

# 红黏土地层微型 CFG 桩复合地基试验研究

刘创<sup>1</sup>, 张可能<sup>1</sup>, 刘源<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 2. 中国有色桂林矿产地质研究院, 广西桂林 541004)

**摘要:** 微型 CFG 桩在广西桂林地区得到了广泛运用, 为拓展研究 CFG 桩在红黏土土层中的运用, 通过室外足尺微型 CFG 桩复合地基现场试验, 对复合地基承载力经验公式中桩间土承载力强度提高系数、单桩承载力发挥系数以及桩-土应力比进行试验研究。试验结果表明: 微型 CFG 桩桩长在 1~4 m 范围内, 桩间土提高系数随桩长的增加而增加, 但增加趋势逐渐减小; 单桩承载力发挥系数随桩长增加而减小, 桩长 1~3 m 时, 单桩承载力发挥系数大于 1, 桩长大于等于 3 m 时, 单桩承载力发挥系数小于 1; 桩土应力比在 1~8 之间, 随着桩长增加而增加。

**关键词:** 微型 CFG 桩; 复合地基; 桩间土提高系数; 单桩承载力发挥系数; 桩土应力比

中图分类号: TV223

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)01-0194-03

## Experiment on composite foundation of miniature CFG pile in red clay layer

LIU Chuang<sup>1</sup>, ZHANG Keneng<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. China Nonferrous Metal Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The miniature CFG pile has been widely used in guilin area of Guangxi. In order to provide theoretical basis for the development and study of CFG pile used in red clay layer, through in-situ test study on outdoor full scale miniature CFG pile, the article studied the increase coefficient of bearing capacity, exertion coefficient of bearing capacity of single pile, and stress ratio of pile to soil in empirical formula of bearing capacity of composite foundation among piles. The experimental results demonstrate that when the length of miniature CFG pile is in the range of one to four meters, the coefficient of bearing capacity between piles increases with the increase of pile's length, but the trend of increase gradually decreases. The coefficient of bearing capacity of single pile decreases with the increase of pile's length. when pile length is one to three meters, the exertion coefficient of bearing capacity of single pile is greater than one. When the pile length is greater than or equal to three meter, the coefficient of bearing capacity of single pile is less than one. When the stress ratio of pile to soil is between one and eight, The coefficient increases with the increase of pile length.

**Key words:** miniature CFG pile; composite foundation; efficiency factor between piles; increase coefficient of bearing capacity of single pile; stress ratio of pile to soil

## 1 研究背景

随着社会经济的快速增长, 带动了建筑业的蓬勃发展, CFG 桩作为一种常见的地基处理方式, 已被广泛研究和应用。范伟震等<sup>[1]</sup>对 CFG 桩复合地基承载力公式  $\beta$  参数取值进行了试验研究; 陈昌仁等<sup>[2]</sup>对 CFG 桩复合地基承载力经验公式的修正及

应用进行了试验研究; 于富华<sup>[3]</sup>对 CFG 桩复合地基承载力计算公式进行试验研究; 但汉成等<sup>[4]</sup>对 CFG 桩复合地基岩土应力比计算与影响因数进行了分析等等<sup>[5-10]</sup>。但是《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2012) 中既没有涉及微型 CFG 桩, 又对区域性土层中 CFG 桩的运用尚无明确规定。本文结合桂林地区残积红黏土的特点<sup>[11-13]</sup>, 进行了室外足尺单桩

收稿日期: 2014-08-01; 修回日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108176)

作者简介: 刘创(1989-), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 研究方向: 地基处理。

通讯作者: 张可能(1962-), 男, 湖南邵阳人, 博士后, 教授, 主要从事岩土加固和地基处理等方面研究。

复合地基试验研究,对红黏土地层中微型 CFG 桩复合地基桩间土承载力强度提高系数、单桩承载力发挥系数、桩-土应力比进行分析研究,为拓展 CFG 桩在红黏土地层中的应用提供理论依据。

## 2 室外足尺试验设计

本次室外试验设计 4 组单桩复合地基试验,试验场地布置示意图见图 1 和图 2。

试验场地通过先开挖,后分层回填并压实,开挖深度 4m,每层填土厚 0.5 m,压实后做标准贯入试验,回填压实结束后对试验场地进行钻孔取样进行室内试验,土体力学性质如表 1。

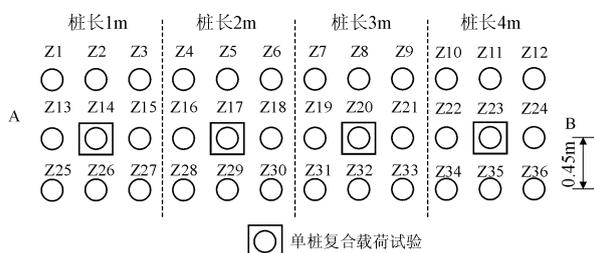


图 1 局部场地平面布置示意图

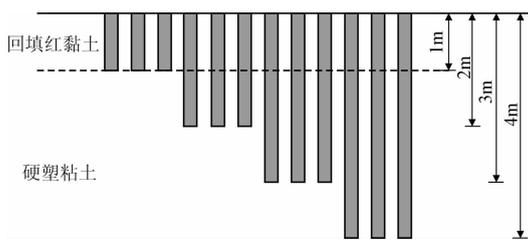


图 2 剖面示意图

表 1 地基土主要物理力学参数

层号	岩土名称	厚度/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$f_{ak}$ / kPa	$E_s$ / MPa	$C$ / kPa	$\varphi$ / ( $^\circ$ )	$q_{si}$ / kPa	$q_p$ / kPa
1	可塑黏土	0~1	18.0	130	6.5	30	15	15	
2	硬塑黏土	1~5	19.0	180	8.0	65	20	25	360
3	硬塑黏土	5~9	19.5	200	10.0	75	22		
4	灰岩			1200					

试验垫层采用 10 cm 的碎屑垫层,CFG 桩体材料采用碎石:碎屑:水泥=7:2:1 的混凝土,碎屑成份是碎石破碎时产生的岩粉,最大粒径小于 10 mm。压板采用直径为 0.5 m 的圆形压板。

此试验为 4 组单桩复合地基试验,选取桩长为 1、2、3 以及 4 m 的桩进行复合地基承载力试验,通过在桩顶和土体表面埋设土压力盒测量桩和土的应力,土压力盒埋设见图 3 和 4,试验桩号为:

$Z_{14}$ : $d = 150 \text{ mm}, L = 1 \text{ m}$ ;  $Z_{17}$ : $d = 150 \text{ mm}, L = 2$

$\text{m}$ ;  $Z_{20}$ : $d = 150 \text{ mm}, L = 3 \text{ m}$ ;  $Z_{23}$ : $d = 150 \text{ mm}, L = 4 \text{ m}$ 。



图 3 开挖安置土压力盒孔



图 4 安置土压力盒

## 3 载荷试验

### 3.1 测试装置

本次静载荷试验采用压重平台反力加载装置;测试仪主机采用武汉岩海工程技术公司研制的 RS-JYB 电脑全自动桩基静荷载测试分析系统;荷载(P)采用联接于电动油泵的 MPM420-70MPa-2 型压力传感器,通过主机控制传感器测定;沉降(S)采用 50 mmRSW-50 型位移传感器测定,在测点压板中心轴线上对称布置 4 个。测试仪主机及位移传感器均经武汉市技术监督局计量认证。用 DSC 无限数据采集仪测量桩土应力。

### 3.2 加载装置

加载(卸载)通过 0.8 kN/min 电动高压油泵经主机控制给 200 t 油压千斤顶加压(卸载);压重平台反力装置采用足够重量(约 35 t)的砧试块经主梁与次梁堆加。

### 3.3 加载与沉降观测

加载分级:每级加载为预估荷载的 1/10,第一级加载按两倍分级荷载加载;加载后每隔 5、10、15、15、15 min,以后每隔 30 min 读一次沉降。当连续 2 h 内,沉降量小于 0.1 mm/h 时,则认为沉降已经趋于稳定,可加下一级荷载。

### 3.4 停止加载条件

当出现下列情况之一时,即可终止试验:

- (1)某级荷载作用下桩的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的 5 倍;
- (2)沉降极剧增大,土被挤出或承压板周围出现明显隆起;
- (3)某级荷载作用下,沉降大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍,且 24 h 未达到相对稳定。

## 4 试验结果及其分析

### 4.1 单桩复合承载力分析

进行了桩长为1, 2, 3及4 m的微型CFG桩复合试验, 垫层厚度采用10 cm厚的碎屑, 承压板采用直径为0.5 m的圆形钢板(板厚40 mm)。试验结果如图5和表2。

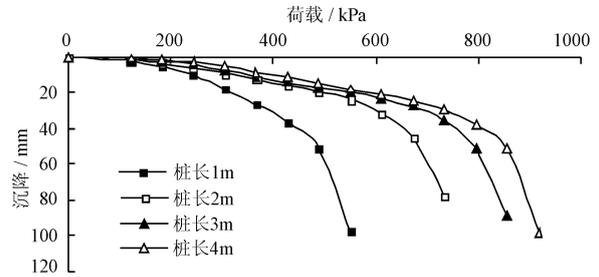


图5 单桩复合试验

表2 试验结果计算表

桩长/m	单桩承载力特征值计算值/kN	复合承载力特征值计算值/kPa	实测复合地基承载力极限值/kPa	实测土压力承载力力极限值/kPa	实测桩顶承载力力极限值/kN	$\lambda$	$\beta$	$k$
1	9.40	142.52	488.94	400.64	30.92	1.64	1.56	1.72
2	21.70	205.17	672.29	484.92	48.63	1.12	1.85	1.64
3	33.50	265.27	794.52	504.75	66.09	0.99	1.94	1.50
4	45.20	324.86	855.64	520.76	77.04	0.85	2.00	1.32

注:  $k$  为复合地基承载力特征值/理论计算承载力特征值;  $\beta$  为桩间土体承载力提高系数;  $\lambda$  为单桩承载力发挥系数。

从试验结果中可以得出, 1~4 m的单桩复合地基承载力特征值比理论计算值大1.32~1.72, 随着桩长越长, 比值逐渐减小。

对于《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2012)7.1.5, 公式<sup>[14]</sup>:

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_d}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}$$

$\lambda$  为单桩承载力发挥系数;  $m$  为面积置换率;  $R_d$  为计算单桩承载力值;  $A_p$  为桩体面积;  $\beta$  为桩间土体承载力提高系数,  $f_{sk}$  为天然土体承载力特征值。

在桂林地基红黏土地层中, 桩长1~4 m时,  $\lambda$  取0.85~1.64, 桩长越长系数越小,  $\beta$  取1.54~2.0, 桩长越长比值越大。

### 4.2 桩土应力比分析

图6为4组单桩复合地基试验桩土应力对比曲线。由图6可以得出以下几点:

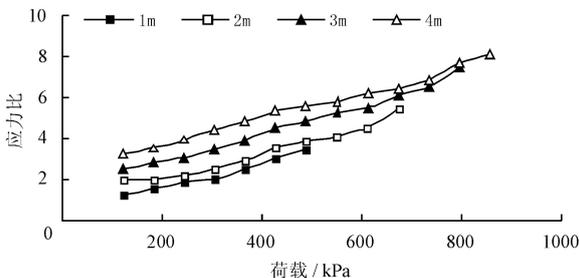


图6 桩土应力比曲线

(1) 桩长为1~4 m的复合地基在极限荷载范围内桩土应力比在1~8之间;

(2) 在荷载相同的条件下, 桩越长桩土应力比越大;

(3) 在复合地基极限荷载范围内, 桩土应力比随着荷载的增加而增加。

## 5 结 语

(1) 在广西桂林红黏土地层中, 采用振冲挤密法方式成桩的微型CFG桩复合地基, 随着桩长的增加, 复合地基承载力增加, 但增加系数逐渐减小, 建议工程使用时桩长小于5 m。

(2) 桩长1~3 m时, 单桩承载力发挥系数大于1,  $\lambda$  取1.0~1.64, 随桩长增加系数逐渐减小, 桩长大于3 m时, 单桩承载力发挥系数将小于1,  $\beta$  取1.54~2.0, 桩长越长比值越大。

(3) 桩长为1~4 m的复合地基, 在极限承载力范围内, 随荷载的增加而增加, 荷载相同的情况下, 桩土应力比随桩长的增加而增加。

### 参考文献:

- [1] 范伟霞, 周建, 俞亚南, 等. CFG桩复合地基承载力公式 $\beta$ 参数取值分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(3): 71-75.
- [2] 陈昌仁, 侯新宇, 郭洪涛. CFG桩复合地基承载力经验公式的修正及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 321-324.
- [3] 于富华. CFG桩复合地基承载力计算方法的比较[J]. 岩土工程界, 2002, 5(11): 47+50.
- [4] 但汉成, 李亮, 赵炼恒, 等. CFG桩复合地基桩土应力比计算与影响因素分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(5): 7-12.
- [5] 张泰安, 王军琪. CFG单桩及单桩复合地基承载力试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009(7): 20-24.

ABAQUS 软件的降雨入渗分析功能。

(2)通过与文献[6]的对比分析可以看出,开发出的降雨模块是稳定可靠的,可以用于边坡降雨入渗的分析;与文献[6]中的自编程序相比,开发出的模块可以进一步利用 ABAQUS 提供的位移-孔压单元,进行降雨作用下三维边坡的流固耦合计算。

(3)该降雨模块是基于 ABAQUS 软件进行的二次开发,便于利用 ABAQUS 软件所提供的各类功能完成更加复杂的研究工作;因此,可以为以后进行与降雨相关的更复杂问题的研究提供一个良好的研究平台。

### 参考文献:

[1] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management - an overview[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65 - 87.

[2] 海龙, 梁冰. 考虑降雨入渗条件的土体边坡稳定性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(4): 46 - 50.

[3] 付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2359 - 2365.

[4] 唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3239 - 3248.

[5] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉, 等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 625 - 629.

[6] Cai Fei, Ugai K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, 4(2): 69 - 78.

[7] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边

坡稳定分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1957 - 1962.

[8] 崔亮, 崔可锐. 基于 ABAQUS 对降雨条件下非饱和土坡稳定性的研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(11): 1560 - 1564.

[9] 朱伟, 程南军, 陈学东, 等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2): 235 - 240.

[10] Santoso A M, Phoon K K, Quek S T. Effects of soil spatial variability on rainfall induced landslides[J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(11 - 12): 893 - 900.

[11] 章正, 张本卓. 应用 ABAQUS 模拟边坡降雨入渗的评价性分析[J]. *中国科技信息*, 2012(9): 80.

[12] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(2): 384 - 394.

[13] 高润德, 彭良泉, 王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. *人民长江*, 2001, 32(11): 25 - 27.

[14] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. *岩土力学*, 1999, 20(1): 2 - 15.

[15] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5): 57 - 61.

[16] 陈学东. 浅层非饱和带降雨入渗规律的试验与数值研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[17] Kim J M, Parizek R R. Three-dimensional finite element modeling for consolidation due to groundwater withdrawal in a desaturating anisotropic aquifer system[J]. *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 1999, 23(6): 549 - 571.

[18] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(上接第 196 页)

[6] 彭志鹏. CFG 桩处理中等压缩性土地基试验研究[J]. *铁道建筑*, 2009(7): 13 - 18.

[7] 闫韩生, 曹森虎, 韩茂蔚. CGF 桩在处理湿陷性黄土地基中的应用研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 40(2): 218 - 223.

[8] 王炳龙, 杨龙才, 周顺华, 等. CFG 桩控制深厚层软土地基沉降的试验研究[J]. *铁道学报*, 2006, 28(6): 112 - 116.

[9] 潘纪顺, 刘志伟, 姬计法, 等. CFG 桩复合地基承载性状的试验研究[J]. *地质与勘探*, 2001, 37(4): 92 - 94.

[10] 薛新华, 魏永幸, 杨兴国, 等. CFG 桩复合地基室内模型试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(2): 7 - 12.

[11] 韦复才. 桂林红粘土的物质组成及工程地质性质特征[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(5): 460 - 464.

[12] Singer A. Weathering patterns in representative soils of Guangxi Province, South-east China, as indicated by detailed clay mineralogy [J]. *Journal of Soil Science*, 1993, 44(1): 173 - 188.

[13] Gao Guorui. The distribution and geotechnical properties of loess soils, lateritic soils and clayey soils in China[J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(1): 95 - 104.

[14] 中国建筑科学研究院. JGJ79 - 2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.