

# PHC-钢管组合桩高应变检测修正方法

王海军<sup>1</sup>, 汤雷<sup>1</sup>, 官福海<sup>1</sup>, 胡骏文<sup>1</sup>, 杨石扣<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;  
2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对 PHC-钢管组合桩这类非常规桩的极限承载力设计及高应变检测难题, 开展了高应变试验和竖向静载试验。设计制作 3 根不同长度组合的 PHC-钢管组合桩, 采用锤击法沉桩, 通过高应变现场试验和竖向静载试验, 得出基于两种试验数据的极限承载力; 依据高应变和竖向静载试验结果, 通过理论分析提出了 PHC-钢管组合桩高应变实测曲线拟合法的修正方法。结果表明, 对于 PHC-钢管组合桩, 高应变实测曲线拟合法得到的极限承载力大于竖向静载试验下的极限承载力, 提出的修正方法计算结果与竖向静载试验结果基本一致, 可用于 PHC-钢管组合桩极限承载力高应变法检测。

**关键词:** PHC-钢管组合桩; 极限承载力; 高应变试验; 静载试验; 修正方法

**中图分类号:** TU4731.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2018)04-0070-05

**Modification method for high strain test of PHC-steel compound piles**//WANG Haijun<sup>1</sup>, TANG Lei<sup>1</sup>, GUAN Fuhai<sup>1</sup>, HU Junwen<sup>1</sup>, YANG Shikou<sup>2</sup>(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To solve the problem of the ultimate bearing capacity in design and the difficulty in high strain test for nontraditional PHC-steel compound (PSC) piles, high strain test and vertical static load test were carried out. Three PSCs made of PHC and steel piles were designed with different length ratios. Pile-sinking was performed using the hammering method, and the vertical bearing capacity of the PSC was obtained by in situ high strain test and vertical static load test. Then, a modification for the high strain measured curve fitting method was proposed by theoretical analysis. The results show that the vertical bearing capacity of the PSCs measured by the high strain measured curve fitting method is higher than that from the static load tests while the results computed by the proposed modification method were in consistent with the static load tests. Therefore, the modification method can be applied to the measurement of the vertical bearing capacity of the PSCs.

**Key words:** PHC-steel compound pile; bearing capacity; high strain test; static load test; modification method

PHC 管桩因其强度高、承载力大、适应性强、生产周期短等优点, 在国内港口和水利工程中的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。但是, 在一些地质条件或桩身较长的情况下, PHC 管桩即使配钢桩靴仍然无法穿透坚硬夹层, 导致断桩、爆头等而无法沉桩到设计标高<sup>[3-5]</sup>。为解决此问题, 近年来出现了一种新桩型——PHC-钢管组合桩<sup>[6]</sup> (PHC-steel compound pile, PSC 桩), PSC 桩上部为 PHC 管桩, 下部为钢管桩, 中间采用法兰盘焊接。不同于 PHC 管桩的钢桩靴, PSC 桩中钢管桩参与承载力设计, 在某些工程中

长度超过 10 m<sup>[6]</sup>。除此之外, PSC 桩还具有以下优点: ①下部钢管桩能有效减弱打桩过程中桩顶反弹力, 减少上部 PHC 管桩裂缝的生成, 有助于提高桩基的施工质量; ②桩基上部为 PHC 管桩, 和钢管桩相比, 无须刷防腐涂料; ③比钢管桩节约工程造价和维护费用。

极限承载力是否满足要求是桩基工程设计及施工中的关注重点<sup>[7-8]</sup>。研究者针对 PHC 管桩开展了大量高应变动力测桩 (PDA) 与静载试验的比较<sup>[7,9-12]</sup>以及高应变曲线拟合法的<sup>[13-14]</sup>研究与分析。

基金项目: 江苏省交通运输科技成果转化项目(2014T13); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y417010, Y417016)

作者简介: 王海军(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程及断裂力学研究。E-mail: hjwang@nhri.cn

通信作者: 汤雷(1972—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程及结构工程研究。E-mail: leitang@nhri.cn

对于钢管桩,开展了如常规钢管桩桩型高应变动力检测<sup>[15-16]</sup>甚至海上超长大钢管桩极限承载力的动力检测研究<sup>[17]</sup>等。因此,在竖向极限承载力的检测方面,PHC管桩及钢管桩积累了较多的工程应用经验,JTJ249—2001《港口工程桩基动力检测规程》及JTS167-4—2012《港口工程桩基规范》也相应给出了参考依据。PSC桩应用时间及范围与PHC管桩等常规桩型有较大差距,相关规程和规范尚未对PSC桩给出专门参考依据,相关研究成果较少,只能参考PHC管桩或钢管桩等的经验。由于PSC桩上下两段的桩径、材质、密度、波阻抗差异明显,且PSC桩存在法兰盘接桩,接桩部位出现较大错台面积<sup>[6]</sup>,因此参考PHC管桩和钢管桩的检测依据得到的PSC桩极限承载力检测结果是否可靠就显得极为关键。

针对PSC桩极限承载力检测问题,本文通过竖向静载试验、现场高应变检测试验结合理论分析,提

出了PSC桩高应变检测修正方法,为PSC桩极限承载力的检测提供试验及理论依据。

## 1 工程背景及试验桩设计

### 1.1 工程背景

研究依托镇江润华物流通用码头工程上游7万t级泊位高桩码头开展。工程位于长江下游泰兴水道炮子洲左岸的中段幸福河口处,镇江港扬中港区西来桥作业区。码头平台长278m、宽30m,平台桩基为PSC桩,每樁排架设4根直桩和2对4.5:1叉桩,桩端进入细砂层中部。

试验地点位于码头引桥喇叭口,地质勘查钻孔ZK11位于此处,有精确地质勘查参数可供参考,避免了局部试验地点与工程区域范围整体地质勘查参数不符的问题,符合规范要求。试验地点土层物理力学性质见表1。

表1 各土层物理力学性质指标

层号	岩土名称	含水量/%	孔隙比	塑性指数	液性指数	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	直剪快剪		固结快剪	
							黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
②1	淤泥质粉质黏土	37.8	1.080	13.8	1.34	1.84	18	3.5	17	11.8
④	粉质黏土夹粉砂	35.4	1.028	12.2	1.38	1.86	22	5.4	19	10.9
⑦1	粉质黏土	24.0	0.676	13.6	0.35	2.05	45	11.8	44	19.4
⑦2	粉质黏土夹粉砂	26.0	0.736	12.3	0.54	2.02	37	10.7	38	18.5
⑧	粉细砂	24.8	0.774			1.98	12	21.5		
⑨	细砂	25.2	0.746			1.96	5	31.4		
⑩	中粗砂	21.3	0.601			2.04	8	29.7		

### 1.2 试验桩设计制作

PSC试验桩共设计制作3根,总长度都为33m,分别编号为PSC桩-1、PSC桩-2、PSC桩-3,采用不同的PHC管桩及钢管桩的长度组合,桩型上粗下细,具体参数见表2。试验桩中PHC管桩基本参数按照《国家建筑标准设计图集:预应力混凝土管桩(10G409)》设计,采用高速离心、高温高压蒸养标准工艺制作(1.0MPa,180℃)。为保证桩端部在锤击沉桩下不出现破碎而影响试验,试验桩顶部2m范围内掺加钢纤维。

表2 试验桩设计参数

试验桩	型号	长度/m	直径/mm	厚度/mm	材质
PSC桩-1 (PHC管桩部分)	C型	24	800	130	C80
PSC桩-1(钢管桩部分)		9	600	16	Q345B
PSC桩-2 (PHC管桩部分)	C型	26	800	130	C80
PSC桩-2(钢管桩部分)		7	600	16	Q345B
PSC桩-3 (PHC管桩部分)	C型	28	800	130	C80
PSC桩-3(钢管桩部分)		5	600	16	Q345B

另外,制作8根C型直径800mm、厚度110mm的PHC管桩作为竖向静载试验用锚桩(配1m长桩

靴),2根C型直径800mm的PHC管桩作为基准桩。为增加抗拔安全性,锚桩采用加强设计,桩端板加厚为30cm,直径12mm端板锚固筋为15根,长度1m,端板裙边厚度5mm,锚桩参数见表3。上述各桩制作好后水运至上游镇江试验地点。

表3 锚桩设计参数

锚桩组成部分	型号	长度/m	直径/mm	厚度/mm	材质
PHC管桩部分	C型	36	800	110	C80
桩靴		1	572	16	Q345B
桩靴D16肋板		0.8			Q345B

## 2 高应变试验

### 2.1 现场试验

高应变检测基本原理是采用重锤打击桩顶,使桩土之间产生一定的相对位移。在距离桩顶约1.5倍桩径的两侧对称安装应变传感器和加速度传感器,如图1所示。记录单次锤击过程中作用在桩上的力波 $F(t)$ (由应变数值转换得到)和加速度波 $a(t)$ 时程曲线,由实测曲线拟合法分析可得到极限承载力。

此次试验采用武汉岩海基桩动力检测系统,该系统的采集装置与应变、加速度传感器等测前经过



图1 现场高应变检测传感器安装

检定,精度完全符合 JTJ 249—2001《港口工程桩基动力检测规程》要求。试验桩采用锤击沉桩施工工艺,在沉桩到设计标高时,继续锤击开展试验桩高应变试验;采用筒式 D138 柴油锤,锤距 1.8 m。

## 2.2 实测曲线拟合法结果

按照 JTJ 249—2001《港口工程桩基动力检测规程》,拟合结果如表 4 所示。试验桩 PSC 桩-1、PSC 桩-2、PSC 桩-3 的实测曲线分别在距底部 9 m、7 m 和 5 m 处存在力曲线(由实测的应变曲线得到)反向反射和速度曲线同向反射,即出现“缩颈”现象,这是因为此处是 PHC 管桩和钢管桩的连接部位。虽然钢管桩的密度和波速都大于 PHC 管桩,但是其截面面积远远小于 PHC 管桩,因此其阻抗小于 PHC 管桩,反应在实测曲线上就出现上述的“缩颈”现象。实测曲线中的这一“缩颈”现象导致拟合结果中平均侧摩阻力在 PHC 管桩和钢管桩接桩部位存在明显的减小趋势,这与地质报告中平均摩阻力单调递增的趋势略有差别。

表 4 高应变试验极限承载力分析结果

试验桩	极限承载力/kN	桩侧摩阻力/kN	桩端承载力/kN	沉降/mm	平均侧摩阻力/kPa	桩端地基应力/MPa
PSC 桩-1	3304.2	2197.7	1106.5	30.72	27.19	3.91
PSC 桩-2	3442.3	2330.1	1122.2	25.81	29.15	3.93
PSC 桩-3	3480.6	2280.7	1199.9	25.21	27.53	4.24

## 3 竖向静载试验

### 3.1 现场试验

为了得到 PSC 桩极限承载力真实值,开展了组合桩的竖向静载试验。采用锚桩反力梁装置的“四锚一”形式开展试验,连接形式如图 2 所示。

由于竖向静载试验在水上悬空组装及试验,且抗拔锚桩采用 PHC 管桩,试验难度极大。试验现场如图 3 所示,试验期间,为避免振动影响,距离试验平台 50 m 范围内全部停止打桩施工作业,同时禁止船舶行驶,避免碰撞试桩平台。

采用快速维持荷载法开展竖向静载试验。每级荷载维持时间为 60 min,在第 5 min、10 min、15 min、

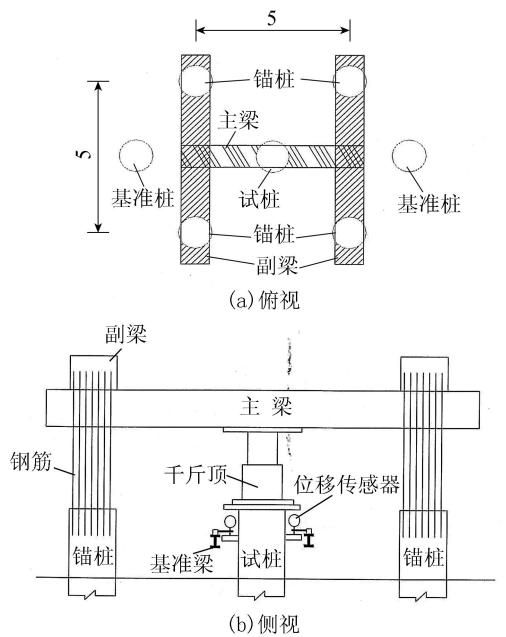


图2 竖向极限承载力静载试验示意图(单位:m)

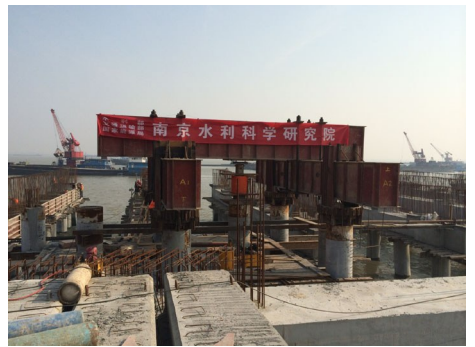


图3 竖向静载试验现场

30 min、45 min 和 60 min 进行沉降等数据测读,累计 1 h 以后每隔 30 min 测读一次沉降数据。每级卸载维持荷载时间为 15 min,测读时间为第 5 min、15 min。试验终止条件: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,认为加载已达到试桩设备的承载能力。

### 3.2 试验结果

竖向极限承载力判据采用 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》判据,得到结果如下:试验桩 PSC 桩-1 及 PSC 桩-3 极限承载力为 3 000 kN,PSC 桩-2 极限承载力为 2 750 kN。

## 4 PSC 桩高应变检测方法的不足与修正

综合考虑 PSC 桩的特殊材质及构造,在竖向静载试验结果及现行高应变实测曲线拟合结果的基础上,对高应变实测曲线拟合结果进行修正。

### 4.1 高应变检测方法的不足

参考现行的高应变检测方法,计算得到 PSC 桩-1、



PSC 桩-2 和 PSC 桩-3 极限承载力分别为 3 304.2 kN、3 442.3 kN 和 3 480.6 kN, 分别比竖向静载试验结果高出 10.1%、25.2% 和 16.0%。PSC 桩完全不同于一般常规桩型, 实际上是两种桩拼接而成的, 上下两段的波阻抗明显不同, 是一种非标准桩, 而现行的高应变实测曲线拟合法都以均质材质的桩为基础, 因此极限承载力检测难以按照现行规范执行和评定。

#### 4.2 修正方法

根据高应变检测原理, 单桩极限承载力与桩身截面力学阻抗  $Z$  有关,  $Z$  符合下式:

$$Z = \frac{AE}{C} \quad (1)$$

其中 
$$E = \frac{\gamma C^2}{g} \times 10^{-3}$$

式中:  $A$  为桩身截面积,  $m^2$ ;  $C$  为桩身应力波波速,  $m/s$ ;  $E$  为桩材弹性模量,  $MPa$ ;  $\gamma$  为桩材容重,  $kN/m^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

由此, 高应变实测曲线拟合得到的单桩极限承载力  $Q$  可表示为

$$Q = f(A, C, E, \gamma, g, \dots) \quad (2)$$

传统高应变实测曲线拟合法得到的极限承载力实际包含两部分, 一是 PHC 管桩贡献的极限承载力, 一是下部钢管桩贡献的极限承载力。而在实际高应变检测分析中, 在采集波形时只能按照一种桩型采集信号, 无法考虑接桩部位的端承力, 由此得到的高应变检测结果必然包含下部钢管桩极限承载力的偏差。

首先, 将实测极限承载力中侧摩阻力和端承力分别按照面积进行权重分离。定义上部 PHC 管桩和下部钢管桩侧摩阻力权重系数分别为  $\lambda_{phc1}$  和  $\lambda_{st1}$ , 端承力权重系数分别为  $\lambda_{phc2}$  和  $\lambda_{st2}$ , 满足以下关系式:

$$\lambda_{phc1} = \frac{A_{phc1}}{A_{phc1} + A_{st1}} \quad (3)$$

$$\lambda_{st1} = \frac{A_{st1}}{A_{phc1} + A_{st1}} \quad (4)$$

$$\lambda_{phc2} = \frac{A_{phc2}}{A_{phc2} + A_{st2}} \quad (5)$$

$$\lambda_{st2} = \frac{A_{st2}}{A_{phc2} + A_{st2}} \quad (6)$$

式中:  $A_{phc1}$ 、 $A_{phc2}$  分别为上部 PHC 管桩侧表面积和端部面积,  $m^2$ ;  $A_{st1}$ 、 $A_{st2}$  分别为下部钢管桩侧表面积和端部面积,  $m^2$ 。

将实测极限承载力中端承力及侧摩阻力分别进行权重分离后, 对钢管桩贡献的极限承载力进行修正。定义 PHC 管桩参数下测定的钢管桩极限承载力修正系数为  $\varphi$ , 由式(1)~(6), 可得到修正系数  $\varphi$

近似符合:

$$\varphi = \frac{A_{phc} \gamma_{phc} C_{phc}}{A_{st} \gamma_{st} C_{st}} \quad (7)$$

式中:  $A_{phc}$ 、 $\gamma_{phc}$ 、 $C_{phc}$  分别为 PHC 管桩桩身截面积、桩材容重和桩身应力波波速;  $A_{st}$ 、 $\gamma_{st}$ 、 $C_{st}$  分别为钢管桩桩身截面积、桩材容重和桩身应力波波速。

由式(3)~(7)可得到 PSC 桩在 PHC 管桩参数下的高应变实测曲线拟合法实测极限承载力的修正公式:

$$Q = Q_{g1} \lambda_{phc1} + \varphi Q_{g1} \lambda_{st1} + Q_{g2} \lambda_{phc2} + \varphi Q_{g2} \lambda_{st2} \quad (8)$$

式中:  $Q$  为极限承载力修正值,  $kN$ ;  $Q_{g1}$  为高应变试验实测侧摩阻力,  $kN$ ;  $Q_{g2}$  为高应变试验实测端承力,  $kN$ 。

#### 4.3 结果对比

通过式(8)对高应变试验下 PSC 桩极限承载力进行计算, 结果如表 5 所示。

表 5 PSC 桩极限承载力修正结果与竖向静载试验结果对比

试验桩	极限承载力/kN		
	竖向静载试验	修正公式	高应变实测曲线拟合法
PSC 桩-1	3000	3080.8	3304.2
PSC 桩-2	2750	3132.1	3442.3
PSC 桩-3	3000	3166.1	3480.6

由表 5 可知, 高应变实测曲线拟合法结果经过修正计算之后, 误差有了明显降低。PSC 桩-1、PSC 桩-2 及 PSC 桩-3 误差分别由 10.1%、25.2% 及 16.0% 降低为 2.7%、13.8% 及 5.5%, 修正结果与竖向静载试验得到的极限承载力相差不大但仍比实际竖向静载试验结果略微偏高。

## 5 结论

a. 高应变检测方法作为一种快速、经济的方法, 可以应用于 PSC 桩的极限承载力检测, 但是参考 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》高应变实测曲线拟合法得到的极限承载力值比竖向静载试验下的极限承载力值高出 10.1%~25.2%。

b. 式(8)充分考虑了 PHC 管桩和钢管桩差别及对极限承载力贡献的权重系数, 修正计算结果精度明显提高, 与竖向静载试验结果基本一致但仍略高, 本次试验桩条件下高出 2.7%~13.8%。

c. 提出的修正方法及公式以现行高应变检测仪器、设定及分析系统为基础, 无须开发新的硬件平台及软件分析系统, 作为一种建立在通用的软硬件产品基础上的修正方法, 精度可以满足施工过程中对极限承载力高效、精确的检测要求。

#### 参考文献:

[1] 施峰, 郝世龙. PHC 管桩水平承载力试验研究[J]. 岩土

- 力学, 2015, 36 (增刊 2): 617-622. (SHI Feng, HAO Shilong. Field test for horizontal bearing capacity of PHC pipe piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (Sup2): 617-622. (in Chinese))
- [ 2 ] 寇海磊, 张明义. 基于桩身应力测试的静压 PHC 管桩贯入机制 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (5): 1295-1302. (KOU Hailei, ZHANG Mingyi. Penetration mechanism of jacked PHC pipe piles based on pile stress measurement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (5): 1295-1302. (in Chinese))
- [ 3 ] 刘欣良, 戴洪军, 韦华. PHC 桩桩端改进后的沉桩与承载力探讨 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2008, 41 (增刊 1): 161-164. (LIU Xinliang, DAI Hongjun, WEI Hua. Discussion on pile-driven and bearing capacity of PHC pile with improved bottom [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41 (Sup1): 161-164. (in Chinese))
- [ 4 ] 蔡小红, 黄松涛. 大直径 PHC 桩沉桩过程中常见工程质量问题及对策 [J]. 水运工程, 2015 (10): 177-181. (CAI Xiaohong, HUANG Songtao. Common quality problems and countermeasures of large-diameter PHC piles driving [J]. Port & Waterway Engineering, 2015 (10): 177-181. (in Chinese))
- [ 5 ] 王国辉, 周文龙. PHC 管桩穿越软弱夹层桩身破损及施工对策 [J]. 施工技术, 2009, 38 (9): 95-97. (WANG Guohui, ZHOU Wenlong. Damage of PHC pipe pile in penetrating soft soil interlayer and construction countermeasures [J]. Construction Technology, 2009, 38 (9): 95-97. (in Chinese))
- [ 6 ] 胡骏文, 邹玉光, 汤雷, 等. PHC-钢管组合桩竖向荷载传递机理研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14 (1): 136-142. (HU Junwen, ZOU Yuguang, TANG Lei, et al. Investigation of vertical load transfer mechanism for PHC-steel composite pile [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14 (1): 136-142. (in Chinese))
- [ 7 ] 李宇, 张勤. 高应变动力测试技术在桩基工程检测中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25 (增刊 1): 121-123. (LI Yu, ZHANG Qin. Application of high strain dynamic measurement technique to pile foundation detection [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25 (Sup1): 121-123. (in Chinese))
- [ 8 ] 彭吉力, 施建勇, 黄刚. 考虑挤土效应的桩基承载力分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (2): 105-108. (PENG Jie, SHI Jianyong, HUANG Gang. Analysis of bearing capacity of pile foundation in consideration of compaction effect [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) 2002, 30 (2): 105-108. (in Chinese))
- [ 9 ] 李锡昌. 高应变法在 PHC 管桩桩身质量检测中的应用优势 [J]. 广东土木与建筑, 2009 (7): 57-59. (LI Xichang. Advocating high-strain test to detect integrity of PHC pile [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009 (7): 57-59. (in Chinese))
- [ 10 ] 黄良机, 林奕禧, 蔡健, 等. 超长 PHC 管桩桩顶沉降特性的动静对比分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (2): 507-511. (HUANG Liangji, LIN Yixi, CAI Jian, et al. Dynamic and static comparative analyses of settlements of overlength PHC pipe piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (2): 507-511. (in Chinese))
- [ 11 ] 邢皓枫, 赵红崑, 叶观宝, 等. PHC 管桩工程特性分析 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (1): 36-39. (XING Haofeng, ZHAO Hongwei, YE Guanbao, et al. Analysis of engineering characteristics of PHC pipe piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (1): 36-39. (in Chinese))
- [ 12 ] 郑泽香. 预应力管桩高应变法与静载试验结果对比分析 [J]. 土工基础, 2006, 20 (4): 94-97. (ZHENG Zexiang. Comparison between high strain dynamic test and static loading test of prestressed pipe piles [J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20 (4): 94-97. (in Chinese))
- [ 13 ] 冯天伟. 高应变曲线拟合法在 PHC 管桩检测中的应用 [D]. 福州: 福州大学, 2014.
- [ 14 ] 中国生, 刘定环. 基于高应变动测法惠州地区桩基承载力试验研究 [J]. 惠州学院学报, 2017, 37 (3): 86-91. (ZHONG Guosheng, LIU Dinghuan. Experimental study on bearing capacity of pile in Huizhou area based on dynamic testing method of high strain [J]. Journal of Huizhou University, 2017, 37 (3): 86-91. (in Chinese))
- [ 15 ] 滕骅, 俞小光. 钢管桩高应变沉桩监测与单桩极限承载力的确定 [J]. 浙江建筑, 2012, 29 (8): 39-42. (TENG Hua, YU Xiaoguang. Monitoring pile-sinking process and determining single pile ultimate bearing capacity for steel pipe pile foundation [J]. Zhejiang Construction, 2012, 29 (8): 39-42. (in Chinese))
- [ 16 ] 林高杰, 徐满意, 孙百顺, 等. 高应变动力测试技术在钢管桩检测中的应用 [J]. 水道港口, 2006 (增刊 1): 49-51. (LIN Gaojie, XU Manyi, SUN Baishun, et al. Application of high strain dynamic method in steel pile dynamic test [J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006 (Sup1): 49-51. (in Chinese))
- [ 17 ] 刘万恩, 蔡克俭, 夏吉祥. 海上超长大钢管桩的高应变动力检测 [J]. 上海地质, 2005 (3): 35-37. (LIU Wanen, CAI Kejian, XIA Jixiang. High-strain dynamic testing for super-length and super-diameter steel pile s in the ocean [J]. Shanghai Geology, 2005 (3): 35-37. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-08-31 编辑: 熊水斌)