

# 冲刷作用下单桩循环加载特性的模型试验

梁发云<sup>1,2</sup>, 李彦初<sup>1,2</sup>, 陈海兵<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 通过模型试验对高铁桥梁单桩基础进行静载试验和循环加载试验,探讨了不同冲刷深度下单桩循环累积沉降和动位移幅值的发展规律. 研究表明:桩基循环累积沉降随冲刷深度增加而增加,对于冲刷深度较小的桩,循环累积沉降和沉降平均速率在较少的循环次数内即可趋于稳定;而对于冲刷深度较大的桩,循环累积沉降大且发展较快,达到稳定需要的时间长,甚至持续发展以致破坏,在实际工程中应重视长期循环累积沉降对其承载特性的影响.

**关键词:** 桥梁桩基; 冲刷深度; 循环加载; 承载性状; 模型试验

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

## Influence of Scour Depth on Vertically Cyclic Behaviors of Single Pile with Model Tests

LIANG Fayun<sup>1,2</sup>, LI Yanchu<sup>1,2</sup>, CHEN Haibing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A series of model tests on static and cyclic axial response of the single pile in sandy soils are described. The accumulated settlement and cyclic amplitude of settlement of piles are investigated for different scour depths. The results indicate that the increase of scour depth can induce the increase of accumulated settlement of piles under cyclic loading. For smaller scour depths, the accumulated settlement and average rate of settlement tend to stable at less cycles. However, for larger scour depths, the accumulated settlement is large and develops very fast and needs longer time to reach stable, which even causes the sustainable development of accumulated settlement to lead to failure of piles. The effect of long-term accumulated settlement on bearing capacity should be considered in engineering practices.

**Key words:** bridge piles; scour depth; cyclic loading; bearing performance; model test

与普通铁路相比,高速铁路对路基沉降变形更为敏感,为确保列车在高速运行条件下的安全性、平稳性和舒适性,高速铁路中通常“以桥代路”,以达到严格控制工后沉降的目的<sup>[1]</sup>. 因此,高速铁路中的桥梁基础所占比例远高于普通铁路. 以京沪高铁为例,沿线桥梁占线路总长为 80.5%,其中相当部分为跨越河流的桥梁<sup>[2]</sup>. 对于跨越河流的桥梁,其桥墩基础不可避免地要受到水流的冲刷作用,河流冲刷会引起原有桥墩基础工作条件的明显改变,由此引起的桥梁损毁和桥墩基础裸露已成为既有桥梁严重的安全隐患<sup>[3]</sup>,这对于高速铁路桥墩安全状态的影响更是不容忽视的. 目前的相关研究大多集中于桥梁基础冲刷发生机理的分析<sup>[4~6]</sup>,很少涉及到冲刷作用对其基础循环加载性状的研究.

Reese<sup>[7]</sup>和 Kishore 等<sup>[8]</sup>分别通过模型试验研究冲刷作用对桩基水平承载性状的影响;闫澍旺等<sup>[9]</sup>建立三维有限元模型对水流冲刷作用下桩基的竖向承载特性进行数值分析,这些研究均是针对静力条件下的桩基冲刷性状进行分析. 在高铁列车长期竖向循环荷载作用下,桩基础承载性状可能发生变化且会产生一定的累积沉降,长期循环荷载作用下的累积沉降往往是设计中需要控制的关键参数<sup>[10]</sup>.

目前对于循环荷载作用下桩基冲刷特性的研究尚未见文献报道,但是关于循环荷载作用下常规桩基承载性状已取得了较多的研究成果. Bea<sup>[11]</sup>研究表明,循环荷载作用下单桩的竖向承载力可能会降低 10%~20%;Poulos 等<sup>[12]</sup>对钙质砂土中桩的循环特性进行了模型试验,研究成果表明,在等幅循环荷载作用下桩顶累积位移随着荷载水平和循环次数而

收稿日期: 2013-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41172246);国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036304)

第一作者: 梁发云(1976—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桩基础、深基坑工程及桥梁冲刷等.

E-mail: fyliang@tongji.edu.cn

增长. 徐和等<sup>[13]</sup>通过砂土模型试验, 分析桩在循环荷载下累积位移和动位移幅值随振动次数的变化规律; 杨龙才等<sup>[10]</sup>针对软黏土地层中的钻孔灌注桩进行了高速列车循环荷载作用下的现场动力试验; 黄雨等<sup>[14]</sup>通过饱和砂土中的模型桩在不同循环荷载比时的沉降试验, 研究了模型桩的桩顶累积沉降和动位移幅值随振动次数的变化而改变的规律. 朱斌等<sup>[15]</sup>开展了单桩受竖向下压循环荷载作用的大比尺模型试验, 获得了不同侧和端阻比下桩基的循环承载力, 以及桩顶循环累积沉降.

结合已有文献的研究成果, 本文采用模型试验对冲刷作用下单桩的竖向循环加载性状进行研究. 首先通过静载荷试验确定单桩的竖向承载性能, 再通过竖向循环加载试验研究冲刷深度对单桩循环加载性状的影响, 探讨单桩循环累积沉降发展规律.

## 1 模型试验概况

### 1.1 试验装置

试验模型槽为钢筋混凝土结构, 几何尺寸为 3 000 mm(长)×2 100 mm(宽)×3 200 mm(高), 壁厚 300 mm, 模型槽地下部分深 1.8 m, 地上部分高 1.4 m, 如图 1 所示. 加载装置采用同济大学软土物理模型试验系统, 量测装置集成在该模型试验系统中, 通过力传感器和位移传感器同步量测力和位移数据.

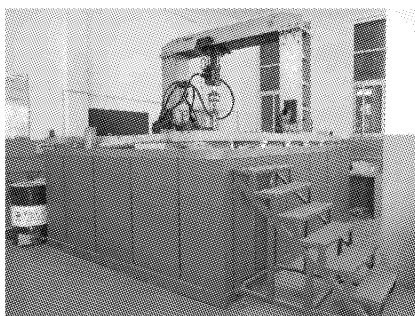


图 1 试验模型槽

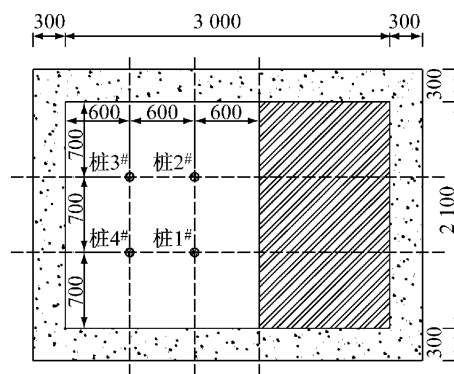
Fig.1 Model test apparatus

### 1.2 试验模型桩

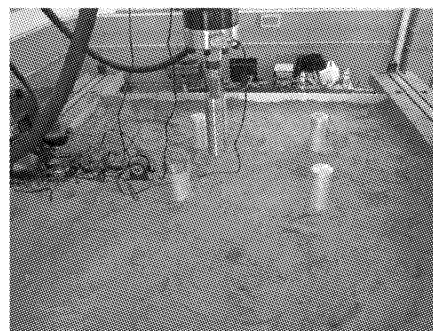
试验所用模型桩为无缝空心铝管, 上下封底, 桩外径为 83 mm, 壁厚 4 mm, 桩长为 2.2 m, 模型桩弹性模量为 70 GPa.

为适应加载装置的位置调节要求, 选取部分模型槽作为试验区域. 已有研究表明<sup>[16-17]</sup>, 当竖向受荷桩的间距  $S$  大于  $6D$  ( $D$  为桩径) 时, 桩与桩之间的相

互影响已较小. 结合试验设备和场地条件, 试验选取  $S=600$  mm ( $7.5D$ ), 近似忽略桩的相互作用影响, 模型桩布置如图 2 所示.



a 布置位置和尺寸(单位:mm)



b 试验照片

图 2 模型桩布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of piles installation

### 1.3 试验地基土

试验用土取自常州某工程的原型场地土, 填土方法参照文献<sup>[18]</sup>, 严格按照分层填铺, 每层土填铺一定的质量, 以质量控制填土的均匀性. 室内土工试验测得主要土性参数如表 1 所示.

表 1 土体物理力学指标

Tab.1 Physico-mechanical indexes of soils

重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	侧限压缩模量 $E/\text{MPa}$
15.50	6.33	33.7	0.5	11.59

### 1.4 试验方案设计

已有研究表明<sup>[8-9]</sup>, 冲刷深度是影响桩基承载性状的重要因素之一. 本次试验重点考察冲刷深度对桩基竖向承载性状的影响. 如图 3 所示, 在模型槽中预埋模型桩, 桩头初始出露高度为  $S_0=20$  cm, 原始泥面以下桩长  $L_0=200$  cm. 试验时, 冲刷深度采用挖掉上覆土层的方法模拟冲刷深度的变化, 这也是目前模型试验中模拟冲刷作用的常用方法<sup>[6-8]</sup>. 各桩

的设计冲刷深度  $S_d$  如表 2 所示。

试验分两个阶段进行,分别是单桩竖向静载荷试验和竖向循环加载试验。

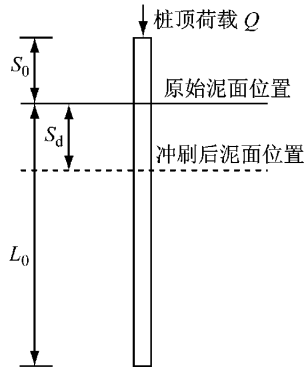


图 3 桩基冲刷示意图

Fig.3 Scour on pile foundation

表 2 各桩冲刷深度

Tab.2 Scour depth of piles

桩号	1#	2#	3#	4#
冲刷深度 $S_d$	0	$0.1L_0$	$0.2L_0$	$0.4L_0$

单桩静载荷试验依据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)<sup>[19]</sup>,采用快速维持荷载法测试单桩承载力。试验以 0.5 kN 为一级,逐级施加。

对于模拟高铁列车循环加载试验,首先需要确定加载波形。参照杨龙才等<sup>[10]</sup>采用的动载试验桩顶荷载形式,如式(1)所示,其加载波形如图 4。

$$Q(t) = Q_0 + W + A_0 \sin \omega t \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为实际加在桩顶的荷载,kN; $Q_0$ 为桩顶的预估恒载,kN; $W$ 为动荷载的平衡重力,kN; $A_0$ 为动荷载的半幅值,kN; $\omega$ 为动载的圆频率。

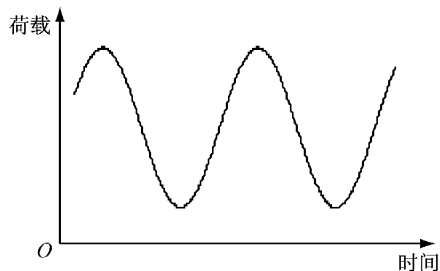


图 4 循环加载波形示意图

Fig.4 Waveform of cyclic loading

参照文献[12-15],并考虑试验设备竖向加载作动器的性能,确定本次试验的预估恒载为桩基极限承载力  $Q_u$  的 0.25 倍,即  $Q_0 = 0.25Q_u$ ;动载幅值为桩基极限承载力的 0.125 倍,即  $W = A_0 = 0.0625Q_u$ ;加载频率设置为 1 Hz。因此,单桩竖向静承载力确定后,循环加载试验的各加载参数即可确

定。

循环加载试验开始前,先加上预估恒载  $Q_0$ ,待其沉降稳定后,保持静载值不变,再加上循环荷载  $W + A_0 \sin \omega t$  进行循环加载试验。

## 2 单桩循环加载试验结果

### 2.1 单桩静载荷试验

首先通过静载荷试验确定单桩的竖向承载性能,试验按照图 2 所示编号的顺序对各桩进行竖向静载试验。图 5 为各桩静载试验荷载与沉降  $Q-s$  曲线。结果表明,四根桩的  $Q-s$  曲线大致均为缓变型曲线,桩基端阻力占主要作用,当沉降量超过 60 mm 时,认为达到破坏标准,停止加载,取前一级荷载为极限承载力。

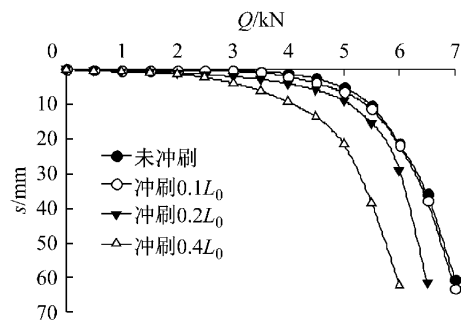


图 5 单桩静载  $Q-s$  曲线

Fig.5  $Q-s$  curves of piles

试验得出各桩的竖向静承载力见表 3 所示。从表 3 和图 5 可以看出,随着冲刷深度的增加,桩基竖向极限承载力呈减小趋势。1# 和 2# 桩的极限承载力相同且曲线较为接近,这是因为对于端阻为主的桩,被冲刷掉的  $0.1L_0$  (也即 20 cm) 浅层地土提供的摩阻力较小,对桩基承载力造成的损失相对较小。

表 3 各桩极限承载力

Tab.3 Ultimate capacity of piles

桩号	冲刷深度 $S_d$	极限承载力 $Q_u$ /kN
1#	0	6.5
2#	$0.1L_0$	6.5
3#	$0.2L_0$	6.0
4#	$0.4L_0$	5.5

### 2.2 单桩循环加载试验

#### 2.2.1 循环加载试验参数

桥梁桩基受到上部结构传递来的竖向循环荷载作用,为研究循环荷载作用下桥梁桩基础承载性状随冲刷深度的变化情况,根据未冲刷的 1# 桩极限承载力来确定循环加载试验的恒载  $Q_0$  和循环荷载幅

值  $2A_0$ 。循环荷载比是指循环荷载幅值与桩基极限静承载力的比值,为循环加载试验中的重要参数,试验采用的循环荷载比约为 0.15。循环加载试验中对各桩施加相同的荷载,具体参数见表 4。

表 4 循环加载试验参数

Tab.4 Parameters of cyclic loading test

恒定 静载/kN	动载 幅值/kN	荷载变化 范围/kN	循环 荷载比	加载 频率/Hz
1.5	1.0	1.5~2.5	0.15	1.0

注:设备加载精度为 0.5 kN,荷载取值考虑了加载精度。

## 2.2.2 循环累计沉降发展过程

图 6 为各桩循环次数与沉降  $N-s$  曲线,横坐标为对数坐标,  $s_c$  为考虑循环加载阶段的累积沉降。从图 6 可以看出,各桩累积沉降量随循环次数的增加而增加,1#~3# 桩曲线逐渐趋于平缓,累积沉降基本稳定,而 4# 桩并没有最终趋于平缓,而是保持持续下降的趋势,若继续加载,桩顶累积位移会进一步增长。4 条曲线从上到下依次排列,1#~3# 各桩曲线间隔比较接近,而 4# 与其他桩曲线间隔很大,说明冲刷深度越大,桩顶循环累积沉降量越大,且与冲刷深度不再保持为线性关系,而是超过某一冲刷深度后,循环累积沉降会急剧增大。

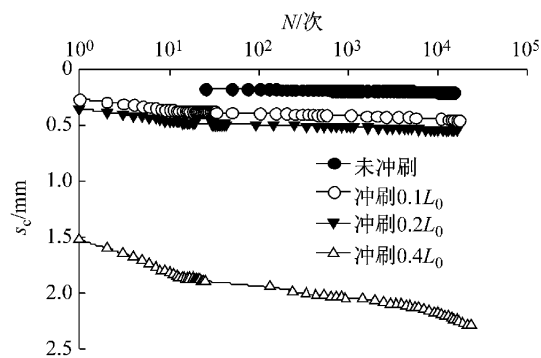


图 6 循环累积沉降随循环次数的变化

Fig.6 Accumulated settlement versus number of cycles

图 7 为相同循环次数下各桩循环累积沉降量的比较。从图 7 可以看出,在相同循环加载次数下,冲刷深度越大,桩顶循环累积沉降量越大,浅层土(0~0.2 $L_0$ )被冲刷掉后,累积沉降的增幅较为缓慢;而深层土(0.2 $L_0$ ~0.4 $L_0$ )被冲刷掉后,累积沉降增幅显著。同时,1#~4# 桩在前 50 次循环产生的累积沉降依次为 0.174, 0.383, 0.488 和 1.908 mm,占 10 000 次循环累积沉降量的 88.3%, 88.2%, 90.9% 和 87.3%,说明各桩的循环加载初期的沉降非常明显。对于 1#~3# 桩来说,随着循环次数的增加,其累积沉降量很快趋于稳定;而对于 4# 桩,50~10 000 次

循环产生的沉降量为 0.277 mm,且仍存在继续发展的趋势。因此,当冲刷深度较大时,需要特别重视长期循环加载产生的循环累积沉降对桥梁桩基础的影响。

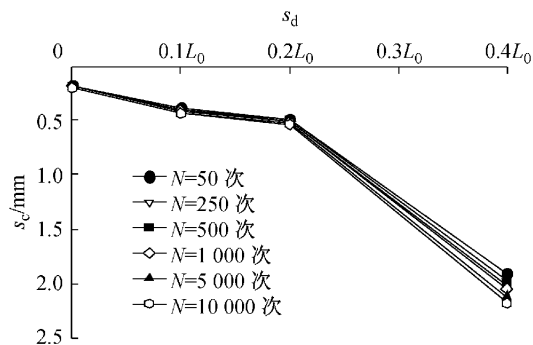


图 7 循环累积沉降随冲刷深度的变化

Fig.7 Accumulated settlement versus scour depth

## 2.2.3 沉降速率发展过程

定义沉降平均速率  $v$  为循环累积沉降  $s_c$  除以加载时间  $t$ 。图 8 为相同循环次数时各桩累积沉降平均速率的比较。从图 8 可看出,在无冲刷作用时,桩基沉降发展速率与文献[10,14]试验得到的随着振动次数的增加,桩的沉降发展速率趋于减少是一致的;当冲刷深度越大时,相同循环次数时的沉降平均速率明显更大,表明沉降达到稳定所需的时间更长,冲刷作用增强了桩基的循环累积沉降效应。

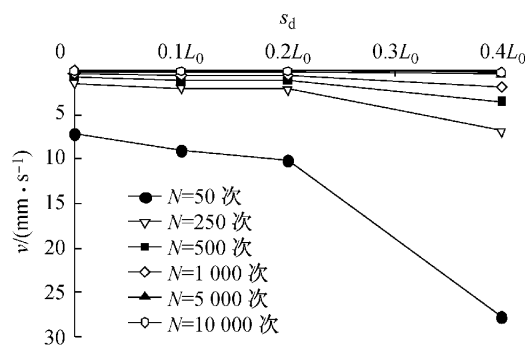


图 8 沉降平均速率随冲刷深度的变化

Fig.8 Average rate of displacement versus scour depth

## 2.2.4 动位移幅值发展过程

桩顶动位移幅值  $\rho_c$  为荷载循环 1 周时桩顶竖向动位移的最大值与最小值之差,桩在竖向荷载下的动刚度  $K_d$  表示桩土系统产生单位桩顶位移所需施加的外力,即  $K_d = 2A_0/\rho_c$ 。图 9 为 1#~4# 桩的桩顶动位移幅值随循环次数的变化曲线,横坐标采用对数坐标。

从图 9 可看出,按冲刷深度的增加,曲线从上到下依次排列,说明冲刷深度越大,桩顶动位移幅值越

大,动刚度越小.其中1#~3#桩动位移幅值随循环次数增加而逐渐下降,且下降的速率逐渐减小,循环达到100次左右即基本稳定;而4#桩动位移幅值变化趋势与其他三根桩相反,在循环10 000次内呈上升趋势,超过10 000次循环开始出现缓慢下降趋势,但依然没有达到稳定.根据动位移幅值与动刚度的反比例关系,说明1#~3#桩的动刚度先随循环次数的增加呈增大趋势,很快便趋于一个稳定值.在杨龙才等<sup>[10]</sup>的试验中,也观察到类似单桩的动刚度区域稳定的现象.在冲刷深度较小时,桩的振动主要表现为弹性振动;而4#桩的动刚度则在经历相当大的循环次数后逐渐减小,后期有缓慢增长趋势,说明冲刷深度较大时,桩更易发生循环累积沉降,与前文的循环累积沉降发展规律一致.

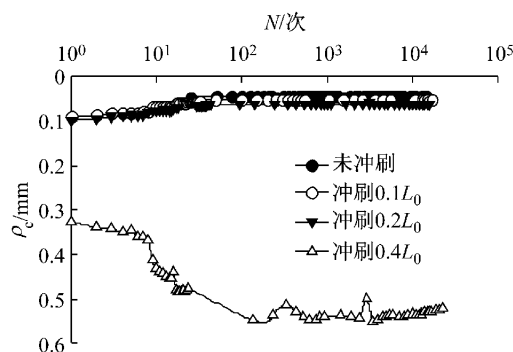


图9 动位移幅值随循环次数的变化

Fig.9 Cyclic amplitude of settlement versus number of cycles

图9从侧面反映了可能存在一个临界冲刷深度,当冲刷深度小于该临界值时,桩的振动处于弹性范围,沉降很快趋于稳定,当冲刷深度大于该临界值时,桩的循环累积沉降持续增长以致破坏.

### 3 结论

本文通过模型试验分别进行了单桩静载试验和循环加载试验,主要研究了不同冲刷深度下单桩的循环加载特性,得到的主要结论如下:

(1) 桩基循环累积沉降随循环次数和冲刷深度增加而增加.对于未冲刷或冲刷深度较小的桩,循环累积沉降主要发生在循环加载初期,沉降量和沉降平均速率均在较少的循环次数内趋于稳定,由于长期循环作用产生的累积沉降效应较小.而对于冲刷深度较大的桩,循环累积沉降量较大且发展快,达到稳定需要的时间长,甚至持续发展以致破坏,需重视长期循环累积沉降对其承载力的影响.

(2) 对于未冲刷或冲刷深度较小的桩,随着循环次数的增加,动刚度随之增大,但其增幅呈逐渐减小的趋势,且在较小的循环次数内便趋于稳定值,动力特性主要表现为弹性质.而对于冲刷深度较大的桩,动刚度在相当多的循环次数内呈减小趋势,循环次数的增加将促进其沉降发展,应考虑其长期循环累积沉降产生的不利影响.

### 参考文献:

- [1] 孙树礼. 高速铁路桥梁设计与实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.  
SUN Shuli. High speed railway bridge design and practice [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 京沪高速铁路工程概况[J]. 中国铁路, 2008(5): 10.  
China Ministry of Railways. Overview of Beijing-Shanghai high speed railway project [J]. China Railway, 2008(5): 10.
- [3] Lagasse P F, Clopper P E, Zevenbergen L W, et al. National cooperative highway research program (NCHRP Report 593): countermeasures to protect bridge piers from scour [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2007.
- [4] Peggy A J, Denial A D. Probabilistic bridge scour estimates [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, 124(7): 750.
- [5] Briaud J L, Ting F C K, Chen H C, et al. SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers [J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE, 1999, 125(4): 237.
- [6] Liang F Y, Bennett C R, Parsons R L, et al. A literature review on behavior of scoured piles under bridges [C]// the 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo. Orlando: ASCE, 2009: 482-489.
- [7] Reese L C. Scour from cyclic lateral loading of piles [C]// Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1989: 395-402.
- [8] Kishore N Y, Rao S N, Mani J S. The behavior of laterally loaded pile subjected to scour in marine environment [J]. Journal of Civil Engineering, ASCE, 2009, 13(4): 403.
- [9] 闫澍旺, 高江林, 王成华. 水流冲刷对桩基承载性状影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1458.  
YAN Shuwang, GAO Jianglin, WANG Chenghua. Numerical simulation of effect of fluid scour on bearing behavior of pile foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1458.
- [10] 杨龙才, 郭庆海, 周顺华, 等. 高速铁路桥桩在轴向循环荷载长期作用下的承载和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2362.  
YANG Longcai, GUO Qinghai, ZHOU Shunhua, et al. Dynamic behavior of pile foundation of high-speed railway bridge under long-term cyclic loading in soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2362.