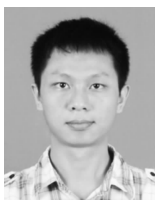


· 地基与基础 ·



## 开口管桩承载力计算方法及桩基模型研究

林岳

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 比较了《港口工程桩基规范》以及 API RP 2A WSD 规范中对于开口管桩单桩承载力两种计算方法各自的优缺点, 利用有限元软件 ANSYS 对目前普遍采用的传统模型和基于荷载传递法的双曲线模型分别建立三维桩基有限元模型进行计算和比较, 分析表明后者更加准确合理、适用性更广泛。

**关键词:** 开口管桩; 桩基; 承载力; 荷载传递法; 双曲线模型; 有限元; ANSYS

中图分类号: U 655.54<sup>+</sup>4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0138-06

### Calculating method for bearing capacity and finite element model of open-ended tubular pile

LIN Yue

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** This article makes a comparative research on the advantage and disadvantage of the calculating method for the bearing capacity of open-ended tubular pile between Code for *Pile Foundation of Harbor Engineering* and *API RP 2A WSD*. Three-dimensional finite element models of pile foundation are built to calculate and compare by finite element software ANSYS according to the traditional method widely adopted now and the hyperbolic model of load transfer method respectively. The result indicates that the latter is more accurate and reasonable, and has a wider range of application.

**Key words:** open-ended tubular pile; pile foundation; bearing capacity; load transfer method; hyperbolic model; finite element; ANSYS

随着经济全球化的不断深入, 国内外沿海港口、海上新能源的开发以及海洋石油工业等的蓬勃发展, 桩基结构在近海、外海工程上的应用越来越多, 其中开口管桩由于其具有良好的贯入能力、抗弯刚度和单桩承载力等优点而广受重视。模拟和计算开口管桩的桩基结构, 具有以下难点: 1) 开口管桩承载力计算中端阻力的土芯闭塞效应和侧阻力的挤土效应机理复杂, 国内外学者对此进行了大量研究<sup>[1-13]</sup>, 但在实际工程设计的计算模型中如何反映开口管桩土芯的作用仍是一个难题; 2) 目前国内水运行业设计在桩基分析模型中普遍采用简化的方法来处理桩身表面与土层间的摩阻力。

### 1 开口管桩承载力计算方法

一般认为, 单桩轴向承载力由桩侧阻力与桩端阻力两部分组成。一般来说, 靠近桩身上部土层的侧阻力先于下部土层发挥, 而侧阻力先于端阻力发挥出来<sup>[14]</sup>。在前期设计阶段缺乏试验资料时, 开口管桩单桩承载力一般由经验参数法来确定, 其承载力的计算方法可分为两大类: 第一类方法是分别计算桩外土体侧阻力和桩端阻力, 在计算桩端阻力时考虑闭塞效应; 第二类方法是分别计算桩内土芯侧阻力、桩身外土体侧阻力和桩端圆环上的阻力。

**1.1** 依据《港口工程桩基规范》计算桩基承载力  
国内水运设计桩基一般采用 JTS 164-4—2012

收稿日期: 2013-12-08

作者简介: 林岳(1986—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事水工结构设计。

《港口工程桩基规范》，其中关于敞口（开口）管桩轴向抗压承载力的经验参数法计算公式如下<sup>[15]</sup>：

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum q_{fi} l_i + \eta q_R A) \quad (1)$$

式中： $Q_d$  为单桩轴向承载力设计值（kN）； $\gamma_R$  为单桩轴向承载力分项系数； $U$  为桩身截面外周长（m）； $q_{fi}$  为单桩第  $i$  层土的极限侧摩阻力标准值（kPa）； $l_i$  为桩身穿过第  $i$  层土的长度（m）； $\eta$  为桩端承载力折减系数； $q_R$  为单桩单位面积极限端阻力标准值（kPa）； $A$  为桩端外围面积（ $m^2$ ）。

对于单桩抗拔承载力，规范考虑了对桩外土体侧阻力的折减以及桩有限重力的贡献，以及对于不同土层桩侧摩阻力的折减；对于水平力作用下桩的计算，规范推荐了  $m$  法、 $NL$  法或  $P-Y$  曲线法，有经验时也可采用假想嵌固点法计算。

### 1.2 依据 API 规范计算桩基承载力

参考在近海工程设计上具有权威性的由 American Petroleum Institute（美国石油协会）出版的标准 API RP 2A WSD，其中关于开口管桩轴向抗压承载力的经验参数法计算公式为<sup>[16]</sup>：

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p \quad (2)$$

式中： $Q_d$  为单桩极限承载力（kN）； $Q_f$  为桩侧摩阻力（kN）； $Q_p$  为桩端总承载力（kN）； $f$  为单桩侧摩阻力（kPa）； $A_s$  为桩侧表面积； $q$  为单位面积桩端承载力（kPa）； $A_p$  为桩端总面积。对于开口管桩，规范中提到桩端总的承载力  $Q_p$  不应超过桩内土芯提供的承载力。对于桩端闭塞的桩，可以认为端部支撑力作用在桩端整个横截面上，此时桩轴向抗压承载力计算方法与端部封闭的桩一样；对于不闭塞的桩，端部支撑力仅仅作用在桩端圆环切面上。桩端是否闭塞可根据静力计算确定，当  $Q > G + F$  ( $F = \sum f_i$ ) 时，可简单理解为假设闭塞时的端部支撑力把桩内土芯往上顶起，实际不能闭塞；反之则闭塞如同封闭桩端，见图 1。由于桩内侧与土的摩擦作用及土颗粒间的粘聚力，所以使土芯向上凸，形成“拱”形。

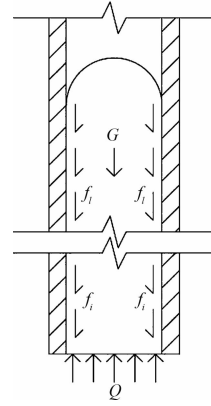


图 1 桩端闭塞判断

对于黏土和砂土，不同土层的桩侧摩阻力及桩端承载力计算公式参见 API 规范，对于不闭塞的开口桩，在砂土中的桩侧摩阻力计算考虑乘以一个 0.8 的折减系数<sup>[16]</sup>。规范规定抗拔力不得大于桩的总侧摩阻力  $Q_f$ ；对于水平力作用下桩的计算，规范推荐  $P-Y$  曲线法。

### 1.3 两种计算方法的比较

1) 《港口工程桩基规范》（简称《桩基》）采用概率极限状态设计法，而 API 规范仍采用容许应力法进行设计，前者更为先进。

2) 对于开口管桩的轴向抗压承载力计算，《桩基》采用桩端承载力折减系数  $\eta$  来综合反映桩外土体侧阻力的挤土效应和桩端的闭塞效应；API 规范则分别考虑桩内土芯侧阻力、桩身外土体侧阻力和桩端圆环上的阻力，并且区分闭塞或不闭塞的情况。在采用 API 规范计算时，规范并没有给出桩内土芯高度的计算方法。

3) 对于轴向抗拔承载力，《桩基》中仅考虑了桩外土体侧阻力而忽略了桩内土芯的贡献，低估了开口管桩的抗拔承载力；而根据 API 规范计算抗拔承载力时应考虑桩外侧阻力，加上桩内土芯的有效重力或桩内土芯摩阻力的较小值。相较而言，后者虽然考虑了桩内土芯的贡献，但未考虑到摩阻力在拔桩工况中应折减<sup>[17]</sup>，高估了开口管桩的抗拔承载力。

4) 对于水平力作用下桩的计算，在使用  $P-Y$  曲线法计算时两者并无差别。

## 2 开口管桩桩基分析模型

### 2.1 传统模型

目前国内水运行业设计普遍采用的传统桩基有限元分析模型中对于约束条件的设置主要包括以下部分：1) 水平力作用下桩土相互作用模拟：采用垂直桩身的弹簧单元模拟，其中弹簧刚度根据 *m* 法、*NL* 法或 *P-Y* 曲线法进行模拟；2) 轴向约束：在桩端设置弹簧单元模拟。桩的轴向刚性系数可按下列公式进行计算<sup>[18]</sup>：

摩擦桩：

$$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{E_p A_p} + \frac{1}{C} \quad (3)$$

$$C = T_c Q_{ud} \quad (4)$$

嵌固桩或支撑在岩基上的桩：

$$\frac{1}{K} = \frac{L}{E_p A_p} \quad (5)$$

式中：*K* 为桩的轴向刚性系数 (kN/m)，即桩顶轴向单位变形所需的轴向力；*L*<sub>0</sub> 为桩在计算泥面以上的长度 (m)；*E*<sub>*p*</sub> 为桩材料的弹性模量 (kPa)；*A*<sub>*p*</sub> 为桩身横截面面积 (m<sup>2</sup>)，开口管桩按环形截面面积计算；*C* 为桩入土部分的单位变形所需的轴向力 (kN/m)；*T*<sub>*c*</sub> 为系数 (m<sup>-1</sup>)，宜取 115 ~ 145 m<sup>-1</sup>，采用钢管桩时宜取小值；*Q*<sub>*ud*</sub> 为单桩垂直极限承载力标准值 (kN)；*L* 为桩身全长 (m)。一般在有限元模型中已经考虑了桩本身的弹性模量，因此对于嵌固桩或支撑在岩基上的桩可直接约束桩端轴向位移，而对于摩擦桩的桩端弹簧单元刚度系数 *K'* 可进一步转化为下式：

$$\frac{1}{K'} = \frac{L_0}{E_p A_p} + \frac{1}{C} - \frac{L}{E_p A_p} \quad (6)$$

当按式(6)计算时，若得出负值则认为桩端弹簧刚度无限大，可取一较大值（如 1 × 10<sup>8</sup> kN/m）或视为桩端嵌固；在计算拔桩工况时则需要另外计算桩端弹簧的刚度。

### 2.2 荷载传递法双曲线模型

荷载传递函数法是由 Seed 和 Reese 于 1957 年首次提出的，随后国内外学者对桩的荷载传递函数进行了大量研究<sup>[19-23]</sup>。这个方法的基本概念是把桩假定为由许多弹性单元体组成，用非线性弹簧来表示桩身侧阻力与桩土间相对位移的关系以

及桩端阻力与桩端沉降的关系。根据国内外大量的试验资料以及在工程中的应用中证明双折线硬化模型和双曲线模型对分析桩的荷载沉降关系具有较好的结果<sup>[22]</sup>。本文基于 API 规范中提出的轴向荷载传递-位移 (*t-z*) 曲线以及桩尖荷载传递-位移 (*Q-z*) 曲线建立弹簧单元来模拟桩基模型轴向向上的约束<sup>[16]</sup>，分别见图 2 和图 3。同时考虑到水平力作用下桩土相互作用，根据 *P-Y* 曲线法建立垂直桩身的弹簧单元。

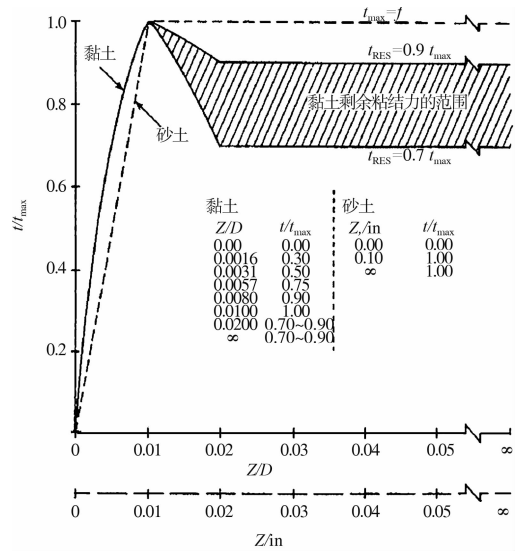


图 2 典型的桩轴向荷载传递-位移 (*t-z*) 曲线

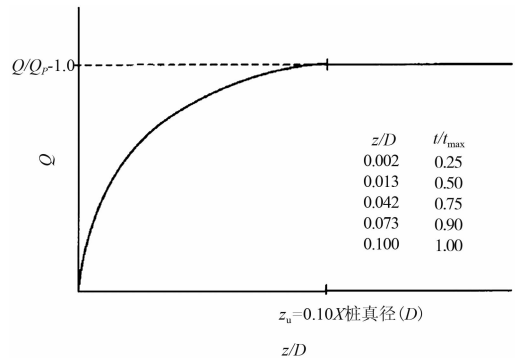


图 3 桩尖荷载传递-位移 (*Q-z*) 曲线

综上所述，国内采用的传统桩基模型与荷载传递法桩基模型见图 4。

对于桩端不闭塞的开口管桩，弹簧单元应分两种情况进行建立：1) 当计算压桩工况时，考虑不同深度处桩身内、外侧摩阻力的总和来建立弹簧；2) 当计算拔桩工况时，笔者建议忽略桩内土芯的有效重力仅考虑桩身外侧摩阻力来建立弹簧。

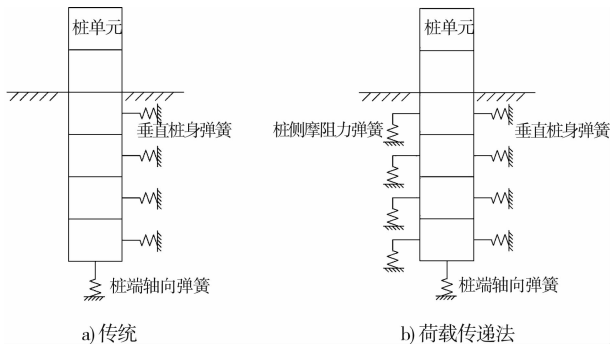


图 4 两种桩基分析模型

### 3 算例分析

本文以某国外近海码头项目中的轨道梁单桩桩基为例，利用有限元软件 ANSYS 进行桩基模型的建立和分析。本算例暂不计算拔桩工况。

该桩基采用桩径 1.0 m，厚度 18 mm 的开口钢管桩，桩顶高程 3.0 m，桩底高程 -36.0 m，计算水位 0.0 m，泥面高程 -3.0 m。土层地质条件见表 1。

根据工程经验，钢管桩内土芯顶高程拟定为 -8.0 m（桩内土芯高程须由现场实测数据进一步确认），桩内土芯暂按与桩外土层相同地质参数进行计算。依据 API 规范计算得出的桩端为不闭塞，桩基抗压承载力为  $Q_1 = Q_{f1} + Q_{p1} = 9\ 308\ \text{kN}$ ；依据《桩基》中的计算方法，查得桩端阻力折减系数  $\eta = 0.5$ ，将桩端视为闭塞计算（参数仍参照 API 规范），可得桩基抗压承载力  $Q_2 = Q_{f2} + Q_{p2} = 8\ 622\ \text{kN}$ ，可见后者计算得出的承载力更为保守。

表 1 土层地质条件

土层	底高程/m	天然密度/ ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	有效密度/ ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	固结不排水		不固结不排水	密实度
				有效粘聚力/kPa	有效内摩擦角/( $^\circ$ )	不排水剪切强度/kPa	
含粉粒细砂	-20.50	1.86	0.86	0	28.0	0	松散
黏土	-22.50	2.00	1.02	30	32.8	145	中等
含粉粒细砂	-27.00	1.95	0.95	0	32.0	0	中等
黏土	-34.00	1.94	9.40	5.4	27.8	122	密实
细砂	-42.00	2.05	1.05	0	42.0	0	密实

#### 3.1 ANSYS 有限元模型的建立

利用有限元软件 ANSYS 对上文提到的两种桩建模方法分别进行三维建模（2.1 节所述桩基模型以下简称模型 A，2.2 节所述桩基模型以下简称模型 B），采用 Beam188 单元模拟钢管桩（区分水位上下的单元密度），Combin39 非线性弹簧单元模拟桩土相互作用。

其中模型 A 与模型 B 均采用  $P$ - $Y$  曲线法计算不同深度处桩侧水平弹簧刚度，模型 B 还须根据  $t$ - $z$  曲线建立不同深度处桩侧摩阻力弹簧，最后两个模型分别根据计算建立桩端弹簧。其中 Combin39 单元可根据不同的荷载-位移曲线计算选取 5~8 个特征点来定义  $F$ - $D$  曲线实常数，结合 ANSYS 的 APDL 功能可批量建立上述弹簧单元，根据算例建立的两个三维桩基有限元模型如图 5 所示。

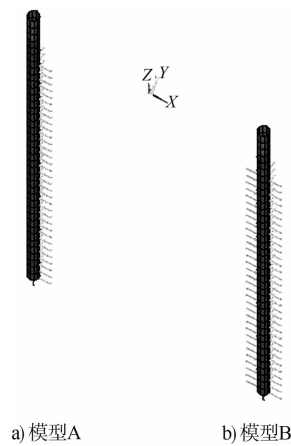


图 5 三维桩基有限元模型

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 计算工况 1

工况 1 计算仅受自重作用  $G = mg$ （重力加速度  $g = 9.81\ \text{m/s}^2$ ）下的桩基，计算得到模型 A 的最大桩轴力为 147 kN，模型 B 的最大桩轴力为 46 kN。

由结果可知（图 6）在自重作用下模型 A 的桩轴力沿深度逐渐增加，结果偏大；模型 B 的桩轴力主要集中在桩入土部分的中上部，桩轴力的分布及大小比模型 A 更为合理。

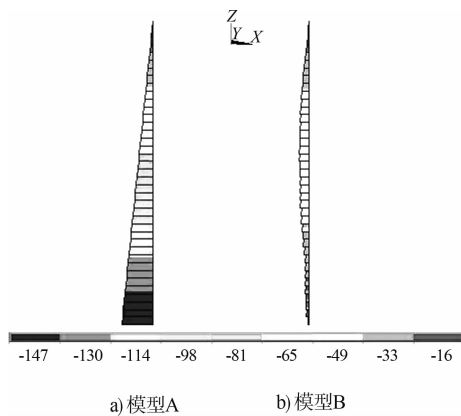


图 6 工况 1 桩轴力分布（单位：kN）

### 3.2.2 计算工况 2

考虑到外部环境及上部结构传递到桩基上的荷载，工况 2 选取简化后的实际工程中使用时期的典型荷载施加于两个桩基模型上进行计算（表 2）。

表 2 工况 2 计算荷载

荷载	作用值	作用位置及方向
自重	$G = mg (g = 9.81 \text{ m/s}^2)$	作用于整个模型
竖向荷载	2 000 kN	作用于桩顶,沿 Z 轴向下
水平荷载	200 kN	作用于桩顶,沿 X 轴正向
弯矩	200 kN·m	作用于桩顶,绕 Y 轴正向

计算工况 2 下两个模型的桩轴力、桩身弯矩如图 7 和 8 所示，各项内力计算结果见表 3。

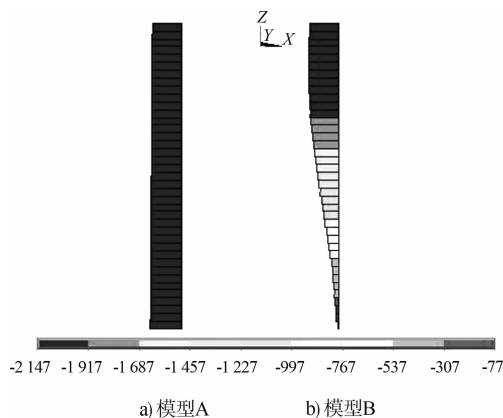


图 7 工况 2 桩轴力分布（单位：kN）

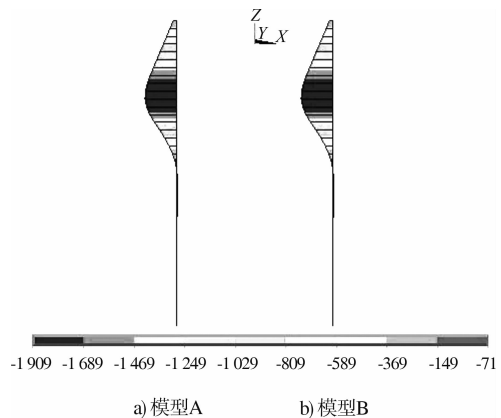


图 8 工况 2 桩身弯矩分布（单位：kN·m）

表 3 工况 2 计算结果

模型	桩顶竖向位移/mm	最大轴力/kN	最大弯矩/(kN·m)	最大扭矩/(kN·m)	最大剪力/kN	最大应力/kPa
模型 A	7.31	2 147	1 909	0	318	176 620
模型 B	4.84	2 028	1 909	0	318	175 807

由工况 2 计算结果可知：1) 模型 A 的桩顶竖向位移较大，接近于模型 B 的 1.5 倍；2) 模型 B 的桩轴力分布集中在桩的上部并且随着入土深度增加逐渐减少，比模型 A 更加符合实际中桩的桩身荷载与桩身压缩变形随深度递减的承载机理；3) 模型 A 与模型 B 计算得出的各项内力最大值非常接近，模型 A 的结果较为保守。

综上，对于一般的端承桩和摩擦端承桩而言，当结构以及荷载条件较为简单时，采用传统建模方法（模型 A）进行桩基内力计算仍是可靠的；当需要分析桩基承载机理以及计算准确的位移，或者模型中包含的上部结构较为复杂时（桩顶变形会间接影响上部结构的内力），推荐采用荷载传递法双曲线模型进行建模。而对于摩擦桩，由于桩基轴向承载力主要是桩身的摩阻力，桩端部分承受的荷载很小，传统的建模方法将不太适用。

## 4 结论

1) 对于开口管桩，《港口工程桩基规范》以及 API 规范中单桩承载力计算的方法两者各有其

优缺点, 在应用时应结合工程实际情况。

2) 目前国内采用的传统建模方法, 与基于荷载传递法双曲线模型建立的桩基模型相比较, 后者能够更为准确地反映桩基承载机理、适用范围较广、结果更可靠。实际上, 当采用桩端承载力折减系数  $\eta$  来反映桩外土体侧阻力的挤土效应和桩端的闭塞效应时, 仍可参考 API 规范中提出的  $t$ - $z$  曲线和  $Q$ - $z$  曲线建立基于荷载传递法双曲线模型的桩基模型。

3) 在海洋环境较为复杂的情况下, 有经验时还可应用 ANSYS 的 PIPE59 单元模拟海洋不规则波浪、海流对桩柱的作用<sup>[24-25]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Kenneth G G, Barry M L. The shaft capacity of pipe piles in sand[J]. *Can Geotech*, 2003, 40: 36-45.
- [2] Paik K H, Salgado R, Lee J H, et al. Behavior of open-and closed-ended piles driven into sands [J]. *Geotech Geoenviron Eng*, 2003, 129(3): 391-403.
- [3] Randolph M F, Leng E C, Houlsby G T. One dimensional analysis of soil plugs in pipe piles[J]. *Geotechnique*, 1991, 41(4): 587-598.
- [4] Lee J H, Salgado R, Paik K H. Estimation of the load capacity of pipe piles in sand based on CPT results[J]. *Geotech Geoenviron Eng*, 2003, 129(5): 391-403.
- [5] Liyanapathirana D S, Deeks A J, Randolph M F. Numerical analysis of soil plug behaviour inside open-ended piles during driving[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1998, 22: 303-322.
- [6] 李乐铭, 尚玉华. 大直径钢管桩垂直承载力的试验研究[G] // 交通部三航局科研所科技成果论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [7] 宰金璋, 朱光裕. 开口钢管桩土塞的机理与性状研究[G] // 桩基技术新进展学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
- [8] 陆昭球, 高倚山, 宋铭栋. 关于开口钢管桩工作性状的几点认识[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(1): 111-114.
- [9] 陈波, 闫澍旺, 李家钢, 等. 动力沉桩中土塞作用数值分析[J]. *天津大学学报*, 2001, 34(5): 636-640.
- [10] 谢永健. 超长 PHC 桩承载性状及土塞效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [11] 杜来斌. PHC 管桩土塞效应浅析[J]. *工业建筑*, 2005, 35(S1): 590-594.
- [12] 李韬, 高大钊. 开口管桩压入法沉桩土塞效应机理分析[J]. *地质与勘探*, 2003, 39(8): 273-275.
- [13] 刘润, 嵇瑞花, 闫澍旺. 大直径钢管桩土塞效应的判断和沉桩过程分析[J]. *海洋工程*, 2005, 23(2): 71-76.
- [14] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [15] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [16] Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. RP 2 A-WSD[S]. Dallas: API, 2000.
- [17] Tomlinson M J, Ceng Fice, Fistruct E. Pile Design and Construction Practice [M]. 5th edition. London: E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2008.
- [18] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [19] 秦波, 殷红艳. 荷载传递函数的选择与应用[J]. *勘察科学技术*, 2001(3): 13-16.
- [20] 肖宏彬. 竖向荷载作用下大直径桩的荷载传递理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [21] 杨桦, 杨敏. 荷载传递法研究单桩荷载-沉降关系发展综述[J]. *地下空间与工程学报*, 2006(1): 155-159, 165.
- [22] Revost J H, Hu Ghes T J R. Finite element solution of elastic-plastic boundary value problems [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1984, 48 (1): 68-76.
- [23] Wei D G, Randolph M F. Rationality of load transfer approach for pile analysis [J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 34(2, 3): 85-112.
- [24] 杨进, 刘书杰, 姜伟, 等. ANSYS 在海洋石油工程中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [25] 张建勇. 浅谈独桩平台有限元分析及合理结构形式研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.

(本文编辑 武亚庆)