

文章编号:1000-582X(2011)09-117-04

CFG 桩复合地基承载力分析

贾剑青^{1,2a}, 王宏图^{2a, 2b}, 李晶¹, 张宪¹, 范晓刚^{2b}

(1. 兰州交通大学 交通运输学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;

b. 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044;)

摘要:某客运专线某标段采用 CFG 桩加固技术。对 CFG 桩进行了低应变动测、单桩承载力试验、复合地基承载力试验及理论计算。结果表明:一类桩占 93.9%, 二类桩占 6.1%; 单桩承载力及复合地基承载力特征值均大于设计值。建立了三维有限元模型, 模拟分析了 CFG 桩顶及桩间土应力随加载水平的变化关系以及 CFG 桩及桩间土应力分担比。模拟结果表明:1) 随着荷载的增加, CFG 桩顶应力及桩间土应力也随之增大, 但 CFG 桩顶应力的增长速率大于桩间土; 2) 加载初期, CFG 桩与桩间土应力分担比逐渐增大, 且增长速度较快; 随着荷载的增加, 桩土应力分担逐渐趋于稳定。

关键词:CFG 桩; 复合地基; 承载力

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

Analysis of bearing capability of CFG pile composite foundation

JIA Jian-qing^{1,2a}, WANG Hong-tu^{2a,2b}, LI Jing¹, ZHANG Xian¹, FAN Xiao-gang^{2b}

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, P. R. China;

2a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control;

2b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The CFG pile is used to consolidate the foundation in one passenger dedicated line. The field experiments including low strain dynamic testing, bearing capability of single pile and the composite foundation are done, and the bearing capability of composite foundation is calculated, too. The results show that the first and second class piles account for 93.9% and 6.1% respectively, and the bearing capability eigenvalues of single pile and composite foundation are larger than the designed values. The 3D FEM model is established to simulate the stresses of CFG pile top and inter-pile soil changing with load level, and the stress ratio between CFG pile and inter-pile soil is analyzed, too. The following results are got from the calculation results of FEM: 1) the stresses of CFG pile top and inter-pile soil increase with load level, but the increasing rate of the former is larger than the latter; 2) the stress ratio between CFG pile and inter-pile soil increases quickly when the load level is low, and it tends to convergent gradually with load increasing.

Key words: CFG pile; composite foundation; bearing capability

收稿日期: 2011-04-01

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金资助项目(50921063); 甘肃省自然科学基金资助项目(1010RJZA063); 重庆市国土房管局科技计划项目(2009-01); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金资助计划资助(QL-08-16A); 川煤集团科技项目(2009-08); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(406057)

作者简介: 贾剑青(1978-), 男, 博士, 兰州交通大学副教授, 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室访问学者, 主要从事隧道工程、路基工程及安全工程方面的教学与科研工作, (E-mail)jqjia@mail.lzjtu.cn.

CFG 桩(Cement Flyash Gravel Pile)即水泥粉煤灰碎石桩,是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和形成的具有一定黏结强度和压缩性的半刚性桩体;CFG 桩、桩间土和褥垫层共同构成了 CFG 桩复合地基。由于 CFG 桩不配筋,桩体利用工业废料粉煤灰作为掺和料,大大降低了工程造价,因此该技术在地基处理工程中得以广泛使用,并取得了良好的经济效益^[1-3]。

CFG 桩为弹性体,其弹性模量受混合料塌落度、石屑率及水泥粉煤灰比等因素的影响,因此混合料配比对 CFG 桩复合地基承载力具有较大影响^[4-7]。CFG 桩复合地基承载力的大小是地基处理成败的关键,因此,《建筑地基处理规范》规定“复合地基承载力应通过现场复合地基载荷试验确定”^[8,9]。

目前,在客运专线黄土地基的加固处理中经常采用 CFG 桩技术,但该方法能否满足客运专线无砟轨道的要求,还缺乏相关工程经验及参考资料。因此,只有通过实际工程进行检(监)测及分析研究,才能逐步完善地基处理方法及设计理论^[10]。笔者采用现场试验、理论计算及数值模拟相结合的手段,分析研究了某客运专线 CFG 桩复合地基的承载力,对处理相关工程问题具有一定的借鉴意义。

1 工程概况

1.1 工程背景

某客运专线某标段地貌单元为渭河一级阶地,地形平坦;场地覆盖层为第四系全新统人工填土及

冲积粘质黄土,下伏基岩为粉质砂岩。该段路基采用 CFG 桩法进行加固处理。岩土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩土体物理力学参数

名称	弹性模量 /MPa	泊松 比	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	密度 /(kg·m ⁻³)
土体	11.8	0.32	23	26.8	1 980
岩体	22.5	0.27	35	31.0	2 150

1.2 CFG 桩设计及施工

试验段 CFG 桩设计桩径 0.4 m,桩长 13 m,桩间距 1.8 m×1.56 m,布置形式为正三角形;CFG 桩采用跳打法施工。CFG 桩施工方法如图 1 所示;CFG 桩配比如表 2 所示。

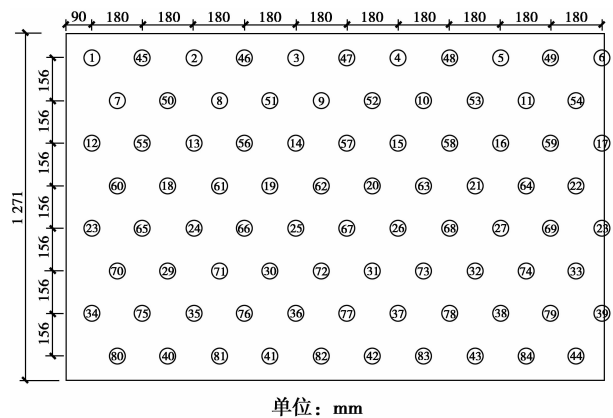


图 1 CFG 桩施工方法

表 2 CFG 桩配比设计

混合料密度 /(t·m ⁻³)	水泥	石屑率	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	石屑/ (kg·m ⁻³)	碎石/ (kg·m ⁻³)
2.2	P.032.5	0.285	235	168.7	257.4	438.8	1 101

2 CFG 桩现场试验

2.1 低应变动测试验

根据波形及波速等特性并结合混凝土设计强度等级要求,CFG 桩结构的完整性可划分为 4 类:一类桩为桩身完整;二类桩为桩身存在轻微缺陷;三类桩为桩身存在明显缺陷;四类桩为桩身存在严重缺陷或断桩^[11]。为确保 CFG 桩的完整性,本工程随机抽取了 1 123 根桩进行了低应变动测试验。试验结果表明,一类桩 1 054 根,占总桩数的 93.9%,二

类桩 69 根,占总桩数的 6.1%,未出现三类及四类桩。

2.2 单桩承载力静荷载试验

单桩静荷载试验采用慢速维持荷载法,最大堆载为 1 800 kN;第一级荷载按预估极限荷载的 2/10 加载,其余每级加载均为估计极限荷载的 1/10。加载过程中,前 8 级沉降均较稳定,加载至第 9 级时,桩体已破坏。该 CFG 桩特征值为 810 kN,大于工程设计要求 419 kN。单桩试验 Q-S 曲线如图 2 所示。

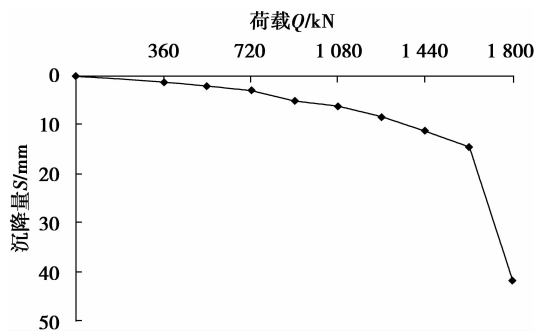


图2 单桩荷载试验 Q-S 曲线

2.3 复合地基承载力试验

复合地基试验中承压板采用直径为 1.26 m 的圆形钢板;垫层厚度为 600 mm,最大加载值为 1 318 kPa。复合地基荷载沉降关系曲线如图 3 所示。

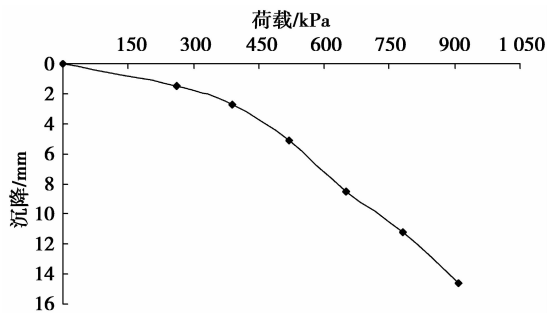


图3 CFG桩复合地基 Q-S 曲线

按照复合地基荷载试验方法及要求,取 $s/b = 0.008$,即 $S=10$ mm 时所对应的压力为复合地基承载力特征值^[8],由图 3 可知试验复合地基承载力特征值约为 735 kPa。

由《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)知,复合地基承载力特征值为^[8,12]:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值,kPa; m 为面积置换率; R_a 为单桩竖向承载力特征值,kN; A_p 为桩的截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力折减系数,可取 $\beta = 0.75 \sim 0.95$; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值,kPa。

依据现场试验及相关规范要求,取 $R_a = 810$ kN, $f_{sk} = 180$ kPa, $m = 0.07$, $\beta = 0.8$,代入式(1)计算所得复合地基承载力特征值为 602 kPa。

从理论计算与现场试验结果可以看出,理论计算复合地基承载力特征值小于试验值,说明仅通过理论计算所确定的复合地基承载力偏于安全^[13]。

3 CFG桩复合地基数值模拟分析

3.1 计算模型

数值分析时,本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型;土体表面为自由边界,侧边界为水平约束,底部为固定边界^[14-16];模型尺寸为 $30 \text{ m} \times 18 \text{ m} \times 30 \text{ m}$;加载方式为分步加载。桩体及垫层物理力学参数如表 3 所示。

表3 路基、褥垫层和桩体物理力学参数

名称	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
路床上层	110	0.20	2 050
路床下层	75	0.28	2 050
褥垫层	120	0.17	2 100
桩体	20 000	0.12	2 300

3.2 计算结果及分析

3.2.1 桩顶及桩间土应力

CFG 桩顶应力与加载水平之间的关系如图 4 所示。桩间土应力与加载水平之间的关系如图 5 所示。

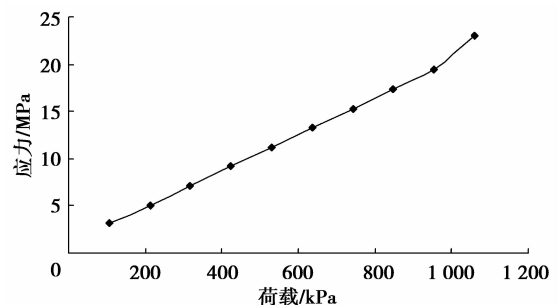


图4 CFG桩顶应力随荷载的变化关系曲线

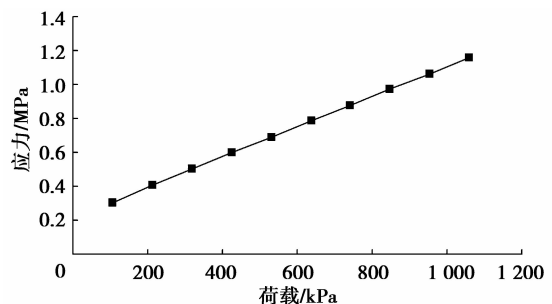


图5 桩间土应力随荷载的变化关系曲线

从图 4、5 可以看出,随着荷载的增加,CFG 桩顶应力及桩间土应力也随之增加,但 CFG 桩顶应力

的增长速率大于桩间土,这是由于CFG桩与桩间土的刚度差异引起的。一般地,材料的刚度与其承载特性为正相关关系,刚度越大,应力集中程度就越高,其承受的荷载也就越大^[14-17]。

3.2.2 桩土应力分担比

CFG桩及桩间土荷载分担比如图6所示。从图6可看出,当荷载为132 kPa时,CFG桩和桩间土荷载分担比分别为40.2%和59.8%;当荷载增加到530 kPa时,CFG桩和桩间土的荷载分担比分别为61.1%和38.9%,之后,随着荷载的增加,CFG桩及桩间土的荷载分担比基本趋于稳定。由此可知,当荷载较小时,桩间土承担的荷载较大,随着荷载的增加,荷载逐渐向高强度的桩顶转移;当荷载增加到一定程度后,桩土变形协调,桩土分担的荷载也趋于稳定^[18,19]。

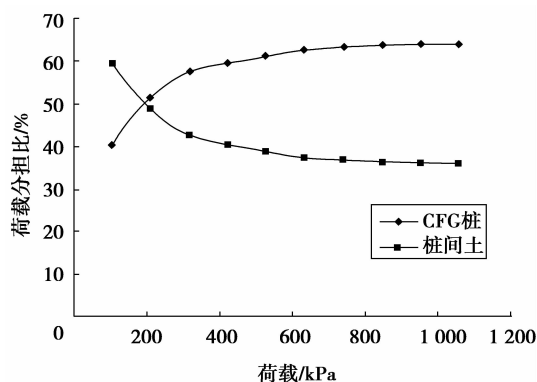


图6 桩土荷载分担比随荷载变化曲线

4 结 语

1)CFG桩复合地基现场测试与理论计算表明,CFG桩复合地基承载力特征值现场试验结果大于理论计算结果,表明理论计算结果偏安全。

2)数值模拟分析结果表明,随着荷载的增加,CFG桩顶应力及桩间土应力也随之增加,但CFG桩顶应力的增长速率大于桩间土。

3)数值模拟分析结果还表明,加载初期,CFG桩与桩间土应力分担比逐渐增大,且增长速度较快;当荷载增加到一定程度后,桩土应力比减小并逐渐趋于稳定,表明随着荷载的增加,桩顶应力集中现象逐渐减弱,桩土变形协调,桩土分担的荷载也趋于稳定。

参考文献:

[1] 任鹏,邓荣贵. CFG桩复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 81-86.

REN PENG, DENG RONG-GUI. Experimental research on composite foundations with CFG piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 81-86.

[2] 丁铭绩. 高速铁路CFG桩桩板复合地基后沉降数值模拟[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3):1-5.

DING MING-JI. Numerical simulation on the post-construction settlement of CFG pile-slab composite foundation in high-speed railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 1-5.

[3] 杨生彬,邵卫信. CFG桩复合地基受力性状三维数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3431-3436.

YANG SHENG-BIN, SHAO WEI-XIN. Research on 3D numerical simulation of working mechanism of CFG pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3431-3436.

[4] TAZAWA E I, MIYAZAWA S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2): 282-287.

[5] JURAN I, RICCOBONO O. Reinforced soft soil with artificially cemented compacted-sand columns [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(7): 1042-1060.

[6] 陈昌仁,侯新宇. 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, 2006, 34(3): 321-324.

CHEN CHANG-REN, HOU XIN-YU. Modification of empirical formula for bearing capacity of CFG pile composite foundation and its application[J]. Journal of Hohai University, 2006, 34(3): 321-324.

[7] 但汉成,李亮. 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.

DAN HAN-CHENG, LI LIANG. Calculation and influence factors analysis on pile-soil stress ratio of CFG pile composite foundation [J]. China Railway Science, 2008, 29(5): 7-12.

[8] 中国建筑科学研究院. GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[9] SHAHROUR I, MEIMON Y. Analysis of the behavior of offshore piles under loads [C] // International Conference on Deep Foundations, March 19-21, 1991, Paris, France. [S.l.]: s. n., [1991]: 277-284.

[10] 杨有海,陶天森,郭建群. 水泥土挤密桩复合地基桩土应力比的现场测试研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(3): 91-95.

YANG YOU-HAI, TAO TIAN-SEN, GUO JIAN-QUN. Field experiment of pile-soil stress ratio of cement-soil compaction piles composite foundation[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(3): 91-95.

(下转第127页)

- [12] RODRIGUES C S, MADEIRA L M, BOAVENTURA R A. Optimization of the azo dye degradation by Fenton's reagent using experimental design [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 987-994.
- [13] MALIK P K, SAHA S K. Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst[J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 31(3): 241-250.
- [14] 赵文生, 邓锡斌, 赵勇胜, 等. 铁炭微电解-Fenton试剂预处理山梨酸废水[J]. *工业水处理*, 2008, 28(3): 48-51.
ZHAO WEN-SHENG, DENG XI-BIN, ZHAO YONG-SHENG, et al. Pretreatment of sorbic acid wastewater by micro-electrolysis and Fenton oxidation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(3):48-51.
- [15] 王延峰, 李亚峰. 微电解-H₂O₂处理印染废水的实验研究[J]. *工业安全与环保*, 2009, 35(2): 9-10.
WANG YAN-FENG, LI YA-FENG. Experimental investigation of dye wastewater treatment by using micro-electrolysis-H₂O₂ [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2009, 35(2): 9-10.
- [16] CHENG H F, XU W P, LIU J L, et al. Pretreatment of wastewater from triazine manufacturing by coagulation, electrolysis, and internal microelectrolysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146(1/2): 385-392.
- [17] WALLING C. Fenton's reagent revisited[J]. *Accounts of Chemical Research*, 1975, 8(4): 125-131.
- [18] 原金海, 雷菊, 党亮. 铁碳微电解及Fenton氧化法在染料废水处理中的应用[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2010, 12(1): 34-41.
YUAN JIN-HAI, LEI JU, DANG LIANG. Fe-C micro-electrolysis and Fenton oxidation wastewater treatment in the application[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2010, 12(1): 34-41.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

(编辑 郑洁)

(上接第120页)

- [11] 张献民, 蔡靖. 桩基缺陷量化低应变动测研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(1): 47-50.
ZHANG XIAN-MIN, CAI JING. Study of low strain testing of pile defect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(1): 47-50.
- [12] 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, 2000.
- [13] 佟建兴, 胡志坚. CFG桩复合地基承载力确定[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(7): 87-91.
TONG JIAN-XING, HU ZHI-JIAN. Identification of the bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(7): 87-91.
- [14] 王士杰, 何满潮, 朱常志, 等. GC与CFG桩组合桩型复合地基承载特性研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2632-2636.
WANG SHI-JIE, HE MAN-CHAO, ZHU CHANG-ZHI, et al. Research on bearing properties of composite foundation integrated by CFG piles and gravel piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2632-2636.
- [15] 黄生根. CFG桩复合地基现场试验及有限元模拟分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1275-1279.
HUANG SHENG-GEN. Test study and finite element analysis of CFG composite foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1275-1279.
- [16] HUANG J, COLIN J G, HAN J. 3D numerical modeling of a geosynthetic reinforced pile-supported embankment stress and displacement analysis[C]// *The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, September 12-16, 2005, Osaka, Japan. [S. l.]: Millpress Science, [2005]: 913-916.
- [17] 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*, July 31-August 3, 2008, Chengdu, China. [S. l.]: ASCE, [2008]: 2715-2721.
- [18] 刘杰, 张可能. 复合地基荷载传递规律及变形计算[J]. *中国公路学报*, 2004, 17(1): 20-23.
LIU JIE, ZHANG KE-NENG. Load transfer law and deformation calculating of the composite foundation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(1): 20-23.
- [19] 陈善雄, 许锡昌. 柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2): 274-278.
CHEN SHAN-XIONG, XU XI-CHANG. Experimental study on bearing characteristics of dry jet mixing pile composite ground under flexible load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 274-278.

(编辑 郑洁)