

DOI: 10.11779/CJGE2016S2023

基于近海钢管桩现场试验的海洋土参数反演

汪明元¹, 单治钢¹, 饶锡保², 江洎洎², 潘家军², 狄圣杰¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 受海洋环境等方面的影响, 海洋土层参数的确定比较困难, 常需钻探取样试验、原位测试并结合桩基现场静载试验进行综合分析。基于海洋钢管桩现场静载试验, 探讨了海洋土层参数取值对不同受荷情况下钢管桩应力与变形的敏感程度, 并对关键参数开展了一系列数值仿真反分析, 通过与海洋钢管桩在现场水平加载、竖向抗压和竖向抗拔等静载试验下的实测结果进行对比, 综合室内试验和 API 等海洋工程规范的经验取值, 对钢管桩在多种受荷条件下的土层参数取值进行了论证。

关键词: 钢管桩; 海洋土; 现场试桩试验; 参数论证; 数值反演

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0143-06

作者简介: 汪明元(1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事海洋工程地质、海洋深基础以及岩土工程计算方法等方面的研究。E-mail: wmy_90@163.com。

Numerical inversion study on comprehensive capacity of marine steel pipe pile based on field pile loading tests

WANG Ming-yuan¹, SHAN Zhi-gang¹, RAO Xi-bao², JIANG Ji-wei², PAN Jia-jun², DI Sheng-jie¹

(1. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 311122, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: It is difficult to determine the parameters of the marine soil due to the influence of the marine environment. There is often a need to combine drill sampling, in situ tests with field static load tests on the pile foundation for comprehensive analysis. Based on the static load test of marine steel pipe pile, the sensitivity of the parameters of the marine soil to the stress and deformation of the steel pipe pile under different loads was discussed. Moreover, a series of numerical simulations were carried out to analyze the key parameters. By comparing with the static load test results, including the horizontal, vertical compression and vertical uplift tests, the experience of the laboratory test and the marine engineering standards (e.g. API), the parameters of the marine soil layer were demonstrated under the various load conditions of the steel pipe pile.

Key words: steel pipe pile; marine soil; field pile loading test; parameter augmentation; numerical inversion

0 引言

近海岩土工程是近年岩土工程领域研究的热点, 钢管桩是海洋最广泛采用的桩型, 钢管桩-海洋地层相互作用特性以及海洋地层参数取值是广为关注的焦点。

海洋地层原状样采集比较困难, 海洋环境下的回转式钻进取样, 对土芯试样也存在一定扰动。对大量的试样需求, 常采用勘探孔取出的土芯进行二次重塑制样^[1], 而结构性是海洋土的一大特征, 其历史固结状态、胶结状态、微观结构一旦破坏无法修复, 重塑样的物理力学特性往往与原状地层存在较大差异^[2], 室内重塑样试验获得的海洋土参数仅能参考。目前, 国内海洋岩土工程勘测设计规范不够完善, 主要参照

美国石油协会 API RP 2A-WSD 规范^[3]和挪威船级社 DNV-OS-J101^[4]规范, 该类规范的纲领特征明显, 对海洋桩基涉及的岩土工程问题进行了建议、提示和指导, 由于其中试验研究经验的局限性, 诸多学者已对这些规范中的一些内容提出了质疑, 例如大尺寸桩基的适用性^[5]、水平受荷桩 p - y 曲线的适用性^[6]、桩-土摩擦系数经验取值^[7]等等。

本文以实际工程为背景, 在钻孔取样得到的海洋土参数的基础上, 对近海桩基现场静载试验进行了数值仿真反分析, 通过数值模拟试桩试验, 得到了可同时满足钢管桩多种受荷条件的海洋土层参数。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51409011); 中央级科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2014057/YT)

收稿日期: 2016-05-19

表 1 海洋土层参数
Table 1 Parameters of layered marine soils

土层	有效重度 ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比	含水率/%	压缩模量 $E_{s100-200}/\text{MPa}$	抗剪强度 (快剪)		抗剪强度参数 (固结快剪)		密实状态
					c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	
①粉砂	9.6		27.5	5.0			0	25	中密
②-2粉土	9.7		25.8	6.5			0	25	中密
③-夹1淤泥质粉质黏土	9.6	1.204	42.1	3.5	20	3	18.4	13.1	
③-1a粉砂	8.1		25.3	8.0			0	30	中密~密实
④-1粉质黏土	9.9	0.747	26.4	4.5	40	3	3.5	15.5	
⑤粉土夹粉质黏土	9.6	0.897	32.1	5.1	17	3	17.1	24.7	
⑥-1粉砂	9.6		24.3	8.0			0	33	密实
⑥-3粉砂	9.7		23.6	13.0			0	35	密实

1 桩基现场静载试验

试桩场地位于中国近海，海洋地层结构见图 1。可见场区地层近似水平层状，地层结构复杂，黏性土与非黏性土交替出现。取样试验的地层参数见表 1，因取样扰动，无黏性土的密实状态根据静力触探测试评价。

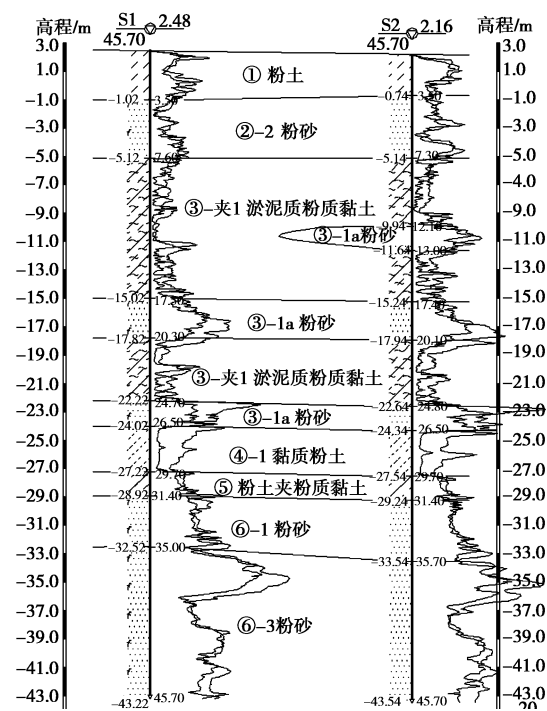


图 1 近海试桩的地层结构

Fig. 1 Typical geological profile of field pile test area

现场试桩长为 36.8 m，入土深度为 35.15 m，桩身壁厚为 2.2 cm，钢管桩外径为 1.4 m。

试桩试验包括 3 种加载方式：

(1) 水平静载试验：加载点位于桩顶下 1.3 m 处，第一级荷载取为 120 kN，并以 120 kN 作为加载增量，

逐级加载至 1680 kN，稳定后，以 240 kN 作为卸载增量，卸载至 0 kN，试验结束。

(2) 竖向抗压静载试验：第一级荷载为 2400 kN，以 1200 kN 作为增量步直至桩体出现加速沉降。

(3) 竖向抗拔静载试验：第一级上拔荷载为 1600 kN，以 800 kN 作为增量步直至桩体出现加速拔出。

图 2 所示为水平静载试验中，泥面以下 5 个不同深度断面处桩身水平变形—荷载关系曲线，可见：

荷载达到 1440 kN 之后，水平变形有一个加速增长趋势；卸载并稳定后，桩身残余变形量较大，与峰值水平变形相比，且距离地表越深，残余变形量比例越高，1 m 深处残余变形仅为峰值变形的 35.6%，而在 9 m 深处则达到 57.2%。

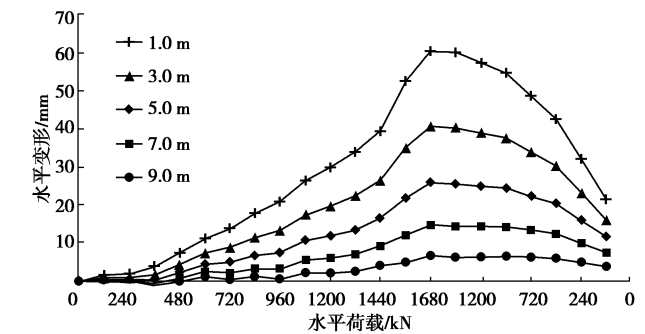


图 2 不同埋深钢管桩水平静载试验荷载 - 变形曲线

Fig. 2 Relation of horizontal load-displacement

表 2 和表 3 分别为竖向抗压和竖向抗拔静载试验结果。可见：

(1) 下压荷载 13200 kN 时，桩身已呈加速下沉，以 $Q-S$ 曲线阶段划分，钢管桩极限抗压承载力应在上一级 10800 kN 左右。

(2) 对上拔试验，桩身分别在 8000 kN 和 7200 kN 荷载时出现加速拔出，钢管桩极限抗拔承载力在 6400 kN~7200 kN 之间。

表 2 钢管桩抗压静载测试结果

Table 2 Results of compressive field tests on steel pipe piles					
最大试验荷载	桩顶最大沉降	桩顶残余沉降	桩顶沉降回弹	桩顶沉降回弹率	桩端最大降量
/kN	/mm	/mm	/mm	/%	/mm
13200	90.80	77.43	13.37	14.7	78.77

表 3 钢管桩抗拔静载测试结果

Table 3 Results of pull-out field tests on steel pipe piles					
序 号	最大试验荷载/kN	桩顶最大上拔量/mm	桩顶残余上拔量/mm	桩顶上拔回弹量/mm	桩顶上拔回弹率/%
1	8000	102.18	89.44	12.74	12.5
2	7200	101.38	89.18	12.20	12.0

2 参数反演方案

钢管桩数值试桩反演分析的意义在于通过与现场试桩结果对比,对土层参数进行优化,综合钻探取样试验、原位测试和反分析结果,结合工程经验,以判断海洋土的参数取值。挪威船级社 DNV 等行业规范明确建议在具体工程中引入有限差分等数值模拟的必要性。本文以 FLAC^{3D} 有限差分程序为平台开展海洋钢管桩静载试验的数值模拟。

2.1 数值仿真模型

以图 1 所示的海洋地层结构,建立数值模拟的三维模型见图 3。该模型共包括 54640 个单元、60280 个节点,模型说明如下:

- (1) 桩体外径为 1.4 m,为消除边界效应,水平方向模型长度取为 20 m。
- (2) 桩入土深度为 35 m,模型竖向尺寸取为 50 m。
- (3) 桩内、外两侧及底部均设置桩-土接触单元,为 FLAC^{3D} 的简化界面元。

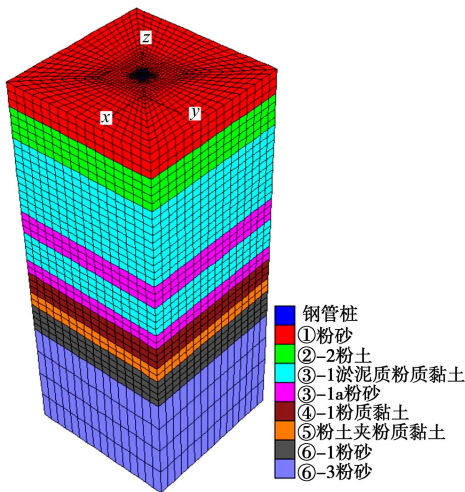


图 3 桩基静载试验的数值仿真模型

Fig. 3 3D model for numerical pile tests

2.2 参数反演方案

(1) 桩基静载试验中,黏性土层近似为不排水,无黏性土层可排水,桩侧土层有效应力变化不十分显著,不考虑有效应力对土层强度与变形参数的影响,选取线弹性—理想塑性的莫尔-库仑模型模拟海洋土。桩-土界面模型采用 FLAC^{3D} 的库伦摩擦模型,界面强度曲线模拟为线弹性。

(2) 海洋土始终处于饱和状态,细粒土泊松比波动范围不大,土体泊松比均取为 0.4。

(3) 对黏性土存在不排水模量和排水模量之分,静力作用下无黏性土一般可考虑为排水。当排水状态和有效应力范围一致时,可采用弹性理论进行弹性模量和压缩模量之间的换算。有文献根据工程经验,土体弹性模量取为压缩模量 2~5 倍^[8]。结合上海周边海相软土层试桩数据,有文献^[9]提出上海地区软土弹性模量取压缩模量的 2.5~3.5 倍。为简化计算,反演方案中弹性模量大致取为压缩模量的 2 倍、3 倍、4 倍和 5 倍进行计算,若在此区间无法获得合理的计算结果,则再扩展计算区间。

(4) 桩-土界面的摩擦角:对无黏性土,参照 API 规范^[5]中钢管桩-桩周土摩擦系数的经验值选取,分别取为:①粉砂 16°;②-2 粉土 16°;③-1a 粉砂 20°;⑥-1 粉砂 24°;⑥-3 粉砂 24°。对钢管桩与黏性土层的界面摩擦角,③-夹 1 淤泥质粉质黏土取 8°,④-1 粉质黏土取 10°,⑤粉土夹粉质黏土取 15°。

基于摩擦桩的受力特征,结合现场试桩结果,桩-土界面摩擦系数分别按上述基准值的 0.50, 0.75, 1.00 和 1.25 倍进行多方案的参数敏感性分析。

(5) 土层的内摩擦角以表 1 中的数值为基准值,上下浮动 25%进行参数敏感性分析。土层的黏聚力相对变化幅度不大,故不再对黏聚力进行参数敏感性分析。

钢管桩采用弹性材料进行模拟,容重为 79 kN/cm³、弹模取为 210 GPa、泊松比为 0.3。

对每组参数,均分别进行海洋钢管桩水平加载、竖向抗拔和竖向抗压等 3 种加载方式的数值反分析。

3 数值反演结果分析

3.1 影响钢管桩承载特性的关键因素

(1) 水平受荷情况下,桩周土弹模对桩基水平变形有显著影响(见图 4)。对各级水平荷载作用下不同埋深处桩身水平变形,取计算值与试验值最接近的桩周土弹模进行后续分析。

(2) 竖向受压和上拔受荷情况下,桩-土摩擦角对抗压和抗拔承载力有显著影响。从图 5 可见,桩-土摩擦角取基准值 0.5 倍和 1.25 倍时,抗拔承载力分

表 4 优化后的海洋土和桩-土界面参数

Table 4 Optimized parameters for marine soils and interface friction between pile and soil

土层	弹性模量 /MPa	抗剪强度（快剪）		抗剪强度（固结快剪）		桩-土界面摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	
①粉砂	20.0			0	25	16.0
②-2粉土	26.0			0	25	16.0
③-夹1淤泥质粉质黏土	14.0	20	5	18.4	13.1	7.9
③-1a粉砂	32.0			0	30	20.0
④-1粉质黏土	18.0	40	5	3.5	15.5	9.3
⑤粉土夹粉质黏土	20.4	17	5	17.1	24.7	14.8
⑥-1粉砂	32.0			0	33	24.0
⑥-3粉砂	52.0			0	35	24.0

别约为 3200 kN 和 8000 kN。基于现场试验获得的抗压和抗拔承载力，以计算结果中最接近试验值的桩-土摩擦角进行后续分析。

(3)桩周土层的摩擦角在浮动范围内对 3 种加载方式下桩基承载力的影响均小于 5%，土层摩擦角可按表 1 取值。

同时满足水平受荷、下压和上拔 3 种加载情况下，计算结果与现场试验结果趋于一致的计算参数，作为优化后的建议参数，优化后的海洋土参数和桩-土界面参数见表 4。采用优化后的参数，水平加载、竖向抗拔、竖向抗压的计算结果分别见图 6~8。

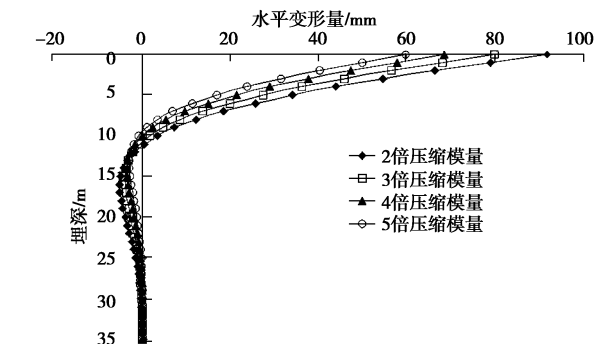
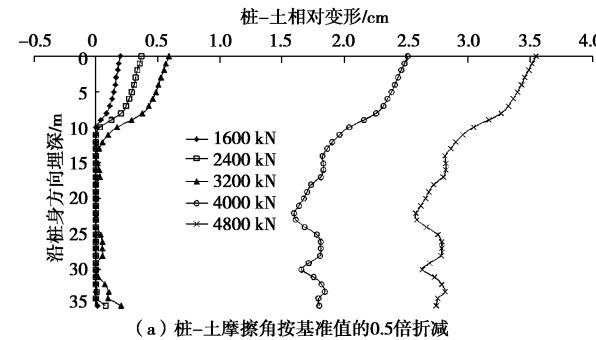
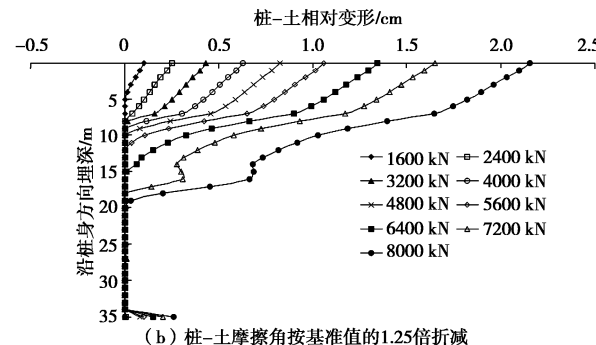


图 4 水平荷载 1680 kN 时桩身水平变形沿深度的变化曲线
Fig. 4 Distribution of horizontal displacement along pile under horizontal load 1680 kN



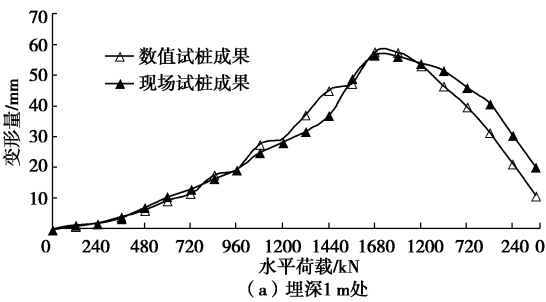
(a) 桩-土摩擦角按基准值的0.5倍折减



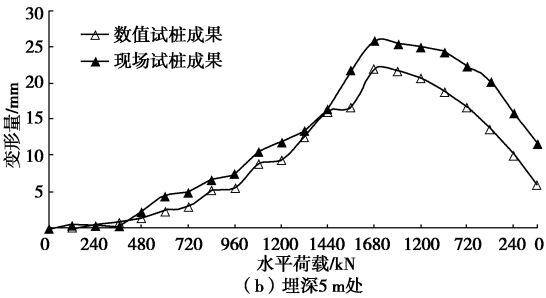
(b) 桩-土摩擦角按基准值的1.25倍折减

图 5 上拔荷载时桩-土相对位移沿桩身的分布

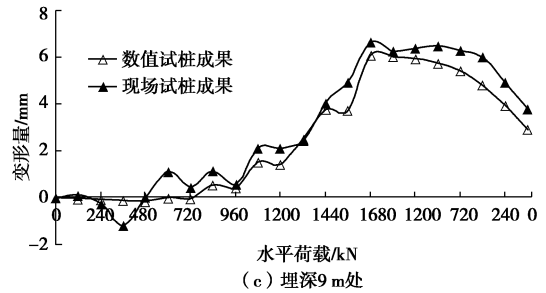
Fig. 5 Related displacement between pile and soil under pull-out load



(a) 埋深1 m处



(b) 埋深5 m处



(c) 埋深9 m处

图 6 桩体水平变形的现场试验与数值计算结果对比

Fig. 6 Horizontal displacement of pile at different depths obtained by filed and numerical tests

3.2 水平受荷情况

与现场试验结果对比，当桩周土弹模约取 4 倍压

缩模量时, 数值计算与现场试桩的结果最为接近, 从图 6 可见:

(1) 加载阶段, 数值计算和现场试验吻合。

(2) 与加载阶段相比, 卸载阶段的误差稍大, 源于莫尔-库仑模型未区分加载模量和卸载模量。

(3) 参照图 4, 埋深 9 m 以上是钢管桩侧向变形的主要深度范围, 图 6 较全面地对比了现场试桩和数值计算结果。

3.3 竖向抗压和抗拔受荷情况

桩-土摩擦角取不同值时, 下压和上拔荷载下, 数值计算的桩顶变形分别见图 7 和图 8。

现场试桩试验获得的单桩抗压极限承载力为 10800 kN, 抗拔极限承载力为 6800 kN, 从图 7 和图 8 可见, 在竖向受压和上拔荷载下, 桩-土摩擦角取基准值的计算结果与现场试验最为接近, 计算的极限抗压荷载约为 9600 kN, 而极限抗拔荷载约为 6400 kN。

当桩-土摩擦角取基准值时, 竖向压荷载 12000 kN 和 13200 kN 时计算的桩顶变形分别为 92 mm 和 135 mm, 与现场试验 13200 kN 下的 90.8 mm 较为接近。上拔荷载 6400 kN 和 7200 kN 下计算的桩顶变形分别为 26.4 mm 和 217 mm, 呈现陡增趋势, 现场试桩在 7200 kN 时最大上拔量 101.38 mm 基本在此区间。

可见, 桩-土摩擦角取基准值是恰当的。

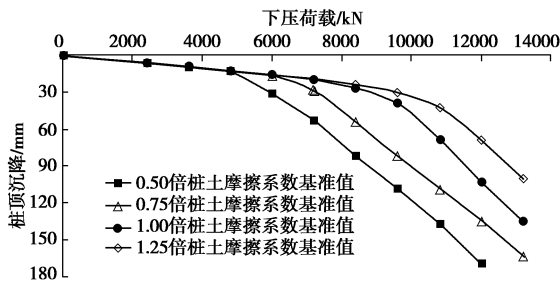


图 7 压荷载下桩顶变形与荷载的关系

Fig. 7 Relation curves of displacement on pile top and compressive load

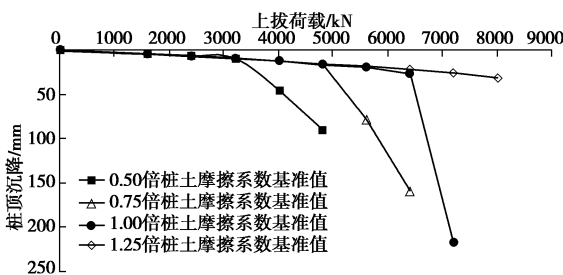


图 8 上拔荷载下桩顶变形与荷载的关系

Fig. 8 Relation curves of displacement on pile top and pull-out load

4 结 论

基于海洋钢管桩的现场静载试验, 采用有限差分

数值模拟进行多方案的参数敏感性分析, 分别将水平荷载、竖向抗压、竖向抗拔等加载情况下的计算值与现场试验值进行对比, 初步实现了对海洋土层参数的反演, 得到以下结论:

(1) 钢管桩水平受荷时, 桩周土弹性模量对钢管桩的水平变形较敏感; 钢管桩受压荷载和上拔载时, 桩-土摩擦系数对钢管桩极限抗压和极限抗拔承载力的影响十分显著。

(2) 通过系统的数值仿真反分析, 可获得同时满足钢管桩在水平荷载、竖向抗压、竖向抗拔等加载情况下荷载-变形曲线的优化参数。

后续尚应采用实体单元法对海洋桩基加载全过程进行精细化数值仿真, 区分黏性土层的不排水模量和排水模量, 研究界面的弹性剪切与塑性切向滑移, 分析海洋土层的弹性变形与塑性流动, 探讨海洋大直径钢管桩端阻与侧阻的发挥规程, 以进一步深入揭示其承载机理, 并建立基于实体单元法的土层参数与基于 Winkler 地基模型的 $p-y$ 曲线、 $q-z$ 曲线、 $\tau-s$ 曲线的联系。

参考文献:

- [1] 孙田, 陈国兴, 周恩全, 等. 琼州海峡 100 m 以浅海洋土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 375 - 382. (SUN Tian, CHEN Guo-xing, ZHOU En-quan, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of marine soils in Qiongzhou strait with depth less than 100 m[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 375 - 382. (in Chinese))
- [2] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 82 - 88. (KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 82 - 88. (in Chinese))
- [3] API. RP 2A-WSD - Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms[M]. Washington: American Petroleum Institute, 2010.
- [4] DNV-OS-J101. Design of offshore wind turbine structures[S]. 2011.
- [5] 魏代峰. 大直径桩基的水平承载机理研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010. (WEI Dai-feng. Study on characteristics of large diameter-tube foundation under lateral loading[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010. (in Chinese))

- [6] BYRNE B W, MCADAM R, HOULSBY G T, et al. New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications[C]// Third International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015). Oslo Norway. 2015.
- [7] 彭文韬. 超长大直径钢管桩竖向承载特性试验分析与预测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. (PENG Wen-tao. Study on the vertical bearing capacity and its predict method for super-long and large-diameter steel pipe pile[D]. Wuhan: Wuhan university of technology, 2010. (in Chinese))
- [8] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2006. (GAO Da-zhao, YUAN Ju-yun. Soil properties and soil mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 杨 敏, 赵锡宏. 分层土中的单桩分析法[J]. 同济大学学报, 1992, 20(4): 421 - 428. (YANG Min, ZHAO Xi-hong. An approach for a single pile in layered soil[J]. Journal of Tongji University, 1992, 20(4): 421 - 428. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)