

# 单桩复合地基静载荷试验系统的设计与应用研究

巩天真<sup>1</sup> 常积玉<sup>1</sup> 韩鹏举<sup>2</sup>

(1. 山西大学工程学院, 山西太原 030013; 2. 太原理工大学, 山西太原 030024)

**【摘要】** 复合地基是通过褥垫层的调整作用, 充分发挥桩间土的承载作用, 使桩土共同承担荷载的地基。基于复合地基的实际工况, 设计了一种单桩复合地基静载荷试验系统, 既体现了褥垫层的调整作用, 又可测得复合地基中桩体、桩间土、复合地基的荷载与其相应的沉降, 同时可得出复合地基受力过程中桩土荷载分配过程与桩土应力比, 提示了复合地基工作机理。通过工程实例测试, 探讨了复合地基的工作机制, 为复合地基的科研、设计与检测提供了依据。

**【关键词】** 复合地基; 褥垫层; 作用机理; 静载荷试验; 桩土应力比

**【中图分类号】** TU 413.4

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2011.01.001

## The Design and Application of Single Pile Composite Foundation Static Loading Testing Set

Gong Tianzhen<sup>1</sup> Chang Jiyu<sup>1</sup> Han Pengju<sup>2</sup>

(1. Engineering College of Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi, China;

2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**【Abstract】** In order to obtain the composite foundation practical work state, which acts by cushion adjusting and by pile and soil bearing load together, single pile composite foundation static loading testing set is designed. It is used to test composite foundation characteristic value of composite foundation bearing capacity, characteristic value of pile and characteristic value of soil in piles containing cushion. This set can obtain the settlements of pile, soil in piles, and composite foundation and load severally, and can make the results of distribution of load in piles and soil in piles under composite foundation load, and can acquire the pile—soil stress ratio, which displays working mechanism of composite foundation. At last, through the practical testing used single pile composite foundation static loading testing set, the composite foundation, pile and soil in piles working state are discussed respectively, which can be used practically in scientific research, practical design and technical testing of composite foundation.

**【Key words】** composite foundation; cushion; strengthening mechanism; static loading test; pile—soil stress ratio

### 0 引言

复合地基是指部分土体被增强或被置换形成增强体, 由增强体和周围地基土共同承担荷载的地基。由于其充分利用桩间土和桩共同作用的特有优势和相对低廉的工程造价, 得到了越来越广泛地应用。复合地基设计中, 基础与桩和桩间土之间设置一定厚度散体粒状材料组成的褥垫层, 通过褥垫层的调整作用, 可充分发挥桩间土的承载作用, 使桩土共同承担荷载, 从而可节省工程造价。目前复合地基已形成了相对完整的理论体系和设计方法, 并且有效地指导着复合地基的工程实践<sup>[1-5]</sup>。但复合地基中

尚有一些问题一直未得到解决。

1) 计算方面: 复合地基承载力计算公式为<sup>[6]</sup>

$$f_{\text{spk}} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m) f_{\text{sk}} \quad (1)$$

或

$$f_{\text{spk}} = [1 + m(n - 1)] f_{\text{sk}} \quad (2)$$

式(1)中  $R_a$  为单桩竖向承载力特征值,  $f_{\text{sk}}$  为处理后桩间土承载力特征值, 取经验值或天然地基承载力特征值, 并不是桩土共同作用的承载力发挥值, 由此计算的复合地基承载力  $f_{\text{spk}}$  与实际是有误差的。

**专利项目:** 实用新型发明专利(ZL 200620023468.3); 国家发明专利(ZL 200610012379.3)

**作者简介:** 巩天真, 1957年生, 男, 汉族, 山西和顺县人, 硕士, 教授, 主要从事地基与基础工程方面的教学与研究。E-mail: gongtz01@163.com

式(2)中  $n$  为桩土应力比,是复合地基很重要的参数,是指复合地基中桩顶上的平均应力与桩间土上的平均应力的比值,反映了桩、土强度的发挥水平,也是现行复合地基优化设计中的一个重要内容。其表达式如下:

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_p$  为桩顶应力, kPa;  $\sigma_s$  为桩间土应力, kPa。

人们对桩土应力比进行了许多研究<sup>[7-12]</sup>,但在现有工程测试中无法得到,设计计算中只能用估计值,《建筑地基处理技术规范》建议对粘性土取 2~4,对粉土和砂土可取 1.5~3.0。

2)测试方面:目前复合地基承载力测试常用的是用刚性压板的方法,是将桩顶面与桩间土整平成一平面,铺 50~150 mm 的砂垫层,再用刚性压板直接压到桩与桩间土上来测试复合地基承载力。此时桩与桩间土的变形始终是一致的,体现不出褥垫层的调整作用,反映不出实际工程中,桩在褥垫层中的反刺入现象,也测不出由于桩、土刚度不同所分担的力与变形的不同。实际上,目前的测试方法中测试时的工作性能与实际工程受力工况不相符合,所测得的桩土共同作用时的总体受力与变形也就不是桩土复合地基真正的受力与变形的特性。

本文通过分析复合地基的工作机理,设计出单桩复合地基静载荷试验系统,同时测得复合地基体中桩体、桩间土、复合地基的加载量与其相应的沉降量,既可体现出褥垫层的调整作用,也真实地反映了桩土共同工作的性状,为复合地基的科研、设计、检测提供了依据。

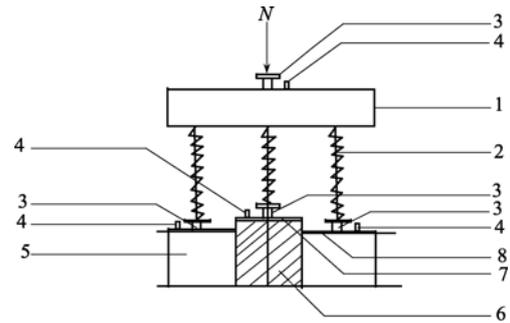
## 1 试验系统的设计

### 1.1 需解决的技术问题

- 1)体现出褥垫层的调整作用;
- 2)真实地反映桩土共同工作的性状。

### 1.2 设计方案

根据已有复合地基系列模型<sup>[13-15]</sup>,本系统采用如下技术方案实现:桩体上方设置中心承压板,桩间土上方设置环形承压板,刚性承压板设于中心承压板与环形承压板上方,并与两承压板分别用与褥垫层等效的传力元件(与褥垫层相同特性的材料,实际测试用级配碎石)连接,中心承压板、环形承压板、刚性承压板上设置有力传感器与位移传感器,试验系统工作原理见图 1。



1—刚性承压板;2—与褥垫层等效的传力元件;  
3—力传感器;4—位移传感器;5—桩间土;  
6—桩体;7—中心承压板;8—环形承压板

图 1 单桩复合地基静载荷试验系统原理图

### 1.3 与现有技术比较及应用对象

本设计将原来的整块刚性承压板改为一个小圆型板(其面积等于桩面积)和一块环形板(其面积等于桩间土面积)作为压板,中间用褥垫层等效的传力元件(与褥垫层相同特性的材料,相当于褥垫层的作用)传力。在施压时,桩土各自变形。用测力传感器分别测桩、土所受的力,用位移传感器分别测桩和土的变形。这样,桩、土在共同作用时的力与变形即可实时测得,顶部仍可测得桩土共同作用的力与变形。

本系统可适用于所有复合地基的单桩复合地基静载荷试验。有益效果如下:可同时测得桩土共同作用时的总体受力与变形,还可测得桩、土在共同作用时和各自的受力和变形,可得到桩土应力比,体现了褥垫层的作用,可测得桩土复合体的实际工作性能。

## 2 单桩复合地基静载荷试验

### 2.1 工程概况

太原某高校学生公寓楼,6层砖混结构,1层地下室,建筑总高度 19.8 m,基础型式为筏片基础。设计采用水泥土搅拌桩处理地基。桩径为  $\phi 500$  mm,有效桩长为 10.0 m,桩间距 1000 mm,正三角形布置。要求复合地基承载力特征值不小于 135 kPa,单桩承载力特征值不小于 150 kN,桩体强度要求不小于 2.0 MPa。场地为非湿陷性黄土地;场地内地下水位高程介于 96.22~97.10 m,地下水对钢筋混凝土具有弱腐蚀性;场地类别为Ⅲ类,场地土类型为中软场地土;地震动峰值加速度 0.20 g,地震烈度为Ⅷ度;最大冻土深度为 80.0 cm。

### 2.2 试验系统的制作

#### 2.2.1 加载装置

本次试验采用堆载试验,根据计算,一根桩承担

的处理面积为  $0.866\text{m}^2$ 。按设计要求的复合地基承载力特征值推算,最大加荷量为  $259.8\text{kN}$ 。试验采用堆载平台试验装置,堆载平台由型钢拼组而成,堆载采用混凝土预制块,按堆载量不小于设计的最大加荷量的  $1.2$  倍,即  $400\text{kN}$ 。加载设备由主梁、千斤-油泵等组成。加载时千斤顶顶起主梁使堆载平台承受反力。用 QY-500 型油压千斤顶加载。

### 2.2.2 试验系统

试验系统制作图见图 2。

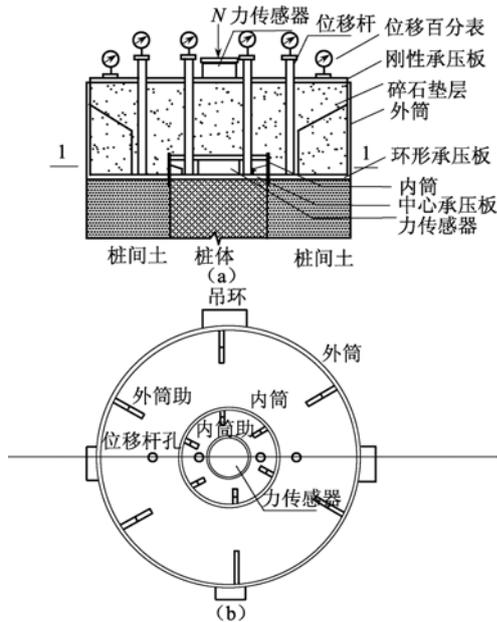


图 2 试验系统制作图

单桩复合地基载荷试验系统采用  $600\text{kN}$  力传感器(型号:CZLYB-5)与 CML-20 型应变/力综合测试仪测量桩体受力,用 8 个百分表分别测量桩体、桩间土及复合地基的沉降量。其中,4 个表测复合地基沉降,2 个表测桩顶沉降,2 个表测桩间土沉降,褥垫层采用与设计相同的级配碎石,厚  $30\text{cm}$ ,试验现场见图 3。



图 3 单桩复合地基载荷试验系统现场试验图

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 荷载-沉降( $p-s$ )分析

普通方法与采用此试验系统所测得的  $p-s$  曲线见图 4。在进行复合地基静载荷试验时,传统的方

法只能测得一条  $p-s$  曲线(见图 4(b)),即复合地基应力与沉降的关系曲线,而新装置方法可同时得到三条曲线,即桩体  $p_p-s$  曲线、桩间土的  $p_s-s$  曲线、复合地基的  $p_{sp}-s$ (见图 4(a))。

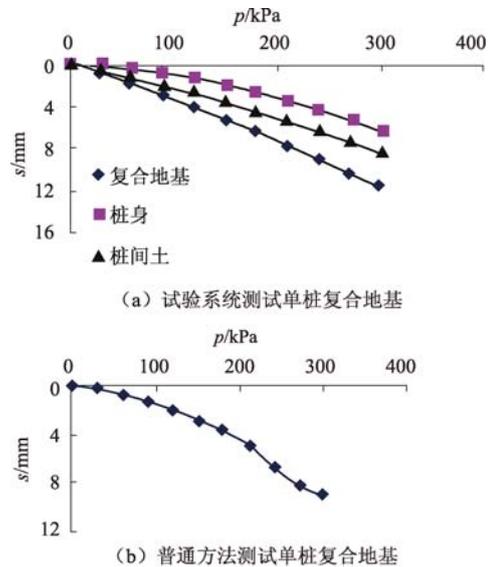


图 4 单桩复合地基静载荷试验  $p-s$  曲线

其中图 4(a)中的  $p_{sp}-s$  曲线包含等效褥垫层的变形,体现了褥垫层在荷载作用下对桩土的协调作用,反映了复合地基的实际工作性状;通过试验的  $p-s$  曲线组,既能得到复合地基承载力特征值,又能得到单桩竖向抗压承载力特征值和桩间土的承载力特征值,供设计中参考。

图 4(a)的试验结果显示:①桩与桩间土由于刚度不同,变形也不同,桩间土的变形大于桩体的变形;②由于试验中复合地基的变形包含褥垫层的变形,所以,其值比常规试验的沉降较大;③试验结果与工程中的实际受力过程一致。④本装置的试验时间与普通方法一样,但本试验结果更为全面、合理。

#### 2.3.2 桩土受力分配分析

复合地基在加载期间的受力分配过程见图 5:①在复合地基压力小于  $150\text{kPa}$  时,复合地基、桩体与桩间土的分担力比例基本相同,桩分担比为  $30\%$ ,桩间土比例为  $70\%$ ;②当复合地基加载大于

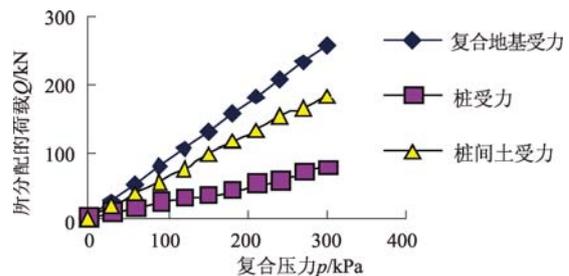


图 5 桩土受力分配图

200 kPa以后,桩体分担比例减小,桩间土分担比例增大。充分体现复合地基工作性状。

### 2.3.3 桩土应力比分析

由于本装置能同时测得桩体、桩间土与复合地基的载荷-沉降曲线与其相应的压力分配过程(见图6)。由图可知:①在复合地基压力小于50 kPa时,复合地基、桩体与桩间土的压力基本相同;②当复合地基加载大于200 kPa以后,桩体压力增大,桩间土压力减小;③复合地基的压力与加载成正比例,桩体的应力始终大于复合地基与桩间土压力,说明桩体发挥作用正常。

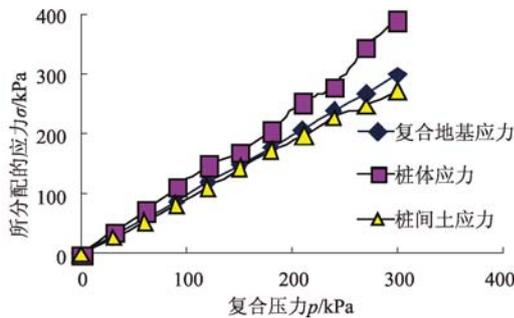


图6 桩土应力分配图

由图6可算出桩土应力比。桩土应力比在加载初期较大,随着荷载的增加而减小,后又增加呈波浪形变化,反映出随着荷载的增加复合地基桩、土沉降相互协调发展(见图7)。由试验所知,所测桩土应力比为1.2~1.4,低于《建筑地基处理技术规范》所推荐的1.5~4。这与复合地基的工作性状有关,当地的土质(粉土)与褥垫层(碎石)的厚度(30 cm)导致复合地基的工作时变形较小,从而导致测得的桩土应力比偏小,但与李国维<sup>[16]</sup>测得结果为1.1~1.75、吴明慧测得结果为1.1~1.6比较接近。

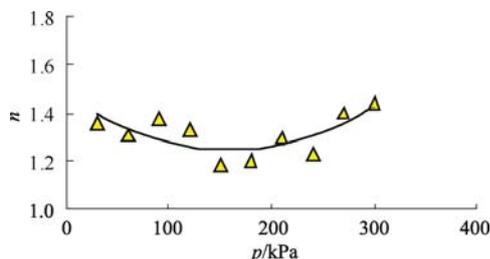


图7 桩土应力比与荷载关系图

## 3 结论

1)本文设计的单桩复合地基静载荷试验系统,可测得桩体、桩间土及复合地基的载荷-沉降关系,桩体、桩间土及复合地基在加载中的压力分配过程,可测得桩土应力比,提示了复合地基的实际工作机理,与传统的试验方法相比更为经济、合理。

2)实测水泥土搅拌桩复合地基的桩土应力比在1.2~1.4之间,低于规范所推荐的1.5~4,但与相关文献接近。

3)因本试验装置具备了多参数检测的功能,可进一步开发检测复合地基中垫层的工作性能。

4)本次试验只是进行了单桩复合地基试验,对群桩复合地基的影响,今后尚应增大试验系统,研究多桩复合地基的工作机理。

## 参考文献

- [1] 秦建庆,孟杰武. 考虑土的非线性的水泥土桩复合地基特性分析[J]. 岩土力学,1998,19(3):54-58.
- [2] 陈龙珠,梁国钱,朱金颖. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法[J]. 岩土工程学报,1994,16(6):30-38.
- [3] 段继伟,龚晓南,曾国熙. 水泥土搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报,1994,16(4):1-8.
- [4] 张雁,黄强. 半刚性桩复合地基性状分析[J]. 岩土工程学报,1993,15(2):86-93.
- [5] 吴慧明,龚晓南. 刚性基础与柔性基础下复合地基模型试验对比研究[J]. 土木工程学报,2002,34(5):81-83.
- [6] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [7] 王树强. 确定桩土应力比  $n$  值的探讨[J]. 西南交通大学学报,1993(3):40-45.
- [8] 秦然,陈征宇,董平. 水泥土复合地基桩土应力比的一种解析算法[J]. 岩土力学,2001,22(1):96-98.
- [9] 池跃君,宋二祥,陈肇元. 刚性桩复合地基在不同荷载下的桩土分担特性[J]. 天津大学学报,2003,36(3):359-363.
- [10] 李志斌,叶观宝,徐超. 水泥土搅拌桩复合地基桩土应力比的对比分析[J]. 地下空间与工程学报,2005(6):386-391.
- [11] 李时亮,郑俊杰. 柔性基础下水泥土搅拌桩复合地基分析与设计[J]. 岩土力学,2002,23(增):103-105.
- [12] 晏启祥,周全能,刘浩吾,等. 粉喷桩加固软土路基筑堤试验原位研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1415-1419.
- [13] 郑俊杰,黄海松. 水泥土桩复合地基桩土应力比的解析算法[J]. 岩土力学,2005(9):1432-1437.
- [14] 方磊,谢永利. 柔性基础下复合地基模型试验研究[J]. 土木工程学报,2005,38(5):67-72.
- [15] 朱世哲,徐日庆,杨晓军,等. 带垫层刚性桩复合地基桩土应力比的计算与分析[J]. 岩土力学,2004(5):814-819.
- [16] 李国维,杨涛. 柔性基础下复合地基桩土应力比现场试验研究[J]. 岩土力学,2005(2):265-269.