

# CFG 桩复合地基承载特性影响因素分析

蔡 宁

(湖南工程职业技术学院, 湖南 长沙 410002)

**摘 要:**为深入分析 CFG 桩复合地基承载特性,在深入探讨 CFG 桩加固机理的基础上,基于某工程背景建立了 CFG 桩复合地基有限元分析模型,通过计算与实测曲线对比验证了有限元模型及参数的正确性与合理性,并以此为基础分析 CFG 桩的应力及变形,最后对 CFG 桩复合地基承载特性的相关影响因素进行了探讨,获得了一些有益结论,对实际工程具有一定的指导意义。

**关键词:**CFG 桩;承载特性;加固机理;有限元

中图分类号:TD 353. 6

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2011)06-0784-06

水泥粉煤灰碎石桩简称 CFG(Cement Fly-ash Gravel)桩<sup>[1]</sup>,即在砂石桩中增加一定量的粉煤灰与少量水泥拌合而成一种高粘结强度的刚性桩,其性能与素混凝土桩相似,强度等级可达到 C5~C25。桩、桩间土和褥垫层一起构成 CFG 桩复合地基。该复合地基可充分发挥桩材和天然地基的承载潜力,因此可有效提高地基承载力,减少地基沉降,同时设计时不需配筋,省略了钢筋笼制作和安装工序,节约时间和成本。桩体以工业废料粉煤灰和石屑作为掺加料,可节约水泥用量,具有较好的经济效益与社会效益,因此在土木工程领域得到了广泛的应用。

CFG 桩复合地基的参数特征不同于天然地基。由于桩体的弹性模量及强度较桩间土大,桩体承担了更多的上部荷载,并可通过桩侧摩阻力及端阻力将荷载向更深的土层传递,土体应力及变形分布规律与天然地基土体完全不同。阎明礼等<sup>[1]</sup>对 CFG 桩的作用机理、设计方法进行了全面的阐述,张京穗等<sup>[2]</sup>基于模糊层次分析方法对 CFG 桩复合地基辅助神经网络设计进行了探讨,闫韩生等<sup>[3]</sup>对 CFG 桩在处理湿陷性黄土地基中的应用开展研究,胡长明等<sup>[4]</sup>对 CFG 桩复合地基承载力影响因素进行了探讨。由于 CFG 桩复合地基本身的复杂性,解析计算方法存在过多假定,数值分析方法则可考虑各种复杂工况和边界条件,因此许多学者利用有限元工具对 CFG 桩复合地基的承载特性及影响因素等分析,如娄国充等<sup>[5]</sup>、黄全文等<sup>[6]</sup>、刘胜群等<sup>[7-8]</sup>基于二维有限元模型对 CFG 桩复合地基承载力特性进行分析,但上述文献的计算模型均过于简单且未考虑三维空间效应影响;陈涛等<sup>[9]</sup>基于三维有限元模型探讨了 CFG 桩复合地基各因素对沉降的影响,但并未对桩土应力比进行分析。

因此,本文拟在前人研究的基础上<sup>[10-11]</sup>,结合某具体工程,对 CFG 桩复合地基进行设计计算,并采用 ANSYS 有限元程序对 CFG 桩单桩承载特性及桩土应力比进行分析,对 CFG 桩承载特性的影响因素进行较深入的探讨,以获得一些有益的结论,可供相关工程参考。

## 1 CFG 桩复合地基设计

广东省新台高速公路位于珠江三角洲西部地区,连接江门、中山、佛山,是西部沿海高速公路及佛开(佛山—开平)高速公路的联接线。路线起于新会市司前镇,止于台山市斗山镇,全长 51.921 km。全线按双向 4 车道设计,设计行车时速 100 km/h。

根据地质调绘资料和勘探结果,本工程中 k9+911.578~k19+250 路段位于潭江冲积区,属软土路基。其中部分地段由于软基厚度较大(7~20 m),土体松散,密实度差,承载力低,不能作为高速公路底

基层. 依据现场情况,同时考虑工期影响,拟采用 CFG 桩复合地基方案进行加固处理. 软土物理力学性质指标如表 1 所示.

1.1 复合地基设计参数

依据公路路基荷载,要求复合地基承载力标准值  $f_{sp,k} \geq 200$  KPa;设计选用 CFG 桩的桩径为 600 mm;考虑持力层分布,桩长定为 17 m.

表 1 软土物理力学性质指标表  
Tab. 1 Physical and mechanical properties indicators of soft soils

土性指标	数值	土性指标	数值
天然密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.74	液限/ $\%$	64
含水率/ $\%$	22.9	粘聚力 $c/\text{kPa}$	10
塑限/ $\%$	26	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	20
孔隙比	0.94	压缩模量/MPa	6.1

CFG 桩单桩承载力计算按照公式进行计算:  $R_k = \frac{\pi D \sum q_{si} \cdot l_i + A_p \cdot q_p}{K}$  (1)

式中: $R_k$  为单桩承载力,kN; $D$  为桩径,m; $q_{si}$  为桩周摩擦力,kPa; $A_p$  为桩端面积, $\text{m}^2$ ; $q_p$  为桩端阻力,kPa; $l_i$  为地层厚度,m; $K$  为安全系数, $K=2.0$ .

经计算可得桩长  $l=17.0$  m 时, $R_k=992.7$  kN.

复合地基面积置换率可根据公式计算:  $m = \frac{f_{sp,k} - \alpha \cdot \beta f_{s,k}}{R_k / A_p - \alpha \cdot \beta f_{s,k}}$  (2)

式中: $f_{sp,k}$  为复合地基承载力标准值; $m$  为置换率; $R_k$  为单桩承载力; $f_{s,k}$  为桩间土承载力; $\beta$  为强度发挥系数,取  $\beta=0.75$ ; $\alpha$  为桩间土强度提高系数,取  $\alpha=1$ ;

经计算可得桩长  $l=17.0$  m 时, $m=1.79\%$ .

按照正方形布桩,则桩间距为:  $s = \sqrt{\frac{A_p}{m}}$  (3)

经计算可得: $s=2.653$  m,取  $s=2.6$  m,实际置换率为  $m=1.86\%$ .

1.2 复合地基承载力及沉降验算

复合地基承载力标准值计算公式为  $f_{sp,k} = m \cdot R_k / A_p + \alpha \cdot \beta (1-m) \cdot f_{s,k}$  (4)

桩长  $l=17.0$  m 时, $f_{sp,k}=205.7$  kPa $\geq 200$  kPa. 故以上选取的设计参数合理,满足复合地基承载力标准值的要求.

依据《公路路基设计规范》(JTG D30-2004)中的地基工后沉降控制标准,地基工后沉降  $s$  应满足  $s \leq [s]=30$  mm.

CFG 桩复合地基最终变形量可按分层总和法进行估算,其中加固区模量可采用复合模量  $E_{sp}$ ,其大小为  $E_{sp} = \zeta \cdot E_s$  (5)

式中: $\zeta$  为模量提高系数; $E_s$  为加固区压缩模量.

加固区模量提高系数按照下式计算:  $\zeta = \frac{f_{sp,k}}{f_{s,k}}$  (6)

选取场区路基中线上的五个钻孔点位置进行地基变形计算,其结果如下表 2 所示.

由表 2 可见工后总沉降均满足要求.

表 2 场区工后沉降计算

Tab. 2 The post-construction settlements of the ground

计算位置	沉降计算截止深度/m	加固区的沉降量/mm	下卧层的沉降量/mm	最终沉降量/mm
1	22.0	18.96	1.10	20.06
2	22.0	15.48	4.30	19.78
3	26.5	23.22	1.05	24.27
4	25.0	17.77	5.02	22.79
5	20.0	12.76	4.04	16.80

此外,根据规范要求,CFG 桩桩身砼 28 天抗压强度应满足  $f_{cu} \geq 3 \times R_k / A_p$  的要求,即为  $f_{cu} \geq 3 \times R_k / A_p = 23.70$  MPa 满足要求.

因此,综合考虑施工影响因素,最终取 CFG 桩桩体强度等级为 C25,坍落度则为 180~220 mm. 复合地基褥垫层厚度为 200 mm;褥垫层的材料采用级配碎石褥垫层,且夯填度  $D$  不得小于 0.90(虚铺 23.00 cm,压实为 20.00 cm),必须满足有关垫层做法的规范.

2 ANSYS 有限元建模及分析

2.1 有限元建模验证

根据本工程的实际情况,对 CFG 桩单桩进行有限元分析. 桩径 60 cm,桩长 17 m. 考虑桩的影响范

围,模型的外边界距桩中心 15 m,模型底部距桩端 17 m.考虑到模型的对称性,选取了二分之一的实体进行建模.实体模型如图 1(a)所示.考虑到桩土材料特点,桩体选用弹性本构模型,土本选用适合软粘土的 Drucker-Prager 弹塑性模型.桩和土单元均采用 SOLID45 八节点立方体单元.网格划分如图 1(b)所示.

考虑桩土之间的接触关系,在桩土间设置摩擦型三维接触单元,在 ANSYS 单元库中即为 CONTAC49 面接触单元. CONTAC49 接触单元可以模拟点面接触、面接触,且对刚—柔接触、柔—柔接触也非常实用.

考虑模型边界条件,在图 1 所示模型底部施加三个方向的位移约束,在周围面上施加切向约束(包括沿桩径和垂直直径两个方向),在桩侧施加径向约束. CFG 桩单桩有限元计算的参数如表 3 所示.

表中, $E$  为弹性模量; $\mu$  为泊松比; $c$  为粘聚力; $\varphi$  为内摩擦角. 桩体弹性模量根据对应同等强度的混凝土模量取值,土体的弹性模量根据相关计算经验取 3~6 倍变形模量,变形模量则通过现场载荷板试验实测得到.

2.1 有限元模型及参数验证

CFG 桩施工完毕后,进行工程验收,其中某单桩载荷试验数据如表 4 所示. 依此单桩载荷试验,进行有限元模拟加载分析,可得计算数据和曲线分别如表 4 和图 2 所示.

由图可见,计算值与实测值吻合良好,从而验证了本文有限元模型及计算参数的正确性和合理性,为进一步的研究分析奠定基础.

表 4 单桩载荷试验数据

Tab. 4 The load test data of the single pile

序号	荷载水平/kN	桩顶沉降 实测值/mm	桩顶沉降 计算值/mm
0	0	0	0
1	160	2.92	2.40
2	240	3.61	3.59
3	320	4.95	4.97
4	400	7.52	7.63
5	480	11.16	11.2
6	560	17.02	17.12
7	640	27.21	27.18
8	720	32.67	32.77

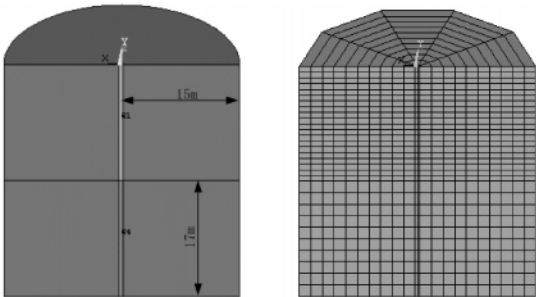


图 1 CFG 桩复合地基三维有限元模型

Fig. 1 The three-dimensional finite element model of CFG pile composite foundation

表 3 CFG 桩复合地基有限元计算参数

材料类型	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/^\circ$
桩体	$1 \times 10^4$	0.20		
土	10	0.35	10	20

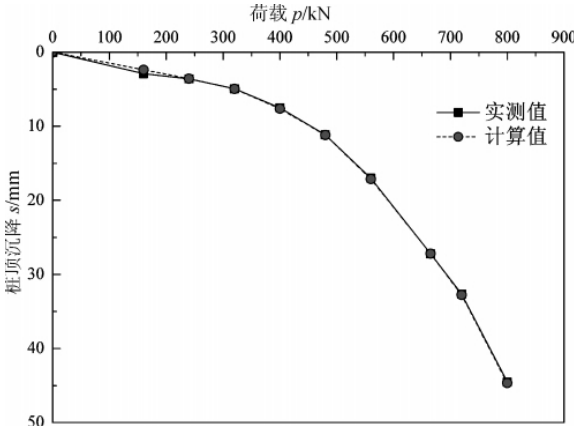


图 2 CFG 桩有限元计算曲线与实测曲线图

Fig. 2 The calculated curve and measured curve of the CFG pile

2.3 有限元结果及分析

桩顶荷载  $p=600\text{ kN}$  时 CFG 桩单桩复合地基的竖向应力及位移分布情况如图 3、4 所示,CFG 桩桩身的轴力及位移分布如图 5、6 所示.

由图可见,CFG 桩侧摩阻力的扩散作用十分明显,是引起桩侧土体下沉的主要原因;其轴力分布及桩身位移与钢筋混凝土摩擦桩的轴力和位移分布规律相似. CFG 桩的应力及位移分布整体呈现摩擦桩的特征,其承载特性与摩擦桩相似.

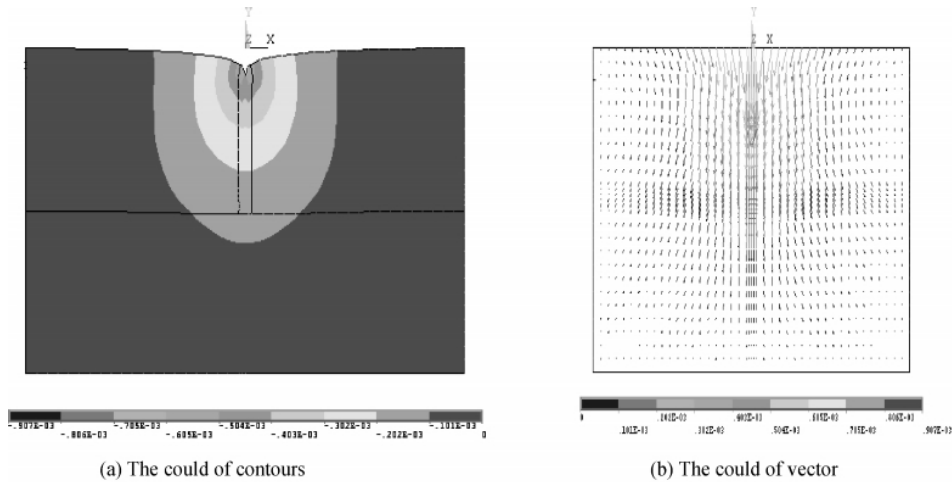


图 3 CFG 桩复合地基竖向位移分布图(单位:m)  
Fig. 3 The vertical displacement distribution of CFG pile composite foundation (unit: m)

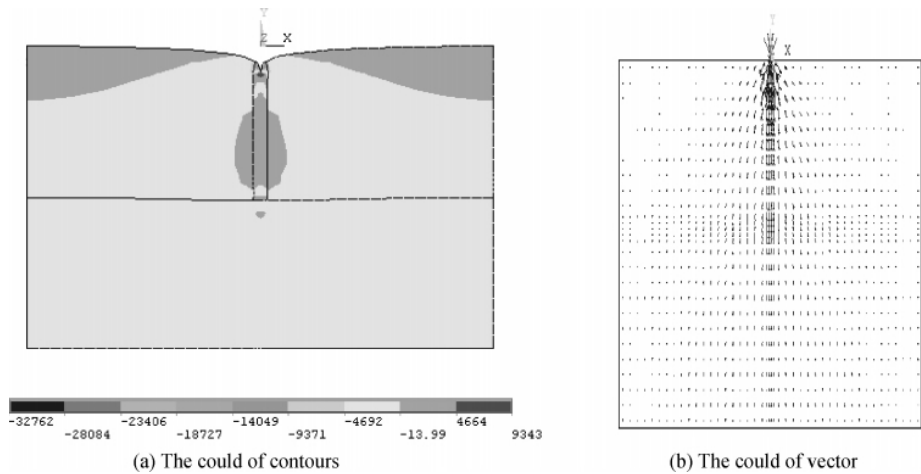


图 4 CFG 桩复合地基竖向应力分布图(单位:Pa)  
Fig. 4 The vertical stress distribution of CFG pile composite foundation (unit: Pa)

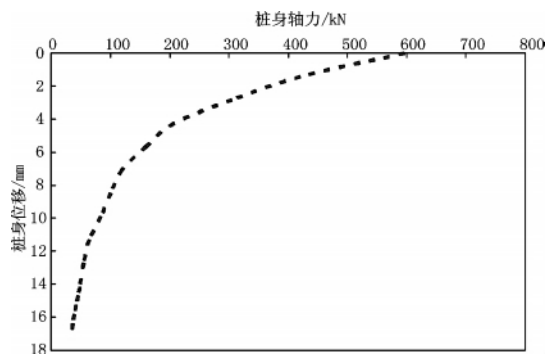


图 5 CFG 桩桩身轴力分布  
Fig. 5 The axial force distribution of CFG pile

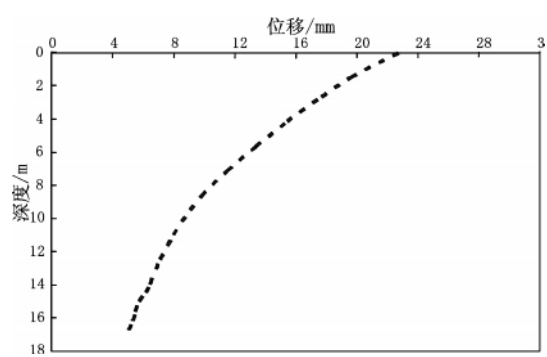


图 6 CFG 桩桩身位移分布  
Fig. 6 The axial displacements distribution of CFG pile

3 影响因素分析

复合地基中桩体的刚度是影响复合地基沉降计算的最主要因素之一. 柔性桩、半刚性桩与刚性桩复合地基的承载特性与变形特征大不相同, 均是受桩体刚度影响所致. CFG 桩的桩身弹性模量变化范围大致在 2 000~20 000 MPa 之间. 图 7 给出了不同模量时 CFG 桩单桩的  $p-s$  曲线.

从图可见,单桩极限承载力与桩身弹性模量并没有明显关系,而在相同荷载作用下,桩身弹性模量越大,其沉降量越小.因此,提高桩身弹性模量可有效地减小单桩及复合地基的沉降,但并不能明显提高单桩极限承载力.这在实际工程设计中需要特别注意.

影响 CFG 桩复合地基承载特性与变形特征的另外一个因素为土体模量.图 8、9 分别给出桩体模量为 2 000 MPa 时,不同桩端土模量与桩间土模量之比  $E_b/E_m$  情况下复合地基桩土应力比  $n$  随荷载  $p$  变化曲线以及复合地基沉降  $s$  与  $E_b/E_m$  的关系曲线.可见,随着  $E_b/E_m$  的增大,桩土应力比增大,荷载向桩体转移,土体承担荷载较小,复合地基的沉降亦逐渐减少.当二者比值小于 10 时,沉降减小幅度较大;但当比值大于 10 时,沉降减小幅度减小.这说明 CFG 桩桩端并不一定要落在非常坚硬土层或岩层上面,应该根据实际情况综合考虑,从而达到降低工程造价的目的.

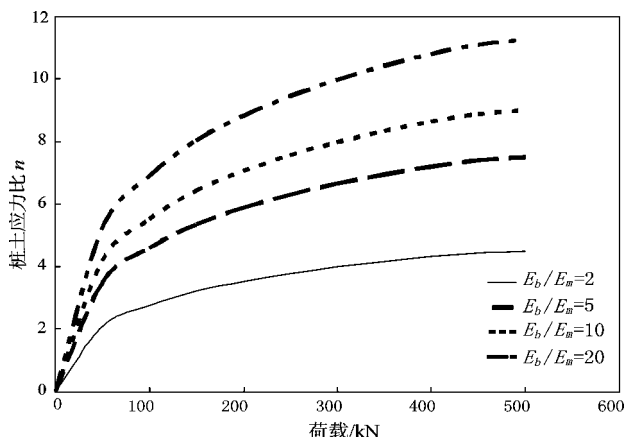


图 8 不同  $E_b/E_m$  下的  $p-n$  曲线

Fig. 8 The  $p-n$  curve with different  $E_b/E_m$

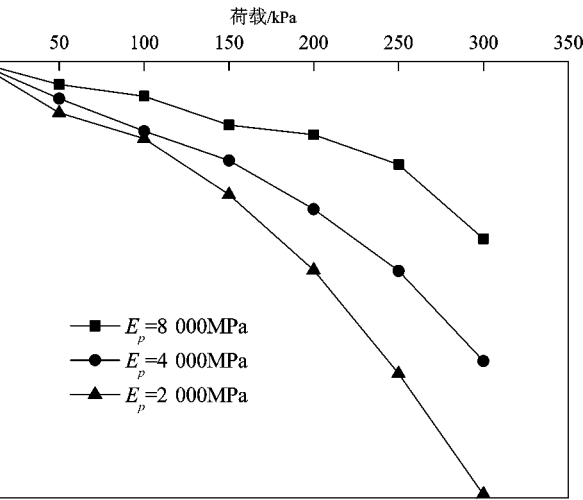


图 7 不同桩体模量的  $p-s$  曲线

Fig. 7 The  $p-s$  curve with different elasticity modulus of the pile

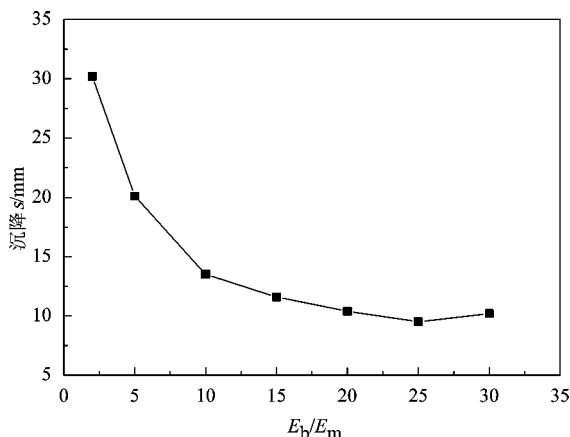


图 9  $E_b/E_m$  与沉降关系曲线

Fig. 9 The settlement curve with different  $E_b/E_m$

## 4 结 论

本文针对某具体工程进行 CFG 桩复合地基设计计算,并采用 ANSYS 有限元分析程序对 CFG 桩复合地基承载特性进行研究,并对相关影响因素进行了分析,得到了如下结论:

(1) CFG 桩侧摩阻力的扩散作用十分明显,是引起桩侧土体下沉的主要原因;CFG 桩的应力及位移分布整体呈现摩擦桩的特征,其承载特性与摩擦桩相似.此亦验证了文献[9-10]中的相关结论.

(2) 提高 CFG 桩桩身弹性模量可有效地减小单桩的沉降量,提高复合地基承载力,但并不能明显提高单桩极限承载力;随着桩端土与桩间土模量比值的增大,桩土应力比增大,荷载逐渐向桩身转移,同时复合地基的沉降逐渐减少,但减小的速率随该比值的增大而降低.

## 参考文献 References

[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.

YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. Technology of CFG pile composite foundation and its engineering application [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2001.

- [2] 张京穗,彭勇波,刘章军. 基于模糊层次分析的 CFG 桩复合地基辅助神经网络设计[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2006,38(3):360-367.  
ZHANG Jing-sui, PENG Yong-bo, LIU Zhang-jun. Design method of CFG piles composite foundation with assistant neural networks based on fuzzy analytical hierarchy process[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2006, 38(3): 360-367.
- [3] 闫韩生,曹森虎,韩茂蔚. CFG 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.  
YAN Han-sheng, CAO Sen-hu, HAN Mao-wei. Mechanism analyses of disposal of collapsed loess with CFG pile [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 218-223.
- [4] 胡长明,王建平,吕江新. CFG 桩复合地基承载力影响因素分析[J]. 施工技术,2005,34(9):68-70.  
HU Chang-ming, WANG Jian-ping, LV Jiang-xin. Analysis of Influence Factors of Bearing Capacity of CFG Pile Compound Foundation. Construction Technology, 2005, 34(9): 68-70.
- [5] 娄国充,冯 涛. CFG 桩复合地基有限元分析[J]. 路基工程,2000(3):6-9.  
LOU Guo-dong, FENG Tao. FEM analysis of CFG pile composite foundation [J]. Roadbed Engineering, 2000(3): 6-9.
- [6] 黄全文,梁建军,刘厚平,等. CFG 桩复合地基承载特性有限元分析[J]. 西部探矿工程,2006,18(9):7-9.  
HUANG Quan-wen, LIANG Jian-jun, LIU Hou-ping, et al. CFG pile composite foundation bearing capacity characteristics of finite element analysis [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(9): 7-9.
- [7] 刘胜群,陈玉平. CFG 桩复合地基工程应用实例及非线性有限元分析[J]. 铁道建筑,2006(9):52-54.  
LIU Sheng-qun, CHEN Yu-ping. Nonlinear FEM analysis of CFG piles composite foundation in an engineering case [J]. Railway Engineering, 2006(9): 52-54.
- [8] 刘胜群,吴建奇,陈玉平. Ansys 有限元软件在 CFG 桩复合地基中的应用[J]. 铁道建筑,2006(12):66-69.  
LIU Sheng-qun, WU Jian-qi, CHEN Yu-ping. Application of ANSYS FEM software in CFG piles composite foundation [J]. Railway Engineering, 2006(12): 66-69.
- [9] 陈 涛,张 聪. CFG 桩复合地基各因素对沉降影响的数值模拟研究[J]. 工业建筑,2009,39(s1):692-695.  
CHEN Tao, ZHANG Cong. Numerical simulation research on influence of parameters of CFG pile composite foundation on settlement[J]. Industrial Buildings, 2009, 39(s1): 692-695.
- [10] JURAN I, RICCOBONO O. Reinforced soft soil with artificially cemented compacted-sand columns[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(7): 1042-1060.
- [11] REN P, YU Z Q, ZHANG H. Analysis of bearing capacity properties for rammed enlarged carrier CFG piles[C]// The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals (ASCE). China: Chengdu, 2008, 2715-2721.

## Analysis of influencing factors on bearing characteristics of CFG pile composite foundation

CAI Ning

(Hunan Engineering Polytechnic, Changsha 410002, China)

**Abstract:** In order to obtain the bearing characteristics of CFG composite foundation, based on the analysis of reinforcement mechanisms of CFG pile, the FEM model for CFG composite foundation is built under the engineering background. The validity and reasonability of FEM model and its parameters are verified by the comparison of computed and tested curves. Then the stress and deformation of CFG pile are obtained and the impact factors for the bearing characteristics of CFG composite foundation are discussed. Some useful conclusions are obtained which can be viewed as a guidance in the situ engineering.

**Key words:** CFG pile; bearing characteristics; reinforcement mechanism; finite element method