

大型桩基模型试验系统的开发

刘汉龙^{1,2}, 谭慧明^{1,2}, 彭 劼^{1,2}, 张建伟^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 为了对现浇混凝土大直径管桩等新桩型开展更深入的研究, 并考虑到室内小模型试验存在的比尺效应等问题, 自行开发了大型桩基模型试验系统, 为进行室内桩基足尺试验研究提供了可能。该试验系统主要由模型槽、加载系统、测量系统以及试验所需的土料和桩体等组成。鉴于较少开展室内足尺试验, 提出了试验土料的制备方法, 并通过现场取样、CPT 等试验对土体的质量进行了检验, 证明了该方法的可行性。此外, 利用该试验系统进行了现浇混凝土大直径管桩室内足尺静载荷模型试验, 通过将试验结果与现场实测结果进行对比, 表明利用试验系统进行桩基室内足尺试验是可行的。

关键词: 模型试验; 足尺试验; 桩基试验; 系统开发

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0452-06

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事地基基础与土动力学方面的教学与科研工作。E-mail: hliuhhu@163.com。

Development of large scale pile foundation model test system

LIU Han-long^{1,2}, TAN Hui-ming^{1,2}, PENG Jie^{1,2}, ZHANG Jian-wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to make further researches on the new types of piles, a large-scale pile foundation system is established to make full-scale model tests and overcome the disadvantages of small model tests, such as scale effect. The developed system consists of the test room, loading system, measuring system and soils. The preparing method of soils, including control indices, laying methods and result detecting, is introduced. Meanwhile the pile-making method and quality test method are also shown. The final test results show that the quality of the soils can meet the requirements of the following experiments. Furthermore, by use of this model test system, the full-scale load tests on PCC piles are done, and the results indicate that the full-scale pile foundation test is feasible.

Key words: model test; full-scale test; pile foundation test; system development

0 前 言

现浇混凝土大直径管桩(PCC桩)^[1-2]作为一种新的桩型由于其可靠的工程性和良好的经济性, 目前已经在江苏、上海等多个省市得到了应用和推广。PCC桩属于以摩擦为主的桩型, 其侧摩阻力的发挥是其重要的工作机理。虽然已有学者^[3-4]通过现场试验以及理论分析等对此进行了研究, 但是到目前为止还没有在现场测得PCC桩荷载作用下的应力分布; 虽然通过室内模型试验^[5]得出了桩身的应力分布, 但试验结果的规律性不强。特别是PCC桩特有的桩芯土部分的研究目前还远远不够, 这主要是因为PCC桩的施工工艺使得很难在现场试验中的桩芯埋设仪器, 而在室内模型试验^[6]中由于桩芯空间对于埋设仪器而言也不够大, 所以仅仅是通过数值模拟的方法, 得出了PCC桩芯内摩

阻力的分布^[3], 缺乏试验的支持。此外, 通过进行室内试验进一步探讨PCC单桩承载力特性, 也是很有必要的。

现场试验是研究桩基础的最有效的方法, 但由于存在试验投入大、周期长以及干扰因素多等缺点, 所以室内试验成为揭示原型桩工作性状常用的手段。室内试验可分为模型试验和足尺试验。按照相似理论^[7], 模型试验中的模型与实际原型相比不仅要做到几何尺寸上的相似, 还要保持物理上的相似, 而这一点对于桩基础研究而言很难做到。室内足尺试验就不存在比

基金项目: 国家自然科学基金项目(50679017, 50778063); 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2008040)

收稿日期: 2008-01-03

尺效应的影响, 是在室内按照原型的尺寸不进行缩小直接建立模型进行试验, 所用的桩体与土体等材料也无须考虑物理相似, 可选用实际材料。虽然室内足尺试验可以克服现场试验和室内模型试验中的很多不足, 但需要在室内建立大尺寸的模型, 这对资金和试验场地都有较高的要求, 试验的工作量以及周期也比较长, 所以目前很少进行桩基础的室内足尺试验。

鉴于开展室内足尺试验对 PCC 桩等新型桩型研究的重要性, 在“十五”“211 工程”建设和国家自然科学基金的支持下, 河海大学岩土所自行开发了大型桩基模型试验系统, 该系统主要包括: 试验场所(模型槽)、加载系统、测量系统等。目前国内外均无定型成套的类似仪器, 有些院校和科研所只是进行过类似的小型模型试验^[5, 8-10]。因此, 本次试验系统的开发主要是从试验原理出发, 同时借鉴小型模型试验的经验, 从而保证系统开发的正常进行。从技术上来讲, 目前, 国内的生产技术能够满足试验系统的技术要求, 因此, 主要采取由本课题组提出技术要求, 委托有关厂家和基建部门进行生产。

1 大型桩基模型试验系统的开发

大型桩基试验系统主要包括: 试验场所(模型槽)、加载系统、测量系统等。为了进行试验还需按要求制备土料和制作桩体。从 2005 年 11 月至 2007 年 4 月经过一年多的努力, 该试验系统已经建成, 图 1 为建成后的模型槽。



图 1 建成后的模型槽

Fig. 1 Full view of the large-scale model test system

1.1 试验场所(模型槽)

大型桩基模型试验槽位于河海大学岩土所旁, 在综合考虑拟开展的试验及后续可能开展的试验等因素下, 提出了模型槽的设计要求, 与专业设计部门合作共同完成了模型槽设计方案。考虑到试验设备的保养以及试验条件的控制, 在模型槽顶架设了不锈钢雨篷。为了便于试验的开展在岩土所和模型槽之间建造了试验平台和试验通道。

模型槽为钢筋混凝土结构, 考虑到试验场地的地质条件以及试验的安全性在模型槽建设地基中打了 4 根 7 m 长的人工挖孔桩, 其直径为 1.5 m。模型槽的平面尺寸为 4.0 m×5.0 m, 墙体高 7.0 m, 墙上 2.6 m 为行车轨道高度。行车的架设是为了便于吊装和运输相关试验设备和材料, 其最大起吊重量为 5 t, 行车配有大车和小车, 使其活动范围可以覆盖整个模型槽试验区域。在模型槽东面一侧墙体设置了钢筋混凝土支撑, 其目的是为后续将要进行的水平承载力试验提供加载反力, 在该侧墙体底部有两个排水孔, 以便土体固结稳定时孔隙水的排出。为了便于试验土料等的运输在模型槽西面一侧墙体预留了宽度为 1.0 m 的门洞, 门洞的总高度为 6.0 m。在试验填土时, 门洞可用 5 块厚度为 20 cm 的钢筋混凝土闸门来关闭。在模型槽南面一侧的墙体上分 3 个不同的高程设置了 6 扇有机玻璃窗, 以便对试验土料填筑情况以及后续试验土体等变形情况进行直接观察。

1.2 加载系统

加载系统是在试验中提供所需施加的荷载以及对所施加荷载的大小、速率等进行控制。加载系统主要由以下几部分组成: 加载设备、数显设备、保压装置、频率调节器以及反力架。

加载设备采用油压式千斤顶, 千斤顶高度为 70 cm, 活塞直径为 15 cm, 其最大行程为 50 cm, 所能提供的最大荷载为 240 t。该千斤顶能提供竖向和水平向的荷载。为了准确读出千斤顶所施加荷载的大小, 专门配置了数字显示装置。

数显设备有测量探头和显示装置组成, 其中测量探头与千斤顶直接相连, 所测量的是千斤顶中的油压而非油泵处油压, 这样所读油压值就可以不受油管长度的影响, 有利于试验精度的提高。

在试验中通常需要在某一级荷载下土体沉降等稳定后才能施加下一级荷载, 这就要求千斤顶的压力能稳定在某一个值或在一个比较小的范围内波动, 为此, 在本加载系统中设置了保压装置。保压装置的工作原理是: 在试验前根据所需施加荷载的大小预先设定荷载的上限值和下限制, 在试验中当荷载大于设定的荷载上限值时, 电动机自动停止工作, 油泵不再泵油; 当荷载减小到设定荷载下限值以下后, 电动机又自动开始工作, 油泵开始泵油, 千斤顶压力上升; 如此往复, 千斤顶所施加的荷载也就在一个范围内波动, 基本实现了荷载的稳定。本套试验系统保压装置设计所能达到的最小控制范围为 ± 3 kN。

电动机泵油的速度是由所用交流电的频率所决定的, 而电动机泵油的速度又决定了千斤顶加载的速度, 在一定程度上也影响着加载的精度。在试验加荷初期,

如果电动机泵油速度过快,荷载会迅速增加,一些较小级别的荷载往往就会错过;另外,加载速度过快对实现荷载的保压也是不利的。考虑到上述问题,在本加载系统中添加了频率调节器,频率调节器顾名思义调节的是电动机的频率,使用频率调节器后可以实现电流频率从 0~50 Hz 任意调节,从而千斤顶的加载速度等也可以得到很好地控制,与保压装置联合使用可以使荷载稳定控制更容易实现。



图 2 模型槽反力架

Fig. 2 Counter force system of the model test system

反力架主要由反力梁和传力槽钢组成(图 2)。两根主梁和一根次梁焊接构成反力梁,主梁和次梁全部采用 Q345 特种钢,主梁跨度为 4000 mm,梁高 600 mm,次梁跨度为 1500 mm,梁高 550 mm,次梁位于主梁中部,试验加载时千斤顶直接作用于次梁上。主梁两端分别与预埋在模型槽柱子内的槽钢通过焊接相连。4 根 9.5 m 长的 40 a 型槽钢是在模型槽建设过程中一起浇筑在墙体中的。本试验系统反力架能承担的设计荷载为 2400 kN,在满载情况下的设计挠度为 4 mm。

水平加载系统的反力装置是在模型槽东侧墙体设置的两片钢筋混凝土支撑(如图 3 所示)。



图 3 水平反力支撑

Fig. 3 Counter force wall for lateral loading

1.3 测量系统

测量系统主要是由各种不同的测量设备组成,如钢弦式反力计、土压力盒、钢筋应力计、百分表、水

准仪等。根据不同的试验目的,可以选择不同的测量设备组成不同的试验测量系统。

钢弦式反力计是用于直接测量千斤顶所施加的荷载大小。在本试验加载系统中反力计是对反力架、千斤顶以及试验对象所构成的传力系统中力的直接测量,是对加载系统荷载控制情况的监测和补充,而且在荷载较小的情况下,反力计的作用就更不容忽视了。本试验系统所配备的钢弦式反力计的最大量程是 2000 kN,最小分辨率为 0.45 kN。

钢筋应力计是直接和钢筋笼焊接后浇筑在混凝土中,通过数据线将相关读数(应力或应变)导出。本试验系统目前共配备了 26 个振弦式钢筋应力计,直径为 16 mm,测量最大压应力为 100 MPa,最大拉应力为 200 MPa。

通过在试验土体中不同的位置埋设土压力盒可以得到,土体内的应力分布情况。本试验系统共配备了 78 个钢弦式土压力盒,考虑到不同试验不同位置的土压力相差比较大,为了使土压力盒处于比较合理的工作状态,所配备的土压力盒的量程主要有 5, 1, 0.4, 0.2 和 0.1 MPa 5 种类型。

以上提及的设备均为力量测设备,位移量测设备主要有百分表和水准仪。本试验系统共配备了 5 只量程为 10 mm 的百分表和 1 台光学水准仪。百分表主要用于测量试验研究对象(如: PCC 桩)的沉降等,而水准仪主要是用于试验(特别是大荷载试验)中整个模型槽系统的安全性监测。

1.4 土料制备

为了保证试验的进行,考虑到天然地基常以成层形式存在,本试验系统共配备了黏土和砂土两种土料,黏土方量为 85 m³ 左右,砂土方量为 55 m³ 左右。

试验所用黏土选自南京河西地区,属于粉质黏土。通过室内试验对该土料的基本物理性质进行了测量,具体参数见表 1。根据该土料的基本特性,参照 PCC 桩现场土层的常见情况,再考虑到在模型槽内操作的可行性和难易程度,通过干密度控制实现土料填筑的控制,控制干密度为 1.50 g/cm³,控制密度下土料的物理力学性质见表 2,其中抗剪强度指标是通过直剪试验测得的。在模型槽内通过人工分层填筑、整平压实的方法来填筑土料,并且对填筑后土体进行取样以检验填筑效果。现场取样测得的干密度为 1.47~1.51 g/cm³。

本次试验所用砂土采购自南京的砂厂,属于细砂。与黏土一样,通过室内试验测定其基本物理性质参数,试验结果见表 3。该砂土的级配比较均匀,不均匀系数 C_u 为 1.58,曲率系数 C_c 为 0.99。在试验中也是通过干密度控制来实现砂土填筑控制的,控制干密度为

1.55 g/cm³。按照控制干密度, 试验时砂土处于中密状态, 控制密度下土料的物理力学性质见表 4。砂土填筑的方法和黏土的类似, 即采用分层填筑整平压实的方法。现场取样实测的干密度为 1.54~1.57 g/cm³。

表 1 黏土基本物理指标

Table 1 Physical indices of clay

天然密度 /(g · cm ⁻³)	天然含水率	干密度 /(g · cm ⁻³)	土粒比重	孔隙比
1.91	30.1%	1.47	2.70	0.836

表 2 控制密度下黏土物理力学指标

Table 2 Mechanical indices of clay with the specified density

控制干密度	压缩模量	黏聚力/kPa	内摩擦
1.51	6.63%	1.35	1.66
1.55	17.0	15.3	37.9

表 4 控制密度砂土物理力学指标

Table 4 Mechanical indices of sand with the specified density

控制干密度	压缩模量	黏聚力/kPa	内摩擦
/(g · cm ⁻³)	<i>E_{s,100~200}</i> /MPa		角/(°)
1.55	17.0	15.3	37.9

在土料来源和控制指标确定后就可以在模型槽内进行土料的填筑。土料填筑是按照图 4 所示的土层情况进行的。首先, 在模型槽底铺设厚度为 20 cm 的碎石层, 用来形成排水通道便于土中孔隙水的排出, 然后, 铺设厚度为 50 cm 的黏土层, 就此 70 cm 厚的桩底下卧层铺设完成; 紧接着是桩周土体的填筑, 首先是按照控制密度在桩底向上 2.5 m 范围内进行砂土的填筑, 在填筑同时进行土压力盒的埋设和取样试验, 砂土填筑完成后, 在其上 3.5 m 范围内填筑黏土, 同样也进行土压力盒的埋设和取样试验, 黏土表面与桩顶齐平时即完成了桩周土的填筑; 最后是桩芯土体的填筑和仪器的埋设, 同样采用人工填筑的方法进行, 桩芯土的分层情况和控制指标与桩周土体是一样的, 桩芯土体填筑至距桩顶 30 cm 即完成, 这 30 cm 空间是用来浇筑混凝土桩头的。另外, 为了减小模型槽四壁摩擦力的影响, 填土前在墙体上先贴上了塑料膜。

土体填筑完成后需要等其稳定后才能进行相关试验。在此阶段, 通过土压力盒读数的变化情况来反映土体的稳定状况, 在填土完成 1 个多月后, 土压力盒读数基本不再变化, 认为土体已基本稳定。考虑到土体填筑时的抽样试验随机性比较大, 同时土体又经过

了固结稳定的过程, 为了对整个模型槽内土体的均匀性进行判断、检验是否存在空洞, 并能对固结后土体的性质有所了解, 在模型槽内还进行了 CPT 原位测试。从 CPT 试验结果 (如图 5 所示) 可以看出, 土体中并没有明显的空洞, 土体分层情况明显, 砂土强度要明显高于黏土的强度, 这也表明本次试验准备所采用的方法达到了预期的目的。

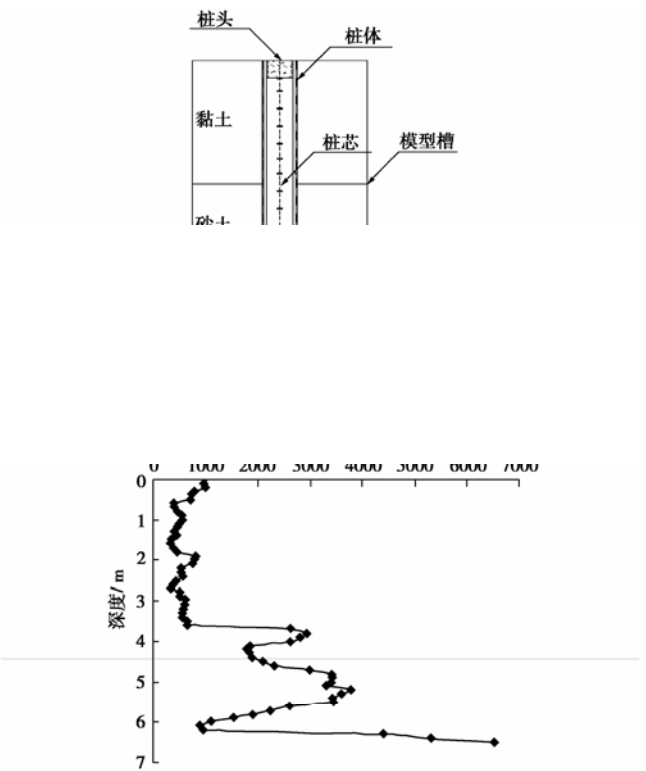


图 5 CPT 试验结果

Fig. 5 Results of CPT tests

1.5 模型桩制作

试验所用的 PCC 模型桩与原形一致, 直径为 1000 mm, 内径 760 mm, 壁厚 120 mm, 桩长为 6.0 m, 桩体混凝土强度等级为 C20。在综合考虑各种因素的前提下, 选择了如下的制桩方法: 在模型槽内先支模浇筑桩体, 等桩体达到一定强度后再拆模。

PCC 模型桩的制作主要包括以下工艺: 绑扎钢筋、模具制作、模具安装、混凝土浇筑、混凝土养护及拆模、桩头浇筑。桩体内共设置了 8 根 Φ16 的钢筋, 在其中两根上各焊接了 13 个钢筋应力计, 相邻两个应力计的间距为 0.5 m, 两根钢筋在桩体内对称布置。

2 实例: PCC 单桩静载荷足尺试验

为了检验使用该试验系统进行室内足尺试验的可行性, 在完成 PCC 桩制作、土体填筑, 等到混凝土达到养护龄期并且土体基本稳定后, 就进行了 PCC 单桩静压试验。在千斤顶上设置反力计测量施加荷载的大

小;在桩头上对称位置架设了两块百分表用以测量桩头沉降。图6是现场试验图。由于PCC桩属于大直径桩,所以各级荷载沉降稳定标准以及终止加载条件都参照《建筑桩基技术规范 JGJ 94—94》中关于大直径桩静载荷试验的内容确定。在试验中每次加载后,在维持荷载基本不变以及桩体沉降稳定的前提下,进行桩顶沉降的量测,然后再加下一级荷载,如此重复,直到试验终止条件出现。

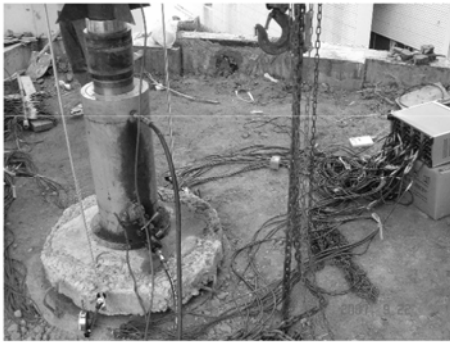


图6 单桩静压试验现场

Fig. 6 Static load tests on PCC pile

荷载-沉降($P-s$)曲线是静载荷试验的主要结论之一。 $P-s$ 曲线是确定桩体承载力的重要依据,也是桩体荷载传递规律的最直接的反映。

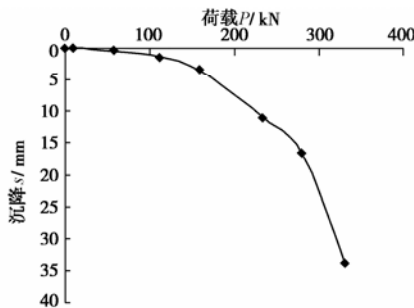


图7 PCC模型单桩荷载-沉降曲线

Fig. 7 $P-s$ curves of PCC pile

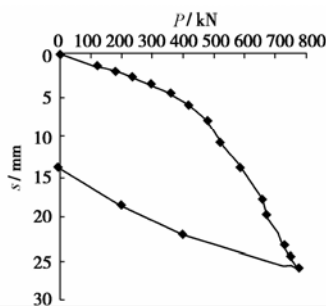


图8 现场实测PCC桩荷载-沉降曲线^[3]

Fig. 8 $P-s$ curves of PCC pile in field tests

本次试验的所加荷载大小是通过反力计频率计算得出,桩体沉降是所架设百分表的平均值。图7为本次试验所得的 $P-s$ 曲线。试验共分7次加载,试验最

大荷载为330 kN,所对应的桩顶沉降为33.8 mm。从图中可以看出, $P-s$ 曲线拐点已经出现,但并不显示明显的陡降现象,而呈缓变型,这与现场实测的结果(见图8)是一致的,说明该试验方法是可行的。对于缓变型大直径桩,文献[11]建议取 $s=(0.03\sim 0.06)D$ (D 为桩径)对应的荷载值作为极限荷载,因此本次试验取30 mm所对应的极限荷载为297 kN。 $P-s$ 曲线呈缓变型说明在竖向荷载下PCC桩端刺入下卧土层时不出现桩端土体的整体剪切破坏,而是表现出以局部剪切为主导作用,这与实心大直径桩的荷载-沉降特征是相似的^[11]。进一步对比可以看出,本次试验中PCC桩底至模型槽混凝土底板只有0.7 m,桩端边界效应比较明显;而在现场试验中,桩端有足够刺入变形空间,但两者表现出的 $P-s$ 曲线规律却相似。这说明桩端持力层性质不同的PCC桩都具有类似的荷载-沉降特性,这与大直径实心桩也是相似的^[11]。

3 结 论

本文主要是对自行开发的大型桩基模型试验系统进行了详细的介绍,并以该试验系统为依托开展了PCC单桩静压试验,验证了使用本试验系统进行室内足尺模型试验的可行性。本文的主要内容和结论如下:

(1) 自行开发的大型桩基模型试验系统主要由模型槽系统、加载系统、测量系统等部分组成。

(2) 试验土料主要包括黏土和砂土,以干密度为控制指标采用人工方式填筑,通过现场取样和现场CPT试验检验,填筑质量能达到试验要求。

(3) 本次PCC单桩静压试验所施加的最大荷载为330 kN,所对应的荷载为33.8 mm。试验所得的 $P-s$ 曲线呈缓变型,这与现场静载荷试验所得的结果是相似的,说明用本试验系统进行PCC桩室内足尺试验是可行的。

(4) 本试验系统以及土体的制备方法对其他桩型的足尺试验也同样适用。

参考文献:

- [1] 刘汉龙, 费康, 马晓辉, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164 - 168. (LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application (I): development and design[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 164 - 168. (in Chinese))
- [2] 刘汉龙, 郝小员, 费康, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003,

- 24(3): 372 - 375. (LIU Han-long, HAO Xiao-yuan, FEI Kang, et al. Field pour concrete thin wall cased pile technology and its application (II): application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 372 - 375. (in Chinese))
- [3] 费康, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 现浇混凝土薄壁管桩的荷载传递机理[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 764 - 768. (FEI Kang, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Load transfer mechanism for field pour concrete thin wall cased pile (PCC)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 764 - 768. (in Chinese))
- [4] 杨寿松, 刘汉龙, 周云东, 等. 薄壁管桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 750 - 754. (YANG Shou-song, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, et al. Application of cast-in-situ concrete thin-wall pipe piles in soft soil improvement of expressways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 750 - 754. (in Chinese))
- [5] 张晓健, 刘汉龙, 高玉峰, 等. PCC 单桩性状室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1495 - 1498. (ZHANG Xiao-jian, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Model test study on properties of PCC single pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1495 - 1498. (in Chinese))
- [6] 张晓健, 刘汉龙, 高玉峰. PCC 桩芯土室内模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 99 - 102. (ZHANG Xiao-jian, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Model test of inner soil of PCC pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 99 - 102. (in Chinese))
- [7] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZUO Dong-qi. Theory and method for model tests[M]. Beijing: China Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese))
- [8] 郑刚, 刘双菊, 伍止超, 等. 刚性桩复合地基在水平荷载作用下工作性状的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 865 - 868. (ZHENG Gang, LIU Shuang-ju, WU Zhi-chao, et al. Experimental study on behavior of rigid pile composite ground under horizontal load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 865 - 868. (in Chinese))
- [9] 叶琼瑶, 黄绍铿. 软岩嵌岩桩的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 461 - 464. (YE Qiong-yao, HUANG Shao-keng. Model testing study on rock-socketed piles in soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 461 - 464. (in Chinese))
- [10] 卢成原, 孟凡丽, 吴坚, 等. 不同土层对支盘桩荷载传递影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3547 - 3551. (LU Cheng-yuan, MENG Fan-li, WU Jian, et al. Testing study on effect of different soil layers on load transfer of model piles with branch plates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3547 - 3551. (in Chinese))
- [11] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建工业出版社, 1995: 64 - 66. (Editorial Committee of Manual of Pile Engineering. Manual of pile engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995: 64 - 66. (in Chinese))