

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.06.006

# 循环荷载下阶梯形变截面桩与等截面桩 复合地基承载性状研究

仵永杰, 刘 杰, 陈 延, 王 威, 王勤富, 王 宁

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为探究循环荷载作用下, 阶梯形变截面桩与等截面桩复合地基工作性状的差异, 对阶梯形变截面桩与等截面桩的9桩复合地基进行室内模型试验, 分析循环加载次数对阶梯形变截面桩与等截面桩复合地基永久沉降、桩-土应力比的影响规律, 以及循环荷载作用下桩身应变的分布规律。研究表明: 阶梯形变截面桩和等截面桩的沉降速率起初较大, 随着加载次数的增加, 沉降速率逐渐减小, 并趋于稳定; 在相同加载条件下, 阶梯形变截面桩的沉降明显小于等截面桩, 并且前者先趋于稳定。桩-土应力比随加载次数的增加而降低, 降低的幅度开始较大, 然后慢慢减小, 并趋于稳定; 在相同条件下, 阶梯形变截面桩的桩-土应力比大于等截面桩的桩-土应力比, 并且前者先趋于稳定。对于阶梯形变截面桩, 在上下段各出现一个应变峰值, 上段的应变峰值明显大于下段的峰值; 而对于等截面桩, 只出现一个应变峰值。

**关键词:** 循环荷载; 复合地基; 永久沉降; 桩-土应力比; 桩身应变

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)06-0029-06

## Experimental Research on Bearing Behaviors of Composite Foundations with Stepped Cross-Section Pile and Uniform Section Pile under Cyclic Loading

Wu Yongjie, Liu Jie, Chen Yan, Wang Wei, Wang Qinfu, Wang Ning

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** To study the work behavior differences of the composite foundations with stepped cross-section piles and uniform piles under cyclic load, conducted indoor contrast model tests on the composite foundations with 9 stepped cross-section piles and uniform section piles, analyzed the influence law of cyclic loading numbers on the permanent settlement and the pile-soil stress ratio of the composite foundations with stepped cross-section piles and uniform piles, and studied the strain distribution law along the piles under cyclic loading. The results show that the settlement rates of stepped cross-section piles and uniform piles are comparatively large at first, with the increment of loading times, the settlement rates decrease gradually and tend to be stable. Under the same loading conditions, the settlement of stepped cross-section piles is significantly less than that of the uniform piles, and the former tends to be stable firstly. The pile-soil stress ratio decreases with the increment of the number of loading, and the reduction magnitude is very large at first, then decreases slowly and tends to be stable. Under the same conditions, the pile-soil stress ratio of stepped cross-section piles is greater than that of uniform section piles, and the former tends to be stable firstly. For the stepped cross-section pile, the upper and lower section respectively emerge a strain peak value, and the upper pile strain peak is greater than that of the lower pile. And the uniform pile only emerges a strain peak.

**Keywords:** cyclic loading; composite foundations; permanent settlement; pile-soil stress ratio; pile strain

收稿日期: 2015-10-22

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5017)

作者简介: 仵永杰(1986-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为桩-土共同作用理论,

E-mail: 372608542@qq.com

## 0 引言

作为基础,在交通荷载作用下,其不但要承受自身及上部结构的静载作用,而且还要承受车辆通行等循环荷载作用。目前很多专家和学者进行了静荷载作用下复合地基的研究,并获得较多的科研成果,孙广灿<sup>[1]</sup>通过对水泥土搅拌桩群桩复合地基承载力确定方法的分析与研究,得出群桩复合地基承载力远远小于单桩复合地基承载力。郭忠贤<sup>[2]</sup>系统研究了夯实水泥土桩的荷载传递机理及变形特性、复合地基承载力、桩土荷载分担特性、桩土变形特性,夯实水泥土桩复合地基中的桩体荷载传递规律。何杰等<sup>[3]</sup>研究了夯实水泥土楔形桩对地基沉降、桩-土沉降差、地基承载力等的影响。学者们对循环荷载作用下复合地基承载性状的研究也取得了不少成果,刘杰等<sup>[4]</sup>研究了循环应力比和加载周数对夯实水泥土圆柱形桩和楔形桩复合地基永久沉降、桩-土应力比的影响规律,并揭示了循环应力比与桩-土应力比的关系。胡娟等<sup>[5]</sup>研究了静荷载和竖向循环荷载共同作用下的循环次数对桩顶沉降、桩身轴力、桩底反力及桩侧摩阻力的影响规律。H. G. Poulos等<sup>[6-7]</sup>通过对等振幅和变振幅循环荷载下钙质砂土中模型桩的研究,总结了其永久累积位移变化规律。黄雨等<sup>[8]</sup>通过饱和砂土中模型桩在单向循环荷载比(循环荷载幅值与桩的极限承载力的比值)分别为12.5%, 25%, 50%三种情况下的沉降试验,研究了模型桩在不同动力循环加载情况下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,拟合了沉降试验曲线的回归方程。陈竹昌等<sup>[9]</sup>根据黏土和砂土中模型桩的试验资料分析了不同土类中桩在单、双向循环荷载下其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>通过对软黏土地层中的钻孔灌注桩轴向循环荷载长期作用下的动力试验,测试和研究了桩的动位移幅值、桩顶沉降、桩身轴力、桩侧动摩阻力和单桩极限承载力等参数的发挥和变化情况。律文田<sup>[11]</sup>、黄清<sup>[12]</sup>、郭鹏飞<sup>[13]</sup>、朱斌等<sup>[14]</sup>分别在各自研究的领域得出了循环荷载作用下关于桩基的一些研究成果。

对循环荷载作用下阶梯形变截面桩复合地基工作性状的研究鲜见相关报道。本文通过循环荷载下阶梯形变截面桩与等截面桩复合地基室内模型对比试验,探讨循环荷载作用下2种复合地基的永久沉降、桩-土应力比、桩身应变的差异,以提高工程界对阶梯形变截面桩复合地基的认识。

## 1 模型试验简介

### 1.1 试验设计

基坑填土:模型试验在室内基坑中进行,基坑尺寸:长×宽×深为6 m×3 m×4 m。试验所用土为黏性土,经过筛处理,加水搅拌均匀,并分层填筑压实至3.6 m厚。压实质量以压实度达到80%为控制标准,在填土完成后静置养护2个月以供试验使用。试验前对基坑内填土进行常规试验,得到试验用土的物理力学性能指标,如表1所示。

表1 土的物理力学性能指标

含水率/ %	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	塑性 指数	液性 指数	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
29.6	18.5	20.8	0.39	9.6	19.6	3.6

模型试验制作:室内模型试验分2组进行,一组为等截面9桩复合地基,另一组为阶梯形变截面9桩复合地基。桩的入土方式均采用静力压入,桩身材料均为杉木,桩身模量为0.8 GPa,泊松比取0.3,其余参数如表2所示。

表2 杉木桩的几何参数

桩型	直径/cm	桩长/cm	桩数	桩距/cm
等截面桩	10	160	9	30
变截面桩	上节12 下节8	上节80 下节80	9	30

测试元件埋设:桩身应变通过在桩身表面上设置BX120-20AA型号电阻应变片量测,应变片从距桩顶5 cm向下每隔30 cm对称设置2片,具体布置如图1所示(图数据单位为cm)。沉降标由长50 cm、Φ4的钢筋和2片直径为2.5 cm的钢片组成,通过焊接连接,并利用铁钉把沉降标固定在桩顶。

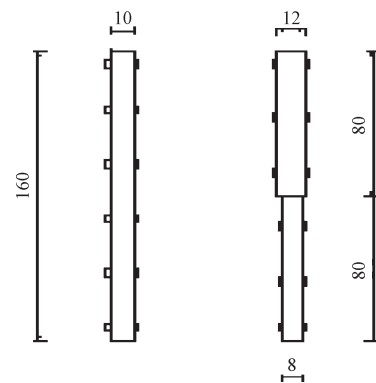
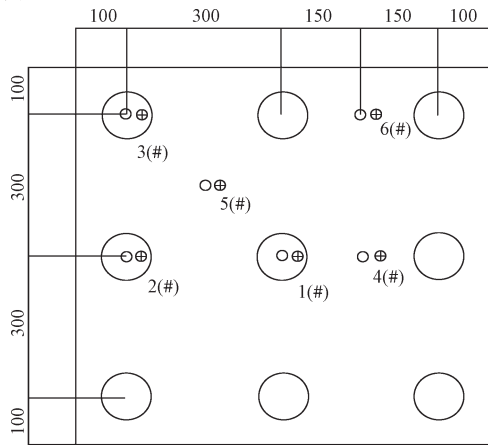


图1 应变片布置图

Fig. 1 Layout of strain gauges

为获取循环荷载作用下桩身轴力变化规律,避免土中水对桩身应变片的影响,在贴应变片时,首先用502胶把应变片固定在所需位置,然后用环氧树脂涂抹一层,最后用清漆涂刷整根桩。为模拟混凝

土桩与土之间的界面特征, 用干净的中粗砂通过环氧树脂涂刷在杉木桩表面。桩、土压力盒、沉降标的分布如图 2 所示。



1-中心桩; 2-边桩; 3-角桩; 4,5,6-不同位置的桩间土, 不加# 为等截面桩基, 加# 号的为阶梯形变截面桩基; ○代表沉降标; ⊕代表土压力盒。

图 2 桩、土压力盒及沉降标的分布

Fig. 2 Distribution of piles, earth pressure cell and settlement marks

### 1.2 加载及采集系统

进行循环荷载作用下阶梯形变截面桩和等截面桩复合地基模型对比试验时, 在桩基模型的表面铺一层厚 20 cm, 边长为 150 cm 的碎石垫层, 然后在垫层上铺一块厚 2.5 cm, 边长为 80 cm 的正方形钢板, 竖向循环荷载施加在钢板上。本试验加载采用西安力创生产的同步多点加载系统加载。通过数值模拟获得等截面复合地基模型承载特征值为 160 kPa。进行循环荷载试验时, 首先对复合地基施加 40 kPa 的恒载, 然后施加循环荷载幅值为 40 kPa、频率为 2 Hz 的正弦荷载 (如式 (1) 所示)。利用应变片采集桩身应变, 百分表采集桩顶沉降, 土压力盒采集桩顶及桩间土压力。本试验采用静载、循环加载、卸载的模式进行。加载公式<sup>[5]</sup>为

$$P(t) = P_s + \frac{1}{2}P_c + \frac{1}{2}P_c \sin \omega t, \quad (1)$$

式中:  $P_s$  为恒载;  $P_c$  为循环荷载幅值;  $\omega=2\pi f$ ,  $f$  为加载频率。

循环荷载加载曲线, 如图 3 所示。

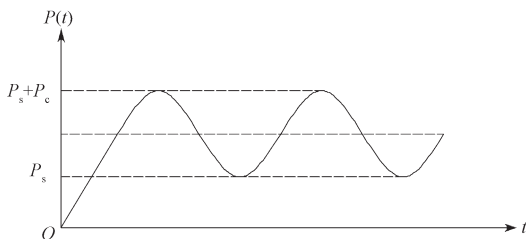


图 3 循环加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cyclic loading

## 2 试验结果及分析

在竖向循环荷载作用下, 复合地基的变形可分为弹性变形和塑性变形。塑性变形就是不可恢复的永久变形即永久沉降。而复合地基的永久沉降是指在竖向循环荷载作用下其产生的不可恢复的残余沉降。桩-土应力比是指对复合土体单元来说, 在荷载作用下, 桩顶平均应力与桩间土表面平均应力之比。本文主要研究竖向循环加载次数对阶梯形变截面桩和等截面桩复合地基永久沉降、桩-土应力比的影响及竖向循环荷载作用下桩身应变的分布规律。

### 2.1 永久沉降对比分析

在循环加载条件下, 复合地基中, 阶梯形变截面桩和等截面桩的永久沉降与循环加载次数的关系曲线如图 4 所示; 复合地基中, 中心桩、边桩和角桩的永久沉降与循环加载次数的关系曲线如图 5 所示。

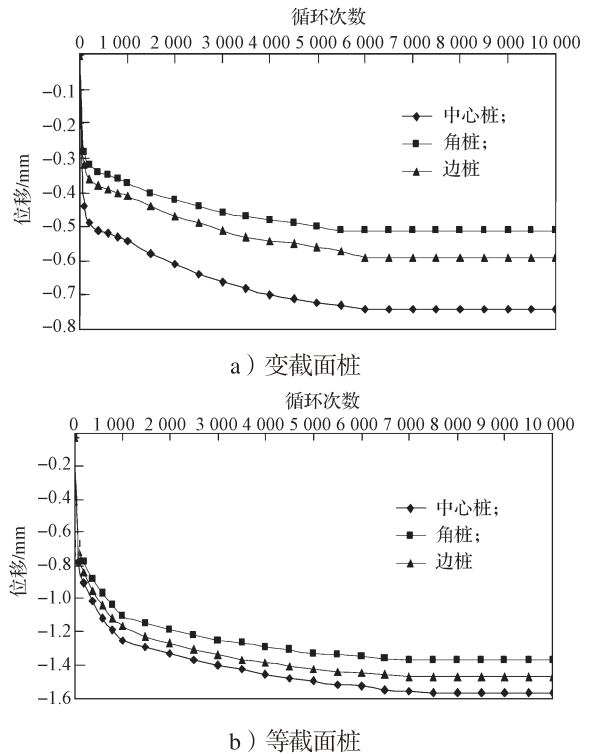


图 4 不同桩型桩的沉降与循环加载次数的关系曲线

Fig. 4 The relationship curves of settlement and cyclic loading numbers for different piles

由图 4 可知, 在循环次数较少时, 无论是阶梯形变截面桩复合地基还是等截面复合地基中的桩, 其永久沉降速率较大; 随着加载次数的增加, 沉降速率逐渐减小, 直至沉降趋于稳定。2 种复合地基都表现出中心桩的永久沉降最大, 边桩次之, 角桩最小。

由图 5 可知, 无论是中心桩、边桩还是角桩, 都是变截面桩的永久沉降小于等截面桩。在同样的循环次数下, 变截面桩复合地基中桩的永久沉降均小

于等截面桩复合地基中桩的永久沉降；且变截面桩复合地基中桩沉降稳定循环次数要比等截面桩的少。

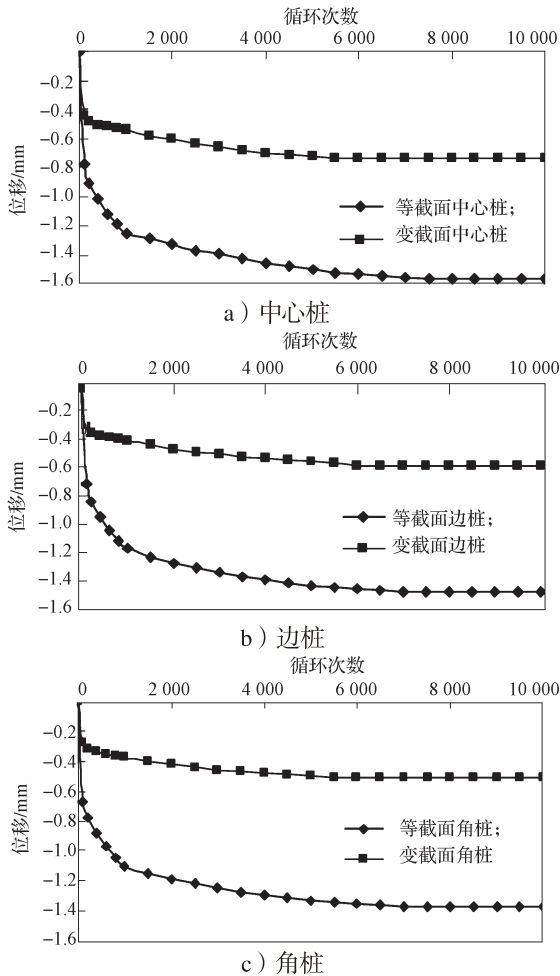


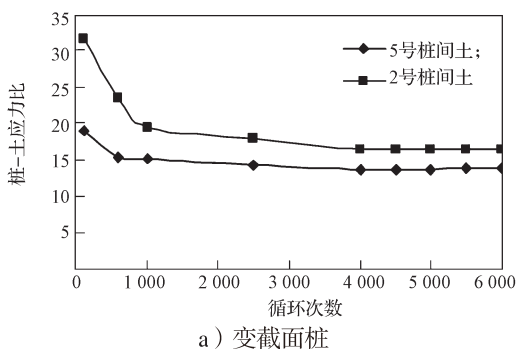
图5 不同位置桩的沉降与循环加载次数的关系曲线

Fig. 5 The relationship curves of settlement and cyclic loading numbers for different piles of location

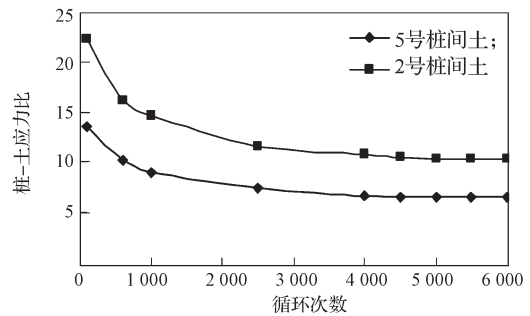
由此可知，阶梯形变截面桩复合地基能有效降低地基沉降，提高复合地基的承载力。

## 2.2 桩-土应力比对比分析

在循环加载条件下，阶梯形变截面桩和等截面桩复合地基桩-土应力比与循环加载次数的关系曲线如图6所示；阶梯形变截面桩和等截面桩复合地基中，中心桩的桩-土应力比与循环加载次数的关系曲线如图7所示。



a) 变截面桩



b) 等截面桩

图6 不同桩型桩-土应力比与循环加载次数的关系曲线

Fig. 6 The relationship curves of pile-soil stress ratio and cyclic loading numbers for different piles

由图6可知，不管是变截面桩复合地基还是等截面桩复合地基，桩-土应力比随加载次数的增加而降低，且降低的幅度开始较大，然后慢慢减小，直到桩-土应力比趋于一个定值。阶梯形变截面桩复合地基和等截面桩复合地基都存在一个临界循环次数，一旦超过该循环次数，桩-土应力比基本不变。2种复合地基的临界循环次数不同，相较于等截面桩复合地基，变截面桩复合地基临界循环次数较小。

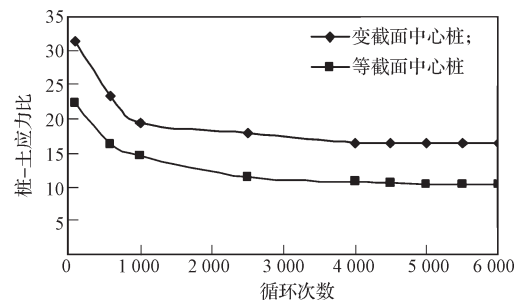


图7 中心桩的桩-土应力比与循环加载次数的关系曲线

Fig. 7 The relationship curves of pile-soil stress ratio and cyclic loading number for center pile

由图7可知，相同条件下，阶梯形变截面桩的桩-土应力比大于等截面桩的桩-土应力比，且前者先趋于稳定。

以上现象表明：相同试验条件下，与等截面桩相比，阶梯形变截面桩承载力得到了更充分地发挥。

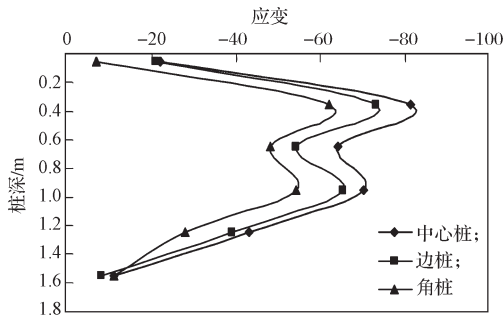
## 2.3 桩身应变分布规律对比分析

在循环加载条件下，阶梯形变截面桩和等截面桩复合地基中，桩应变与桩深的关系曲线如图8所示；复合地基中，中心桩、边桩和角桩应变与桩深的关系曲线如图9所示。

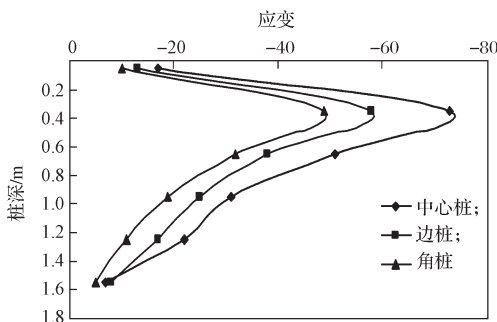
由图8可知，对于阶梯形变截面桩，上下节桩均出现一个应变峰值，上节桩的应变峰值明显大于下节桩的峰值；并且上节桩应变峰值大致出现在桩身中部，而下节桩应变峰值大致位于距离桩顶1/4处。对于等截面桩，整个桩身只出现一个应变峰值，其位置大致出



现在距离桩顶的 1/4 处。无论是变截面桩基还是等截面桩基, 中心桩的应变最大, 边桩次之, 角桩最小。



a) 变截面桩



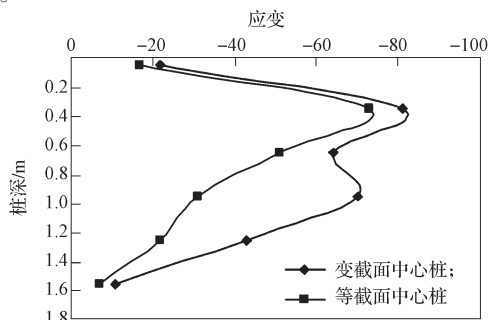
b) 等截面桩

图8 不同桩型桩应变与桩深的关系曲线

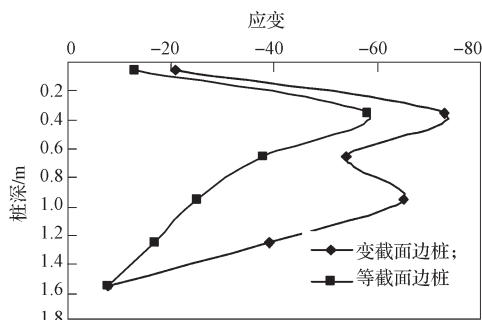
Fig. 8 The relationship curves of strain and pile depth for different piles

由图9可知, 不管是中心桩、边桩还是角桩, 都是变截面桩的应变大于等截面桩的应变。

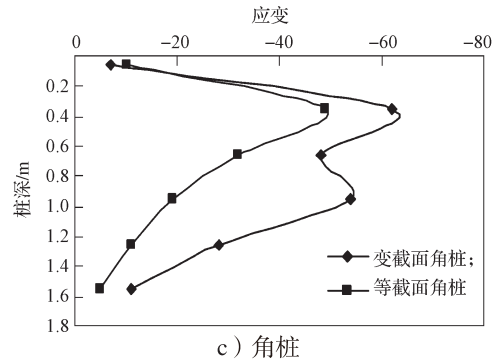
以上现象表明: 与等截面桩相比, 变截面桩能够更好地调节桩-土间的作用, 充分发挥桩体自身的承载力。



a) 中心桩



b) 边桩



c) 角桩

图9 不同位置桩应变与桩深的关系曲线

Fig. 9 The relationship curves of strain and pile depth for piles of different location

### 3 结论

本文通过室内较大比例复合地基模型试验, 对比研究了阶梯形变截面桩与等截面桩复合地基在循环荷载作用下的工作性状, 可得如下结论:

1) 在相同循环加载条件下, 阶梯形变截面桩和等截面桩的沉降速率起初较大, 随着循环加载次数的增加, 沉降速率逐渐减小; 阶梯形变截面桩的沉降明显小于等截面桩; 从复合地基中桩的沉降稳定趋势看, 都存在一个临界循环次数, 其临界循环稳定次数约分别为 6 000 次和 7 000 次。

2) 桩土应力比随循环次数的增加而降低, 降低的幅度开始较大, 然后慢慢减小, 直到桩土应力比趋于一个定值。阶梯形变截面桩和等截面桩复合地基中的桩土应力比均存在一个临界循环次数, 从复合地基中心桩的桩土应力比稳定趋势看, 阶梯形变截面桩复合地基临界循环次数明显小于等截面桩复合地基, 其临界循环次数约分别为 1 000 次和 2 500 次。

3) 在循环荷载作用下, 阶梯形变截面桩的上下段各出现一个应变峰值, 上段的应变峰值明显大于下段的峰值; 而等截面桩只出现一个应变峰值。

#### 参考文献:

[1] 孙广灿. 水泥土搅拌桩群桩复合地基承载力确定方法的分析与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.  
Sun Guangcan. The Analysis and Study About the Method for Determining Bearing Capacity of Cement-Soil Mixing Pile Group Piles Composite Foundation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.

[2] 郭忠贤. 夯实水泥土桩复合地基特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.  
Guo Zhongxian. Research on the Behavior of Composite with Rammed Soil-Cement Pile[D]. Beijing: Beijing

- University of Technology, 2010.
- [3] 何杰, 刘杰, 张可能, 等. 夯实水泥土楔形桩复合地基承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1506-1512.  
He Jie, Liu Jie, Zhang Keneng, et al. Experimental Study of Bearing Behaviour of Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Tapered Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1506-1512.
- [4] 刘杰, 肖佳兴, 何杰. 循环荷载下圆柱形桩与楔形桩复合地基工作性状对比试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 631-636.  
Liu Jie, Xiao Jiaying, He Jie. Comparison Experimental Research on Work Behavior of Composite Foundation with Column and Tapered Piles Under Cyclic Loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 631-636.
- [5] 胡娟, 宋一凡, 贺拴海. 静载及循环荷载下砂土中复合桩基承载特性模型试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 305-311.  
Hu Juan, Song Yifan, He Shuanhai. Research on Model Tests of Bearing Capacities for Composite Pile Foundation Under Static and Cyclic Loading in Sand[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(3): 305-311.
- [6] Poulos H G. Cyclic Axial Loading Analysis of Piles in Sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(6): 836-852.
- [7] Al-Douri R H, Poulos H G. Predicted and Observed Cyclic Performance of Piles in Calcareous Sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(1): 1-16.
- [8] 黄雨, 柏炯, 周国鸣, 等. 单向循环荷载作用下饱和砂土中单桩沉降模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1440-1444.  
Huang Yu, Bai Jiong, Zhou Guoming, et al. Model Tests on Settlement of a Single Pile in Saturated Sand Under Unilateral Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1440-1444.
- [9] 陈竹昌, 徐和. 土类对轴向循环荷载下桩性状的影响[J]. 同济大学学报, 1989, 17(3): 329-336.  
Chen Zhuchang, Xu He. Influence of Soil Type on Behaviour of Cyclic Axially Loaded Pile[J]. Journal of Tongji University, 1989, 17(3): 329-336.
- [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): 2362-2368.  
Yang Longcai, Guo Qinghai, Zhou Shunhua, et al. Dynamic Behaviors 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): 2362-2368.
- [11] 律文田. 静动荷载作用下铁路桥梁桩基的动力特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
Lü Wentian. Study on Dynamical Characteristics of the Railway Bridge Pile Foundation Under Static-Dynamic Load [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [12] 黄清. 循环荷载作用下单桩沉降规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
Huang Qing. Settlement Behaviors of Single Piles Under Cyclic Loading[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [13] 郭鹏飞, 王旭, 杨龙才, 等. 长期竖向循环荷载作用下黄土中单桩沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 551-558.  
Guo Pengfei, Wang Xu, Yang Longcai, et al. Model Tests on Settlement of Single Pile in Loess Under Long-Term Axial Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 551-558.
- [14] 朱斌, 任宇, 陈仁朋, 等. 竖向下压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 186-193.  
Zhu Bin, Ren Yu, Chen Renpeng, et al. Model Test on Bearing Capacity and Accumulated Settlement of Single Pile Subjected to Axial Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 186-193.

(责任编辑: 邓光辉)