

文章编号: 1006- 2106(2010) 02- 0032- 05

# 夯扩载体 CFG 桩复合地基工程研究及分析\*

杨红梅<sup>1\*</sup> 王胜军<sup>2</sup> 刘红坡<sup>3</sup>

(1 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 成都 610041; 3 西南交通大学峨眉校区土木工程系, 四川 峨眉 614202)

**摘要:** 研究目的: 夯扩载体 CFG 桩复合地基应用日益广泛, 但其理论研究还较少。本文结合某夯扩载体 CFG 桩复合地基工程实践, 通过现场监测数据及 FLAC 计算软件, 研究不同荷载、单桩承载力、褥垫层厚度、桩长、桩间距对地基承载力及变形的影响规律。

**研究结论:** 本文研究了该新型复合地基对各种参数的敏感性, 并得知: 夯扩载体 CFG 桩负摩阻力作用范围比普通 CFG 桩长, 中性点降低, 或无中性点。夯扩载体 CFG 桩桩体作用明显, 褥垫层的厚度在普通 CFG 桩的基础上应该适当增大。

**关键词:** 复合地基; FLAC 数值模拟; 夯扩载体 CFG 桩

**中图分类号:** TU472.32 **文献标识码:** A

## Research and Analysis of Engineering Characteristics of Rammer Carrier CFG Pile Composite Foundation

YANG Hong-mei<sup>1</sup>, WANG Sheng-jun<sup>2</sup>, LIU Hong-po<sup>3</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Sichuan Provincial Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Department of Civil Engineering, Emei District, Southwest Jiaotong University, Emei, Sichuan 614202, China)

**Abstract Research purposes** Rammer carrier CFG pile composite foundation is increasingly used widely, but only a little theoretical research has been done on it. Combined with one engineering practice of rammer carrier CFG pile composite foundation, this paper researches the influencing regulation of the different loads, single pile carrying capability, cushion layer depth, pile length and space between piles on the bearing capacity and deformation of the foundation with the monitored data on rammer carrier CFG pile and FLAC software.

**Research conclusions** From the research on the sensitivity of such new composite foundation to the all parameters, it is concluded the effective range of the negative friction of rammer carrier CFG pile is wider than the common CFG pile and the neutral point is very low or zero. The effect of pile body of rammer carrier CFG pile is more obvious and the cushion of rammer carrier CFG pile composite foundation should be thicker than common CFG pile composite foundation.

**Key words** composite foundation; FLAC numerical simulation; rammer carrier CFG (Cement Fly-ash Gravel) pile

普通 CFG 桩复合地基自 20 世纪 80 年代提出以来, 广泛应用于处理杂填土、素填土、新近沉积土、淤

泥、淤泥质土及一般承载力较低的粘性土、粉土砂土、黄土等, 但其要求具有较好桩端持力层, 不适用于浅层

\* 收稿日期: 2009- 02- 17

\*\* 作者简介: 杨红梅, 1981 年出生, 女, 助理工程师, 注册土木(岩土)工程师。

及深层都是较差淤泥质土的情况。为了解决这一问题, 扩大 CFG 桩适用范围, 夯扩载体 CFG 桩新型复合地基开始逐渐被应用于工程实践。

夯扩载体 CFG 桩复合地基是集合了夯扩桩和 CFG 桩复合地基突出优点的一种新型桩土复合地基, 在普通 CFG 桩基础上, 在桩端扩底形成夯扩头, 对其周围土和端部土高度挤压, 从而大幅提高地基承载力。并且具有沉降变形小、适用范围广、造价低等优点。

夯扩载体 CFG 桩复合地基主要用于需加固的地基上部有承载力较高厚度不大但不能满足上部结构要求的土层, 而其下部相对软弱厚度较大的土层的地基处理工程。处理后既可以达到承载力要求, 又可以控制基础变形量。

目前此项技术在西南地区很多工程中得到应用, 该技术的工程实践是成功的, 但其理论研究国内外均比较少, 相对滞后。故本文针对夯扩载体 CFG 桩复合地基的工程性质、承载力、变形特性进行研究, 完善该技术的相关理论, 促进其工程应用的进一步发展。

## 1 计算模型及验证

根据某夯扩载体 CFG 桩复合地基现场试验建立并验证数值模拟模型。

地质概化模型: 根据岩土工程勘察报告, 建立土体模型, 分为粉质粘土、粉土、粉砂、圆砾、稍密卵石 5 层, 并设置褥垫层。用 FLAC3D 中实体单元模拟土体、垫层, 用结构单元桩单元模拟普通桩段及夯扩载体。桩单元中已经结合了接触面单元以考虑桩土相对位移。

根据上述特征, 建立计算模型, 如图 1 所示。

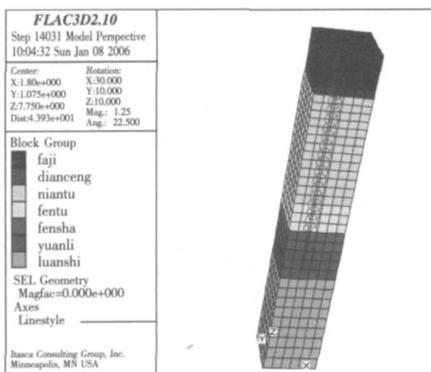


图 1 计算模型

先验证该模型的合理性, 图 2 为采用该模型的有限差分计算与现场实测值桩身轴力 - 深度曲线对比。由图 2 可知, 有限差分计算值与实测值规律相似, 吻合较好, 误差约为 2% ~ 12%, 说明本文采用的计算模型是合理有效的。

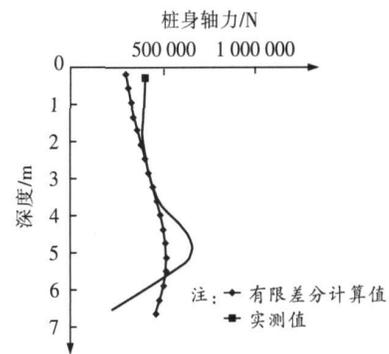


图 2 桩身轴力 - 深度曲线对比

## 2 竖向荷载作用下单桩的力学特性

### 2.1 桩身轴力随荷载变化规律

数值模拟桩身轴力的变化规律如图 3 所示, 和现场测试桩的结果相符。由于褥垫层的存在, 从一加荷载开始就存在一个负摩阻区。加载后, 桩的沉降量较少, 土的沉降量大, 产生负摩阻力, 使得桩身轴力随着埋深不断增大。随着埋深增大, 桩的位移和土的位移相等, 该点称为中性点。中性点以下桩的位移大于土的位移, 土对桩产生的是正摩阻力, 相应桩身轴力随着深度增大而减小。但是与普通 CFG 桩相比, 夯扩载体 CFG 桩中性点位置下移, 这是由于夯扩载体的作用, 桩体向下刺入量较小, 故负摩阻力一直到较深位置才克服, 桩身轴力才开始减小。

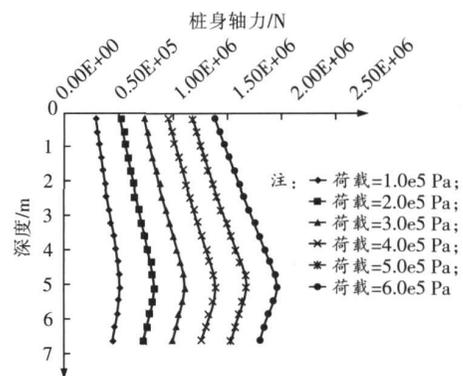


图 3 桩身轴力随荷载变化曲线

### 2.2 桩间土压力随荷载变化规律

桩间土压力随荷载变化规律如图 4 所示, 荷载增大, 桩间土压力亦增大。与现场测试的规律相似, 桩身出现应力集中, 随着荷载的增大, 桩和土的应力都增大, 但桩的应力增加幅度更大。

### 2.3 桩土应力比随荷载变化规律

图 5 与实测规律相符, 桩土应力比先增大, 荷载稳定后, 由于褥垫层的调整作用, 桩顶应力  $\sigma_p$  和桩间土

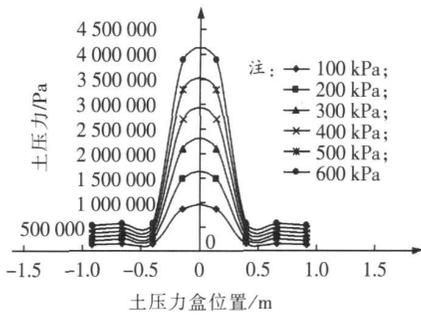


图 4 桩间土压力随荷载变化曲线

表面应力  $\sigma_s$  始终保持常量, 即桩土应力比  $n = \sigma_p / \sigma_s$  为常量, 不再随时间的变化而变化。

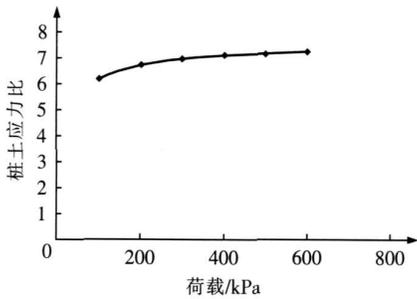


图 5 桩土应力比随荷载变化曲线

### 2.4 沉降随荷载变化规律

图 6 表明随着荷载的增加, 位移增大, 没有明显的拐点。由于桩的作用, 沉降控制在不超过 4 cm 的范围内, 符合规范的要求, 与静载试验的结果相符合。且桩的模量比土的大, 桩的位移小, 土的位移大, 桩顶褥垫层的料向桩间土充填, 使得土体和褥垫层始终保持接触, 桩土始终共同受力。

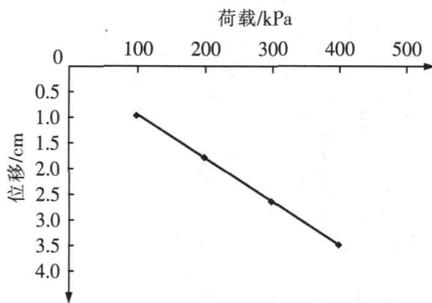


图 6 位移随荷载变化曲线

### 2.5 夯扩载体 CFG 桩复合地基单桩内力分布

图 7 为夯扩载体 CFG 桩复合地基 (单桩) 的垂直应力  $\sigma_s$  应力云图。由图 7 可见, 夯扩载体 CFG 桩复合地基 (单桩) 与天然地基相比较, 桩顶及桩端产生应力集中, 桩体承担较大的荷载, 端承作用明显, 桩长范围土体应力水平较低。夯扩载体 CFG 单桩复合地基

与桩基础的应力分布类似, 高应力区主要集中在桩端以下土体。桩间土分担了部分荷载, 但相当一部分浅层应力将向桩体集中, 并通过桩向深层扩散, 从而降低了地基中沿深度的应力不均匀程度, 使复合地基中的高应力区比天然地基及桩基础的高应力区范围更大。

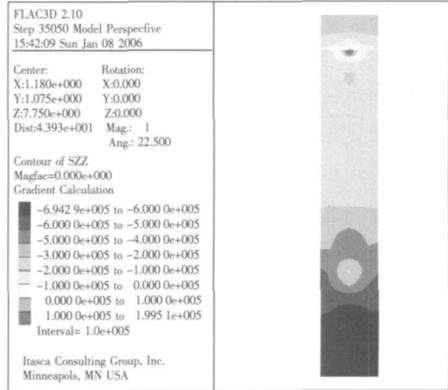


图 7 夯扩载体 CFG 桩复合地基 (单桩)  $\sigma_s$  应力云图

### 2.6 夯扩载体 CFG 桩复合地基单桩变形特性

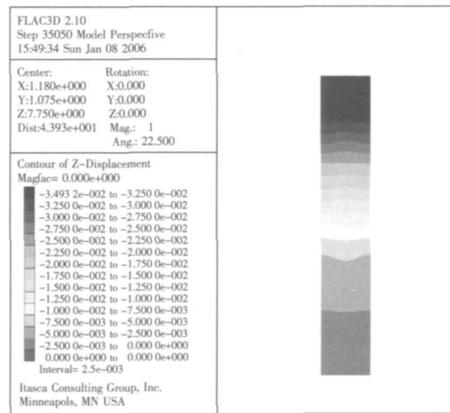


图 8 夯扩载体 CFG 桩复合地基单桩竖向变形云图

图 8 是夯扩载体 CFG 桩复合地基单桩竖向变形云图。由图 8 可以看出, 复合地基的沉降主要由桩长范围内土层的压缩及下卧层压缩组成, 并且浅层变形较天然地基小, 而天然地基变形主要由于浅层土层压缩变形。一方面, 复合地基同桩基础一样具有实体深基础的变形特性; 另一方面, 由于复合地基的桩间土承担了部分荷载, 在地基浅层产生了沉降变形, 且夯扩体的存在使桩土界面间的相对位移增大。

## 3 影响因素分析

### 3.1 夯扩载体

夯扩载体对于提高 CFG 桩的单桩承载力、控制沉降起到了很重要的作用。图 9 是有无夯扩载体的荷载 - 沉降曲线对比图。由图中可以看到, 无夯扩载体的复

合地基沉降大得多。夯扩载体起到了改良持力层, 提高复合地基承载力, 显著降低沉降的作用。也说明普通 CFG 桩需要落在比较好的持力层, 否则其承载能力将有所降低。

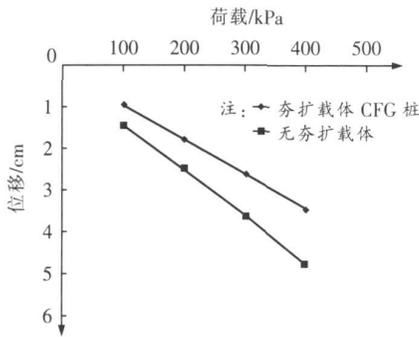


图 9 有无夯扩载体荷载-沉降曲线对比图

### 3.2 单桩承载力

夯扩载体 CFG 桩通过扩底工序能使桩底支承面积增加 1.1~1.4 倍, 在形成扩大头的同时能进一步加密桩端持力层, 可充分发挥持力层的承载能力。且可调整单桩承载力, 当持力层力学指标有较大差异时, 可通过增减扩底混凝土灌注量、拔管高度、扩底次数来调整单桩承载力。故下面研究单桩承载力大小对复合地基的影响。

图 10 是复合地基随单桩承载力变化的荷载-位移图。

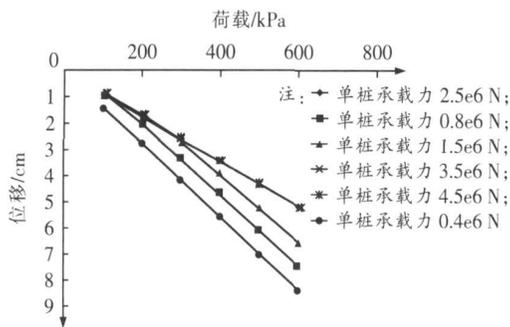


图 10 随单桩承载力变化的荷载-位移图

从图 10 可以看出, 随着单桩承载力的增大, 沉降量逐渐减小, 但增大到一定程度, 沉降不再减小。因此可以通过增减扩底混凝土灌注量、拔管高度、扩底次数来调整单桩承载力, 从而达到控制地基沉降、调整复合地基承载力的目的。这个调节是有效的, 但是过分增大单桩承载力是不经济的, 因为当单桩承载力达到一定数值, 沉降量就不再随单桩承载力的增大而减小。

上述分析可看出, 夯扩载体 CFG 桩复合地基可以通过夯扩工序调整单桩承载力, 调整桩所承担的和土

所承担的荷载比例, 进而控制沉降, 提高复合地基承载力。单桩承载力大, 桩身轴力大, 桩间土压力小, 桩承担的荷载比例大, 桩土应力比大, 沉降小。但是一味增大单桩承载力是不现实的, 因为单桩承载力增大到一定值时, 沉降、桩身轴力、桩间土压力、桩土应力比不再随单桩承载力的增大而发生变化。

### 3.3 褥垫层厚度

褥垫层技术是 CFG 桩复合地基的一个核心技术, 具有保证桩、土共同承担竖向和水平向荷载并调整其荷载分担、减小基底应力集中的作用。垫层厚度间接影响复合地基的承载力, 其厚度的不同改变桩和桩间土的应力分担比, 从而使桩和桩间土的承载力达到最佳状态, 提高整个复合地基的承载力。

图 11 是夯扩载体 CFG 桩复合地基沉降随垫层厚度变化图, 从图中可以看出垫层厚度增大, 沉降量增大。因为垫层厚度增大, 土承担的荷载增大, 桩承担荷载减小, 故沉降量增大。

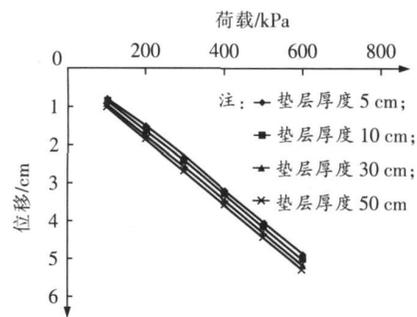


图 11 沉降随垫层厚度变化图

对于同样的桩、桩间土和荷载时, 桩土应力比随垫层厚度增大而减小, 也说是说垫层厚度越大, 桩间土承载力发挥的水平越高。即随着垫层厚度的增大, 桩间土承担荷载增大, 桩土应力比减小, 沉降量增大。垫层厚度过大会导致桩承载力发挥不够, 厚度过小会使桩间土承载力发挥不够。因此, 在工程设计中, 要根据实际情况, 选择合适的垫层厚度, 使桩和桩间土分担的比例达到最优, 充分发挥桩间土的作用, 以此提高复合地基的承载力。结合大量的普通 CFG 桩工程实践经验, 普通 CFG 桩褥垫层厚度一般取 10~30 cm 为宜。土质较差或上部结构刚度不大, 沉降要求严格时, 取小值。土质较好或上部结构刚度较大、沉降控制要求不太严格时, 取大值。

对于本论文所讨论的夯扩载体 CFG 桩复合地基, 桩体由于夯扩段改良了持力层土体, 单桩承载力大。复合地基在上部荷载作用下, 桩身轴力大, 桩承担的荷载比例大, 桩土应力比比普通桩大。故褥垫层的厚度在普通 CFG 桩的基础上应该适当增大, 以充分利用桩

间土的承载力,保证桩土应力比在一个合适的水平。

## 4 结论

本文结合四川省某夯扩载体 CFG 桩复合地基工程实例,通过现场试验和运用岩土专业分析软件 FLAC 数值模拟的计算对比分析,得出以下结论:

(1) 夯扩载体 CFG 桩,其桩端置于较硬的混凝土夯扩载体上,在上部荷载作用下,桩体主要是向上刺入褥垫层,产生桩身负摩阻,而桩端刺入混凝土夯扩体的刺入量很小,故其负摩阻力作用范围比普通 CFG 桩长,中性点降低,或者没有中性点,即产生的桩侧正摩阻力不足以克服由于桩顶向上刺入褥垫层产生的负摩阻力。

(2) 夯扩载体 CFG 桩单桩承载力大,桩体作用明显,桩承担荷载大,桩承担的荷载比例大,桩土应力比比普通 CFG 桩大。故褥垫层的厚度在普通 CFG 桩的基础上应该适当增大,以充分利用桩间土的承载力,保证桩土应力比在一个合适的水平。

(3) 夯扩载体 CFG 桩复合地基可以通过夯扩工序调整单桩承载力,从而调整桩所承担的和土所承担的荷载比例,进而控制沉降,提高复合地基承载力。单桩承载力大,桩身轴力大,桩间土压力小,桩承担的荷载比例大,桩土应力比大,沉降小。但是一味增大单桩承载力是不经济的,因为单桩承载力增大到一定值时,沉降、桩身轴力、桩间土压力、桩土应力比不再随着单桩承载力的增大而发生变化。

## 参考文献:

- [1] 周景星,王洪瑾,等. 基础工程[M]. 北京:清华大学出版社,1996
- Zhou Jingxing Wang Hongjin et al Foundation Engineering[M]. Beijing Tsinghua University Press 1996
- [2] 康景文. CFG 桩复合地基的应用及其发展——西南软弱地基 CFG 桩复合地基实践体会和应用展望(一)[J]. 四川建筑,2001(1): 39-45
- Kang Jingwen Application and Development of CFG Piles Composite Foundation - Practice Experience and Application Prospect of Southwest Soft Foundation CFG Pile Composite Foundation (1) [J]. Sichuan Architecture 2001, 21(1): 39-45
- [3] 康景文. CFG 桩复合地基应用及其发展——西南软弱地基 CFG 桩复合地基实践体会和认识(二)[J]. 四川建筑,2001(2): 45-50

- Kang Jingwen Application and Development of CFG Piles Composite Foundation - Practice Experience and Application Prospect of Southwest Soft Foundation CFG Pile Composite Foundation (2) [J]. Sichuan Architecture 2001(2): 45-50
- [4] 康景文,赵翔. CFG 桩复合地基应用及其发展——西南地区 CFG 桩复合地基应用展望(续完)[J]. 四川建筑,2001(3): 49-51
- Kang Jingwen Application and Development of CFG Piles Composite Foundation - Practice Experience and Application Prospect of Southwest Soft Foundation CFG Pile Composite Foundation (End of continuous) [J]. Sichuan Architecture 2001(3): 49-51
- [5] Emiliós M. Camodranos Christos T. Anagnostopoulos Michael K. Georgiadis Numerical Assessment of a  $\lambda$  IP  $\lambda$  Group Response Based on Load Test [J]. Computers and Geotechnics, 2003 (30): 89-95
- [6] 阎明礼,张东刚. CFG 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 Mingli Zhang Donggang The Technology and Engineering Practice of CFG Composite Foundation [M]. Beijing China Water Power Press 2001
- [7] Tasuoka Influence of the Foundation Width On the Bearing Capacity Factor [J]. Soil and Foundations 1989(3): 126-130
- [8] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000
- Gong Xiaonan Analysis on Geotechnical Computer [M]. Beijing China Architecture and Building Press 2000
- [9] Itasca Consulting Group Inc FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User Manual (version 2.1) [R]. Minneapolis Itasca Consulting Group Inc, 1997.
- [10] 黄熙龄,秦宝玖,等. 地基基础设计与计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981
- Huang Xiling Qin Baojiu et al Design and Computing Method of Foundation [M]. Beijing China Architecture and Building Press 1981
- [11] 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): 21-25
- Zhang Taian Wang Junqi Experimental Research on the Bearing Capacity of Single CFG [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(7): 21-25

(编辑 赵立兰)