



湛江港大直径钢管桩的压桩试验 及其数值模拟

赵冉¹, 李聪², 苏林王¹, 姚三¹, 巫志文¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交四航局第三工程有限公司, 广东 湛江 524005)

摘要: 为研究大直径钢管桩压桩试验的数值模拟技术及其与试验结果的差值, 以湛江港高桩码头结构为工程背景, 对两个码头的3根大直径钢管桩进行了现场试验和数值模拟分析。首先采用锚桩法进行了现场压桩试验, 得到了各条试验桩的 $Q-s$ 曲线和极限承载力; 然后采用ABAQUS进行了数值模拟, 并将数值模拟结果与试验结果进行了对比分析。分析结果表明, 在整个加载过程中, 数值模拟的桩基沉降比现场实测结果大, 且随着荷载的增加, 两者的差值逐渐增大, 沉降量的最终差值在20%~30%。

关键词: 大直径钢管桩; 竖向荷载; 锚桩法; 现场试验; 数值模拟

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0149-06

Research on pressed pile test and numerical simulation of large diameter steel pipe pile in Zhanjiang port

ZHAO Ran¹, LI Cong², SU Lin-wang¹, YAO San¹, WU Zhi-wen¹

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. The Third Engineering Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China)

Abstract: In order to study numerical simulation techniques of pressed pile test and the difference of numerical simulation and field test, based on high-piled wharfs of Zhanjiang port, pressed pile test and numerical simulation of three large diameter steel pipe piles of the two wharfs in this paper. Anchored pile method is used in pressed pile test, and the curves of $Q-s$ and ultimate bearing capacity are attained. Then the three piles are numerically simulated by ABAQUS, and results of numerical simulation and field test are comparative analyzed. The results show that sedimentation value of numerical simulation is bigger than that of field test in the loading process, the difference value increasing with the increasing of load, and the ultimate difference value of sedimentation is about 20% to 30%.

Key words: large-diameter steel pipe pile; vertical load; anchored pile method; field test; numerical simulation

大直径钢管桩因其整体性能好、承载能力强、沉桩工艺简便等优点, 使其在港口码头结构中得到了广泛的应用。从20世纪末至今, 大量学者对其进行了深入的研究。谢世波等^[1]对大直径钢管桩在打桩过程中对周围土体的影响进行了研

究, 认为大口径开口钢管桩打桩过程中桩周范围内的土体产生裂缝, 会降低土体有效应力, 在分析时应考虑桩土的共同作用效应。汪宏等^[2]对大直径钢管桩的承载能力进行了分析, 该分析基于荷载传递因素, 对大直径钢管桩的承载力和单桩轴

收稿日期: 2012-04-28

作者简介: 赵冉(1982—), 男, 博士, 工程师, 从事水运工程检测、评估与维修加固的研究。

向刚度变化进行了详细分析,提出了钢管桩承载能力分析时应注意的实际工程中的问题。刘润等^[3]对大直径钢管桩的土塞效应和沉桩过程进行了分析,提出了采用改进的静力平衡法进行土塞效应判断,建立了简化的土塞与桩壁相互作用模型。朱照清等^[4]对大直径钢管桩的水平承载力进行了现场试验研究,采用单向单循环加载法,测试了直桩、正反斜桩的水平承载力及水平位移。Yoshiaki等^[5]对大直径钢管桩进行了竖向荷载下的试验研究,该研究针对东京港海滨公路工程的大直径钢管桩进行现场试验,试验结果表明在竖向荷载作用下,小的位移会导致端承力较大,大的位移会导致摩阻力较大,并且在分析端承力时需考虑土塞的影响。张明远等^[6]基于FLAC3D对大直径钢管桩的竖向承载特性进行了数值模拟,研究结果表明超长直径钢管桩是典型的端承摩擦型桩,桩侧摩阻力随深度变化复杂,与土性密切相关。

从上述研究可以看出,关于大直径钢管桩的研究大都集中在其承载能力的研究上,这是由于海港工程地质条件较为复杂,单桩承载力及其沉降特性的分析对工程安全意义重大。目前实际工程中桩基承载力检测的常用方法有静载试验法和高应变法,其中静载试验是确定单桩轴向承载力及其沉降特性的最直接也是最可靠的方法。在一个港口工程区域,采用的桩基会有多种桩径和桩

长的类别,但静载试验所需费用较高,难以对每种桩型都进行静载试验,采用数值模拟分析可解决这一难题,但静载试验的数值模拟需综合考虑桩土共同作用、土的地应力平衡等问题,数值模拟结果往往不理想,难以应用于实际工程中。为了对现场压桩试验及其数值模拟技术进行研究,本文从现场试验和数值分析两个方面对大直径钢管桩的承载能力及沉降特性进行了系统研究。首先通过对湛江港宝满集装箱码头一期工程和新建油码头工程的3根试桩(S1,S2,T1)进行了现场压桩静载试验,得到了各条桩的承载能力和 $Q-s$ 曲线。然后采用通用有限元软件ABAQUS对试验桩进行建模,研究大直径钢管桩在桩土共同作用下,土的地应力平衡情况、桩身应力情况、沉降性能等内容,并对试验结果和数字模拟结果进行了对比分析。进一步明确了大直径钢管桩的竖向承载力特性、数值模拟技术及其与现场试验结果的差值范围。

1 现场试验分析

在码头现场,共选取了3根钢管桩进行了竖向抗压试验,其中新建油码头工程选取了1根试桩(T1),宝满集装箱码头工程选取了2根试桩(分别为S1,S2)。各个试桩的基本情况见表1,压桩试验现场情况如图1所示。

表1 试验桩基本信息

桩号	桩型	桩径/mm	壁厚/mm	桩顶高程/m	泥面高程/m	桩尖高程/m	入土深度/m	最终贯入度/(mm·击 ⁻¹)
T1	钢管桩	ϕ 1 400	20	7.8	-19.8	-55.2	35.4	9.0
S1	钢管桩	ϕ 1 400	18	6.0	-14.1	-42.8	28.7	5.0
S2	钢管桩	ϕ 1 400	18	6.0	-8.7	-38.4	29.7	2.7



图1 压桩试验现场

试验的反力系统采用锚桩横梁反力装置,利用试验桩周围的4根工程桩作锚桩和试验大梁联接组成反力架。压桩试验时,由一台电动油泵控制置于试验桩桩顶的千斤顶进行逐级加载卸载;同时利用试验桩周围的其它工程桩作为基准桩,焊接两条足够刚度的观测梁。在试验桩桩顶以下0.5 m处,对称安装4块大量程百分表(精度0.01 mm)测量桩顶沉降。

试验加载采用快速维持荷载法, 加卸载分级进行。每加载级荷载为最大试验荷载的1/10, 每次加载后的持荷时间均为60 min。

试验时进行沉降观测, 测读时间依次为0,5,10,15,30 min, 其后应每隔30 min测读一次, 直至达到荷载维持时间的规定为止。

终止加载条件: 静载荷试验凡符合下列条件之一时可终止加载, 并进行分级卸载:

- 1) 试验加载量达到设计要求。
- 2) 在加载过程中, 发现试验桩桩顶偏离轴线的位移过大, 危及试验安全。
- 3) 压桩试验桩顶总沉降量超过40 mm, 且在某级荷载作用下, 桩的沉降量为前一级荷载作用下的5倍或 Q - s 曲线出现可判定极限承载力的陡降段。

3条桩的压桩试验 Q - s 曲线如图2~4所示。

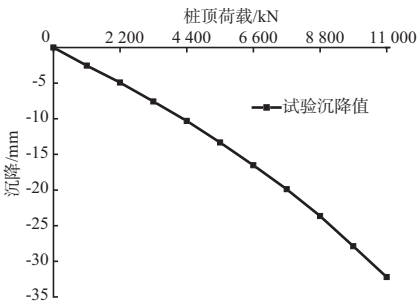


图2 S1压桩试验 Q - s 曲线

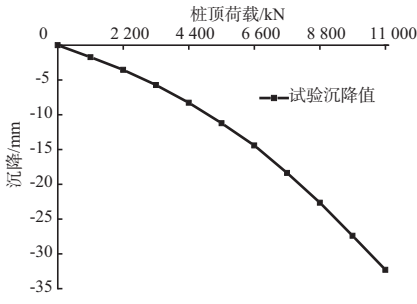


图3 S2压桩试验 Q - s 曲线

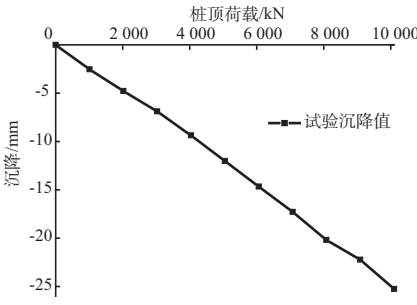


图4 T1压桩试验 Q - s 曲线

从图2~4中可以看出, 各压桩试验的 Q - s 曲线均没有出现陡降段, 而且桩顶位移也未超过40 mm。

S1桩压桩试验的最大沉降量为32.21 mm, 竖向抗压极限承载力不小于11 MN; S2压桩试验的最大沉降量为32.30 mm, 桩的竖向抗压极限承载力不小于11 MN; T1桩压桩试验最大沉降量为25.25 mm, 桩的竖向抗压极限承载力不小于10 MN。

2 数值模拟分析

2.1 土层参数

各土层参数采用《湛江港宝满集装箱码头一期工程地质勘查报告》、《油码头工程地质勘查报告》等文件中的数据。限于篇幅, 文中仅列出S1桩位各土层的工程性状、土层厚度及主要参数, 如图5和表2所示。由于地勘中数据资料有限, 部分参数参考了《工程地质手册》中的经验数据。

5.3 (桩顶位置)	
无土或挖土区	-14.1
④ ₃ 黏土	-19.91
④ ₆ 粗砾砂	-21.31
④ ₃ 黏土	-28.81
⑥ ₁ 黏土	-32.71
⑥ ₃ 中粗砂	-33.71
⑥ ₁ 黏土	-35.11
⑦ ₁ 细砂	-35.81
⑦粗砂、砾砂	-45.11
⑧黏土(夹砂)	-49.81
⑨粗砾砂	-57.01

图5 S1桩(宝满)位各土层分布及其厚度(单位: m)

2.2 本构模型及桩土接触模型

2.2.1 土的本构模型

实际工程中遇到的土及其受荷条件差异较大, 很难提出一种满足所有土质所要求的广义的应力应变关系, 故通常用理想化的地基模型来模拟实际的土性态。本文计算时假定土体的变形由线弹性阶段变形和非线性阶段的变形组成, 线弹性阶段采用理想弹性模型, 非线性阶段选用Mohr-Coulomb模型。Mohr-Coulomb模型是经典的土力学模型, 能反映土体的抗压强度不同的 S - D 效应及对静水压力的敏感性, 简单实用, 在岩土工程问

表2 S1桩（宝满）位土层的工程性状及主要参数

土层编号	土层名称	状态	压缩模量/MPa	摩擦系数	摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
④ ₃	黏土	可塑	6.853	0.25	15.4	35.3	0.30	1.68
④ ₆	粗砾砂	中密	13.333	0.45	40.0	4.0	0.27	1.95
⑥ ₁	黏土	可塑-硬塑	5.962	0.30	12.7	39.5	0.28	1.72
⑥ ₃	中粗砂	中硬土	15.000	0.50	38.0	3.0	0.26	1.95
⑦ ₁	细砂	中密-密实	7.500	0.47	36.0	4.0	0.30	1.95
⑦	粗砾砂	中硬土	15.000	0.50	40.0	4.0	0.30	1.95
⑧	黏土（夹砂）	可塑-硬塑	5.369	0.30	13.7	35.5	0.30	1.87
⑨	中粗砂	密实、极密实	18.000	0.50	42.0	2.0	0.25	2.05

题的数值计算中应用非常广泛。ABAQUS中提供的Mohr-Coulomb模型假定作用在破坏面上的应力是处于最大的主应力圆上，也就是说可以用 σ_3 和 σ_1 为直径的圆，与中间应力 σ_2 无关。Mohr-Coulomb模型屈服准则假定当土体任何点的剪应力达到某个值时破坏发生，考虑了正应力的最大主剪应力屈服理论，在 τ - σ 坐标系中，其屈服或破坏线如图6所示。

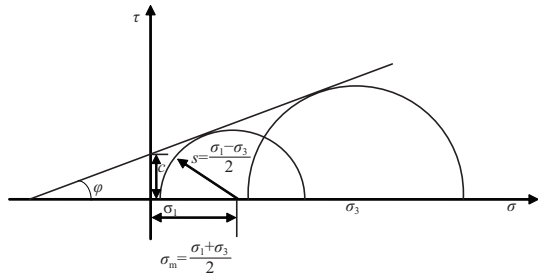


图6 τ - σ 空间的Mohr-Coulomb准则

2.2.2 钢管桩的本构模型

本数值计算的钢管桩采用Q345钢材，其屈服强度取345 MPa。在桩土模型当中，桩土的弹性模量相差两个数量级以上，在工作荷载作用下，桩身一般处于弹性阶段。但为精确起见，钢管桩仍考虑其塑性性能，采用弹塑性本构模型。线弹性阶段采用理想弹性模型，非线性阶段确定屈服应力，采用MISES屈服准则判断。在一定的变形条件下，当受力物体内一点的应力偏张力的第二不变量达到某一定值时，该点就开始进入塑性状态。用主应力表示为：

$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 = 6K^2$ (1)

式中： σ_s 为材料的屈服点； K 为材料的剪切屈服强度。Mises屈服准则也可以表述为：在一定的变形条件下，当受力物体内一点的等效应力达到某一

定值时，该点就开始进入塑性状态。

在小应变时，材料性质基本为线弹性，弹性模量常数，应力超过屈服应力(yield stress)后，刚度会显著下降，此时材料的应变包括塑性应变(plastic strain)和弹性应变(elastic strain)两部分；在卸载后弹性应变消失，而塑性应变是不可恢复的；如果再次加载，材料的屈服应力会提高，即所谓的加工硬化。

钢管桩的弹塑性本构模型表达式为：

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ \sigma_s + E'(\varepsilon - \varepsilon_s) & \varepsilon > \varepsilon_s \end{cases} \quad (2)$$

式中： E 为弹性模量； E' 为塑性模量； σ_s 为屈服应力。钢材材料的基本参数如表3所示。

表3 钢材的基本参数

强度等级	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比	屈服极限 σ_s / MPa	强度极限 σ_b / MPa
Q345	7 850	210	0.3	345	470

2.2.3 桩土接触作用

桩与土的接触问题是一个高度非线性行为，处理其接触问题时需要确定桩土接触区域、接触面间的接触状态及接触行为的本构模型。本文计算桩土接触区域以及接触面间的接触状态选用面接触(surface to surface contact)，接触面接触行为的本构模型选用库伦摩擦模型(Penalty)。

ABAQUS描述接触面之间的滑动有两种模型，小滑动(small sliding)与有限滑动(finite sliding)。根据桩土接触的实际状况，文中选用有限滑动(finite sliding)模型。有限滑动则允许两个接触面之间可以有任意的相对滑动。在应用有限滑动公式时，ABAQUS需要不断地判断从面节点和主面节点的哪一部分发生了接触，计算时间成本

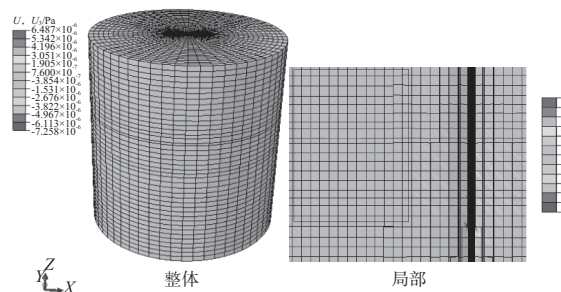
比小滑移公式要高。

ABAQUS摩擦模型有库仑摩擦模型、罚函数摩擦模型、Lagrange摩擦模型以及动力学摩擦模型等。文中的桩土接触模型采用库仑摩擦模型,并用摩擦系数 μ 来表征在两个表面间的摩擦行为。接触属性包括两个部分:接触面之间的法向作用和切向作用,对于法线作用,接触压力和间隙的默认关系采用“硬接触”,其含义为:接触面之间能够传递的接触压力的大小不受限制,当接触压力变为0或者负值时,两个接触面分离,并且去掉相应节点上的接触约束。

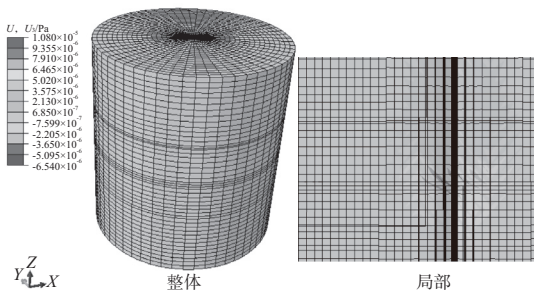
2.3 初始地应力平衡分析

ABAQUS中有两种方法可以用来分析初始地应力平衡。第1种方法通过给出土体的竖向应力及侧向压力系数,并结合相应的理论,得出等效自重应力场;第2种方法是通过有限元计算,先算出各个高斯点的应力值,再以外部文件的形式直接输入。两种方法的不同点在于第1步得出应力场以不同的形式加入平衡计算。本文采用第2种方法实现初始地应力平衡。3条试验桩位置的土的初始地应力平衡计算结果如图7所示。

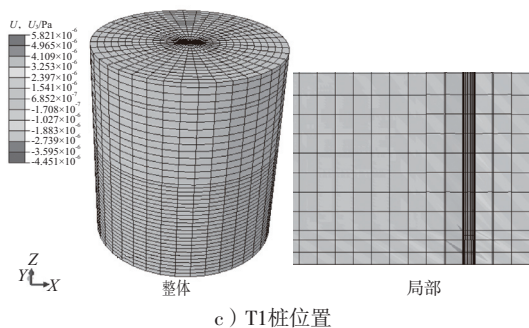
由3条桩的初始地应力平衡计算结果可以看出,经过初始地应力平衡计算,在自重方向上的变形均在 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 的数量级上,说明经过初应力平衡计算,ABAQUS可以较好地解决初始地应力平衡



a) S1桩位置



b) S2桩位置



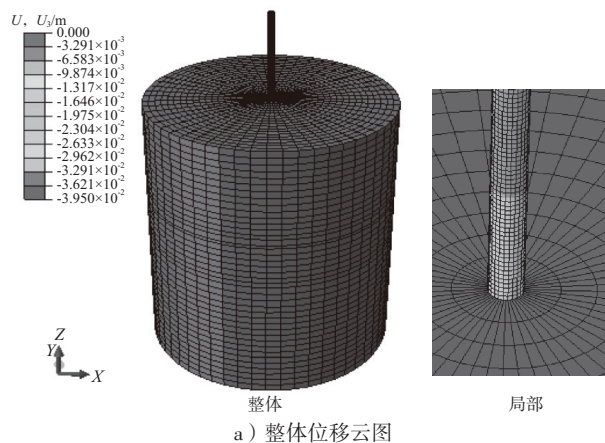
c) T1桩位置

图7 各桩的初始地应力平衡计算结果

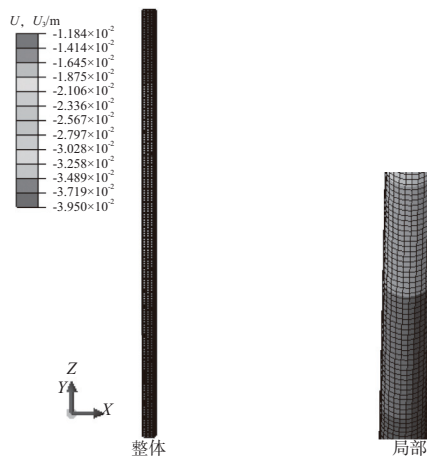
问题,为接下来的荷载分析打下了较好的基础。

2.4 有限元计算与现场试验对比分析

采用ABAQUS对3个高桩码头的钢管桩进行分析,并与实测值进行比较,有限元计算结果如图8所示,有限元分析与现场实测结果的曲线如图9~11所示。



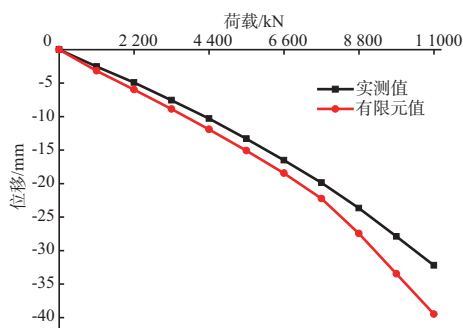
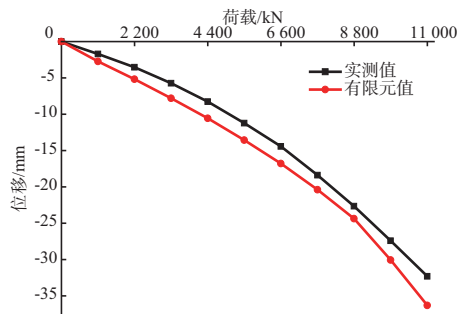
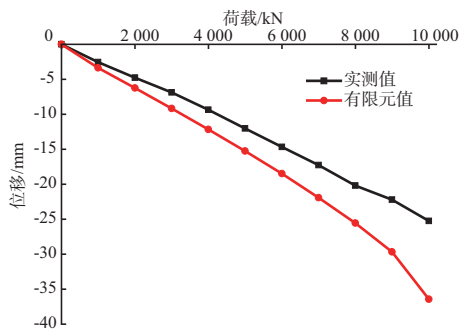
a) 整体位移云图



b) 桩身位移云图

图8 S1桩有限元计算结果

从有限元计算过程和计算结果可以看出,经过土的地应力平衡后,外围土的位移量很小,土的位移主要发生在桩周土及桩底与桩接触部位小

图9 S1桩的实测和有限元 $Q-s$ 曲线对比图10 S2桩的实测和有限元 $Q-s$ 曲线对比图11 T1桩的实测和有限元 $Q-s$ 曲线对比

区域内。整个体系的变形主要发生在桩身处, 桩顶处变形最大, 往桩尖逐渐递减, 原因是桩身轴力沿桩身大体呈“倒三角”分布, 桩顶处轴力最大, 必然导致变形最大。从图9~11有限元计算和实测结果的对比曲线可以看出, 有限元计算出的最终位移比实测结果高出20%~30%, 这是由于沉降量的计算涉及的各种条件较为复杂, 土和桩的材料非线性、各种边界条件及土体指标的选用等, 都会直接影响计算结果。本文在有限元分析中没有考虑打桩引起的附加应力、各土层不同压力段的压缩模量一般比实际值偏小、土体的本构模型的理想化及模型中部分参数的选取等因素, 导致了有限元分析的沉降比静载试验结果略大。且一般来讲, 桩的沉降计算值大于实测值是普遍

现象, 在相关规范中一般由调整系数来控制。整体上来说, 采用ABAQUS对钢管桩在竖向荷载作用下得有限元模拟结果较为准确, 可以作为桩土共同作用的数值方法来对该类桩型的承载力特性进行定性和定量分析, 在实际工程中可将大直径钢管桩有限元分析的沉降量值进行适当折减, 折减系数可取0.8左右。

3 结论

1) 采用锚桩法进行大直径钢管桩的压桩试验时, 在严格控制加载持荷时间和停止加载条件的情况下, 可快速有效地得到试验桩的 $Q-s$ 曲线和极限承载能力。

2) 采用有限元法分析桩土共同作用时, 土的初始地应力平衡较为重要, 是后续荷载分析的基础, 应采用适当的方法对其进行分析。

3) 采用ABAQUS对钢管桩在竖向荷载作用下的有限元分析结果比试验实测结果稍大, 原因是有限元分析中没有考虑打桩引起的附加应力、土体的本构模型的理想化及其参数的选取等因素。从最终的沉降值来看, 数字模拟结果比现场测试结果大20%~30%。

参考文献:

- [1] 谢世波, 陆林强. 大口径开口钢管桩打桩过程对周围土体的影响分析[J]. 上海铁道大学学报, 1997, 18(2): 67-72.
- [2] 汪宏, 王林, 湛奇峰. 大直径钢管桩承载力的分析[J]. 港口技术, 2004 (3): 13-15.
- [3] 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.
- [4] 朱照清, 龚维明, 戴国亮. 大直径钢管桩水平承载力现场试验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 36-39.
- [5] Kikuchi, Yoshiaki, Yamashita, et al. Vertical Loading Test of a Large Diameter Steel Pipe Pile[C]. 5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference 2010. Sydney: N.S.W. Engineers Australia, 2010.
- [6] 张明远, 黎生南, 彭文韬, 等. 基于FLAC3D的超长大直径钢管桩竖向承载特性模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2 856-2 860.

(本文编辑 武亚庆)