

DOI: 10.11779/CJGE201511008

# 考虑波流联合作用的大直径钢管桩自由站立稳定性分析

周 龙<sup>1</sup>, 刘 润<sup>1,2</sup>, 张金凤<sup>1</sup>, 郭绍曾<sup>1</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222)

**摘 要:** 随着海洋工程建设水深的不断增加, 导管架平台的钢管桩基础呈现出大直径、深贯入的特点。桩基承载力的提高导致了打桩施工难度的增长, 不仅要求具有更大锤击能量的打桩设备, 而且对打桩全过程的安全控制提出了更高的要求。桩的自由站立稳定性是打桩分析的第一个重要环节。针对置锤荷载的瞬态性特征, 以钢管桩自由站立稳定性的静力分析方法为基础, 提出了采用动力算法考虑作用于钢管桩上的波浪力和海流力, 建立了钢管桩自由站立稳定性分析的动力模拟方法。研究表明, 由于 API 规范法考虑的是荷载长期作用效果, 与钢管桩置锤瞬间的瞬态过程不符, 用该方法验算桩的自由站立稳定性偏于保守; 动力法分析与 API 规范的计算结果对比表明, 规范中的强度折减系数用于验算桩基自由站立稳定性时可以放大 1.5 倍。

**关键词:** 大直径钢管桩; 自由站立; 波流联合作用; 稳定性; 强度折减系数

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)11-1992-08

**作者简介:** 周 龙(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: zhoulonglmn@126.com。

## Stick-up stability of large-diameter steel pipe pile considering combined wave-current loads

ZHOU Long<sup>1</sup>, LIU Run<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-feng<sup>1</sup>, GUO Shao-zeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** With the increase of water depth in marine construction projects, characteristics of large diameter and deep penetration appear in the steel pipe piles used for jacket platform. Because the bearing capacity of piles is improved, constructions of piles become more difficult. It results in the need of hammers with larger blow energy and higher demand for safety in pile driving. The stick-up stability of piles is the first important part in the analysis of pile driving. Considering the transient characteristics of hammer load, a dynamic method is adopted to calculate the wave and current loads, and a dynamic simulation method is proposed to analyze the stick-up stability of pipe piles. The results show that the calculation of stick-up using the API code, which is different from the transient process and considers the long-term effect of load, is conservative. The API code can be used to check the stick-up stability of piles, and the strength reduction factor can be magnified 1.5 times.

**Key words:** large-diameter steel pipe pile; stick-up; combined wave-current load; stability; strength reduction factor

## 0 引 言

桩基导管架平台是海洋油气资源开发的重要基础设施。近年来, 随着海洋石油、天然气资源的开发向深海发展, 大直径钢管桩在海洋采油平台中得到了广泛应用。动力打桩是钢管桩沉桩的主要施工方法, 由于钢管桩桩径增大, 打桩过程中使用的打桩锤锤击能量增大, 其自重也随之增大。因此, 在打桩过程中将桩锤置于桩顶的瞬间, 桩的自由站立稳定性校核非常重要。桩的自由站立是指桩的底端已经贯入土体一定深度, 桩身大部分处于没有支持的悬臂状态, 此时桩

相当于一端固定一端悬臂的压杆。将打桩锤置于桩顶是打桩施工的第一步, 置锤荷载将引起桩身发生类似于压杆的失稳, 验算置锤瞬间桩是否屈曲失稳称为桩的自由站立稳定性分析。

早在 1957 年, Brandtzaeg 等<sup>[1]</sup>基于试验验证了在竖向荷载作用下, 伸出地面的长桩在桩身应力未达到材料的屈服强度时, 会发生屈曲失稳。目前工程技术

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51279127); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51322904)

**收稿日期:** 2014-09-08

人员普遍采用 API 规范<sup>[2]</sup>中的方法对桩的自由站立稳定性进行分析。陈波等<sup>[3]</sup>基于 API 规范法对某海洋石油平台桩基屈曲失稳的事故进行了分析, 提出了相应的工程措施。API 规范在分析桩的自由站立稳定性时, 所用的强度折减系数为长期稳定性安全系数, 校核的是长期应力状态, 而对于自由站立稳定性分析这一暂时过程来说, 规范是偏于保守的。为了考虑置锤瞬间桩身的自由站立稳定性, 可采用数值模拟方法进行分析。刘润等<sup>[4-5]</sup>、高喜峰等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法对桩身的自由站立稳定性进行了分析, 研究了桩身屈曲模态及影响桩自由站立稳定性的因素。但采用数值模拟方法分析桩的自由站立稳定性时, 均将作用于桩身的荷载简化为等效静荷载, 未考虑海洋环境荷载——波流荷载的动力效应影响。

本文基于钢管桩自由站立稳定性的静力分析方法, 提出了采用动力算法考虑作用于钢管桩上的波浪力和海流力, 建立了大直径钢管桩自由站立稳定性的动力分析方法, 并结合实际工程将动力与静力方法进行了对比分析, 提出了对静力算法中强度折减系数的取值参考。

## 1 自由站立静力分析方法

### 1.1 波流力的计算

通常静力分析中将作用于建筑物上的动荷载等效为静荷载进行计算。海洋工程中的桩基为孤立式结构物, 其结构直径与波长之比小于 0.2。对于桩体直径与波长之比小于 0.2 的小尺度桩, 作用于整个桩体高度上的最大总波浪力  $P_{\max}$  和最大总波浪力矩  $M_{\max}$  可按下述方法计算<sup>[7]</sup>。

当  $P_{D\max} \leq 0.5P_{I\max}$  时,  $P_{\max}$  和  $M_{\max}$  分别按下式计算:

$$P_{\max} = P_{I\max} \quad (1)$$

$$M_{\max} = M_{I\max} \quad (2)$$

当  $P_{D\max} > 0.5P_{I\max}$  时,  $P_{\max}$  和  $M_{\max}$  分别按下式确定:

$$P_{\max} = P_{D\max} \left( 1 + 0.25 \frac{P_{I\max}^2}{P_{D\max}^2} \right) \quad (3)$$

$$M_{\max} = M_{D\max} \left( 1 + 0.25 \frac{M_{I\max}^2}{M_{D\max}^2} \right) \quad (4)$$

式中  $P_{D\max}$  为作用于整个柱体高度上的最大速度力 (kN);  $P_{I\max}$  为作用于整个柱体高度上的最大惯性力 (kN);  $M_{D\max}$  为作用于整个柱体高度上的最大速度力矩 (kN·m);  $M_{I\max}$  为作用于整个柱体高度上的最大惯性力矩 (kN·m);  $P_{D\max}$ ,  $P_{I\max}$ ,  $M_{D\max}$  和  $M_{I\max}$  分别按下式确定:

$$P_{D\max} = C_D \frac{\gamma D H^2}{2} K_1 \quad (5)$$

$$P_{I\max} = C_M \frac{\gamma A H}{2} K_2 \quad (6)$$

$$M_{D\max} = C_D \frac{\gamma D H^2 L}{2\pi} K_3 \quad (7)$$

$$M_{I\max} = C_M \frac{\gamma A H L}{4\pi} K_4 \quad (8)$$

式中  $C_D$  为速度力系数, 对圆形断面取 1.2;  $\gamma$  为水的重度 (kN/m<sup>3</sup>);  $D$  为桩体直径 (m);  $H$  为建筑物所在处进行波波高 (m);  $C_M$  惯性力系数, 对圆形断面取 2.0;  $A$  为柱体的断面积 (m<sup>2</sup>);  $L$  为波长 (m);  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  和  $K_4$  为相应系数, 具体计算方法见海港水文规范<sup>[7]</sup>。

在桩的自由站立分析中, 根据以上方法计算的最大总波浪力  $P_{\max}$  和波浪力矩  $M_{\max}$  均作用于海底泥面处。

与波浪荷载相比, 海流对孤立桩柱的作用中水质点的运动速度及周期随时间变化缓慢得多, 在计算海流对结构物作用力时, 可把海流看成稳定运动。作用于建筑物各构件上的水流力标准值按下式确定<sup>[8]</sup>:

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A \quad (9)$$

式中  $\rho$  为海水密度, 一般取 1025 kg/m<sup>3</sup>;  $C_w$  为水流阻力系数, 圆柱取 0.73;  $A$  为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积 (m<sup>2</sup>);  $V$  为海流流速 (m/s)。

当桩顶被水面淹没时, 流荷载的作用点取顶面以下 1/3 高度处; 当桩顶位于水面以上时, 流荷载的作用点取在水面以下 1/3 水深处。

### 1.2 API 规范中的分析方法

桩的自由站立稳定性分析可类比于压杆稳定问题。桩基接桩完毕后, 在置锤的瞬间, 由于锤重和自重的作用, 桩体会下沉到泥面以下几米到几十米范围的土层中, 直到桩体受到的土阻力与锤重和自重达到平衡。在进行自由站立稳定性分析时, 一般将伸出的接桩段作为底端固定的自由站立桩来分析, 如图 1 所示。

API 规范中规定了置锤期间自由站立稳定性的校核按照压、弯联合作用的圆柱形构件考虑, 在其全长的各点上, 应满足式

$$U_{C1} = \frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_e}\right) F_b} \leq 1.0 \quad (10)$$

$$U_{C2} = \frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (11)$$

式中  $f_a$  为轴向压应力 (MPa);  $F_a$  为轴向允许压应力

(MPa);  $C_m$  为降低系数, 将桩的悬臂部分作为一端自由的立柱考虑时取 1.0;  $f_{bx}$ ,  $f_{by}$  分别为  $X$ ,  $Y$  向的弯曲应力 (MPa);  $F_b$  为允许弯曲应力 (MPa);  $F_y$  为材料屈服强度 (MPa);  $F'_c$  为除以某一安全系数后的欧拉应力 (MPa),  $F'_c = 12\pi^2 E / 23(Kl/r)^2$ , 其中,  $E$  为材料弹性模量 (MPa),  $K$  为有效长度系数, 取 2.1;  $l$  为无支撑长度 (m);  $r$  为惯性半径 (m)。

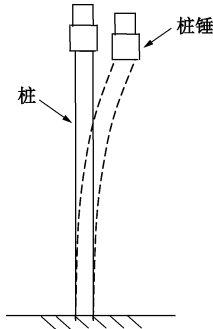


图 1 桩在置锤期间的示意图

Fig. 1 Sketch of stick-up of a pile

在式(10)中轴向允许压应力  $F_a$  按以下方法计算:

$$\text{当 } \frac{Kl}{r} < \left( \frac{2\pi^2 E}{F_y} \right)^{1/2} \text{ 时,}$$

$$F_a = \frac{1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}}{5/3 + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} F_y ; \quad (12)$$

$$\text{当 } \frac{Kl}{r} \geq \left( \frac{2\pi^2 E}{F_y} \right)^{1/2} \text{ 时,}$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} . \quad (13)$$

式(10)和式(11)中允许弯曲应力  $F_b$  按以下方法计算: 当  $\frac{D}{t} \leq \frac{10340}{F_y}$  时,

$$F_b = 0.75F_y ; \quad (14)$$

$$\text{当 } \frac{10340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20680}{F_y} \text{ 时,}$$

$$F_b = \left( 0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right) F_y ; \quad (15)$$

$$\text{当 } \frac{20680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 \text{ 时,}$$

$$F_b = \left( 0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right) F_y ; \quad (16)$$

式中,  $D$  为钢管桩桩径 (m),  $t$  为壁厚 (m)。

式(10)与式(11)中的  $U_{c1}$  与  $U_{c2}$  均等于 1 时, 可以分别计算出桩在自由站立时的临界屈曲荷载  $P_{cr1}$  与  $P_{cr2}$ , 取两者中的较小值即为临界屈曲荷载  $P_{cr}$ 。

### 1.3 静力数值分析法 (SFEA)

数值分析法可用于研究桩的自由站立稳定性问题。本文采用了有限元软件 ABAQUS 进行三维数值模拟。分析中地基土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 为了便于划分单元, 模型的计算区域设置为圆柱形, 底部边界处施加固定约束, 侧面边界施加侧向约束。为了确保数值分析模型不受边界效应的影响, 计算模型的半径超过 12 倍桩径, 模型底部至桩底的距离超过 3 倍桩径<sup>[9]</sup>。钢管桩采用弹塑性本构模型。泥面以下的桩体与土体之间的接触通过设置接触对来实现, 在接触对的设置中, 选取刚度较大的钢管桩表面为主动面, 土体表面为被动面。有限元模型网格的划分基于主次原则, 桩土接触界面网格适当密集, 远离接触部位网格适当稀疏, 桩、土皆采用 C3D8R 单元。分析中, 将波浪荷载与海流荷载简化为等效静力荷载, 根据式(1)~(4)计算作用于钢管桩桩身的最大波浪力及波浪力矩, 作用点位于海底泥面处; 根据式(9)计算作用于桩身的流荷载, 由于桩顶位于水面以下, 故作用点位于桩顶以下 1/3 桩长处。为了加载方便, 将波浪荷载均等效至桩顶。采用 Riks 法分析桩身的自由站立稳定性, 当桩顶处的水平位移发散时, 表明桩已发生屈曲失稳, 此时对应的桩顶竖向荷载即为临界屈曲荷载。

## 2 自由站立动力分析方法

### 2.1 考虑波流联合作用时荷载计算

在动力分析法中, 波流的动力联合作用不容忽视。当波流共存时, 作用在孤立桩柱上波浪与海流荷载将发生显著变化。对于桩体直径与波长之比小于 0.2 的桩体, 可以用 Morison 方程计算波流合力<sup>[10-11]</sup>。某时刻  $t$  作用于水底面以上高度  $z$  处桩断面上的正向波流合力按下式计算:

$$f(z, t) = \frac{\gamma}{2g} DC_D (|u+v|)(u+v) + \frac{\pi\gamma}{4g} D^2 C_M \frac{\partial u}{\partial t} . \quad (17)$$

式中  $\gamma$  为水的重度 ( $\text{kN/m}^3$ );  $C_D$  速度力系数, 对圆形断面取 1.2;  $C_M$  惯性力系数, 对圆形断面取 2;  $u$ ,  $\partial u / \partial t$  分别为水质点运动的水平速度 (m/s) 和水平加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $v$  为海流流速 (m/s)。

目前应用较多的波浪理论有微幅波理论、有限振幅波理论及随机波浪理论等。微幅波理论计算方法简便同时可满足工程设计的要求。根据该理论, 波动水体任意空间点上的水质点运动水平速度可按式计算<sup>[7]</sup>:

$$u = \frac{\pi H \operatorname{ch} kz}{T \operatorname{sh} kd} \cos \omega t , \quad (18)$$

式中,  $H$  为建筑物所在处进行波波高 (m);  $d$  为建筑物前水深 (m);  $T$  为波浪周期 (s);  $\omega$  为波浪运动的

圆频率 ( $s^{-1}$ ),  $\omega = 2\pi/T$ 。

将式 (18) 代入式 (17) 并积分, 可得整个桩体上的总波流荷载  $F$  及总水平波流力矩  $M$ (对海底取矩) 为

$$F = \int_0^\eta f(z,t)dz \quad (19)$$

$$M = \int_0^\eta f(z,t)zdz \quad (20)$$

式中,  $\eta$  为波表面相对于静水面的高度 (m)。

在自由站立分析中, 根据式 (19)、(20) 计算得到波流力和波流力矩对时间的函数, 作用点位于海底泥面处。

### 2.2 考虑波流联合作用的动力数值分析法 (DFEA)

当考虑波流联合作用采用动力分析法研究钢管桩的自由站立稳定性时, 其建模过程与静力法相同, 但加载方式不同, 作用于桩身的波流荷载为随周期变化的动荷载, 如图 2 所示。为了便于荷载的施加, 将由式 (19)、(20) 计算的波流荷载等效至钢管桩桩顶, 采用 Riks 法分析桩身的自由站立稳定性, 当桩顶处的水平位移发散时, 桩顶竖向荷载为临界屈曲荷载。

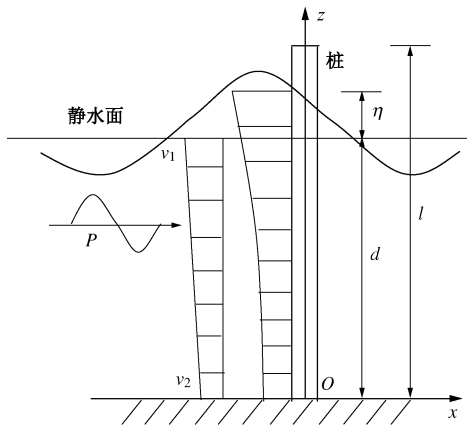


图 2 动力分析方法示意图

Fig. 2 Sketch of dynamic analysis method

## 3 工程算例

### 3.1 工程概况

某海洋采油平台桩基础采用直径为 2.8 m 的大直径钢管桩, 具体参数见表 1。

表 1 钢管桩的几何与力学参数

Table 1 Parameters of steel pipe pile

桩长 /m	桩径 /m	壁厚 /mm	密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )	弹性模量 /GPa	泊松比
71.9	2.8	70	7850	210	0.26

打桩现场平均海水深度为 70 m, 本工程为水下打桩作业。最大波高 2.78 m, 周期为 7.0 s, 海流顶层流速为 0.65 m/s, 底层流速为 0.3 m/s。拟采用 MHU1200 型锤进行水下打桩作业, 锤的基本参数如表 2 所示。

表 2 MHU1200 型锤的基本参数

Table 2 Parameters of MHU1200 hammer

额定锤击能 /kJ	额定效率 /%	锤心质量 /t	最大冲程 /m	锤的水下总质量 /t
1199	85	64.94	1.85	165.91

各土层的基本参数见表 3, 根据土层的基本参数, 可估算在 MHU1200 型锤和桩的自重作用下, 桩可瞬时贯入土体的深度为 11.8 m, 因此可知桩的自由站立长度为 60.1 m。

### 3.2 数值分析模型

为模拟本工程中钢管桩的自由站立特性, 建立直径为 2.8m 的钢管桩模型, 壁厚 70 mm, 桩长 71.9 m, 入土段长度为 11.8 m, 自由站立长度为 60.1 m, 具体参数见表 1。土体模型尺寸采用高度为 60 m, 直径为 80 m 圆柱形, 土层参数见表 3, 有限元模型如图 3 所示。

### 3.3 静力分析结果

采用 API 规范法分析桩的自由站立稳定性时, 根据式 (10)、(11) 计算临界屈曲荷载为 17.4 MN, 具体计算结果如表 4 所示。

表 3 土层基本参数

Table 3 Soil properties

土层编号	土层名称	层底深度 /m	浮重度 $\gamma'$ /( $kN \cdot m^{-3}$ )	不排水剪切强度 $c_u$ /kPa	外摩擦角 $\delta$ /( $^\circ$ )	单位侧阻力 $f$ /kPa	单位端阻力 $q$ /MPa
1	黏性土	1.07	7.5	2.39 <sup>①</sup> ~5.74 <sup>②</sup>	—	0~3.4	0.021~0.051
2	黏性土	1.98	8.9	38.24	—	12.9~15.4	0.344~0.344
3	黏性土	9.46	9.3	71.7~133.8	—	24.7~59.9	0.645~1.204
4	粉土	11.13	9.4	—	15	11.5~13.4	0.685~0.811
5	黏性土	16.47	9.4	71.7~114.7	—	42.6~66.0	0.645~1.032
6	砂土	20.59	9.4	—	20	27.3~34.4	1.822~2.286
7	黏性土	30.96	8.6	133.8~138.6	—	79.8~98.5	1.204~1.247
8	黏性土	43.01	9.4	138.6~143.4	—	98.5~118.7	1.247~1.29
9	粉土	46.06	9.4	—	15	47.8~47.8	1.9~1.9
10	黏性土	54.90	9.4	133.8~239.0	—	118.5~130.0	1.205~2.151

注: 上标①, ②表示每层土的层顶和层底。

表 4 API 规范法计算结果

Table 4 Calculation result of API code

$f_a$ /MPa	$f_{bx}$ /MPa	$f_{by}$ /MPa	$F'_e$ /MPa	$F_y$ /MPa	$F_a$ /MPa	$F_b$ /MPa	$P_{cr}$ /MN	$U_{C1}$	$U_{C2}$
33.9	55.3	0	63.3	360	63.3	259.4	17.4	1.0	0.37

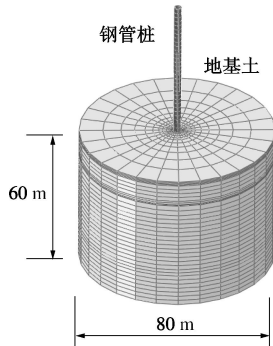


图 3 数值分析模型

Fig. 3 Numerical analysis model

采用数值分析静力法时，根据式 (1) ~ (4) 计算作用于桩顶的波浪荷载；根据式 (9) 计算作用于桩顶的海流荷载，计算结果如表 5 所示。

表 5 波浪与海流荷载

Table 5 Wave and current loads

波浪荷载		海流荷载		总波浪荷载	
水平力 /kN	弯矩 /(kN·m)	水平力 /kN	弯矩 /(kN·m)	水平力 /kN	弯矩 /(kN·m)
76.2	-913.5	12.8	-255.4	89.0	-1168.9

将表 5 中的波流荷载施加于桩顶位置处，得到桩身位移云图如图 4 所示。

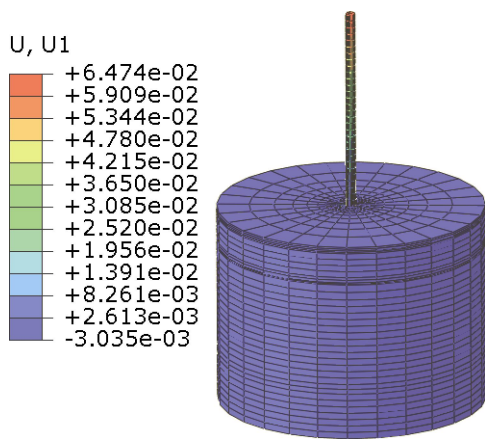


图 4 桩身位移云图

Fig. 4 Distribution of pile displacement

由图 4 可知，在波流荷载作用下桩身会发生水平位移，最大水平位移位于桩顶，约为 6.5 cm。

将桩顶最大水平位移与波、流荷载引入 Riks 分析步，获得桩顶竖向荷载随桩顶水平位移的变化曲线如图 5 所示。

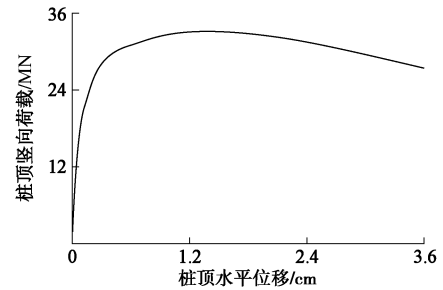


图 5 桩顶水平向位移随竖向荷载的变化曲线

Fig. 5 Relation curve between lateral displacement and vertical load at pile top

由图 5 可知，当竖向荷载为 32.9 MN 时，桩顶处水平位移发散，表明此时桩已发生屈曲失稳，即临界屈曲荷载为 32.9 MN。

以上静力分析结果表明，根据 API 规范计算的临界屈曲荷载为 17.4 MN，约为静力数值分析法计算值的 1/2。分析差距产生的原因在于，API 规范法采用了计算压、弯联合作用构件的长期稳定性分析公式来验算桩的自由站立稳定性，这与置锤荷载作用的瞬时性有较大差别，而静力数值分析法模拟了桩的实时稳定性，没有考虑强度储备等因素，因此得到的临界屈曲值明显高出规范计算值。由此可见，对于置锤的瞬态过程，采用 API 规范法验算偏于保守。

### 3.4 动力分析结果

采用动力法分析桩的自由站立稳定性，根据式 (19)、(20) 对本工程的波流合力进行计算。波流同向时，桩顶水平荷载和弯矩荷载分别如图 6、7 所示；波流反向时，桩顶水平荷载和弯矩荷载分别如图 8、9 所示。

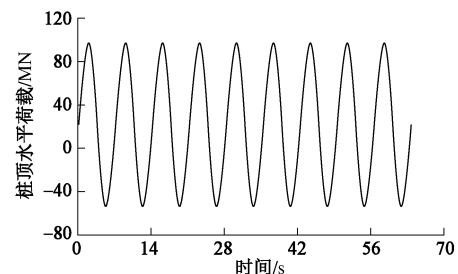


图 6 波流同向时桩顶水平力

Fig. 6 Lateral force at pile top under same direction of wave and current

在桩顶施加波流荷载，波流同向时，波流荷载如图 6、7 所示；波流反向时，波流荷载如图 8、9 所示。

两种工况下计算得到的桩顶水平位移时程曲线分别如图 10, 11 所示。

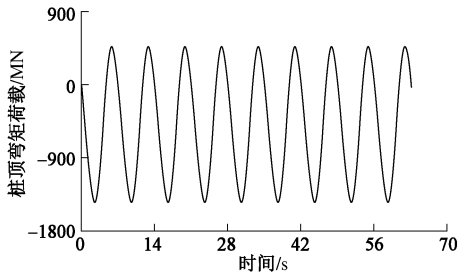


图 7 波流同向时桩顶弯矩荷载

Fig. 7 Bending moment at pile top under same direction of wave and current

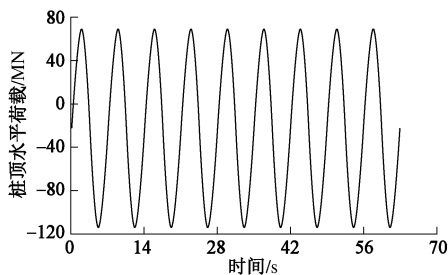


图 8 波流反向时桩顶水平力

Fig. 8 Lateral force at pile top under opposite direction of wave and current

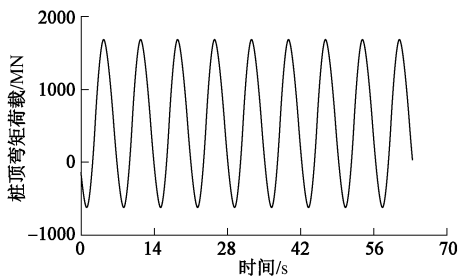


图 9 波流反向时桩顶弯矩荷载

Fig. 9 Bending moment at pile top under opposite direction of wave and current

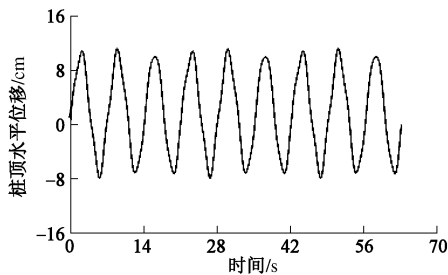


图 10 波流同向时桩顶位移变化曲线

Fig. 10 Change of lateral displacement at pile top under same direction of wave and current

由图 10, 11 可知, 采用动力数值分析法考虑波流

联合作用时, 波流同向和波流反向两种工况计算得到的桩顶最大水平位移分别为 11.2, -13.5 cm。由于考虑了波浪与海流荷载的动力联合作用, 计算的波流合力大于静力数值分析法的结果, 因此在置锤期间动力分析得到的桩顶水平位移大于静力分析时的 6.5 cm。

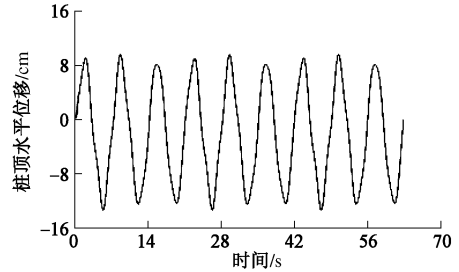


图 11 波流反向时桩顶位移变化曲线

Fig. 11 Change of lateral displacement at pile top under opposite direction of wave and current

将桩顶水平位移与波、流荷载引入 Riks 分析步, 在桩顶施加竖向荷载, 得到不同工况时桩顶的临界屈曲荷载随时间变化的曲线分别如图 12, 13 所示。

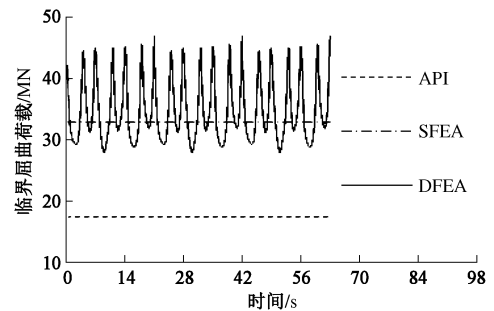


图 12 波流同向时屈曲荷载变化曲线

Fig. 12 Change of buckling load under same direction of wave and current

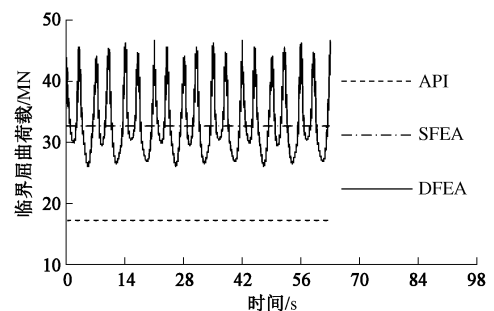


图 13 波流反向时屈曲荷载变化曲线

Fig. 13 Change of buckling load under opposite direction of wave and current

由图 12, 13 可知, 考虑浪流荷载的动力作用时, 由于在置锤期间桩顶位移及作用于桩身的波流荷载随时间呈周期性变化, 因此桩身临界屈曲荷载也随时间而变化。波流同向时, 临界屈曲荷载在 28.0~46.0 MN

之间变化；波流反向时，临界屈曲荷载在 26.8~46.0 MN 之间变化。3 种分析方法的结果对比可知，由于 API 规范法考虑了荷载的长期效应，所用的强度折减系数为长期稳定性安全系数，取值较小，因此计算的临界屈曲荷载偏小。而数值静力分析法中未考虑强度储备等因素，且桩端约束条件与 API 规范中的固定端约束不同，因此计算的屈曲荷载与 API 规范有较大差异，为其 2 倍。动力数值分析法在静力数值分析法的基础上，又考虑了波流荷载的动力联合作用，因此计算的最小临界屈曲荷载是静力数值分析法所得结果的 0.8 倍。

### 3.5 确定强度折减系数

数值分析方法的桩端约束条件和加载方式较为符合置锤期间的实际工况，考虑了桩体入土段的桩土相互作用及置锤荷载的瞬态性特性，因此在桩的自由站立分析中，可对式 (10)、(11) 中的强度折减系数进行适当放大，得到与数值模拟结果相符的屈曲荷载。将式 (10)、(11) 写成如下形式：

$$U_c = \frac{f_a}{\alpha F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{\beta F_y} \leq 1.0 \quad (21)$$

式中， $\alpha$ ， $\beta$  为强度折减系数。

对比式 (10)、(11)、(21) 可知，采用 API 规范法计算桩的临界屈曲荷载时，相应的强度折减系数  $\alpha$ ， $\beta$  分别为 0.18 和 0.34。

本文采用试算法改变式 (21) 中的强度折减系数，直至得到的屈曲荷载与数值模拟结果相当，具体计算结果如表 6 所示。

表 6 强度折减系数试算

Table 6 Calculation of strength reduction factor

试算步	$\alpha$	$\beta$	$P_{cr}/\text{MN}$	$U_c$	备注
1	0.23	0.44	32.9	1.37	
2	0.28	0.54	32.9	1.12	
3	0.32	0.60	32.9	1.00	$P_{cr} = P_{cr}^{\text{SFEA}}$
4	0.21	0.40	26.8	1.23	
5	0.25	0.47	26.8	1.05	
6	0.26	0.50	26.8	1.00	$P_{cr} = P_{cr}^{\text{DFEA}}$

由表 6 可知，当  $\alpha$ ， $\beta$  分别为 0.32 和 0.60 时，采用式 (21) 计算的临界屈曲荷载与静力数值分析法相同，此时的  $\alpha$ ， $\beta$  与 API 规范法中的 0.18，0.34 相比均放大了约 1.8 倍；当  $\alpha$ ， $\beta$  分别为 0.26 和 0.50 时，采用式 (21) 计算的临界屈曲荷载与动力数值分析法相同，此时的  $\alpha$ ， $\beta$  与规范相比均放大了约 1.5 倍。由于动力数值分析法考虑了波流荷载的动力效应，更加符合工程实际，因此采用 API 规范法计算屈曲荷载时，可将强度折减系数放大 1.5 倍，此时的计算值较

为接近置锤期间屈曲荷载的真实值。

## 4 结 论

本文以钢管桩自由站立稳定性的静力分析方法为基础，提出了考虑波流联合作用的自由站立动力分析方法，并通过某实际工程与静力分析方法进行了对比，得出以下结论。

(1) 分析桩的自由站立稳定性时，在波、流荷载作用下桩顶会发生水平位移。当考虑波流的动力联合作用时，桩顶的水平位移随时间不断变化，且最大水平位移大于静力分析时的结果。

(2) API 规范采用了长期稳定性分析方法验算桩的自由站立问题，与打住置锤的瞬态工况存在差异；而数值分析法模拟了桩的实时稳定性，因此计算的临界屈曲荷载明显高于规范值，静力与动力数值分析的结果分别为 API 规范法的 2 倍和 1.5 倍。

(3) 鉴于数值分析法模拟了入土段的桩土相互作用且考虑了波流荷载的动力效应，更加符合工程实际，故以动力分析结果为依据，通过试算法修正了 API 规范屈曲稳定性验算公式中的强度折减系数，即可将原有的强度折减系数放大 1.5 倍验算桩在置锤瞬间的自由站立稳定性。

### 参考文献：

- [1] BRANDTZAEG A, HARBOE E. Buckling tests of slender steel piles in soft, quick clay[C]// Proc of the 4th Intern Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London, 1957: 19 - 23.
- [2] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms[M]. Washington D C: API Recommended Practice 2A-WSD (RP2A-WSD), 2000.
- [3] 陈 波, 闫澍旺, 樊之夏. 桩基平台桩的可打入性和自由站立强度分析[J]. 中国海上油气(工程), 2001, 13(6): 1 - 5. (CHEN Bo, YAN Shu-wang, FAN Zhi-xia. Driveability and freestanding analysis of steel pile of offshore platform[J]. China Offshore Oil and Gas(Engineering), 2001, 13(6): 1 - 5. (in Chinese))
- [4] 刘 润, 褚瑞花, 闫澍旺, 等. 超长桩施工中桩身稳定性的三维非线性有限元分析[J]. 天津大学学报, 2006, 39(3): 257 - 263. (LIU Run, ZHUO Rui-hua, YAN Shu-wang, et al. Nonlinear 3D finite element method analysis for stability of pile stick-up during driving[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(3): 257 - 263. (in Chinese))
- [5] 刘 润, 闫澍旺, 毛永华, 等. 海洋工程中桩身自由站立稳

- 定性影响因素分析[J]. 海洋工程, 2006, 24(3): 6 - 13. (LIU Run, YAN Shu-wang, MAO Yong-hua, et al. Study on influence factors for pile stick-up stability in ocean engineering[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(3): 6 - 13. (in Chinese))
- [6] 高喜峰, 刘 润, 谭振东, 等. 基于桩土相互作用的桩体自沉及屈曲稳定性研究[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 113 - 121. (GAO Xi-feng, LIU Run, TAN Zhen-dong, et al. Study on pile self-penetration and buckling stability considering interaction between pile and subsoil[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 113 - 121. (in Chinese))
- [7] JTS 145—2—2013 海港水文规范[S]. 2013. (JTS 145—2—2013 Code of hydrology for sea harbour[S]. 2013. (in Chinese))
- [8] JTS 144—1—2010 港口工程荷载规范[S]. 2010. (JTS 144—1—2010 Load code for harbour engineering[S]. 2013. (in Chinese))
- [9] 郭玉树, 阿布达, 雷赫曼. 用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1729 - 1734. (GUO Yu-shu, ACHMUS M, ABDEL-RAHMAN K. Estimation of lateral deformation of monopile foundations by use of cyclic triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1729 - 1734. (in Chinese))
- [10] MORISON J R, JOHNSON J W. The forces exerted by surface wave on piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149 - 154.
- [11] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms[M]. API Recommended Practice 2A-LRFD (RP2A-LRFD), 1993.

## 大型专业辞书《水利大辞典》出版发行

一部系统介绍当代水利科学技术的大型专业辞书《水利大辞典》，在纪念水利高等教育百年、河海大学百年校庆的前夕正式发行了。该书是在上海辞书出版社 1994 年出版的《水利词典》基础上，由河海大学组织学校相关学科教师百余人精心编纂修订而成的，由姜弘道教授、唐洪武教授担任执行主编。这是进入 21 世纪以来，我国总结水利科技发展、普及水利科技知识、传承水利科技文化的又一标志性力作。该书特别适合具有中等以上文化程度的水利工作者以及中等以上水利类专业的教师、学生阅读和使用。

新出版的《水利大辞典》内容全面、选词科学、取材精当、格式规范、资料新而丰富。具有如下学科特点和时代特色：

(1) 反映现代水利新发展。在基本保持原《水利词典》框架的基础上，根据水利事业的新发展，由原来的 5 类 23 个分支调整为 8 类 31 个分支。调整后的分支学科包括：水利（综合），水利史；水文学，水资源，地质；工程力学，水力学，河流动力学，土力学，岩石力学，工程结构，水工材料；防洪抗旱，农业水利，城市水利，给水排水工程，水力发电，水电设备，水工建筑物，水利工程施工；海洋水文学与海岸动力学，港口，航道，河口，海岸；环境水利，生态水利；水利经济，水利管理；水利科技，水利信息化，水文化等，很好地体现了现代水利的新发展。

(2) 词目更新与时俱进。在不大量增加《水利词典》词目总量和总字数的基础上，通过删旧增新，重点增加了近 20 年来水利学科与水利事业新领域中的词目，新增词目近三分之

一。

(3) 释文内容修订更新。对 20 年前出版的《水利词典》老词条逐条仔细审视，决定取舍，更新内容，核准数据，反复修改。全书共收编词目 4700 余条，计 142 万字。

(4) 附录资料数据可靠。全书 12 个附录，除保留《中国分区水资源总量估算》外，其余附录均根据最新资料和数据作了大幅度的修订和更新，包括中国水利史略年表、中国总库容 20 亿  $m^3$  以上的水电站大型水库、中国高度 100 m 以上的大坝、中国装机容量 25 万 kW 以上的抽水蓄能电站、中国装机容量 25 万 kW 以上的水电站、国外总库容大于 300 亿  $m^3$  立方米上的大型水库、国外高度 220 m 以上的大坝、国外装机容量 200 万 kW 以上的水电站、国外主要港口、中国主要水利及相关期刊、国外主要水利及相关期刊。此外还附有词目英汉对照索引、词目音序索引。

《水利大辞典》的出版是一项充分体现河海大学专业特色的文化工程，又是一项专业面宽、参编人员多、十分耗时费力的编纂工作。有近 60 位河海大学各学科的学术带头人、学术骨干参加了《水利大辞典》的编撰和修订；有 80 位专家，包括特聘的校外专家，参加了《水利大辞典》的三轮审稿。他们严谨治学、字斟句酌、反复推敲、认真审订，为保证和提升《水利大辞典》的编纂质量发挥了关键性的作用。

《水利大辞典》每册定价 298.00 元。邮购联系：021-62676853 上海辞书出版社邮购部。

（河海大学《水利大辞典》修编办公室 供稿）