

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.015

CFG 桩复合地基承载性状的研究

韩永强, 朱雪珂

(西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: CFG 桩复合地基是一种经济、可靠的地基处理方法,可以有效控制地基变形、提高地基承载力。依据工程实例提出为了使桩与土之间的应力分别达到调节和平衡的目的,可以调整褥垫层厚度和置换率的方法来完成,减少基底应力集中,达到充分发挥桩间土的作用,并得出了褥垫层厚度适用范围值。同时,采用 MIDAS/GTS NX 有限元计算软件分析得出了褥垫层厚度、置换率对桩土应力比和沉降量的影响规律,并对有限元法和理论计算法进行了比较分析,验证了其可靠性。研究表明:桩土应力比和沉降量随褥垫层厚度的增大而逐渐减小;桩土应力比和沉降量随置换率的增大逐渐减小,而桩土应力比趋于稳定。

关键词: CFG 桩复合地基、褥垫层、置换率、地基承载力

中图分类号: TU473.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)06—0077—05

Bearing Behavior of CFG Pile Composite Foundation

HAN Yongqiang, ZHU Xueke

(School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: The composite foundation of CFG-pile is an economical and reliable foundation treatment method, which can effectively control the deformation of the foundation and improve the bearing capacity of the foundation. The method that adjusting the cushion thickness and replacement rate is proposed based on the engineering example. It makes the stress between the pile and the soil can be adjusted and balanced, and the stress concentration of the base can be reduced, which makes full use of the role of soil between piles, and proposes the applicable range of the thickness of the cushion. The influence of the thickness and replacement rate of the cushion on the pile-soil stress ratio and settlement is obtained by Midas NX GTS finite element calculation software. The finite element method and theoretical calculation method are compared and analyzed to verify its reliability. The main conclusions are as follows: the pile-soil stress ratio and settlement decrease with the increase of cushion thickness; the pile-soil stress ratio and settlement gradually decrease with the increase of displacement rate, while the pile-soil stress ratio tends to be stable.

Keywords: composite foundation of CFG-pile; cushion; replacement rate; bearing capacity of the foundation

随着国家经济建设的大力快速发展,高层、超高层建筑在人们的生活中越来越普遍。由于高层建筑基础荷载重、面积大、埋置深,天然地基难以满足建筑物对地基承载力(变形)的要求,因此在高层、超高层的建筑工程中,CFG 桩复合地基被广泛应用,还被列入国家行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)CFG 桩由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌合形成的高粘结强度桩,又称为水泥粉煤灰碎石桩(Cement Fly-Ash Gravel, Pile)。常用于和桩间

土、褥垫层形成新型复合地基,共同承担建筑物荷载,如图 1 所示。20 世纪 80 年代末,中国建筑科学研究院研发了这种地基处理的新技术,不但可以大幅度提高地基承载力、有效减少地基施工后沉降等特点,并且具有良好地消除地基的不均匀变形的适应性^[1-3]。

CFG 桩、桩间土以及褥垫层共同组成刚性复合地基。由于 CFG 桩桩体自身刚度大,可以使荷载从桩顶向桩底部传递过程中有很大的可调性,所以与

收稿日期:2018-07-19

修稿日期:2018-08-15

作者简介:韩永强(1962—),男,陕西泾阳人,教授,主要从事岩土工程方面的工作。E-mail:1242470889@qq.com

通讯作者:朱雪珂(1992—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:315604233@qq.com

一般柔性桩复合地基相比,地基承载力大幅度提高。此外,CFG 桩复合地基在充分发挥桩承载力的同时,桩可以沿着整个桩长发挥侧摩阻力和端摩阻力,使得桩间土一起参与受荷工作,能够大幅增加承载力并减少沉降。CFG 桩复合地基广泛应用于处理各种地基加固中^[4-5],包括黏性土、粉土、砂土和自重固结已完成的素填土等地基的处理。

1 工程概况

某高层住宅楼采用剪力墙结构、筏板基础。地基处理采用 C20 的 CFG 桩提高地基承载力,CFG 桩桩径

500 mm,桩长 24 m,桩间距 1.6 m,按正三角形梅花形满堂布置,总桩数 660 根,复合地基承载力特征值不小于 450 kPa。场地工程地质条件如表 1 所示。

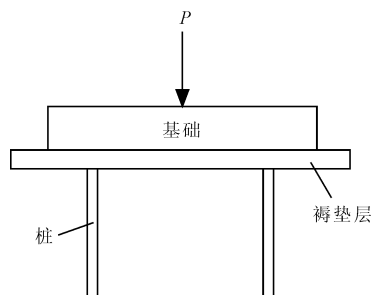


图 1 CFG 桩复合地基示意图

表 1 岩土力学参数

层号	土类名称	层厚 /m	层底标高 /m	饱和重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 μ	压缩模量 E_s /MPa
1	黏性土	2.18	-2.18	19.00	16.0	18.42	0.27	19.60
2	黏性土	2.80	-4.98	19.00	21.0	19.63	0.30	23.40
3	黏性土	3.70	-8.68	19.00	23.0	19.80	0.35	33.80
4	黏性土	6.10	-14.78	19.00	25.0	21.15	0.45	84.00
5	黏性土	8.90	-23.68	19.00	26.0	19.82	0.40	46.00
6	黏性土	5.70	-29.38	19.00	36.0	17.23	0.25	53.00

现场 CFG 单桩及单桩复合地基静载试验结果表明,最大加载压力已达到设计要求压力值的 2 倍(即 900 kPa),可满足住宅楼复合地基承载力的设计要求。

1.1 CFG 桩复合地基承载力计算

CFG 桩复合地基承载力计算结果见表 2。

(1) 复合地基承载力验算^[6-8]。由 JCCAD 计算得出:基底压力标准值 $P_k = 450$ kPa;计算车库等效覆土深度 $d = 1.25$ m,深度修正的基础埋深 $d = 3.75$ m,有效重度取值 15 kN/m^3 。

最终得到复合地基承载力为 490 $\text{kPa} \leq f_{\text{spk}}$ 。

(2) 桩身强度验算:当复合地基承载力进行基础埋深的深度修正时,增强体桩身强度应满足:

$$f_{\text{cu}} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \left[1 + \frac{\gamma_m(d - 0.5)}{f_{\text{spa}}} \right] \quad (1)$$

$$f_{\text{cu}} \geq 4 \frac{\lambda R_a}{A_p} \left[1 + \frac{\gamma_m(d - 0.5)}{f_{\text{spa}}} \right] = 21 \text{ kPa} \quad (2)$$

桩身强度取 C25,满足要求。

1.2 CFG 桩复合地基沉降计算

选取桩径为 500 mm,桩长为 24 m 的 CFG 桩进行沉降计算。计算场地平面长度 27 m,宽度 14 m,计算荷载为满堂 450 kPa,计算简图见图 2 所示,基底应力计算结果如表 3 所示。

表 2 承载力计算表

设计条件	设计数据	计算内容	计算结果
CFG 桩桩长 /m	24	$\sum_{i=1}^n q_{si} l_i$	601.82
桩直径/m	0.5	桩周长 U_p/m	1.57
桩间距/m	1.6	桩截面积 A_p/m^2	0.20
桩端阻力特征值 q_p/kPa	750	单桩竖向承载力特征值 R_a/kN $R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p$	1092.04
对应的土层厚 l/m	2.18 2.80 3.70 6.10 8.90 0.30	面积置换率/m	0.08
桩侧阻力特征值 q_{si}/kPa	19 25 27 23 27 33	复合地基承载力特征值 $f_{\text{spk}}/\text{kPa}$ $f_{\text{spk}} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{\text{sk}}$	504.53
土承载力折减系数 β	0.95		
桩间土承载力特征值 f_{sk}/kPa	90		

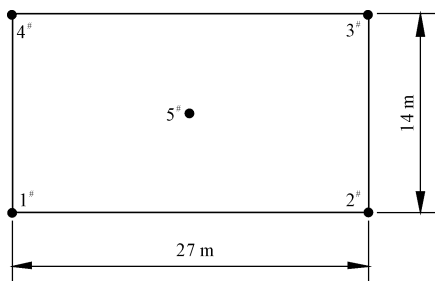


图 2 沉降计算简图

表 3 基底应力计算表

点号	1#	2#	3#	4#
角点全反力 /kPa	262.00	262.00	262.00	262.00
基底全反力 /kPa	$p_{amax} = 262.00$ $p_{amin} = 262.00$ 平均 = 262.00			
点号	1#	2#	3#	4#
角点附加应力 /kPa	258.76	258.76	258.76	258.76
附加应力 /kPa	$p_{amax} = 258.76$ $p_{amin} = 262.00$ 平均 = 262.00			

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002),复合地基最终沉降量 S ,按下式计算:

$$S_c = \Psi \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{k_i \zeta_i E_{si}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) \right] \quad (3)$$

沉降计算点($x = 0.000 \text{ m}$, $y = 0.000 \text{ m}$)各层土的压缩情况如表 4 所示。

表 4 沉降计算点各层土的压缩表

层号	土类名称	层厚 /m	压缩模量 /MPa	压缩量 /mm	应力面积 /kN
1	黏性土	2.18	19.60	29.048	2.173
2	黏性土	2.80	23.40	29.780	2.660
3	黏性土	3.70	33.80	23.106	2.981
4	黏性土	6.10	84.00	10.835	3.474
5	黏性土	8.90	46.00	2.928	0.514
6	黏性土	5.70	53.00	12.013	2.430

对计算简图中 1#、2#、3#、4#、5# 进行沉降计算,计算结果如表 5 所示。

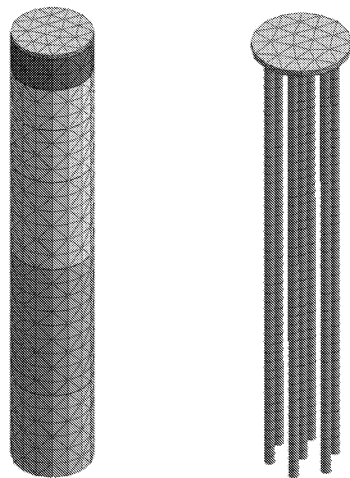
由计算结果可知,工程中所选取的参数(桩径、桩间距等),其复合地基的最大沉降量满足设计沉降要求^[9]。

表 5 复合地基沉降计算表

点号	1#	2#	3#	4#	5#
固结/mm	62.878	62.763	62.691	62.625	87.185
最终沉降/mm	12.777	13.106	12.816	12.974	31.939

2 数值模拟分析

复合地基的桩土应力比和沉降之间联系密切,对 CFG 桩复合地基的承载力性能有较大的影响^[10-11]。数值分析采用 MIDAS/GTS NX 有限元计算软件,建立有限元分析模型,分析桩土应力比和沉降之间的关系。模型建立如图 3 所示。



(a) 土体模型示意图 (b) CFG 桩模型示意图

图 3 CFG 桩分析模型

模型选取半径为 2.4 m 的圆柱体为土体范围,结构尺寸、材料属性的选取参照设计图纸与地质勘探资料。通过利用 MIDAS 有限元法,能够计算得出 CFG 桩复合地基的不同褥垫层厚度、不同置换率对复合地基的影响。有限元计算简图如图 4 所示。

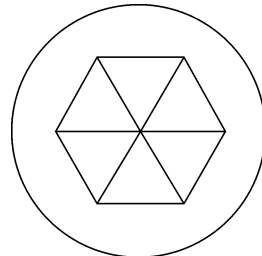


图 4 CFG 桩复合地基有限元计算简图

3 数值模拟结果分析

3.1 不同褥垫层厚度对复合地基承载力的影响

桩顶和基础之间应设置褥垫层^[12-14],通常褥垫层厚度宜为桩径的 40% ~ 60%^[15]。褥垫一般选

用最大粒径不大于 30 mm 的中砂、粗砂、级配砂石和碎石等材料,采用静力压实法,夯填度不应大于 0.90。当其他条件一定时,从图 5 可以看出桩土应力比随褥垫层厚度的增大而减小。当褥垫层厚度大于 300 mm 时,桩土应力比趋于稳定,充分发挥了桩间土的承载力。由于桩间土表面的荷载作用,会产生水平向和竖向附加应力在桩侧土单元体,水平向附加应力增大了侧阻力作用在桩表面上;竖向附加应力则大大提高了单桩承载力,褥垫层的作用得到充分地发挥。

调整合理褥垫层的厚度不但可以减小地基沉降,还可以消除地基不均匀沉降。从图 6 可以看出,当褥垫层厚度大于 300 mm 时地基沉降反而增大,这是由于桩间土分担的荷载过多。因此合理的褥垫层厚度可以调节复合地基中的桩、桩间土的荷载分担,确保桩与土能够共同承担荷载。本工程的褥垫层合理厚度为 300 mm 左右。

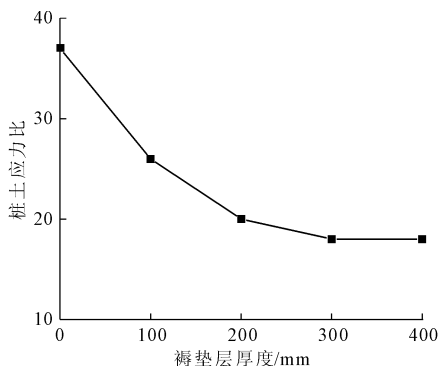


图 5 褥垫层厚度对桩土应力比的影响

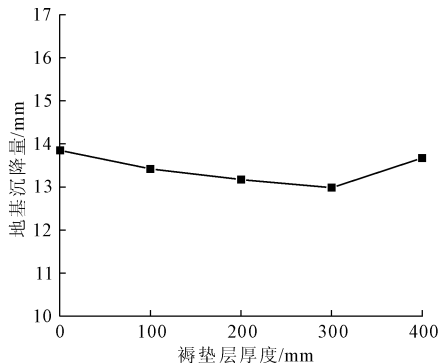


图 6 褥垫层厚度对地基沉降的影响

3.2 不同置换率对复合地基承载力的影响

由图 7 和图 8 可以说明,随置换率^[16](桩的端面积与土体面积之比)的增大,桩土应力比减少,达到 0.08 时趋于稳定;由于复合地基中桩的面积占比增大,所以复合地基的桩体会承担更多的荷载,不但达到提高整个复合地基的承载力的设计目的,而且

基础沉降也会产生明显的减小。因此,在实际工程中可以通过采取增大置换率的方法来提高复合地基承载力和降低地基沉降量。

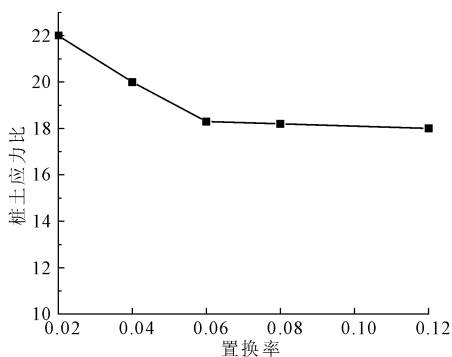


图 7 置换率对桩土应力比的影响

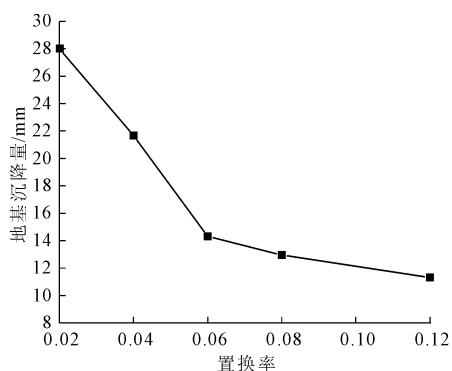


图 8 置换率对地基沉降的影响

4 结 论

本文以理论计算和数值模拟相结合的方法,得出 CFG 桩复合地基的公式计算沉降量和有限元分析结果相符。首先对 CFG 桩复合地基的承载性状进行了理论研究,再利用 MIDAS 有限元软件,分析了褥垫层厚度、置换率对桩复合地基的承载特性的影响。主要结论如下:

(1) 桩土应力比与地基变形沉降量随着褥垫层厚度的增大而逐渐减小。当褥垫层厚度超过某一限值时,桩的优点得不到发挥,沉降量反而会增加;太薄时,复合地基应力过于集中在桩体,土很难发挥作用。在实际工程设计过程中,褥垫层能够确保桩土共同工作,为更好地协调桩、桩间土间的荷载分担,褥垫层厚度的取值尤为重要,一般为桩径 40% ~ 60%。

(2) 随着置换率的增大,桩土应力比和沉降量逐渐减小,桩土应力比趋于稳定。

(3) 通过桩复合地基的工程实例,并与 MIDAS 有限元结果进行了比较,验证了 CFG 桩复合地

基的承载力和沉降的可靠性。

参考文献:

- [1] 阎明礼,张东刚.CFG桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001:1-6.
- [2] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:3-17.
- [3] 陈东佐,梁仁旺.CFG桩复合地基的试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(4):71-74.
- [4] 刘小高,黄立夫,谭博,等.市政道路施工海相深厚软土组合型地基处理技术[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):78-82.
- [5] 曾召田,吕海波,尹闯,等.CFG桩复合地基加固机理及工程实例分析[J].铁道建筑,2014(1):79-81.
- [6] 魏钱钰,方云飞,卢萍珍,等.CFG桩复合地基承载力检测方法讨论与实例分析[J].建筑结构,2016,46(S2):531-534.
- [7] 房飞.CFG复合地基承载力研究[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2016,25(2):32-33.
- [8] 邝彬,李戈,王永鑫,等.CFG桩复合地基承载性状试验研究[J].建筑结构,2017,47(23):100-102,71.
- [9] 崔亚楠,洪宝宁,李凯,等.高填方路段CFG桩复合地

基变形规律计算分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):131-134.

- [10] 肖航,曹丹.某工程CFG桩复合地基设计及施工[J].施工技术,2016,45(17):56-59,70.
- [11] 何志鹏.CFG桩复合地基工程应用与分析[J].露天采矿技术,2016,31(8):88-90.
- [12] 邵国霞,苏谦,尹紫红,等.不同垫层下管桩复合地基现场对比试验研究[J].西南交通大学学报,2018,53(2):279-285.
- [13] 苏旭文,陈行,陈文宇,等.复合地基粉煤灰碎石桩的褥垫层特性影响[J].粉煤灰综合利用,2018(3):18-21.
- [14] 王勇,蔡智,屈洋,等.CFG桩复合地基加筋褥垫层作用机理数值分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):96-100.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [16] 闫明礼,罗鹏飞,佟建兴,等.复合地基面积置换率[J].工程勘察,2014,42(9):30-35.
- [17] 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

(上接第76页)

参考文献:

- [1] 黄峥,白植舟.钢筋混凝土空心薄壁桥墩的延性[J].公路交通科技(应用技术版),2013,9(4):195-197.
- [2] 崔海琴,贺拴海,宋一凡.空心矩形薄壁墩抗震性能试验研究[J].公路交通科技,2010,27(6):58-63.
- [3] 杜修力,陈明琦,韩强.钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):254-259.
- [4] 宋晓东.桥梁高墩延性抗震性能的理论及试验研究[D].上海:同济大学,2004.
- [5] 罗征,李建中.低周往复荷载下空心矩形墩抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2013,32(8):183-184.
- [6] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L. OpenSees Command Language Manual[M]. Berkeley: PEER, University of California, 2007.
- [7] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.

- [8] Chang G, Mander J. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I evaluation of seismic capacity[R]. Buffalo, N. Y.: U. S. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER Technical Report, 1994 - 0006.
- [9] 苏俊省,王君杰,郭进,等.基于钢筋低周疲劳的桥墩地震易损性分析[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(1):29-36.
- [10] Brown J, Kunnath S K. Low cycle fatigue behavior of longitudinal reinforcement in reinforced concrete bridge columns[R]. Technical Report NCEER - 00 - 0007, 2000.
- [11] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [12] 孙治国,王东升,郭迅.钢筋混凝土空心墩延性变形能力分[J].铁道学报,2012,34(1):91-96.
- [13] 陈昕,马麟.高墩大跨连续刚构桥抗震性能分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):74-77.