

DOI: 10.11779/CJGE201901003

# 往复水平荷载作用下不同桩型单桩水平承载性能 足尺对比试验研究

郑刚<sup>1,2</sup>, 刘畅<sup>\*1,2</sup>, 刘永超<sup>3</sup>, 胡秋斌<sup>1</sup>, 王成博<sup>1</sup>, 康谷贻<sup>1</sup>, 刘彦坡<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300354;

3. 天津市桩基技术工程中心, 天津 300301)

**摘要:** 选取天津市汉沽区典型软土地基, 针对预应力管桩、预应力空心方桩、钻孔灌注桩共38根足尺桩, 展开现场原位土体条件下的单桩拟静力试验; 探究各桩型足尺桩在考虑桩-土相互作用条件下受到桩顶低周往复水平荷载作用时的承载性状及抗震性能, 并基于不同桩型做出对比。通过对预应力桩、增配不同数量非预应力筋形成的复合配筋桩及灌注桩的破坏形态、荷载-位移关系、位移延性的对比分析, 结果表明: 常规预应力桩延性较差, 呈脆性破坏; 增配非预应力筋是提高预应力桩抗震性能的有效措施; 复合配筋桩的位移延性及耗能能力得到显著改善, 呈延性破坏; 不同配筋率的灌注桩的位移延性系数均在4.5以上, 具有较好的延性及耗能性能; 复合配筋桩及灌注桩的位移延性系数均随非预应力筋配筋率的增加呈先增大后减小的趋势, 存在一个最优的非预应力筋配筋率, 使得其位移延性最好。

**关键词:** 预应力桩; 钻孔灌注桩; 非预应力钢筋; 拟静力试验; 水平承载性能

**中图分类号:** TU473    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2019)01-0032-09

**作者简介:** 郑刚(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

## Experimental study on horizontal bearing behaviors of different types of full-scale piles under reciprocating horizontal loads

ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, LIU Chang<sup>1,2</sup>, LIU Yong-chao<sup>3</sup>, HU Qiu-bin<sup>1</sup>, WANG Cheng-bo<sup>1</sup>, KANG Gu-yi<sup>1</sup>, LIU Yan-po<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety Ministry of

Education, Tianjin 300354, China; 3. Tianjin Pile Foundation Technology Engineering Center, Tianjin 300301, China)

**Abstract:** The field pseudo-static tests on 38 prototype piles in in-situ soil conditions, which contain prestressed pipe piles, prestressed squared piles and bored cast-in-situ piles, are made in a typical soft soil site of Hangu, Tianjin. The bearing and seismic behaviors of all kinds of full-scale piles under the pile-soil interaction subjected to low-cycle reciprocating horizontal loads at the pile top are studied. The failure modes, load-displacement relationships and displacement ductility among the prestressed pipe piles, composite-reinforced piles with distributed non-prestressed reinforcements and bored cast-in-situ piles are compared. The results indicate that the regular prestressed pipe pile has poor ductility and is brittle during failure. The displacement ductility and energy dissipation capacity of the composite-reinforced piles are obviously improved by adding non-prestressed reinforcements in addition to prestressed steel bars. This consequently leads to the ductile failure mode. Therefore, adding conventional steel without prestress is an effective measure to improve the seismic performance of prestressed piles. The displacement ductility factor of all the bored cast-in-situ piles with different reinforcement ratios exceeds 4.5, which means that their ductility and energy dissipation capacity are good. The displacement ductility factors of both the composite-reinforced piles and bored cast-in-situ piles increase at first then decrease with the reinforcement ratio of the increasing non-prestressed reinforcements while there is an optimal reinforcement ratio of the displacement ductility.

**Key words:** prestressed pile; bored cast-in-situ pile; non-prestressed reinforcement; pseudo-static test; horizontal bearing behavior

## 0 引言

桩基础作为一种被广泛应用的基础类型, 其水平

收稿日期: 2017-10-11

\*通讯作者 (E-mail:lclc74@163.com)

承载性状及抗震性能对地震荷载作用下建筑物的安全起着至关重要的作用。但关于桩基础抗震性能的试验研究存在如下问题:

(1) 桩土的动力相互作用。目前, 关于桩基础水平承载性状以及抗震性能的研究主要是桩在静力和动力荷载作用下的力学性能研究<sup>[1-6]</sup>以及针对桩的破坏机理、抗震性能展开的一些模型试验研究, 包括室内高度缩尺的模型试验和振动台试验<sup>[7-10]</sup>, 难以真实反映桩、土的材料动力非线性相互作用。而室内足尺的构件试验, 因没有考虑实际土层中桩的受力条件和桩土相互作用, 难以考虑地震荷载作用下桩土动力相互作用过程及桩周土对桩水平约束的演化的影响。特别是在认识到常规高强预应力桩(PHC桩)因钢棒延性较差导致桩的脆性弯曲破坏、桩身延性较低从而抗震性能不佳的问题, 近年来也开展了一些在PHC桩中增加非预应力纵向钢筋形成复合配筋高强预应力混凝土桩(PRC桩)试图改善桩身延性的研究<sup>[11-19]</sup>, 但目前已见到的研究均为室内构件试验。

(2) 不同桩型的抗震性能对比。预应力管桩、预应力空心方桩、灌注桩均是地震区建筑物下常用的桩型, 但在其它条件特别是土层条件相同、竖向承载力相同的条件下, 3种常用桩型抗震性能的对比研究几乎为空白。

(3) 现场试验加载方法。传统单桩水平荷载作用下的水平承载力主要采用单向水平加载试验, 并采用单向多级加卸荷循环的加载方式。该加载方式与单桩在实际承受水平向往复地震荷载作用不同。在桩顶往复水平荷载作用下, 桩周土的非线性动力性能及其对桩的动态约束条件在地震激励全过程总的影响可能与现有的单向水平加载制度条件下的影响不同。目前为止尚无专门的现场桩基抗震性能试验的方法和相关标准, 在往复水平荷载作用加载以模拟单桩在地震荷载作用下的水平承载性能方面的现场足尺试验研究几乎为空白。因此, 对足尺桩进行现场抗震性能试验研究是十分必要的。

针对上述问题, 专门打设了38根足尺试验桩, 其中预应力管桩20根, 预应力空心方桩10根, 钻孔灌注桩8根, 展开了多桩型足尺单桩在往复水平荷载循环作用下的大型现场试验。试验场地位于天津市汉沽区, 场地平坦, 各土层在试验场地范围内分布较为均匀。采用低周往复加载进行针对大震大变形条件下单桩水平承载性状及抗震性能的现场试验研究。针对常规预应力混凝土管桩(PHC桩)、常规预应力混凝土空心方桩、增加不同数量非预应力钢筋所形成的复合配筋预应力桩(PRC桩)、不同配筋率的灌注桩进行原位土体条件下的现场试验, 通过对不同桩型滞回性

能、骨架曲线、延性等特性分析, 研究不同桩型的抗水平承载性状, 并在此基础上对不同桩型进行抗震性能对比研究。

## 1 试验设计

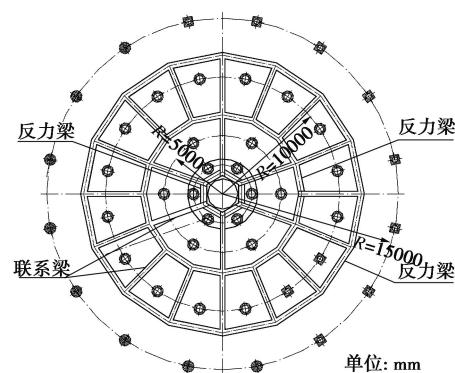
### 1.1 试件设计

预应力管桩和预应力空心方桩包括仅配置PC钢棒的常规预应力桩和同时配置PC钢棒和非预应力纵向钢筋的复合配筋高强预应力混凝土桩。针对3种桩型的38根足尺试验桩, 根据现场土质条件, 按相同竖向单桩承载力特征值原则确定了3种桩型桩长。预应力桩和灌注桩截面设计均采用工程中较为常用的桩型。各试验桩基本参数如表1所示。图1, 2分别为试验桩位平面布置图和现场实景照片。试验桩采取环形布置, 最内圈为6根反力桩, 其它3圈为试验桩。上部设三圈由联系梁相连的反力梁提供加载反力。

表1 试验桩基本参数

Table 1 Basic parameters of test piles

桩型	外径或边长/mm	内径/mm	桩长/m	数量/根
预应力管桩	500	300	20	20
预应力空心方桩	400	220	20	10
灌注桩	500	0	22	8



说明:●—灌注桩,○—预应力管桩,▲—预应力空心方桩,  
其中最内侧一圈为反力桩

图1 试验桩位平面布置图

Fig. 1 Plane layout of test piles



图2 试验现场实景照片

Fig. 2 Photos of test piles

试验桩具体配筋参数如表 2 所示。各试验桩编号依次由桩型代号。预应力钢棒直径-非预应力钢筋直径组成, 其中灌注桩只有桩型代号及非预应力钢筋直径。

表 2 试验桩配筋参数

Table 2 Reinforcement configuration of test piles

类型	编号	预应力 钢棒	非预应力 钢筋	根数
I 型预应 力管桩	PHC9.0-0		无	2
	PRC9.0-8		12Φ8	2
	PRC9.0-10	12Φ9.0	12Φ10	2
	PRC9.0-12		12Φ12	2
	PRC9.0-14		12Φ14	2
II 型预应 力管桩	PHC10.7-0		无	2
	PRC10.7-8		12Φ8	2
	PRC10.7-10	12Φ10.7	12Φ10	2
	PRC10.7-12		12Φ12	2
	PRC10.7-14		12Φ14	2
预应力空 心方桩	HKFZ9.0-0		无	2
	HKFZ9.0-10		8Φ10	2
	HKFZ9.0-12	8Φ9.0	8Φ12	2
	HKFZ9.0-14		8Φ14	2
	HKFZ9.0-16		8Φ16	2
灌注桩	YZ12		8Φ12	2
	YZ14		8Φ14	2
	YZ16	无	8Φ16	2
	YZ18		8Φ18	2

预应力钢棒为 1420 MPa 35 级低松弛预应力混凝土用螺旋槽钢棒 (PC 钢棒), 初始张拉控制应力为 994 MPa; 非预应力钢筋采用 HRB400 级钢筋。两种纵向受力主筋的力学性能指标见表 3。预应力钢棒和非预应力筋采用间隔布置的方式, 管桩预应力钢棒与非预应力筋均为 12 根等间距布置, 方桩预应力钢棒和非预应力筋数量均为 8 根, 灌注桩钢筋为 8 根。管桩的螺旋箍筋采用冷拔低碳钢丝。各类桩型考察的主要因素

表 3 纵向受力主筋材性试验结果

Table 3 Mechanical parameters of longitudinal reinforcements

试验用钢筋	屈服强度 /MPa	极限抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
PC 钢棒	1492.9	1570.0	205.0
HRB400	462.7	671.4	202.6

注: PC 钢棒的屈服强度为名义屈服强度。

表 4 典型土层物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of typical soil layers

土层名称	土层厚 度/m	含水率 /%	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	初始孔隙 比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	塑性 指数	液性 指数	压缩指数 C <sub>c</sub>	回弹指数 C <sub>s</sub>
粉质黏土	1.7	35.6	18.82	0.999	15.3	19.7	12.20	0.92	0.135	0.013
淤泥质粉黏	1.4	39.7	18.16	1.142	11.1	6.9	17.80	1.09	0.185	0.009
粉质黏土	4.9	35.7	18.46	1.000	12.8	22.0	14.56	0.93	0.152	0.004
粉质黏土	4.8	32.2	18.19	0.977	17.7	19.3	14.02	0.61	0.170	0.007
粉土	3.6	21.0	19.61	0.619	8.5	27.0	7.68	0.45	0.097	0.008
粉质黏土	3.6	39.2	18.63	1.033	23.9	18.5	14.43	0.98	0.174	0.026
粉质黏土	4.7	23.0	20.47	0.635	17.6	22.2	10.82	0.49	0.110	0.011
粉土	4.3	17.4	20.99	0.522	13.1	28.2	8.02	0.37	0.085	0.006
粉质黏土	5.0	31.1	19.33	0.845	29.7	24.3	15.52	0.56	0.144	0.014
粉质黏土	6.0	23.6	20.42	0.647	30.1	25.7	13.81	0.44	0.086	0.016

为非预应力钢筋配筋率差异的影响。预应力桩的混凝土强度等级为 C80; 灌注桩的混凝土强度等级为 C30。

### 1.2 场地工程地质条件

试验选取天津市滨海新区典型软弱土场地, 该区域平整开阔, 土质较为均匀, 保证了各试验桩工作条件的一致性。沿深度方向自上而下典型土层分布柱状图见图 3, 各土层物理力学参数如表 4 所示。预应力混凝土管桩、空心方桩采用静压沉桩, 灌注桩采用潜水钻泥浆护壁施工, 各试验桩桩顶均高出地表 0.5 m, 作为水平加载装置的夹持端。各试验桩施工完成后 60 d, 待桩身强度达到要求、桩周土强度恢复后开始加载。

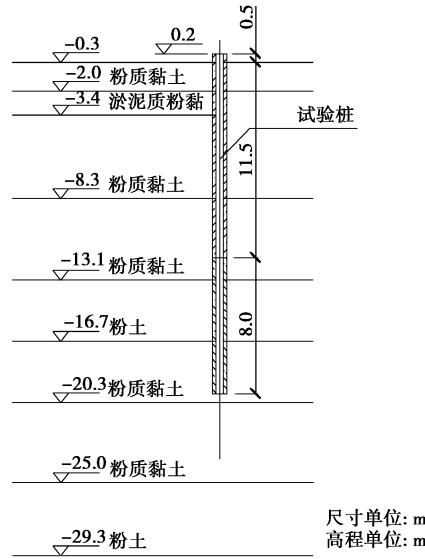


图 3 土层及试桩剖面图

Fig. 3 Profile of soil layers and test pile

### 1.3 试验加载及量测方案

专门研制的试验桩往复水平加载装置如图 4, 5 所示, 利用最大拉压荷载达 500 kN 的液压千斤顶对试验桩桩顶施加水平力, 通过荷载传感器及荷载测试仪控制加载等级。千斤顶的最大行程达 500 mm, 满足可加载至桩周土发生破坏, 同时, 设置大量程位移计测量桩顶水平位移。图 5 为试验现场加载装置布置图。试验加载过程中桩顶位移较大, 桩顶发生倾斜, 千斤

注: PC 钢棒的屈服强度为名义屈服强度。



顶两侧的销轴可以转动保证千斤顶施加水平荷载。桩顶发生倾斜后根据试验现象观察到千斤顶两侧的销轴位置仍保持水平。

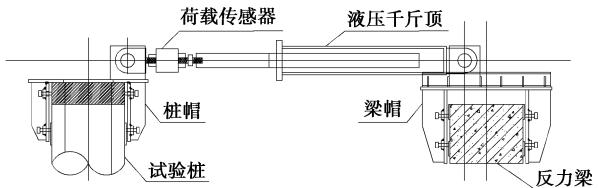


图 4 试验加载装置示意图

Fig. 4 Horizontal loading devices of test pile

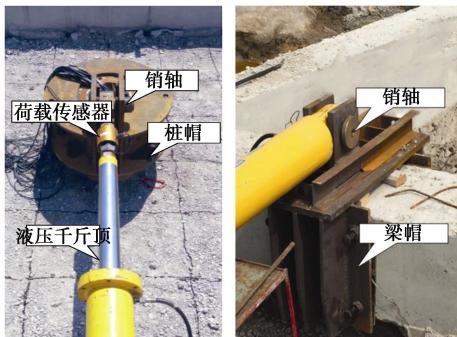


图 5 试验现场加载装置布置图

Fig. 5 Layout of loading devices in test site

试验根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015), 并结合《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中相关规定确定试验加载制度, 采用荷载-位移混合双控制加载, 试件屈服前采用分级力加载, 进入屈服后, 采用分级位移加载, 级差为屈服位移  $\Delta_y$  的倍数; 经前期统计分析, 并根据现场试桩的加载试验结果, 当桩顶荷载达到 100 kN 时桩顶位移接近 40 mm, 桩身钢筋屈服。虽然各桩的屈服位移有所差别, 为了避免加载制度不同对试验结果影响, 力级差统一取 20 kN, 位移级差统一取 20 mm。每级加载均按反向加载、卸载、正向加载、卸载的方式往复循环 3 次, 其中每级荷载施加后, 维持恒载 4 min 测读桩顶水平位移及荷载, 然后卸载至零, 停 2 min 测读水平残余位移或荷载。试验终止条件为荷载下降到峰值荷载的 85%或桩身断裂不适用于继续承载。该拟静力试验具体加载制度如图 6 所示。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 预应力管桩试验结果

#### (1) 滞回曲线

在往复荷载作用下, 通过绘制桩顶水平荷载和水平位移之间的关系曲线可以得到滞回曲线。滞回曲线可以反映构件的强度、耗能能力等特性。PHC 管桩以

及对应的复合配筋 PRC 管桩的滞回曲线对比如图 7 所示, 其中 I 型常规管桩、II 型常规管桩的预应力钢棒数量均为 12 根, 区别在于二者预应力钢棒直径不同, 分别为 9.0, 10.7 mm。

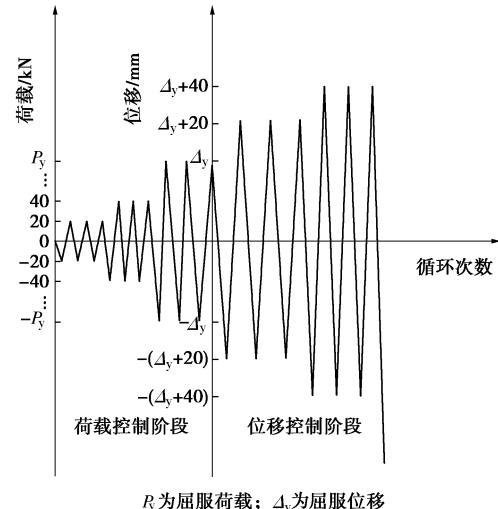


图 6 拟静力试验加载制度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loading plan of pseudo-static tests

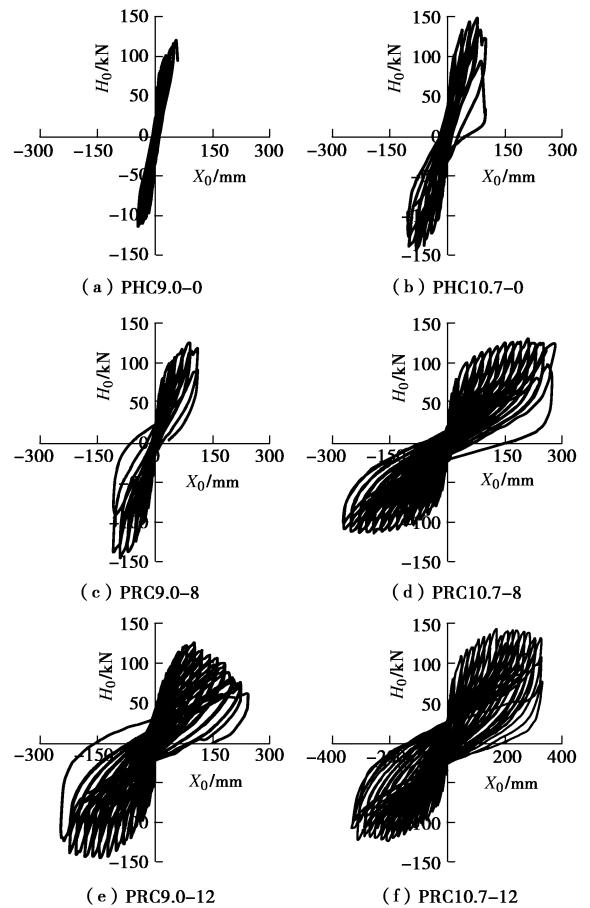


图 7 管桩滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of pipe piles

各桩滞回曲线差异明显, 由图 7 (a)、(b) 可以看出常规管桩的滞回曲线“捏缩效应”明显, 耗能特

性较差。增配非预应力筋形成的复合配筋管桩,如图7(c)~(f)所示,滞回曲线趋于饱满,“捏缩效应”得到了极大的改善,且可以看出滞回曲线饱满程度随着非预应力钢筋直径的增加而提高,管桩的捏缩现象得到改善,耗能能力增强,表明其抗震能力在一定程度上得到了提升。

PHC9.0桩破坏时不能经历较大的水平位移,破坏时呈现高脆性,如图7(a)所示,PHC9.0在水平位移达到55mm时即发生破坏,瞬间丧失承载能力。由图7(d)~(f)可以看出,复合配筋管桩达到峰值荷载后出现一个水平段或下降段,即水平荷载没有显著变化但位移可以持续增加。增配非预应力筋的复合配筋桩,能经历较大的水平位移而不破坏,预应力钢棒被拉断并未导致管桩承载力的急剧下降,呈延性破坏特征。

PHC10.7桩较PHC9.0桩破坏时水平位移明显增加,但其自身脆性性能并没有明显改观,如图7(a)、(b)所示,究其原因在于桩身预应力钢棒的材性没有改变,虽然II型管桩纵筋直径由9.0mm提高到10.7mm,但其加载到一定阶段仍然呈现脆性特质。对比两种类型的桩可以发现,PHC10.7桩相对于PHC9.0桩峰值荷载、极限位移均有所提高,说明预应力钢棒在承受水平往复荷载时也起到了相当重要的作用。

## (2) 骨架曲线

将每级荷载循环的荷载-位移曲线峰值点连接起来形成骨架曲线,骨架曲线反映的是试件的变形历程,各试件骨架曲线如图8所示。

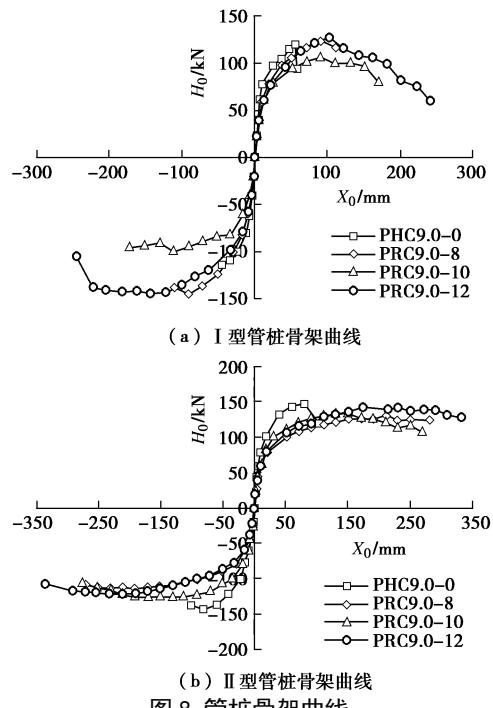


Fig. 8 Skeleton curves of pipe piles

PRC桩与相应PHC桩相比,峰值荷载提高幅度不大,且随着非预应力筋配筋率的增加,管桩水平承载力并未明显提高。这是由于增配非预应力筋提高了管桩的抗侧刚度,桩身弯矩最大位置较常规管桩更深,虽然增配非预应力筋能提高管桩的抗弯能力,但是桩顶水平荷载相对于弯矩最大截面处的作用力矩也更大,所以桩顶水平承载力并没有明显的提高。但是,PRC桩经历较大的水平位移后发生破坏,骨架曲线出现很长的持平段,证明了复合配筋桩具有很好的延性性能,且骨架曲线具有明显的下降段,说明破坏并没有发生脆断,而呈现出延性破坏特征。

通过I、II型管桩骨架曲线的对比可以发现,II型管桩峰值荷载以及极限位移都要优于I型管桩。对于常规桩,II型PHC桩水平极限位移几乎为I型的两倍,但随着非预应力筋配筋的增加,I、II型PRC桩的水平极限位移差别在逐渐缩小,预应力钢棒占主导地位的优势被削弱。

## (3) 桩身破坏方式

各试验桩破坏过程对破坏位置进行了微距照相,如图9所示为PHC9.0-0和PHC10.7-0桩破坏位置图,管桩在破坏时在桩身某一截面形成贯穿的环形裂缝,桩身截断,在截断位置的上部和下部均有裂缝宽度较小的环形裂缝,从加载方向轴线上沿桩壁向两边发展,管桩的破坏均为受弯破坏。在桩身发生弯曲破坏时,桩身弯矩最大位置最先发生破坏,从图9可以看出PHC9.0-0桩弯矩最大位置在桩顶以下2.2m附近,PHC10.7-0桩弯矩最大位置在桩顶以下3.6m附近。

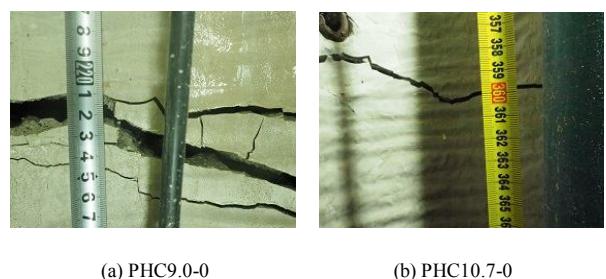


图9 桩身破坏位置

Fig. 9 Damage location of pile

## (4) 延性

延性是结构构件在破坏之前的变形能力。延性系数是结构构件延性量化的指标。延性系数越大,说明结构构件的延性越好,耗能能力和承受非弹性变形的能力越强,反之则越差。

结构构件的位移延性系数是指构件的极限位移 $\Delta_u$ 和相应的屈服位移 $\Delta_y$ 的比值,如下所示:

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad , \quad (1)$$

式中,  $\Delta_c$  为构件的极限位移, 取名义极限荷载即骨架曲线峰值荷载下降到 85% 时对应的水平位移为极限位移;  $\Delta_y$  为构件的屈服位移, 采用能量等值法<sup>[20]</sup>确定。

由上式计算得到的各试件极限位移、屈服位移以及位移延性系数正、反向均值如表 5 所示。

表 5 管桩位移及延性系数

Table 5 Displacements and ductility coefficients of pipe piles

桩型	屈服位移	极限位移	延性系数
	均值/mm	均值/mm	均值
PHC9.0-0	23.0	55.0	2.43
PRC9.0-8	36.6	110.5	3.03
PRC9.0-10	41.7	166.5	4.02
PRC9.0-12	53.7	203.3	3.75
PRC9.0-14	73.3	251.6	3.45
PHC10.7-0	35.8	101.7	2.86
PRC10.7-8	41.7	180.6	4.32
PRC10.7-10	47.1	253.4	5.41
PRC10.7-12	79.3	334.5	4.23

相较于 PHC 桩而言, PRC 桩的屈服位移和极限位移都有明显的提高, 说明其抵抗变形能力增强。PRC 桩相较于 PHC 桩延性系数明显提高, PHC9.0 和 PHC10.7 延性系数均小于 3, 而增配非预应力筋后, PRC 桩延性系数均达到 3 以上。PHC10.7 的延性高于 PHC9.0 达 17.7%, 预应力钢棒直径增加对提高管桩延性具有一定作用, 但效果有限。

通过增配非预应力钢筋改善管桩延性, I 型管桩延性最大提高了 65.4%, II 型管桩延性最大提高了 89.2%, 延性系数最高超过 5.0, 效果显著, 说明在管桩中增配非预应力钢筋, 可以达到很好的改善延性效果。

通过非预应力筋改善管桩延性, 随着非预应力筋配筋率的提高, 两种桩型延性系数均呈先增大后略微降低的趋势, 原因在于随着非预应力筋配筋率的提高, 极限位移的增长速率落后于屈服位移的增长, 导致其比值减小。这也表明通过增配非预应力钢筋来提高预应力桩的延性时, 并非配筋率越高效果越好, 而是存在一个最优配筋率。

## 2.2 预应力方桩试验结果

### (1) 滞回曲线及骨架曲线

HKFZ 方桩和复合配筋方桩的滞回对比曲线如图 10 所示。HKFZ 方桩与 PHC 管桩同样属于预应力高强混凝土预制构件, 二者具有很多相似性, 滞回曲线特性相似, 均呈现出很明显的捏缩现象, 经历的加载次数较少即突然丧失承载力而发生脆性破坏。

对于方桩通过增配非预应力筋形成的复合配筋方桩, 其耗能能力、延性提高效果同样显著。图 10 (b)

HKFZ9.0-10 方桩, 可承受更多次的加载循环, 且破坏时变形较大, 承载力有持平段, 而不是突然丧失, 属于延性破坏。复合配筋方桩随着配筋率的增加, 滞回曲线愈加饱满, 捏缩现象极大改善, 耗能能力显著增强, 抗震能力提高。

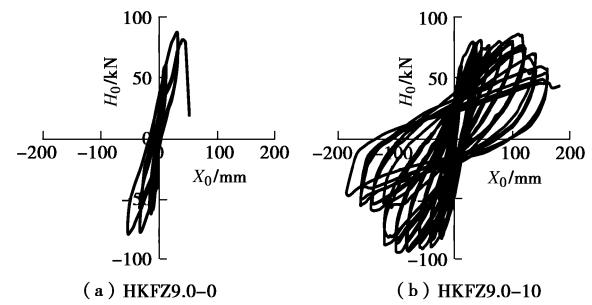


图 10 方桩滞回对比曲线

Fig. 10 Hysteresis curves of square piles

方桩及复合配筋方桩的骨架曲线如图 11 所示。常规 HKFZ 方桩破坏时呈现脆性破坏特征, 骨架曲线出现明显的尖峰, 构件达到最大承载力后曲线突然下降; 复合配筋方桩呈现出延性破坏的特征, 在构件到达最大承载力后, 能够经历很大变形, 而承载力没有明显降低, 骨架曲线有较长的平台段。

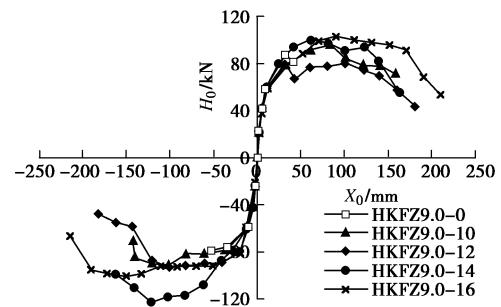


图 11 方桩骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of square piles

HKFZ9.0-0 当水平位移达到 47 mm 时, 即发生脆性破坏, 破坏时经历的水平位移较小。复合配筋方桩随着非预应力钢筋直径的增加, 试件水平承载力并未显著提高, 最大仅提高了 33.3%。极限荷载并未随着非预应力钢筋配筋率的增加而持续增大。但是, 同管桩一样, 复合配筋方桩可以经历较大的水平位移后发生破坏, 且随着非预应力钢筋配筋率的增加, 极限位移一直处于增长状态, 最大提高幅度为 296.2%; 即使非预应力钢筋配筋率为 0.52% 的 HKFZ9.0-10 较常规方桩极限位移也提高了 170.4%, 这说明配置非预应力钢筋对提高构件的抗变形能力具有显著的作用。

### (2) 延性

按前述方法确定各试件的极限位移、屈服位移以及位移延性系数正反向均值如表 6 所示。由表 6 可以

看出, 方桩的屈服位移、极限位移整体随着配筋率的增加呈现出增长的趋势, 但延性系数并没有随着非预应力钢筋配筋率的增加而持续增长, 而是呈现出先增大后减小的变化规律。是由于屈服位移、极限位移增长速率不同, 所以导致了其比值的变化。根据建筑上部结构抗震对位移延性的要求, 一般上部结构、构件的位移延性要求不小于 3, 地下结构可适当降低要求, 本次试验结果增配非预应力筋后的复合配筋预应力桩位移延性均大于 3, 满足抗震要求。

表 6 方桩位移及延性系数

Table 6 Displacements and ductility coefficients of square piles

桩型	屈服位移 均值/mm	极限位移均 值/mm	延性系数 均值
HKFZ9.0-0	18.0	47.0	2.62
HKFZ9.0-10	35.6	127.1	3.57
HKFZ9.0-12	27.1	135.1	4.98
HKFZ9.0-14	36.2	150.7	4.38
HKFZ9.0-16	42.8	186.1	4.35

HKFZ9.0-12 的延性系数在几根桩中达到最大为 4.98, 相较于常规桩增幅达 90.1%, 其非预应力筋的配筋率为 0.74%。这说明就抗震性能而言, 同复合配筋管桩一样, 复合配筋方桩并不是其非预应力钢筋掺入量越多越好, 而是存在一个最优配筋率的范围, 超过该范围, 会降低非预应力钢筋提高桩身延性的效果。本试验结果为, 当增配 8 根直径为 12 mm 的非预应力钢筋时, 即当非预应力钢筋与预应力钢棒面积比为 1.78 时, 构件的延性提高最多。

### 2.3 钻孔灌注桩试验结果

#### (1) 滞回曲线

图 12 为一组钢筋混凝土钻孔灌注桩的荷载-位移滞回曲线。从图中可以看到, 各试验桩的荷载-位移关系总体上依次经历了上升、水平、缓降、骤降 4 个过程。

各试验桩的荷载-位移滞回曲线均相对较为饱满, 耗能性能整体较好; 进入位移控制加载阶段后, 滞回环的捏缩效应逐渐改善, 在骤降阶段之前, 随着加载位移的增大, 滞回环饱满程度不断增加, 桩身破坏呈现出延性破坏的特征。

#### (2) 骨架曲线

图 13 为各钻孔灌注桩的骨架曲线。试验中各灌注桩的桩顶位移发展规律基本一致, 在力加载控制阶段桩顶位移上升较快, 在位移加载控制阶段桩顶位移都经历了一个较大的水平段后桩身失去承载能力, 且随着纵筋直径的增大, 桩顶的极限位移逐渐增大, 屈服平台的范围逐渐扩大, 塑性变形能力不断提高。YZ18 的极限位移达到了 185 mm, 相比于 YZ12 提高了 200%, 纵筋配筋率对灌注桩的变形能力影响较大。

从 YZ12 到 YZ18, 随着纵向受力主筋配筋率的增

加, 试验桩正、反向单桩水平承载力峰值的均值依次为 61.31, 75.62, 95.45, 110.36 kN; 可见, 考虑桩-土共同作用条件下, 在一定的纵筋配筋率范围内, 钻孔灌注桩单桩水平承载力随纵筋配筋率的增加单调递增。

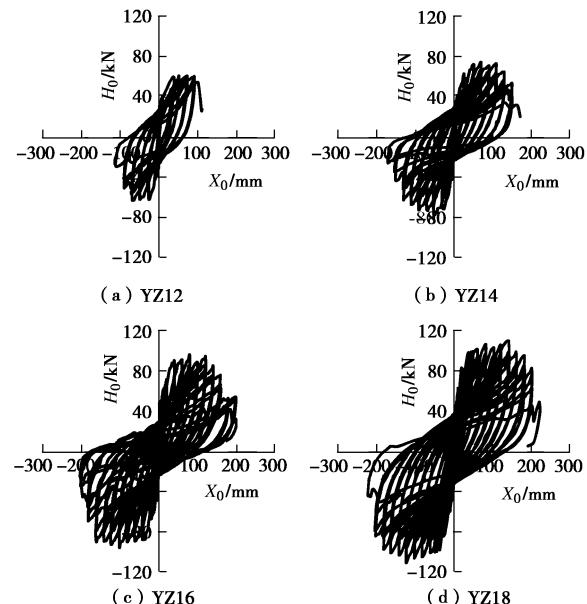


图 12 灌注桩荷载-位移滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves of load and deformation

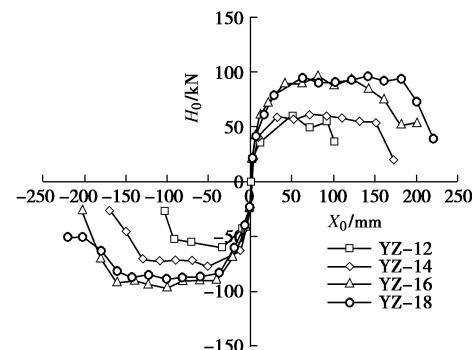


图 13 灌注桩骨架曲线

Fig. 13 Comparison of envelope curves

#### (3) 延性

表 7 给出了钻孔灌注桩的屈服位移、极限位移及位移延性系数正、反向加载的均值。

表 7 钻孔灌注桩位移延性系数

Table 7 Displacement ductility coefficient of bored cast-in-situ piles

试验桩编号	屈服位移 均值/mm	极限位移均 值/mm	位移延性系 数均值
YZ12	19.9	91.3	4.60
YZ14	25.8	125.5	4.86
YZ16	31.5	159.6	5.10
YZ18	37.6	185.5	4.93

由表 7 可看到, 随着纵筋配筋率的增加, 试验桩的屈服位移平均值从 19.9 mm 增至 37.6 mm, 增长了 89%; 同时, 极限位移平均值从 91.3 mm 增至 185.5 mm, 增幅达 103.1%。增配纵向受力钢筋使钻孔灌注桩的极限位移得到显著提高, 灌注桩在破坏前可经历更大的水平位移。各试验桩的位移延性系数均满足大于 3 的要求, 可满足基础构件在地震作用下的延性要求。随着纵筋配筋率的增加, 试验桩的位移延性系数平均值先增加后减小, 在配筋率为 0.82% (YZ16) 时达到最大值 5.10。因此, 从位移延性这一角度分析, 钢筋混凝土钻孔灌注桩同样存在着一个最优配筋率。

#### 2.4 各桩型位移延性对比

表 8 给出了位移延性系数最大、最小的桩型。可以看到, 各桩型中灌注桩的位移延性处于一个整体较高的水平, 位移延性系数在 4.5 以上。常规预应力管桩、常规预应力空心方桩的位移延性均较低, 且均小于 3; 通过增配非预应力钢筋, 预应力桩的位移延性得到显著提高, 复合配筋预应力桩的位移延性系数最大达到了 5.41, 达到了灌注桩的延性水平, 较好地满足了基础构件的抗震要求。增配非预应力钢筋是改善预应力桩抗震性能的有效措施。

表 8 各桩型位移延性系数

Table 8 Displacement ductility coefficients of piles

桩型	试验桩编号	屈服位移均值 /mm	极限位移均值 /mm	位移延性系数均值
I型预应力管桩	PHC9.0-0	23.0	55.0	2.43
	PRC9.0-10	41.7	166.5	4.02
II型预应力管桩	PHC10.7-0	35.8	101.7	2.86
	PRC10.7-10	47.1	253.4	5.41
预应力空心方桩	HKFZ9.0-0	18.0	47.0	2.62
	HKFZ9.0-12	27.1	135.1	4.98
灌注桩	YZ12	19.9	91.3	4.60
	YZ16	31.5	159.6	5.10

### 3 结 论

(1) 常规预应力混凝土管桩、空心方桩在水平低周往复荷载作用下的荷载-位移滞回曲线“捏缩效应”严重, 耗能特性较差。增配非预应力筋形成的复合配筋预应力桩, 滞回曲线的“捏缩效应”得到了较大的改善, 滞回环饱满程度随着非预应力钢筋配筋率的增加而提高。

(2) 常规预应力混凝土管桩、空心方桩在达到单桩水平承载力峰值后, 继续加载, 水平承载力迅速下降, 呈脆性破坏。增配非预应力钢筋可显著改善常规预应力桩的变形性能, 各复合配筋预应力桩的屈服位移、极限位移均随非预应力筋配筋率的增加而增长, 在经历较大位移后发生破坏, 复合配筋预应力桩的破坏过程呈延性破坏。

(3) 增配非预应力钢筋可显著改善预应力混凝土管桩、空心方桩的位移延性, 增配一定量非预应力筋后复合配筋预应力桩可满足抗震性能的要求。随着非预应力钢筋配筋率的增加, 复合配筋预应力桩的位移延性系数呈先增大后减小的趋势, 存在一个最优的非预应力筋配筋率, 使得其位移延性最佳。

(4) 灌注桩试验桩的位移延性系数均大于 3, 具有较好的延性。随着配筋率的增加, 灌注桩的位移延性系数同样呈现出先增大后减小的规律, 存在一个位移延性的最优配筋率。

(5) 常规预应力混凝土管桩、空心方桩的极限位移值和位移延性系数均显著小于常规灌注桩, 当增配适量非预应力钢筋后, 其极限位移值和位移延性系数均可达到与常规灌注桩相当, 抗震性能显著改善。在 PRC 桩和灌注桩都能满足抗震要求时, PRC 桩水平承载力更高。

本次试验未考虑竖向力对桩体抗震性能影响, 后期将通过试验及数值分析继续研究。

### 参考文献:

- [1] 刘春原, 张振拴, 母焕胜. 预应力混凝土管桩的抗震性能及新进展 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 1-2. (LIU Chun-yuan, ZHANG Zhen-zhuan, MU Huan-sheng. Seismic performance and new progress of prestressed concrete pipe pile [M]. Beijing: China Communications Press, 2013: 1-2. (in Chinese))
- [2] DAVISSON M T, SALLEY J R. Model study of laterally loaded piles [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1970, **96**(5): 1605-1627.
- [3] MAYNE P W, KULHAWY F H. Laboratory loaded modeling of laterally loaded drilled shafts in clay [J]. J Geotechnical Engineering, 1995, **121**(12): 827-835.
- [4] DYSON G J, RANDOLPH M F. Monotonic laterally loading of piles in calcareous sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(4): 346-352.
- [5] 王 钰, 林 军, 陈锦剑, 等. 软土地基中 PHC 管桩水平受荷性状的试验研究 [J]. 岩土力学, 2005, **26**(增刊): 39-42. (WANG Yu, LIN Jun, CHEN Jin-jian, et al. Field test for the behavior of pre-stressed pipe piles in soft subsoil under lateral load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(S0): 39-42. (in Chinese))
- [6] 周万清, 蔡 健, 林奕禧, 等. 深厚软土地基细长 PHC 管桩水平荷载试验研究 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, **35**(7): 131-136. (ZHOU Wan-qing, CAI Jian, LIN Yi-xi, et al. Experimental investigation into PHC pipe piles

- under lateral load in deep soft soil foundation[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, **35**(7): 131 – 136. (in Chinese))
- [7] 王铁成, 杨志坚, 赵海龙, 等. 改善预应力高强混凝土管桩抗震性能试验研究及数值分析[C]// 第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会论文集. 九江, 2013: 45 – 53. (WANG Tie-cheng, YANG Zhi-jian, ZHAO Hai-long, et al. Experimental study and numerical analysis on seismic behavior of prestressed high strength concrete pipe pile[C]// Proceedings of the 16th National Conference on the Study of Concrete and Prestressed Concrete and the 12th Session of the Academic Conference of Prestress. Jiujiang, 2013: 45 – 53. (in Chinese))
- [8] 王铁成, 王文进, 赵海龙, 等. 不同高强预应力管桩抗震性能的试验对比[J]. 工业建筑, 2014, **44**(7): 84 – 89. (WANG Tie-cheng, WANG Wen-jin, ZHAO Hai-long, et al. Seismic performance of different prestressed high strength concrete pipe piles[J]. Industrial Construction, 2014, **44**(7): 84 – 89. (in Chinese))
- [9] 李艳艳, 陈艳风, 刘坤, 等. 预应力高强混凝土管桩抗震性能试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2013, **42**(5): 99 – 103. (LI Yan-yan, CHEN Yan-feng, LIU Kun, et al. Seismic performance of prestressed high-intensity concrete pile[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013, **42**(5): 99 – 103. (in Chinese))
- [10] 刘春原, 李光宏, 李兵. 预应力管桩振动台试验的数值分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 1): 265 – 269. (LIU Chun-uan, LI Guang-hong, LI Bing. Numerical analysis of shaking table test for prestressed pipe piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S1): 265 – 269. (in Chinese))
- [11] 张忠苗, 刘俊伟, 谢志专, 等. 新型混凝土管桩抗弯剪性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 271 – 277. (ZHANG Zhong-miao, LIU Jun-wei, XIE Zhi-zhuan, et al. Experimental study on flexural and shearing properties of modified concrete pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 271 – 277. (in Chinese))
- [12] 张忠苗, 刘俊伟, 邹健, 等. 加强型预应力混凝土管桩抗弯剪性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, **45**(6): 1074 – 1080. (ZHANG Zhong-miao, LIU Jun-wei, ZOU Jian, et al. Experimental study on flexural and shearing property of reinforced prestressed concrete pipe pile[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2011, **45**(6): 1074 – 1080. (in Chinese))
- [13] 王铁成, 杜宙芳, 赵海龙, 等. 混合配筋管桩的抗震性能试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2015(3): 27 – 32. (WANG Tie-cheng, DU Zhou-fang, ZHAO Hai-long, et al. Experimental research on aseismic behavior of pipe piles with hybrid reinforcement[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015(3): 27 – 32. (in Chinese))
- [14] 戎贤, 邓昊, 李艳艳. PHC 管桩抗震性能及其改善措施的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(9): 32 – 36. (RONG Xian, DENG Hao, LI Yan-yan. Experimental study on seismic behavior and improvement measures of PHC pipe pile[J]. China Concrete and Cement Products, 2012(9): 32 – 36. (in Chinese))
- [15] 戎贤, 王旭月, 李艳艳. 反复荷载作用下改善的 PHC 管桩的抗震性能试验研究[J]. 建筑科学, 2013, **29**(7): 59 – 65. (RONG Xian, WANG Xu-yue, LI Yan-yan. Test study on seismic behavior of the improved PHC pipe piles under low cyclic loading[J]. Building Science, 2013, **29**(7): 59 – 65. (in Chinese))
- [16] 戎贤, 齐晓光, 李艳艳. 预应力高强混凝土管桩滞回性能的试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2013, **43**(2): 88 – 91. (RONG Xian, QI Xiao-guang, LI Yan-yan. Experimental research on hysteretic behavior of prestressed high strength concrete pipe piles[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013, **43**(2): 88 – 91. (in Chinese))
- [17] 王新玲, 杜琳, 黄伟东. 混合配筋预应力混凝土管桩抗弯刚度模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, **34**(6): 80 – 84. (WANG Xin-ling, DU Lin, HUANG Wei-dong. Stiffness study of prestressed and reinforced concrete compounded pipe pile[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, **34**(6): 80 – 84. (in Chinese))
- [18] 王新玲, 高会宗, 周同和, 等. 新型混合配筋预应力混凝土管桩抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, **42**(8): 64 – 68. (WANG Xin-ling, GAO Hui-zong, ZHOU Tong-he, et al. Experimental studies of flexural behavior of new type prestressed concrete pipe pile with compound unprestressed reinforcement[J]. Industrial Construction, 2012, **42**(8): 64 – 68. (in Chinese))
- [19] 王新玲, 冯香玲. 混合配筋新型预应力混凝土管桩抗弯性能研究[J]. 施工技术, 2012, **41**(16): 118 – 122. (WANG Xin-ling, FENG Xiang-ling. Study on flexural behavior of new type prestressed concrete pipe pile for compounding reinforcement[J]. Construction Technology, 2012, **41**(16): 118 – 122. (in Chinese))
- [20] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004. (LI Zhong-xian. Theory and technique of engineering structure experiments[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004. (in Chinese))