

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.005

# 循环荷载作用下有无侧向约束 复合地基沉降对比分析

肖佳兴, 刘 杰, 何 杰, 陈小巍

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 为探讨循环荷载作用下有无侧向约束夯实水泥土桩复合地基的变形性状, 进行了循环荷载作用下有无侧向约束夯实水泥土桩复合地基室内大比例模型对比试验, 基于模型对比试验实测结果, 分析了侧向约束对夯实水泥土桩复合地基变形性状的影响。结果表明: 有侧向约束的夯实水泥土桩复合地基的沉降明显低于无侧向约束夯实水泥土桩复合地基的沉降。侧向约束对降低复合地基沉降的效果随着循环荷载比的增大而变得更加显著。因此, 侧向约束对限制软土的侧向变形、降低复合地基的沉降具有良好的作用。

**关键词:** 复合地基; 模型试验; 循环荷载; 侧向约束

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)01-0020-04

## Comparative Analysis on the Composite Foundation Settlement with and without Lateral Constraint under Cyclic Loading

Xiao Jiaxing, Liu Jie, He Jie, Chen Xiaowei

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

**Abstract:** To exploring the deformation character of the composite foundation with and without lateral constraint rammed soil-cement piles under cyclic loading, large-scale indoor model comparative tests are performed. Based on the test results, influence of the lateral constraint on the deformation of the composite foundation is analyzed. It shows that the settlement of the composite foundation with lateral constraint rammed soil-cement piles is smaller than that without the lateral constraint. Effect of the lateral constraint to reduce settlement of composite foundation becomes more significant with the increase of cyclic load ratio. Therefore, the lateral constraint has good effect to restrict the lateral deformation of soft soil and reduce the settlement of composite foundation.

**Keywords:** composite foundation; model test; cyclic loading; lateral constrain

## 0 引言

我国广泛分布着深厚的软粘土层, 随着经济的发展, 在软土地区修建高速铁路、高速公路是不可避免的。在软粘土地区施工时常要进行地基处理,

夯实水泥土桩复合地基是软粘地区进行地基处理的一种常用方法。对于高速公路、高速铁路等工程来说, 其荷载不仅包括静荷载, 还包括动荷载。目前, 国内外相关学者对循环荷载作用下软粘土的特性做了较多试验研究: 胡亚元<sup>[1-2]</sup>通过一维等效时间线模

收稿日期: 2012-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078140)

作者简介: 肖佳兴(1986-), 男, 广西桂林人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地基处理, E-mail: 315448787@qq.com

型和一维条件下软土“最终”沉降与应力路径无关的性质,获得正弦循环荷载作用下路堤运行期间长期总沉降和工后沉降近似计算公式。黄茂松等人<sup>[3]</sup>在考虑影响饱和软黏土循环荷载下轴向循环塑性累积应变的应力历史、动偏应力水平及第一次轴向循环塑性累积应变与围压归一化基础上,提出了计算饱和软黏土轴向循环塑性累积应变显式模型。Parr等人<sup>[4]</sup>提出了基于临界状态及动偏应力水平的饱和软黏土循环加载下轴向循环塑性累积应变,将Ponter提出的“均匀化”理论<sup>[5]</sup>应用于公路、铁路路基在交通荷载作用下的沉降计算。“均匀化”理论模型适用于重复荷载的周期与材料的特征时间(包括流变和固结等)相比很小的情况。C. L. Monismith<sup>[6]</sup>、周建<sup>[7]</sup>、蒋军<sup>[8]</sup>等人曾对软粘土进行过一系列循环试验,并提出了一系列经验模型。白顺果等人<sup>[9-10]</sup>通过循环荷载作用下水泥土桩复合地基的室内模型试验,探讨了影响地基沉降的因素。但循环荷载作用下侧向约束复合地基的性状研究成果甚少。因此本文拟通过室内大比例模型试验,模拟循环荷载作用下垫层、加固区和下卧层相互作用,研究循环荷载作用下有无侧向约束条件下夯实水泥土桩复合地基沉降的传递规律,同时,基于室内大比例模型对比试验结果,分析侧向约束对夯实水泥土桩复合地基变形性状的影响。

## 1 模型试验

### 1.1 模型试验概况

模型试验在2 000 mm×2 000 mm×1 500 mm(长×宽×高)的模型箱内进行。模型箱内分层填筑软粘土,每层填筑厚度为200 mm,并用平板振动器来回振动压实2次,以确保分层压实的均匀性。模型箱内填土结束静置1周后进行夯实水泥土桩的制作,桩体材料为粘土与水泥混合料,粘土中水的含量为35%,水泥采用#325普通硅酸盐水泥,水泥掺入比为10%。夯实水泥土桩的制作采用带芯杆的PVC管成孔,芯杆由圆木制成,直径略小于PVC管内径,长度与PVC管等长,PVC管外径与夯实水泥土桩直径相同。夯实水泥土桩的制作是根据夯实水泥土桩的桩长,将带芯杆的PVC管压入土中,取出芯杆,并将PVC管上拔100 mm,然后在孔内夯填水泥与粘土混合料,夯填质量按压实度为85%,采用填料体积用量控制,当第一段的压实质量满足要求后,再将PVC管上拔100 mm,采用同样的方法在孔内夯填水泥与粘土混合料,重复上述操作直至一根夯实水泥土桩的制作完成。夯

实水泥土桩复合地基模型竖向从上到下依次为50 mm厚砂垫层、900 mm厚的加固层和600 mm厚的下卧层。复合地基中夯实水泥土桩的桩径为75 mm,桩长为0.9 m,桩间距为225 mm,正方形布置。有侧向约束复合地基中的约束桩采用圆木制成,桩径为200 mm,与夯实水泥土桩的中心距为200 mm,有无侧向约束复合地基中桩的平面布置及桩数如图1所示。

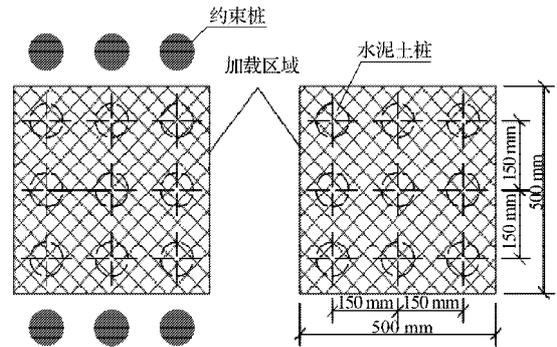


图1 加载区域图

Fig. 1 Load area

在复合地基模型制作完成,静置28天后进行土工参数的测试(测试结果见表1)、复合地基静载试验及循环荷载试验。

表1 土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

压缩模量 /MPa	含水率 /%	重度 / (kN·m <sup>3</sup> )	塑限	液限	内粘聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
1.9	28.2	17.4	29.8	47.1	10.9	5.5

循环荷载试验采用刚性承载板加载,刚性承载板为边长500 mm,厚20 mm正方形钢板,有无侧向约束复合地基模型试验加载区域和加载装置示意图1~2所示。

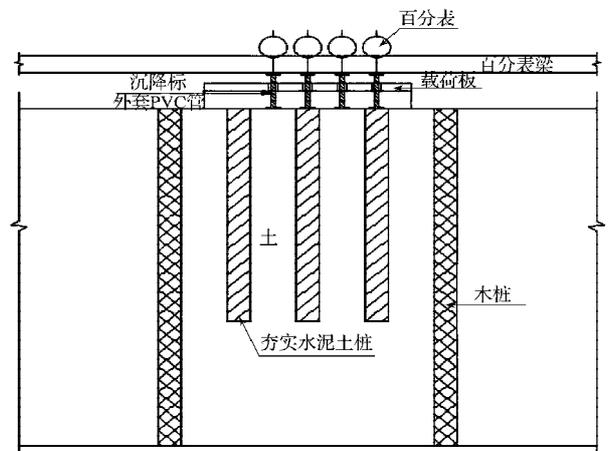


图2 试验模型剖面图

Fig. 2 The test model section

为了模拟交通荷载的特性,采用连续的正弦加

载曲线作为动力加载曲线，加载设备为西安力创多点协调加载试验系统自动控制加载的波形、频率和次数。

### 1.2 循环荷载的施加

本模型试验考虑竖向加载，采用连续的正弦加载曲线作为动力加载曲线。具体试验加载区域见图1，试验模型断面见图2，沉降采用百分表测量。本实验采用加载频率为2 Hz，循环荷载比 ( $R_c = P_{max}/P_u$ ， $P_{max}$  为循环荷载的峰值， $P_u$  为复合地基极限承载力，本文中  $P_u$  的值是通过静荷载确定的) 为 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60; 加载次数均为5 000次。

## 2 实验结果与分析

图3为加载频率是2 Hz情况下，有无侧向约束的复合地基在循环荷载施加5 000次后，载荷板沉降与循环荷载比关系的实测曲线。

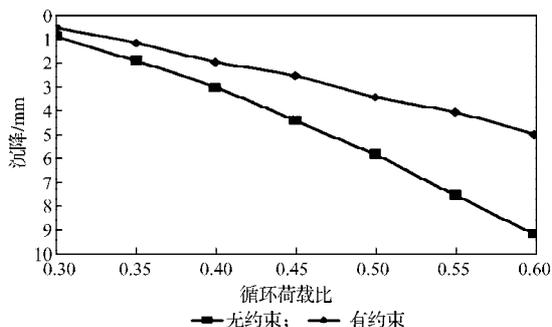


图3 载荷板沉降和循环荷载比关系

Fig. 3 Relation of load plate settlement and cyclic load ratio

从图3中可以看出：在循环荷载作用次数及加载频率相同的条件下，载荷板的沉降均随循环荷载比的增加而增大；有侧向约束的复合地基的沉降明显小于无侧向约束的复合地基的沉降，且随着循环荷载比的增加，两者的差值越来越大。

图4为加载频率是2 Hz情况下，有无侧向约束的复合地基在循环荷载施加5 000次后，桩间土沉降与循环荷载比关系的实测曲线。

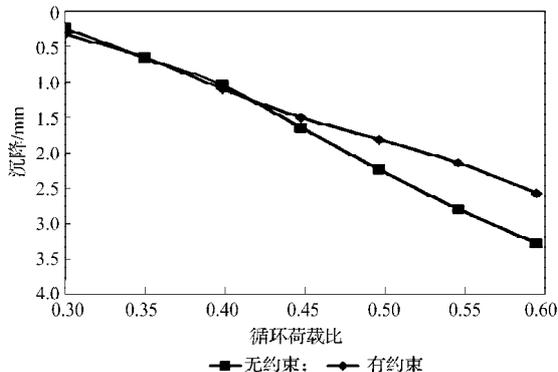


图4 桩间土沉降和循环荷载比关系

Fig. 4 Relation of soil settlement and cyclic load ratio

从图4中可以看出：在循环荷载作用次数及加载频率相同的条件下，桩间土的沉降值随循环荷载比的增加而增大。当循环荷载比小于0.45时，有无侧向约束的复合地基桩间土的沉降差不显著，当循环荷载比大于0.45时，有侧向约束的复合地基桩间土的沉降明显小于无侧向约束的复合地基桩间土的沉降，且随着循环荷载比的增加，两者的差值越来越大，且有侧向约束的复合地基沉降随循环荷载比增加的趋势明显比无侧向约束复合地基沉降增加趋势要平缓。

图5为加载频率是2 Hz情况下，有无侧向约束的复合地基在循环荷载施加5 000次后，桩沉降与循环荷载比关系的实测曲线。

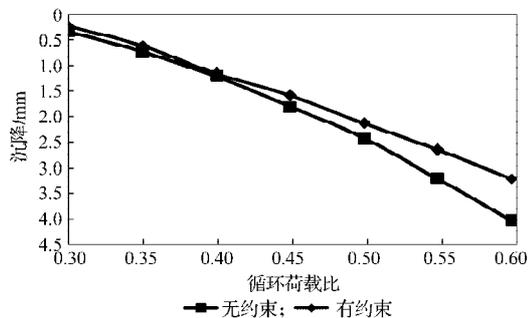


图5 桩沉降和循环荷载比关系

Fig. 5 Relation of pile settlement and cyclic load ratio

从图5中可以看出：桩的沉降均随循环荷载比的增加而增加。当循环荷载比小于0.40时有无侧向约束的复合地基中桩的沉降差值不明显；当循环荷载比大于0.40时，有侧向约束的复合地基中，桩的沉降明显小于无侧向约束的复合地基中桩的沉降，并随着循环荷载比的增加，两者的差值越来越大，且有侧向约束的复合地基桩的沉降随循环荷载比增加的趋势，明显比无侧向约束复合地基桩的沉降增加趋势要平缓。

## 3 结论

1) 在循环荷载作用次数及加载频率相同的条件下，有侧向约束的复合地基的沉降明显小于无侧向约束的复合地基的沉降；因此，在软土地基中可通过设置侧向约束来限制软土的侧向变形，从而达到降低复合地基的沉降，提高复合地基的承载力该方法具有良好的效果；

2) 当循环荷载比小于0.40时，侧向约束对限制软土侧向变形的作用还不能发挥；只有当循环荷载比大于0.40后，侧向约束对限制软土侧向变形、降低地基沉降的作用才能逐步体现出来。

## 参考文献:

- [1] 胡亚元. 准塑性的粘弹性模型在黏土中的应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 253-360.  
Hu Yayuan. Application of Plastic-Like Visco-Elastic Model to Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 253-360.
- [2] 胡亚元. 考虑次固结时循环荷载引起的软基沉降[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(1): 106-111.  
Hu Yayuan. Settlement of Soft Ground Induced by Cycle Load Considering Secondary Settlement [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(1): 106-111.
- [3] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891-895.  
Huang Maosong, Li Jinjun, Li Xingzhao. Cumulative Deformation Behavior of Soft Clay in Cyclic Undrained Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 891-895.
- [4] 刘明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1703-1709.  
Liu Ming, Huang Maosong, Liu Yanhua. Long-Term Settlement of Tunnels Across a River Induced by Vehicle Operation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1703-1709.
- [5] Abdelkrim M, Bonnet G, de Buhan P. A Computational Procedure for Predicting the Long Term Residual Settlement of a Platform Induced by Repeated Traffic Loading[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 463-476.
- [6] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent Deformation Characteristics of Subsoil Due to Repeated Loading[J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1-17.
- [7] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75-78.  
Zhou Jian, Gong Xiaonan. Study on Strain Softening in Saturated Soft Clay under Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75-78.
- [8] 蒋军. 循环荷载作用下粘土应变速率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 528-531.  
Jiang Jun. Study on the Strain Rate of Clay under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 528-531.
- [9] 白顺果, 侯永峰, 张鸿儒. 循环荷载作用下水泥土桩复合地基的临界循环应力比和永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 84-87.  
Bai Shunguo, Hou Yongfeng, Zhang Hongru. Analysis on Critical Cyclic Stress Ratio and Permanent Deformation of Composite Foundation Improved by Cement-Soil Piles under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 84-87.
- [10] 白顺果, 侯永峰, 张鸿儒, 等. 循环荷载作用下水泥土桩复合地基模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊1): 1017-1020.  
Bai Shunguo, Hou Yongfeng, Zhang Hongru, et al. Model Testing Study on Composite Foundation of Cement-Soil Pile under Cyclic Loading [J], Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 1017-1020.

(责任编辑: 申 剑)