

# 桥梁桩基础抗震性能试验研究综述

张德明\* 叶爱君

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要** 对近几十年来国内外有关桩基弹塑性变形性能、土体对桩基的水平抗力特性以及同时考虑桩土及其相互作用时桩基抗震性能的试验研究现状做一梳理,以阐明国内外桥梁桩基抗震能力研究中已取得的成果,并对今后桥梁桩基抗震性能的试验研究重点提出几点建议。

**关键词** 桥梁, 桩基础, 抗震性能, 试验

## Review of Experimental Research on Seismic Performance of Bridge Pile Foundations

ZHANG Deming\* YE Aijun

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** This paper summarily describes the present status of experimental research on inelastic behavior of pile foundation and the horizontal soil resistance characteristics. Tests with the presence of both pile and soil so as to take account of the pile-soil interaction effects on pile foundation seismic performance are also summarized. The results of pile foundation seismic performance are reviewed, and the important problems in future research are proposed.

**Keywords** bridge, pile foundation, seismic performance, experimental

### 1 引言

桩基础是一种应用广泛的深基础形式,与其它形式的基础相比,能较好地适应复杂地质条件以及各种荷载情况,同时具有承载能力大、稳定性好、差异沉降小等优点,因而近年来在我国的城市高架桥、大型越江或跨海桥梁工程中得到了广泛应用。但是,地震灾害调查表明,桩基础仍然是桥梁结构体系中的地震易损构件。在最近的几次城市破坏性地震中,桥梁桩基都遭到了不同程度的破坏,如桩帽与承台的连接失效、桩基随土体侧移引起落梁,上部结构传下来的惯性力所引起的桩基剪切、弯曲破坏等。然而,对桩基础在地震水平作用下的力学行为尚未有较为透彻的认识,这在很大程度上影响着设计者准确预测这类结构的

震损伤状态。特别是在高桩承台基础抗震能力方面,目前国内外都缺乏系统深入的研究,这也是我国大型越江和跨海桥梁工程抗震性能研究中面临的一个瓶颈问题。因此,基于桩土共同作用的抗震试验,探讨桩基结构的地震破坏机理及其抗震能力,并在此基础上建立有效的数值模拟技术和适用的桩基抗震性能评估方法显得尤为迫切。有鉴于此,本文对目前为止国内外有关桩基础抗震性能试验做一综述,归纳所取得的一些成果,并对今后应主要采用的试验研究方法和研究重点提出自己的见解。

### 2 国内外研究现状

为了能够比较准确地把握桩基的抗震性能,需要对其主要影响因素即桩身的弹塑性变形性

收稿日期: 2010-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目“大型桥梁高桩承台基础的地震损伤机理研究”,项目号 50878147

\*联系作者, Email: wszdm0503@163.com

能,桩周土体对桩基的动力阻抗特性和桩土相互作用做深入的研究。目前国内外所开展的桩基抗震性能试验根据试验侧重点的不同,主要可分为三类:①研究桩身的弹塑性变形性能。这类试验集中在室内拟静力试验,通常桩身周围不包含土体,而是以一种确定的加载模式模拟桩身的弯矩分布,循环加载到桩基破坏,以此研究桩基的曲率延性能力和耗能能力。②研究土体对桩基的水平抗力特性。主要是对广泛采用的 $p-y$ 曲线的研究,试验包括现场试验和离心机试验。③考虑桩土相互作用时桩基础抗震性能试验,这是研究桩基抗震性能最可靠的试验方法,包括用盛土容器在室内进行的拟静力试验以及现场足尺试验。通过桩体和土体均进入非线性状态后的力学行为如非线性力-位移曲线关系、曲率延性、位移延性、耗能能力、塑性铰产生机制、横向极限承载能力等的研究,阐明桩基础的地震损伤、破坏机理并对其抗震能力进行评价。以下分别对这三个方面的试验研究做一综述。

## 2.1 桩身弹塑性变形性能试验研究综述

国外室内试验研究桩基弹塑性变形性能时大都是取出承台下两零弯矩点之间的桩身集中研究其塑性变形能力。加载时桩身水平放置,两端铰支,加载模式有跨中单点集中加载也有两点或三点甚至四点、五点对称加载,目的是尽可能准确地模拟原型桩基地震作用下的弯矩分布。

Sheppard<sup>[6]</sup>1983 年对 3 个在加利福尼亚州做的有关预应力混凝土桩基弹性及非线性变形性能的试验作了报告。共测试了 5 个方桩,试件中间加集中力或对称于桩基中部的两点施加集中力模拟弯矩分布。实验结果表明,桩基延性性能与箍筋的用量有很大关系。除配箍率为 0.021 的试件在整个非线性变形试验过程中表现出良好的延性性能外,所有试件均是在裂缝刚形成时即发生脆性破坏。

日本学者 Ikeda<sup>[5]</sup>等于 1982 年对 3 组预应力混凝土空心桩基础进行了延性能力的拟静力试验研究。试验测试了箍筋用量及纵向非预应力筋对预应力混凝土桩基延性的影响。结果显示,配置充足的横向箍筋可以有效约束核心混凝土使桩基呈延性反应,而非预应力筋也能给预制桩提供一定的延性水平。

ATC 3-06(ATC 1978)规定预应力混凝土桩

基础由于延性不佳不能用于强震区的结构。为此,Banerjee<sup>[7]</sup>等做了一系列拟静力试验研究预制桩在轴力及循环荷载作用下的局部曲率延性能力,试件的制作以美国西部沿海地区大量使用的桩基为参照,加载布局与 Sheppard<sup>[6]</sup>类似。试验表明桩基的抗震性能受箍筋数量的影响很大。以体积配箍率为参数,可以将预制桩基分为三个性能等级:配箍率 $\rho_v < 0.0035$ 时,预制桩不适合用于地震区,因为横向约束不足,截面的非线性变形能力很差。 $0.0035 < \rho_v < 0.02$ 时,其曲率延性能力对于大部分地区除了强震地带外均可以得到保证。 $\rho_v > 0.02$ 时,其曲率延性能力很大,此时的桩基抗震性能由纵筋的抗拉强度决定。非预应力筋在没有横向箍筋时,对桩基的延性能力没有多少贡献,这与 Ikeda<sup>[5]</sup>的结果相反。空心截面预制桩是由于内壁的破裂而破坏,箍筋对其性能影响很小。

新西兰设计规范 NZS 3101(1982)规定,对于预应力混凝土桩必须配置大量额外的非预应力筋和横向箍筋以满足强烈地震作用下的结构延性需求。为此,Park<sup>[1]</sup>和 Pam<sup>[2]</sup>做了一系列试验用以验证是否有必要在预应力混凝土桩基础中配置额外的非预应力筋及大量的箍筋。共测试了 11 个试件,试验中变化的参数为螺旋箍筋的用量、轴压比、是否含非预应力筋等。试验发现根据 NZS 3101 配置横向箍筋的预应力混凝土桩基础延性性能可得到保证,同时也发现非预应力筋对桩基延性性能没有影响。为了进一步掌握预应力混凝土桩基础的延性性能和耗能能力,Pam<sup>[3]</sup>等又做了 6 个试件的循环加载试验,试件制作同 Pam<sup>[2]</sup>。但这次试验变化参数主要为箍筋的用量和等级。两个试件用低碳钢箍筋,其余四个试件箍筋用冷拉钢筋。试验得出的主要结论为,桩基按 NZS 3101 配置横向箍筋在轴压比小于 50% 时,不管是低碳钢钢筋还是冷拉钢筋均可获得满意的延性性能。但是,冷拉钢筋延性不如低碳钢钢筋,因此,当用低于规范要求的配箍率时,应使用低碳钢钢筋。同时建议箍筋用量的计算应基于有效轴力(恒载、地震作用与预应力的和)。在有效轴压力下,配置 NZS 3101 规定的箍筋用量的 24% 到 50% 时,相应的位移延性系数可达 2.5 到 7.0。

为了研究横向箍筋及土体可能提供的外部约束对桩基塑性铰变形能力及滞回耗能的影响,Budek<sup>[8]</sup>于 1997 年对加州运输局常用的钻孔灌

注桩及预应力混凝土桩基础做了一系列试验。主要变化参数包括轴压比、体积配箍率和塑性铰区是否受土体的外部约束以及塑性铰区是否用玻璃纤维加强等。通过多点集中循环加载以尽可能准确地模拟原型桩基地震荷载作用下的弯矩分布。试验用鞍座支撑试件周边上下各  $100^\circ$  范围内的橡胶衬垫来模拟土体对桩基提供的外部约束作用。Budek 是第一个试图通过室内试验系统研究土体对桩身的约束作用对其抗震性能的影响的学者。试验结果表明:土体提供的外部约束可提高截面的有效约束程度,提高塑性铰的转动能力,对桩基的延性性能有很大贡献。配箍率对桩基延性性能也有很大影响。对于实心截面预应力混凝土桩基础,其潜在的塑性变形能力及延性性能比通常认为的(如 ATC 3-06、NZS 3101)要好很多。空心截面预应力混凝土桩基础试验中桩基试件均是由于内壁的破裂导致强度急剧下降而破坏,滞回耗能能力很小,箍筋、外部约束及非预应力纵筋对其延性性能影响都很小。用玻璃纤维加强桩基塑性铰区,虽然可以提高弯曲强度,但塑性转动集中于弯曲裂缝处,致使塑性铰长度变小,导致弯曲延性性能大幅下降,且均是由于预应力筋的断裂而发生破坏。因此,桩基土体中塑性铰区不适合用玻璃纤维等加强。

国内目前开展的桩基延性能力试验很少。周敫<sup>[26]</sup>利用拟静力试验对钢筋混凝土高桩承台基础进行了抗震性能研究,并重点关注了钢护筒对桩承台连接处塑性铰的非线性变形能力提高作用。试验利用抗弯钢板的抗弯刚度和拉杆轴向刚度的组合来模拟土弹簧的水平刚度。原型场地土类型按照单一的匀质土层考虑,为中密的中砂。抗弯钢板的滞回曲线和原型土的  $p-y$  曲线相近。桩基通过抱箍和拉杆与抗弯钢板连接。试验采用变幅、等幅混合位移控制的水平加载制度。试验观察到所有试件最终都是呈弯曲破坏为主的延性破坏形态。其中,无钢护筒加强的试件先在桩头处屈服形成塑性铰,然后在土体中形成第二个塑性铰,而钢护筒加强的试件则相反。所有试件均是边桩先屈服先破坏,因此,群桩体系的抗震性能是由边桩决定的。在桩头—承台连接部位采用钢管加固能有效地提高桩基弯曲强度和有效约束程度,延缓混凝土的压碎和失效。

## 2.2 土体对桩基的水平抗力特性研究综述

在建立模型进行桩基抗震能力评价时,基本

而重要的问题是正确地描述桩侧土体的力学状态和合理地考虑桩侧土体对结构力学行为的影响。其中试桩试验得出的  $p-y$  曲线应用的最为广泛。 $p-y$  曲线法区分了水上和下水土的性质并引入  $P$  乘子考虑了群桩效应,能较为真实地把地基的非弹性性质及由地表开始向土体中的进行性破坏现象反映到桩的计算中。基于众多学者的研究成果,美国石油学会 API 规范(1993)和我国《港口工程桩基础设计规范》(JTJ 254—98)都将  $p-y$  曲线法列为分析横向荷载作用下桩基性状的方法。

McClelland 和 Focht<sup>[38]</sup>就试桩的实测反力与变位的  $p-y$  曲线与同时进行的土的固结不排水室内三轴试验应力应变曲线存在相互关系,提出一种求解桩非线性横向阻力的方法,该方法即  $p-y$  曲线法的起源。Matlock<sup>[12]</sup>对钢管桩进行了水平加载试验,桩径 0.33 m,桩长 12.8 m。选用土体为 Austin 湖附近的软粘土。之后,Matlock 对钢管桩进行了修复,对 Texas 州 Sabine Pass 地区的粘土也进行了横向加载试验。经过对试验数据的分析拟合,提出了水下软粘土的  $p-y$  曲线。Reese, Cox 和 Koop<sup>[13]</sup>对钢管桩进行水平加载试验,桩径 0.6 m,桩长 15.24 m。选用土体为 Texas 州 Manor 地区附近的硬粘土,试验得到了水下硬粘土的  $p-y$  曲线。Reese 和 Welch<sup>[14]</sup>在 Texas 州 Houston 地区硬粘土质中进行了钻孔灌注桩的横向加载试验。通过对试验的归纳研究,提出了水上硬粘土的  $p-y$  曲线。Cox, Reese 和 Grubbs<sup>[15]</sup>在 Mustang 岛地区进行了大量钢管桩的横向加载试验。桩径 0.6 m,埋深 21 m,所选土体为单一砂土。从土楔体极限平衡理论推出砂土的极限土抗力,以此建立了砂土的  $p-y$  曲线。

此后,许多学者对经典的 Matlock-Reese 曲线进行了深入的研究和探讨,并提出了一些确定  $p-y$  曲线的新方法。Ismael<sup>[24]</sup>在 Kuwait 地区中等密度胶结土进行了单桩和小型群桩的静载试验。12 根测试桩均为直径 0.3 m 的钢筋混凝土钻孔桩。忽略胶结土中粘性成分的影响,用砂土  $p-y$  曲线(Reese)求得的桩身变形比试验测得的桩身位移大得多。于是 Ismael 提出了同时考虑内摩擦角和剪切强度的抛物线型  $p-y$  曲线。Wallace<sup>[16]</sup>和 Janoyan<sup>[37]</sup>等对一大直径钻孔灌注桩基础进行了水平循环加载试验,桩径 2 m,土质为硬黏土,试验发现考虑桩基非线性时对  $p-y$  曲线有很大影响。Boulanger<sup>[17]</sup>等学者通过大型的

离心机试验,对各种类型的桩基础进行比较分析,在此基础上提出了更为复杂却更能反映土体非线性本质的动力 $p-y$ 曲线模型。

此外,国外学者通过大量的足尺试验对影响 $p-y$ 曲线的因素也进行了研究,较典型的有:Brown<sup>[20,21,25]</sup>等对 $3 \times 3$ 的钢管桩进行了水平循环加载试验,桩距 $3D$ ,包括硬粘土和中密砂土。试验研究了群桩效应对 $p-y$ 曲线的影响,并于1988年首次提出可以用 $P$ 乘子系数考虑群桩效应对前后排桩土抗力的折减。Rollins<sup>[18,19,39]</sup>等为研究确定 $P$ 乘子系数进行了大量试验,试验均是用钢管桩,群桩布局有 $3 \times 3, 3 \times 4, 3 \times 5$ 等,包括各种土质,桩距从 $3D \sim 6D$ 变化,循环加载,试验表明当群桩桩距增大到 $6D$ 左右时,群桩效应可以忽略不计。Liu<sup>[42]</sup>, Wilson<sup>[41]</sup>, Weaver<sup>[40]</sup>和 Ashford<sup>[23]</sup>等分别通过离心机试验和现场原型试验研究了砂土液化时 $p-y$ 曲线的特性。Huang<sup>[22]</sup>通过对 $3 \times 4$ 桩距 $3D$ 的群桩沉入桩基础和 $2 \times 3$ 桩距 $3D$ 的群桩钻孔桩基础的现场试验研究了不同施工方法对群桩 $p-y$ 曲线的影响,试验表明钻孔桩使得土体变松散从而增大了群桩效应,而沉入桩使土体变密实因此减小了群桩效应。Juirnarongrit<sup>[10]</sup>等通过现场灌注桩基研究了桩径对 $p-y$ 曲线特性的影响,桩基直径分别为 $0.4\text{ m}, 0.6\text{ m}, 0.9\text{ m}$ 和 $1.2\text{ m}$ 。试验表明 $p-y$ 曲线对桩径不敏感。

国内对 $p-y$ 曲线的研究比较少。章连洋<sup>[30]</sup>在分析镇江大港等试验资料的基础上,提出了适合粘性土的 $p-y$ 曲线确定方法。王惠初和王平<sup>[29,31]</sup>等在上海黄浦江大桥试验的基础上,提出适合粘性土的 $p-y$ 曲线新统一法。王腾<sup>[32]</sup>进行了浸水黄河粉土中模型钢管桩的水平静载试验,推得了黄河粉土的 $p-y$ 曲线,发现粉土的黏聚力对其 $p-y$ 曲线有很大的影响。

### 2.3 考虑桩土相互作用桩基抗震性能试验研究综述

以上研究桩身弹塑性变形特性的拟静力试验均是在桩周无土体的环境下以一种预先确定的加载方式进行的。然而,实际的桩-土是一个复杂的非确定性的相互作用系统,尤其是在桩、土屈服进入非线性后,桩身受力会发生重分布。因此,要准确地研究桩基的强度及延性性能只能通过含实际土体的试验来实现,包括用盛土容器在室内进行的拟静力试验以及现场足尺试验。

Chai<sup>[9]</sup>等对加州常用的钢筋混凝土桩柱式基础进行了现场足尺试验以研究其弯曲强度和延性能力。试验由4个足尺钢筋混凝土试件组成,自由长度包括 $2D$ 和 $6D$ 两类。测试参数包括砂土的密实度和体积配箍率。试验通过在现场开挖一圆形土槽进行。回填干砂土时控制好压实度以实现密实和松散两种试验土体条件。试验观察到所有试件均表现出弯曲延性反应行为,尽管其中两个试件体积配箍率相对较低,只有ATC-32(1996)规定的一半左右,这可归因于桩周土体的约束作用<sup>[8]</sup>。试件横向最大承载力在密实和松散砂土中很接近,表明水平承载能力对砂土密实度不敏感,主要取决于桩身的弯曲强度。最大弯矩所在深度即塑性铰位置则与自由长度和砂土密实度均有关。试验得到了不同位移延性系数下的等效塑性铰长度,且表明其对砂土密实度和位移延性系数均不敏感。相反,自由长度对其影响则比较大。

Wallace<sup>[16]</sup>等对大直径灌注桩基进行了抗震性能原型试验研究。试件根据加州抗震设计规范制作,由直径 $1.8\text{ m}$ 、高 $12.2\text{ m}$ 的墩柱和桩径 $2\text{ m}$ 、桩长 $14.6\text{ m}$ 的大直径钢筋混凝土桩基组成,桩基全长埋入硬粘土中。主筋配筋率为 $2\%$ ,体积配箍率 $0.84\%$ ,最大轴压比 $1.3\%$ 。桩顶自由,不限制转动,试验由位移控制加载。试验通过锚固于墩柱顶的斜拉索实现循环加载,轴压通过拉索的竖向分力施加。结果表明试验中的大直径灌注桩基表现出很好的延性性能,滞回曲线的骨架曲线呈双线性;变形小于屈服位移时,滞回环呈狭长形,近似为线性反应,表明滞回阻尼较小;变形大于屈服位移尤其是临近极限状态时的滞回曲线呈明显的梭形,表明此桩基具有很好的耗能能力。这与预期的情况一致,因为试件破坏时拉索所施加的最大剪力还远小于由加州规范计算得到的桩基的名义抗剪强度,试件属于能够出现塑性铰的延性桩基。试件最终破坏集中在土下 $0.7D$ 的塑性铰处。采用试验测到的数据,计算出试验中桩基加载方向两侧实际的等效塑性铰长度分别为 $2.7\text{ m}$ 和 $2.9\text{ m}$ 。同时,采用Chai<sup>[9]</sup>试验中用到的计算等效塑性铰长度的经验公式,算出的等效塑性铰长度为 $2.4\text{ m}$ ,与实际值很接近。试验后采用了三种 $p-y$ 曲线进行数值仿真分析:API(1993)的硬粘土 $p-y$ 曲线;试验得到的 $p-y$ 曲线;对试验得到的 $p-y$ 曲线作适当修正以考虑桩土脱

空和滑移的影响。用有限元分析软件仿真分析表明,采用试验的 $p-y$ 曲线作骨架同时考虑桩土脱空和滑移的影响得到的桩基非线性力-位移曲线、截面弯矩-曲率关系和塑性铰位置及等效长度均与试验结果吻合得很好。这验证了桩基抗震性能的分析模型及分析工具可靠性。

张晨南<sup>[26]</sup>利用剪切变形土箱,完成了一个 $2 \times 2$ 低桩承台基础的拟静力试验,共进行了两个荷载工况,即通过在承台处施加水平力模拟上部结构对桩基的惯性作用以及利用土箱的剪切变形来模拟地震作用下土体的剪切变形对桩基的影响。对于采用倒三角的土箱剪切变形群桩试验得到了桩身的弯矩分布和群桩效应对前后排桩基内力的影响,发现同排桩基内力接近,群桩效应主要对前排桩影响较大。在承台施加水平荷载情况下,桩身的最大弯矩出现在桩头,在桩身埋深为 $6D$ 处也产生了很大的弯矩,但由于试验过程中出现意外,未能得到整个加载过程中桩基非线性变形性能。

张永亮<sup>[27]</sup>采用拟静力试验对黄土地基中一低桩承台基础进行了模型试验研究,通过在墩顶施加水平往复荷载,获得了桩、土及桥墩整体结构的滞回曲线,阐述了结构的耗能能力、强度退化、刚度退化以及变形能力等特性,同时初步探讨了黄土地基中低桩承台基础的破坏机理。

### 3 需进一步研究的问题

由以上试验现状可知,目前对于桩基抗震性能的研究还非常有限,尤其是对于大直径钻孔桩基础和大型群桩基础来说更是如此。并且,侧重研究桩基弹塑性变形能力的室内拟静力试验多数是在无土体的环境下进行的,不能考虑到桩-土之间的相互作用,而侧重于 $p-y$ 曲线的试验研究是基于桩基线弹性的假定,由于两者分开研究的局限性,今后的桩基抗震性能研究应主要采用现场足尺试验来进行。主要研究的方面有:

(1) 现有的桥梁桩基抗震性能的研究侧重于弯曲性能,而在实际震害调查中桩基与承台连接处或者土层分界处常发生剪切破坏,有必要对桩基的剪切破坏机理和分析方法进行研究。

(2) 已有的桩基抗震性能试验大都是针对单桩的,对于群桩结构体系的研究则很少。群桩基础在强烈地震作用下,首先在桩承台连接处形成

塑性铰,要充分发挥此塑性铰的非线性变形能力必然导致在土体中产生第二个塑性铰。已有一些研究混凝土桩承台连接处抗震性能的试验<sup>[4,33,34]</sup>,然而这仅仅是针对几种预制桩承台连接构造情况展开的。桩承台连接处局部非线性变形性能对结构整体的抗震能力有很大影响<sup>[26]</sup>,还需展开系列研究。并且应综合考虑不同场地土类型、桩径/桩距比、桩基自由段长度、桩基数量等对其抗震性能有影响的因素。

(3) 地基失效(如土体滑移和砂土液化)是桥梁基础产生震害的主要原因,有必要开展此类场地土下的桩基抗震性能足尺试验研究。

(4) 河床冲刷对桩基水平承载能力及其抗震性能有很大影响,Liang<sup>[35]</sup>对受冲刷的桩基研究现状进行了详细总结,Kishore<sup>[36]</sup>用PVC和铝制管桩通过试验研究了冲刷对其水平承载能力及桩身弯矩分布的影响。冲刷对桩基抗震性能的影响还需开展系统研究。

(5) 在桥梁桩基中经常有设置斜桩的情况,斜桩的地震作用需求比竖桩大,而现在很少有关地震作用下斜桩的内力分布及延性能力的研究。

(6) 诸多学者对 $p-y$ 曲线影响参数开展了研究,如土质、桩径、群桩效应、加载方式、施工方法、桩土脱空、砂土液化、河床冲刷及桩头连接方式等等,然而还缺乏一致的结论,各影响参数的试验数据都很有有限,还需开展大量试验以提高 $p-y$ 曲线应用于桩基抗震性能评估的准确度。另外,现广泛应用的API(1993)规范中的 $p-y$ 曲线,均是假定桩基为线弹性即用线性的弯矩-曲率关系推导出来的,这与实际地震作用下桩基常进入非线性有很大出入。

### 参考文献

- [1] Park R, Falconer T J. Ductility of Prestressed Concrete Piles Subjected to Simulated Seismic Loading[J]. PCI Journal, 1983, 28(5): 113-144.
- [2] Pam H J, Park R. Ductility of prestressed concrete piles subjected to simulated seismic loading [R]. Report 84-4, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1984.
- [3] Pam H J, Park R, Priestley M J N. Seismic Performance of Prestressed Concrete Piles and Pile-Pile Cap Connections [R]. Report 88-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1988.

- [4] Pam H J, Park R. Simulated seismic load tests on prestressed concrete piles and pile-pile cap connection [J]. *PCI Journal*, 1990, 35(6).
- [5] Ikeda S, Tsubaki T, Yamaguchi T. Ductility improvement of prestressed concrete piles [J]. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1982, 4: 531-538.
- [6] Sheppard D A. Seismic design of prestressed concrete piling [J]. *PCI Journal*, 1983, 28: 20-49.
- [7] Banerjee S, Stanton J F, Hawkins N M. Seismic performance of precast concrete bridge piles [J]. *Journal of Structure Engineering*, 1987, 113: 381-396.
- [8] Budek A M, Benzoni G, Priestley M J N. Experimental investigation of ductility of in-ground hinges in solid and hollow prestressed piles [R]. Report No. SSRP97/17, Division of Structural Engineering, University of California at San Diego, California, 1997.
- [9] Chai Y H, Hutchinson T C. Flexural strength and ductility of reinforced concrete bridge piles [R]. Rep. No. UCD-STR-99-2, Dept. of Civil and Environmental Engineering, UC Davis, Davis, Calif., 1999.
- [10] Juimarongrit T, Ashford S A. Effect of Soil Confinement in Enhancing Inelastic Behavior of Cast-in-Drilled-Hole Piles [C]. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, 2003.
- [11] Juimarongrit T, Ashford S. Effect of Pile Diameter on  $p-y$  Curves [C]. The 6th Caltrans Seismic Research Workshop, Sacramento, 2001: 5-103.
- [12] Matlock H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C]. Proc., 2nd Offshore Tech. Conf., Houston, TX, 1970, 1: 577-594.
- [13] Reese L C, Cox W R, Koop F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay [C]. Proc., 7th Offshore Tech. Conf., Houston, TX, 1975: 671-690.
- [14] Reese L C, Welch R C. Lateral loading of deep foundations in stiff clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1975, 101(7): 633-649.
- [15] Cox W R, Reese L C, Grubbs B R. Field testing of laterally loaded piles in sand [C]. Proc., Offshore Tech. Conf., Houston, TX, 1974: 459-472.
- [16] Wallace J W, Fox P J, Stewart J P, et al. Cyclic large deflection testing of shaft bridges. Part I—Background and field test results [R]. Report to California Department of Transportation, December, 2001.
- [17] Boulanger R, Curras C, Kutter B, et al. Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1999, 125(9): 750-759.
- [18] Rollins K M, Peterson K T, Weaver T J. Lateral load behavior of full-scale pile group in clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1998, 124(6): 468-478.
- [19] Rollins K M, Olsen R J, Egbert J J, et al. Pile Spacing Effects on Lateral Pile Group Behavior: Load Tests [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 2006, 132(10): 1262-1271.
- [20] Brown D A, Reese L C. Lateral load behavior of pile group in sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1988, 114(11): 1261-1276.
- [21] Brown D A, Reese L C, O'Neill M W. Behavior of a Large Scale Pile Group Subjected to Cyclic Lateral Loading [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1987, 113(11): 1326-1343.
- [22] Huang A, Hsueh C K, O'Neill M W, et al. Effects of construction on laterally loaded pile groups [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 2001, 127(5): 385-397.
- [23] Ashford S A, Rollins K. Full-Scale Behavior of Laterally Loaded Deep Foundations in Liquefied Sand: Preliminary Test Results [R]. Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, 1999.
- [24] Ismael N F. Behavior of laterally loaded bored piles in cemented sands [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1990, 116(11): 1678-1699.
- [25] Brown D A, Reese L C. Behavior of a large-scale pile group subjected to cyclic lateral loading [R]. Report to the Minerals Management Services, U. S. Dept. of Interior, Reston, VA. Dept. of Research, FHWA, Washington DC and U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1985.
- [26] 周牧. 高桩承台桥梁抗震性能试验和理论研究 [D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2008.  
Zhou M. Experimental and Theoretical Studies on Seismic Performance of Elevated Pile Cap Bridge [D]. Shanghai: Department of Bridge Engineering, Tongji University, 2008.
- [27] 张永亮, 陈兴冲, 丁明波. 黄土地基—群桩基础—桥墩滞回特性模型试验研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2007, 26(1): 93-96.  
Zhang Y L, Chen X C, Ding M B. Study on Model Test of Loess Subgrade-pile Group-pier for Hysteretic Property [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2007, 26(1): 93-96.
- [28] 张展南. 推倒分析方法在高架桥梁系统抗震分析中的应用 [M]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2003.

- Zhang C N. Application of Pushover Analysis on Seismic Analysis of Viaduct Bridge [M]. Shanghai: Department of Bridge Engineering, Tongji University, 2003.
- [29] 王惠初,武冬青,田平. 粘土中横向静载的 $p-y$ 曲线的一种新的统一法[J]. 河海大学学报,1991,19(1):9-17.
- Wang H C, Wu D Q, Tian P. A New United Method of  $p-y$  Curves of Laterally Statically Loaded Piles in Clay[J]. Journal of HeHai University, 1991, 19(1): 9-17.
- [30] 章连洋,陈竹昌. 粘性土中 $p-y$ 曲线的计算新方法[J]. 港口工程,1991,(2):29-35.
- Zhang L Y, Chen Z. A New Calculated Method of  $p-y$  Curves In Clay [J]. Port Engineering, 1991, (2):29-35.
- [31] 田平,王惠初. 粘土中横向周期性荷载桩的 $p-y$ 曲线统一法[J]. 河海大学学报,1993,21(1):9-14.
- Tian P, Wang H C. A Unified Method of  $p-y$  Curves for Laterly and Periodically Loaded Piles In Clay[J]. Journal of HeHai University, 1993, 21(1):9-14.
- [32] 王腾,王天霖. 粉土 $p-y$ 曲线的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(5):1343-1346.
- Wang T, Wang T L. Experimental research on silt  $p-y$  curves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5):1343-1346.
- [33] Teguh M, Hutchinson G L, Mendis P A, et al. Introduction to Seismic Performance of Prestressed Concrete Pile-to-pile Cap Connections [J]. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Melbourne, 2003.
- [34] Harries K A, Petrou M F. Behavior of Pre-cast Prestressed Concrete Pile to Cast-in-Place Pile Cap Connections[J]. PCI Journal, 2001:82-92.
- [35] Liang F, Caroline R B, Robert L P, et al. A Literature Review on Behavior of Scoured Piles under Bridges [C]. ASCE, International Foundation Congress and Equipment EXPO, 2009.
- [36] Kishore Y N, Rao S N. Influence of Scour on Laterally Loaded Piles [C]. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 2008.
- [37] Janoyan K, Stewart J P, Wallace J W. Analysis of  $p-y$  curves from lateral load test of large diameter drilled shaft in stiff clay [C]. Caltrans 6th Seismic Design Workshop, Sacramento, CA, 2001:5-105.
- [38] McClelland B, Focht J A. Soil Modulus for Laterally Loaded Piles[J]. ASCE, 1958:1049-1086.
- [39] Rollins K M, Olsen R J, Egbert J J, et al. Response, analysis, and design of pile groups subjected to static and dynamic lateral loads [R]. Report No. UT-03. 03, Utah Department of Transportation Research and Development Division, 2003.
- [40] Weaver T, Ashford S, Rollins K. Development of  $p-y$  Curves for a 0.6 m CISS Pile in Liquefied Sand [C]. The 6th Caltrans Seismic Research Workshop, Sacramento, 2001:5-104.
- [41] Wilson D. Soil-Pile-Superstructure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay [D]. California: University of California at Davis, 1998.
- [42] Liu L, Dobry R. Effect of Liquefaction on Lateral Response of Piles by Centrifuge Model Tests [J]. NCEER Bull, 1995:7-11.
- [43] 燕斌,王志强,王君杰. 桥梁桩基础计算中 $p-y$ 曲线法与 $m$ 法的对比研究[J]. 结构工程师, 2007, 23(4):62-68.
- Yan B, Wang Z Q, Wang J J. Study on Comparison of  $p-y$  Method and  $m$ -Method in Computation of Bridge Pile Foundations [J]. Structural Engineers, 2007, 23(4):62-68.