

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.008

基于多功能加载系统的 全机械式桩基模型试验装置研发

任连伟¹, 杨权威¹, 詹俊峰¹, 顾红伟², 彭怀风², 张敏霞¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在借鉴国内外学者关于桩基模型试验装置研究经验的基础上, 自主研发了基于多功能加载系统的全机械式桩基模型试验装置, 该装置可实现抗压、抗拔、水平桩基模型试验的加载。其桩基模型试验系统主要由模型槽、加载系统、测量系统等组成, 模型槽全机械连接, 可根据试验需求设置不同的长、宽、高; 全自动加载系统可实现每级荷载的稳压要求, 并且电脑自动控制和采集, 试验的精确性和可靠性大幅度提高; 全自动加载系统具有两向或三向同时加载的功能, 可模拟桩基在不同工况下的承载性能。采用该装置进行了Y形桩抗压、抗拔、水平单桩模型试验, 验证了该试验装置和加载系统的可行性和可靠性。

关键词: 桩基模型试验装置; 全机械式连接; 全自动加载; Y形桩

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)06-0519-06

Development of fully mechanical model test equipment for pile foundation based on multifunctional loading system

REN Lianwei¹, YANG Quanwei¹, ZHAN Junfeng¹, GU Hongwei², PENG Huaifeng², ZHANG Minxia¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on research achievements of scholars from China and abroad, fully mechanical model test equipment was independently developed for pile foundations. The equipment is based on a multifunctional loading system and can be used for model tests of compression, uplift, and horizontal loadings on pile foundations. The pile foundation model test system consists of a model tank, a loading system, a measurement system, and other components. The model tank is connected mechanically and can be set to different lengths, widths, and heights according to model test requirements. The fully automatic loading system can meet the requirements of pressure stability for each level of loading. The system is controlled and collected automatically by computer, leading to the high accuracy and reliability of the model test. In addition, the system has the function of loading simultaneously in two or three directions and can simulate the bearing performance of different piles under different conditions. Finally, model tests of compression, uplift, and horizontal loadings on Y-shaped piles were carried out, and the feasibility and reliability of the test equipment and loading system are verified.

Key words: pile foundation model test equipment; fully mechanical connection; fully automatic loading; Y-shaped pile

在桩基础的研究中, 现场试验是最可靠的研究手段, 但其存在造价高、重复性差、场地工期限限制严格等缺点。为了系统研究桩基础特别是新形桩的受力性能, 国内外学者自行研制模型槽, 在其内进行全面的试验研究。

Pan 等^[1] 为了分析被动桩变形以及确定作用在桩侧的极限土压力, 设计了由钢板制作的小型模型槽。Xing 等^[2] 对桩支撑的平面上垫层有无土工格栅进行了大尺寸试验研究。Goit 等^[3] 为研究水平荷载作用下

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51508166); 河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF140143)

作者简介: 任连伟(1980—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: renhpu@163.com

桩土相互作用的非线性,进行了相关的动态模型试验。Cihan 等^[4]对钢筋混凝土和钢纤维混凝土桩的非线性特性进行了对比模型试验研究。Zhang 等^[5]为了研究打入桩的工作机理,自制一加压模型箱,进行多组模型试验。河海大学岩土工程科学研究所自行开发了大型桩基模型试验系统^[6],可进行各类桩的足尺模型试验研究。肖昭然等^[7]研制了一套功能完备的自动压桩仪,为研究静力沉桩提供了较为稳定的条件。楼晓明等^[8]为模拟土体加卸荷对桩基摩阻力产生的影响,研制了土体加卸荷对桩基影响模拟试验系统,该系统可通过气压加载法在大直径土样顶面以较高荷载进行加卸荷,模拟不同土性、不同桩端约束条件下土体沉降或回弹对模型桩产生的影响。李永波等^[9]为研究冻土环境中桩基动力特性,设计一套冻土-桩动力相互作用模型试验系统,该试验系统能较好地模拟分析冻土-桩动力性能。郦建俊等^[10]采用室内离心模型试验来代替现场原位试验,研究桩土相互作用,取得了较好的效果。

在借鉴国内外学者关于桩基模型试验装置的先进经验基础上,笔者自行研发了基于多功能加载系统的桩基模型试验系统,该试验系统主要由试验场所(模型槽)、加载系统、测量系统等组成,能够实现桩基抗压、抗拔、水平单桩和群桩一系列试验研究以及变角度加载试验。其主要特点是模型槽全机械式连接,可根据试验需要改变长、宽、高。另外,配有国内先进的全自动加载系统,能通过1个控制平台同时控制3个方向的加载,每级加载中可以实现稳压功能,解决模型试验中稳压控制难的问题,提高了试验的准确性和可靠性。为实现加载的多功能性,还配有滑轮加配重块加载、手动千斤顶加载等,可根据试验需要选择不同的加载方式或组合方式,并且通过对Y形桩进行抗压、抗拔、水平单桩模型试验,验证了该系统的可行性和可靠性。

1 全机械式桩基模型试验装置研发

1.1 模型槽设计

全机械式桩基模型试验系统主要由试验场所(模型槽)、加载系统、测量系统等部分组成,模型槽全机械式连接,加载系统有自动加载、滑轮加载、手动加载等多功能加载装置。图1为模型槽的三维设计图形及建好后的模型槽。

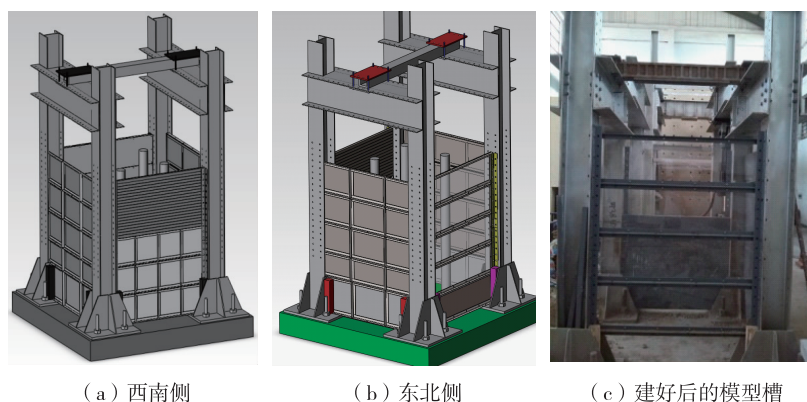


图1 模型槽

Fig. 1 Model tank

试验所采用的模型槽位于河南理工大学结构大厅,模型槽上面有厂房的钢结构雨篷,防止模型槽受天气影响,可以有效地对设备进行保养和维护。

模型槽全部为钢结构机械连接而成,为了保证模型槽上部结构的安全与稳定,该模型槽的4根立柱由槽钢组成,柱子下面用16个直径大于10 cm的大螺栓固定于地下室钢筋混凝土顶板上。模型槽的平面尺寸为2 m×2 m,高度为2.5 m。由于地下室顶板上每隔50 cm布置有螺栓孔,模型槽可根据试验需要改变尺寸。在模型槽的上方安装有行车轨道,便于吊装和运输相关设备和材料,车轨上有最大起重量为5 t和10 t的2个吊机,可以根据需要选择,吊车可以覆盖整个模型槽区域。模型槽的东、西两侧用活动钢挡板围成,每侧由5块挡板组成,总高度为2.5 m,挡板上焊接有5#角钢,并在角钢上面进行钻孔,用螺栓将5块活动挡板进行连接,便于模型槽的安装和拆卸,如图1(a)所示。考虑水平试验时钢板变形对试验结果的影响,在模型槽的南侧下部1.5 m范围内布置3块活动挡板,上面1 m采用20个5 cm高度的空心方钢(厚度3 mm),可减小钢板变形对水平试验的影响。为便于对试验土料填筑情况以及后续试验土体变形等情况进行直接观察,在

模型槽的北面设置了5块有机玻璃板,每块高度50 cm,经角钢螺栓连接,如图1(b)所示。

反力架主要是由传力柱和反力梁构成(图2),反力梁分为主梁和次梁2部分。在模型槽的东、西两排柱子上分别固定有一个改装型H型主梁,主梁的中心是实心钢结构,主梁高0.5 m,主梁与钢柱之间用螺栓连接。钢柱上布置有间距为10 cm的螺栓孔,主梁可以根据试验要求在竖向调节高度,简单方便。在主梁的上方固定有一个次梁,次梁为实心方钢,其尺寸为2.4 m×0.08 m×0.075 m,次梁经上下带螺栓孔的钢板用长螺栓与主梁连接,共同构成反力构件。由于主梁槽钢上面设计有间距10 cm的螺孔,因此次梁可以根据桩的不同位置,在水平方向上前后移动,满足加载需求。



图2 反力架装置

Fig. 2 Reaction frame equipment

1.2 加载系统

1.2.1 全自动加载系统

全自动加载设备采用双油路千斤顶,千斤顶最低高度为33.8 cm,油缸外径为13.2 cm,活塞直径为7 cm,活塞最大行程为20 cm,千斤顶所能提供的最大荷载为50 t。千斤顶既可以竖向放置也可以水平放置,能够提供竖向、水平2个方向的荷载,千斤顶所施加的荷载由与其接触的荷载传感器连接到电脑上读出。

为了满足静载荷试验时每级荷载稳定要求,采用具有稳压功能的静力载荷测试仪,容差在 ± 1 kN,有较高的稳压效果。本仪器具有1个荷载测试通道和4个位移测试通道,可直接显示各测试通道的荷载值(单位kN)、沉降值(单位mm),而不需人工换算。本仪器有2路各自独立的油泵控制输出,可以对试桩的加载、补载自动控制。该控制器的机芯采用的是进口变频器,可以自动调节高压油泵流量,能同时满足小吨位单桩或复合地基试验及大吨位群桩试验对流量精细调节的要求。仪器与传感器、油泵间采用电缆连接,测试人员可远距离操作。既提高了工作效率,减轻了劳动强度,又大幅度提高了测试精度。

该试验系统还配备有国内先进的静载测试仪,它将传统的仪器系统各组件间的电缆连接改变为无线遥控并具有开创性的一带三功能。1台主机最多可同时自动遥控3台前端测控器,能同时进行3根桩试验或者对1根桩同时进行3个方向的加载,并且主机在有效范围内可随意放置,无须连接电缆线,可以进行无线控制,给试验带来了极大的方便。

1.2.2 水平加载系统

水平加载有2种方式,一种是通过模型槽南侧设置的方钢作为支撑挡墙用手动螺旋式千斤顶加载,配合荷载传感器及显示装置使用,如图3(a)所示;另外一种是通过滑轮加配重块进行水平加载,如图3(b)所示。2种方式都可以实现恒载循环加载。

1.2.3 抗拔加载系统

专门设计一抗拔试验装置,如图4所示。2块钢板预先钻有螺栓孔,钢板厚度不小于1 cm,由4根高强度螺栓经螺帽固定到钢板两端。桩头预先焊接不少于2根钢筋,通过螺帽固定于下钢板。反力梁置于4根螺栓中间,反力梁与上钢板留有足够空间用于放置千斤顶和荷载传感器。至此形成抗拔加载系统。由于模型桩的抗拔力比较小,一般使用手动螺旋式千斤顶加载。



(a) 千斤顶加载



(b) 滑轮配重块加载

图3 水平加载系统

Fig. 3 Horizontal loading system



图4 抗拔加载系统

Fig. 4 Uplift loading system

1.3 测量系统

测量系统主要用于对桩身沉降、桩端阻力、桩身轴力、桩侧土压力等进行测量,为了达到测量目的,所采用的测量设备主要包括以下几种:钢筋应力计、微型土压力盒、位移计等。由于试验目的不同,所采用的测量设备有所不同。

为了准确测量桩身的沉降,避免百分表读数产生误差,节约人力,方便数据的记录,本次试验采用与全自动静载荷载测试仪配套使用的 MFX-50 数显百分表,该位移传感器的测量范围为 0~50 mm,能够精确到 0.01 mm。

1.4 试验土体

试验所采用的土体为砂土,在试验时将砂晒干,模拟桩在干砂中的承载力,通过室内试验测得其基本物理性质参数:密度 $\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi = 42^\circ$,压缩模量 $E_s = 15.31 \text{ MPa}$ 。该砂土的不均匀系数 $C_u = 1.22$,曲率系数为 0.97。砂土的填筑采用砂雨法,控制高度为 50 cm,均匀分层填筑。

1.5 模型桩制作

由对 Y 形桩已有研究成果可知^[11-12],实际工程中常用的 Y 形桩外包圆半径 $R = 0.3955 \text{ m}$,桩长 12 m。本试验所用的 Y 形桩为预制桩,按照 1:6 的相似比得出试验桩的外包圆半径 $R = 65.92 \text{ mm}$,开弧间距为 20 mm,开弧角度为 72° ,如图 5 所示。与 Y 形桩等面积的圆形桩 C_1 的 $R = 39.87 \text{ mm}$,与 Y 形桩等周长的圆形桩 C_2 的 $R = 62.28 \text{ mm}$,桩长都是 2 m。各桩桩身混凝土强度等级均为 C25,桩内均匀布置 3 个 $\phi 6$ 的冷拉筋,箍筋 $\phi 2@20$,用细铁丝进行绑扎,如图 5 所示。Y 形桩和圆形桩参数见表 1。

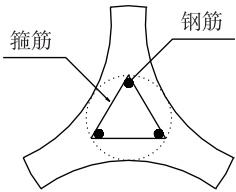


图 5 Y 形桩截面
Fig. 5 Cross section of Y-shaped pile

表 1 模型桩桩身参数

Table 1 Parameters of model test piles		
桩编号	横截面面积/ mm ²	截面周长/ mm
Y	4992.35	391.10
C ₁	4992.35	250.50
C ₂	12185.60	391.10

2 实例应用

2.1 竖向抗压试验

图 6 为单桩静载试验现场照片,根据规范^[13-14]要求进行竖向载荷试验。由于桩体配置有主筋露出桩头,所以在进行抗压试验时在桩头放置钻孔钢垫片,然后在垫片上面放置加载板便于千斤顶放置及位移计固定,在垫板上面对称布置 2 个位移计以测定桩顶位移。在千斤顶上面放置方形钢块作为传力柱,荷载传感器放置在反力梁和垫块之间,测定桩顶施加的竖向荷载。

加载采用全自动液压千斤顶,油泵采用改装的流量为 0.2 L/min 双油路液压油泵,与采集软件连接,设置补载下限,可以将波动范围控制在 $\pm 1 \text{ kN}$ 范围内,其荷载、位移大小可以直接在电脑上直接读出,提高试验的可靠性和准确性。该自动加载设备具有记忆功能,即使测试过程中出现断电的情况,在电脑重新打开时仍然可以继续加载,不会影响试验结果。图 7 为 3 根试桩的荷载-沉降曲线,满足竖向载荷试验要求。

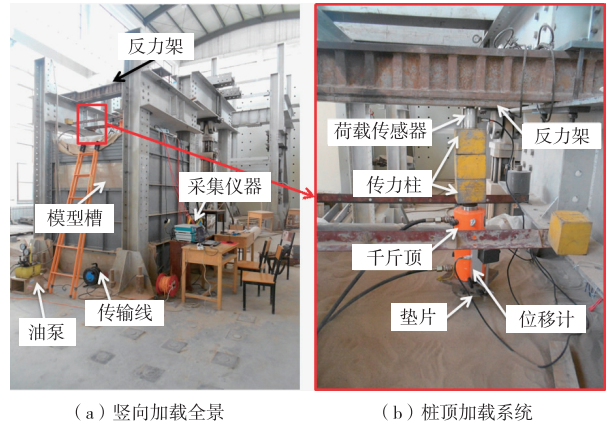


图 6 单桩竖向载荷试验
Fig. 6 Vertical loading test of single pile

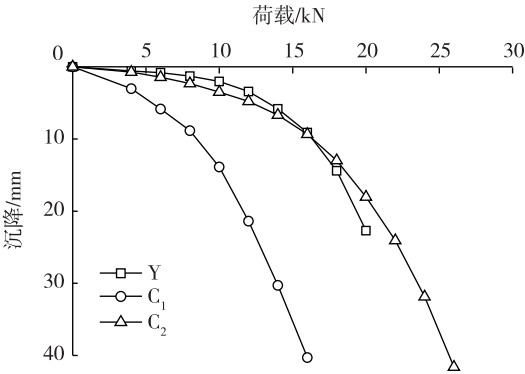


图 7 荷载-沉降曲线
Fig. 7 Loading-settlement curves

2.2 水平载荷试验

图8为水平试验现场照片,通过滑轮使用标准配重块对桩进行水平方向加载。水平加载装置是先在主梁上固定2个外伸悬臂梁,并用螺栓在外伸悬臂梁的一端固定一个横梁用以固定滑轮;然后将钢丝绳穿过滑轮,一端连接桩头,另一端连接放置配重块的承载架,通过调整滑轮的高度,将钢丝绳调整水平,使用配重块进行加载。这种加载方式能够使所施加的荷载保持稳定,试验结果更加准确可靠。图9为3根试桩的水平力-水平位移曲线,可满足水平试验要求。

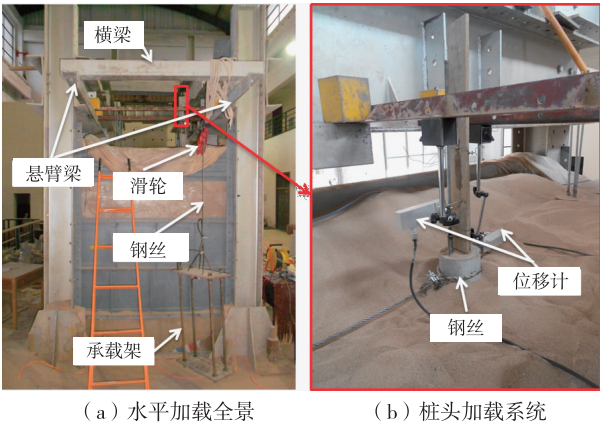


图8 水平载荷试验
Fig. 8 Horizontal loading test

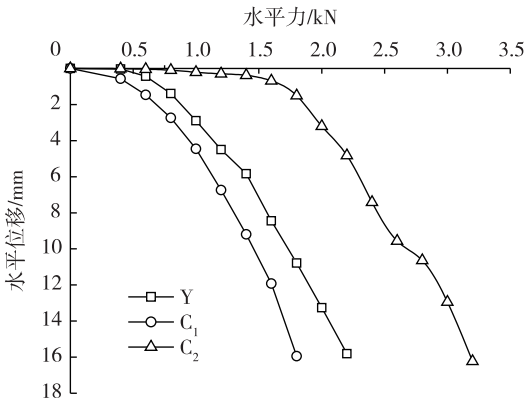


图9 水平力-水平位移曲线
Fig. 9 Horizontal loading-displacement curves

2.3 竖向抗拔试验

图10为抗拔试验时现场照片,在进行抗拔试验时,将标准螺栓钢筋与桩体主筋进行焊接,并将螺栓钢筋与抗拔装置通过螺帽连接到一起。试验所用抗拔装置主要由连接板、螺栓钢筋和加载板3部分组成,在连接板上钻孔,通过螺帽与桩头螺栓钢筋连接到一起,加载板与连接板通过大直径螺栓钢筋进行连接。装置固定好之后,通过千斤顶进行加载。

本次试验由于桩的抗拔承载力较小,故采用手动机械式千斤顶,荷载传感器量程是0~5t,并采用马歇尔数据采集仪,该采集仪可以精确到0.01kN。如果试验需要,同样可以采用全自动液压加载系统进行加载。图11为3根试桩的上拔荷载-桩顶上拔量曲线,可以满足抗拔试验要求。

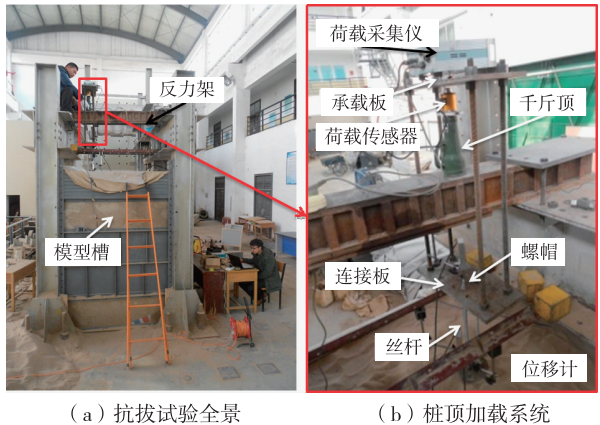


图10 竖向抗拔试验
Fig. 10 Vertical uplift test

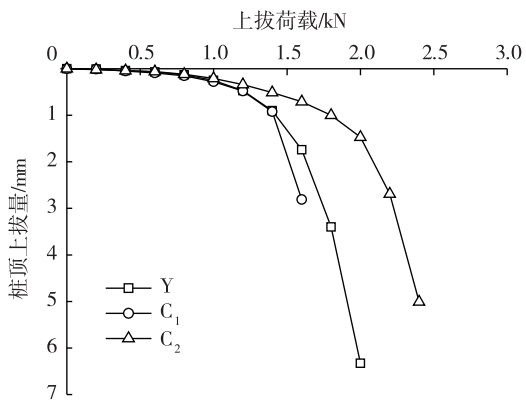


图11 上拔荷载-桩顶上拔量曲线
Fig. 11 Uplift loading-displacement curves

3 结 论

a. 完整桩基模型试验系统主要由机械式模型槽、全自动加载系统、测量系统等组成,模型槽的尺寸可根据试验需要设置不同的长、宽、高,具有挡板块状拼接、拆装组合便捷等优点。挡板一侧设置为有机玻璃板,便于观察土体的基本物理性质。

b. 反力梁与横梁螺栓连接,可根据桩的位置调整反力梁的位置,使其位于桩顶正上部。水平试验时,为提供水平反力,在挡板上部设置方钢挡墙,可根据试验要求对称布置方钢挡墙,实现多向加载。同时也设置了滑轮加标准配重块的水平加载系统,使试验结果更稳定可靠。另外,还专门研制了抗拔加载装置,与反力梁配合实现单桩和群桩的抗拔试验。

c. 加载系统有全自动加载系统、手动加载、配重块加载等,全自动加载系统可实现每级荷载的稳压要求,并且电脑自动控制和采集,试验的精确性和可靠性大幅度提高。另外,全自动加载系统具有2向或3向同时加载的功能,可模拟不同的桩基受力特性。

d. 通过对Y形桩抗压、抗拔、水平单桩模型试验,验证了该试验装置和加载系统的可行性和可靠性。

参考文献:

- [1] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. The model tests on single piles in soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(4): 890-897.
- [2] XING Haofeng, ZHANG Zhen, LIU Huabei, et al. Large-scale tests of pile-supported earth platform with and without geogrid[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(6): 586-598.
- [3] GOIT C S, SAITOH M, MYLONAKIS G, et al. Model tests on horizontal pile-to-pile interaction incorporating local non-linearity and resonance effects[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 48: 175-192.
- [4] CIHAN T A, GÜRKAN Özden. Nonlinear behavior of reinforced concrete (RC) and steel fiber added RC (WS-SFRC) model piles in medium dense sand[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 464-472.
- [5] ZHANG Z, WANG Y H. Examining setup mechanisms of driven piles in sand using laboratory model pile tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(3): 04014114-1-04014114-12.
- [6] 刘汉龙, 谭慧明, 彭劼, 等. 大型桩基模型试验系统的开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 452-457. (LIU Hanlong, TAN Huiming, PENG Jie, et al. Development of large scale pile foundation model test system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 452-457. (in Chinese))
- [7] 肖昭然, 刘轶. 静力沉桩的室内模型试验装置研发[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1695-1698. (XIAO Zhaoran, LIU Yi. Development of laboratory model test equipments for jacked piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1695-1698. (in Chinese))
- [8] 楼晓明, 李德宁, 杨敏, 等. 土体常规加卸荷对桩基影响模型试验系统研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1509-1515. (LOU Xiaoming, LI Dening, YANG Min, et al. Development and application of simulation system for model piles impacted by routine loading and unloading of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1509-1515. (in Chinese))
- [9] 李永波, 张鸿儒, 全克江. 冻土-桩动力相互作用模型试验系统研制[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 774-780. (LI Yongbo, ZHANG Hongru, QUAN Kejiang. Development of model test system for dynamic frozen soil-pile interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 774-780. (in Chinese))
- [10] 郦建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩承载力的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 388-396. (LI Jianjun, HUANG Maosong, WANG Weidong, et al. Centrifugal model tests on bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 388-396. (in Chinese))
- [11] 王新泉, 陈永辉, 刘汉龙. Y型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 615-623. (WANG Xinquan, CHEN Yonghui, LIU Hanlong. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped vibor-pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 615-623. (in Chinese))
- [12] 陈永辉, 王新泉. 公路软土地基处理中Y型沉管灌注桩异形特性研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 19-25. (CHEN Yonghui, WANG Xinquan. Research on abnormality characteristic of Y-shaped tube-sinking cast-in-situ pile in highway soft ground[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 19-25. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.