

# CFG桩复合地基承载力确定

佟建兴<sup>1</sup> 胡志坚<sup>2</sup> 闫明礼<sup>1</sup> 王明山<sup>1</sup>

(1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013, 2. 华纺房地产开发公司, 北京 100006)

**摘要:** CFG桩复合地基是刚性桩复合地基, 属于地基范畴; 复合桩基是桩基, 属于基础范畴。CFG桩复合地基中单桩承载力大于自由单桩承载力, 复合地基桩间土承载力一般情况下大于天然地基承载力。复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定, 试验方案要合理模拟工程实际条件。利用公式估算复合地基承载力特征值时要合理选择  $R_a$ 、 $f_{sk}$ 、 $\beta$  的取值。公式计算结果一般不大于载荷试验结果。CFG桩复合地基载荷试验中, 褥垫层厚度取 150mm, 褥垫层周围预留原状土约束形成侧限条件。

**关键词:** CFG桩; 复合地基; 承载力

**中图分类号:** TU473.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-131X (2005) 07-0087-05

## IDENTIFICATION OF THE BEARING CAPACITY OF CFG PILE COMPOSITE FOUNDATION

Tong Jianxing<sup>1</sup> Hu Zhijian<sup>2</sup> Yan Mingli<sup>1</sup> Wang Mingshan<sup>1</sup>

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China,

2. Huafang Real Estate Development co., Beijing 100006, China)

**Abstract:** CFG pile composite foundation is a type of rigid subgrade, whereas composite pile foundation is a type of foundation. The bearing capacity of one single pile in a CFG pile composite foundation is higher than that of a free single pile, and the bearing capacity of soil surrounding the CFG piles is commonly higher than that of natural soil. The characteristic bearing capacity of a composite foundation should be confirmed by field bearing test, that can simulate realistic engineering condition, and rational values of  $R_a$ ,  $f_{sk}$  and  $\beta$  should be employed to estimate bearing capacity of a composite foundation. The formula calculation is in general smaller than that of loading test. In a bearing test of a CFG pile composite foundation, the thickness of the cushioning layer is taken as 150mm, and the preserved surrounding soil forms a laterally constrained condition.

**Keywords:** CFG pile; composite foundation; bearing capacity

## 引言

CFG桩复合地基从80年代末开始在工程中应用, 它具有承载力提高幅度大、地基变形小等特点, 并对不均匀地基消除不均匀变形具有很好的适应性。通过十余年的科研和工程实践, CFG桩复合地基技术不断完善, 现已列入国家行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)。随着这一技术在全国广泛推广应用, 工程技术人员对CFG桩与桩基的差异、CFG桩复合地基设计、施工及检测等诸多方面都总结了一些有益的经验, 但也存在这样或那样一些不同的认识。本文将对上述问题做一些分析。

## 1 刚性桩复合地基与复合桩基

复合地基是在原土中设置一定比例的增强体, 由桩间土和增强体共同承担荷载的人工地基。复合地基的判定条件可概括为: 1) 桩土共同承担竖直和水平荷载; 2) 具有地基性状, 即桩对基础无冲切作用, 且在无埋深条件下水平荷载由基底摩阻力承担, 桩承担的水平荷载远远小于土承担的水平荷载。

CFG桩复合地基中增强体(桩)、桩间土构成复合土体, 桩与基础不是直接相连, 而是通过褥垫层(如砂、碎石等)和基础相联系。褥垫技术是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。试验结果表明, 当褥垫层厚度适宜时, 桩、土均能发挥较好的荷载分担作用, 桩对基底产生的应力集中不大, 桩顶受到的水平荷载很小, 桩体不

会发生水平断裂, 桩在复合地基中不会失去工作能力。复合桩基中土参与分担部分荷载, 但是由于桩体同基础直接相连, 桩对基础产生显著的应力集中, 桩对基础具有冲切作用, 当基础承受水平荷载时, 桩土水平荷载分担比尚需进一步研究。

刚性桩复合地基、复合桩基是从天然地基到基础过渡的两种典型状态, 前者是复合地基, 属于地基范畴; 而后者是桩基, 属于基础范畴。

## 2 复合地基承载力的确定

复合地基承载力的确定需分设计阶段和工程验收阶段来讨论。

### 2.1 设计阶段

《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2002) 对复合地基承载力给出了确定原则, 即复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定, 或采用增强体的载荷试验结果和其周边土的承载力特征值结合经验确定。《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002) 同样强调复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定, 初步设计时可按式 (1) 估算:

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

式中:  $f_{\text{spk}}$  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 ( $\text{m}^2$ ),  $\beta$  为桩间土承载力折减系数, 宜按地区经验取值, 如无经验时可取 0.75 ~ 0.95, 天然地基承载力较高时取大值,  $f_{\text{sk}}$  为处理后桩间土承载力特征值 (kPa), 宜按当地经验取值, 如无经验时, 可取天然地基承载力特征值。

实际工程中, 有条件先在拟建场地做现场载荷试验, 可为设计提供可靠的设计参数。而很多情况下是在无试验资料条件下按式 (1) 估算复合地基承载力, 但要结合工程实践经验, 合理确定  $R_a$ 、 $f_{\text{sk}}$ 、 $\beta$  等的取值。出于对工程安全的考虑, 希望公式计算值接近但不大于载荷试验结果, 而大量试验结果表明, 公式计算结果一般不大于载荷试验结果。分析其原因, 主要有以下三点:

(1) 地基中的单桩与自由单桩承载性状不同: 严格的说, 式 (1) 中的  $R_a$  应为复合地基中单桩竖向承载力特征值, 而在实际计算中, 采用的是自由单桩竖向承载力特征值。复合地基中的单桩不同于自由单桩的一个重要特点是, 由于桩间土应力在桩侧土中产生一个较大的竖向应力增量, 使得桩的承载特性与自由单桩不同。

图 1 (a) 为自由单桩受力图, 桩顶应力  $\sigma_p$ , 桩

间土应力  $\sigma_s = 0$ 。图 1 (b) 为复合地基中单桩受力示意图, 除桩顶应力  $\sigma_p$  作用外, 桩间土表面作用的应力  $\sigma_s$ , 必然在桩侧产生附加应力  $\Delta\sigma_z$ , 桩身则受到一个正向应力增量  $k_0\Delta\sigma_z$  ( $k_0$  为静止土压力系数), 导致桩的侧阻增加; 另外, 在桩端产生的附加应力增量, 形成桩端边载效应, 减少了主应力差, 增加了桩的端阻力。因此, 复合地基中单桩承载力要比自由单桩承载力大, 用自由单桩试验结果估算复合地基中单桩承载力是偏于安全的。

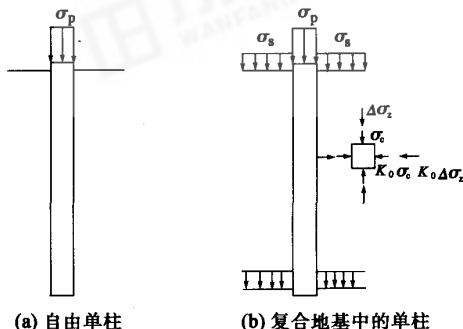


图 1 复合地基中单桩与自由单桩的受力对比

Fig.1 Single pile in composite foundation versus free single pile

(2) 复合地基中的桩间土和天然地基的承载特性不同。分析原因, 主要由于桩和褥垫层的参与, 一般认为有两个方面:

1) 桩的约束作用: 复合地基中桩的存在, 使桩间土的侧向变形受到限制, 从而使土的竖向变形减小。桩对桩间土的约束作用同桩的数量和置换率有关。单桩复合地基, 桩的约束作用最小, 群桩复合地基, 桩数越多, 置换率越大, 则约束作用越大。

2) 负摩擦区的影响: 由于褥垫层的设置, 复合地基中, 桩存在负摩擦区, 如图 2。在该区, 桩给桩间土一个向上的作用力, 其作用是阻止桩间土的变形。

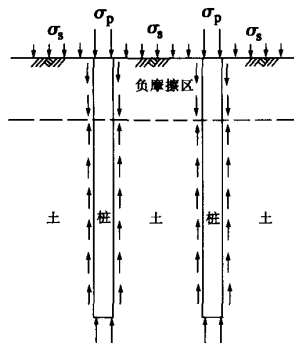


图 2 复合地基中桩的摩擦力示意图

Fig.2 The frictional resistance for a pile in composite foundation

如用天然地基承载力特征值计算复合地基承载

力，其结果也是偏于安全的。

(3) 计算公式 (1) 引入了小于 1 的折减系数  $\beta$ 。 $\beta$  与桩间土承载力发挥程度有关，根据地区经验取值，无经验时可取 0.75~0.95。由于  $\beta$  小于 1，使公式计算结果偏于安全。

参考文献 4 给出了包括天然地基、CFG 桩自由单桩、单桩复合地基、4 桩复合地基和 9 桩复合地基的模型试验。桩长为 3.2m，桩径为 150mm，桩间距为 0.525m（即 3.5 倍桩径），单桩、4 桩和 9 桩复合地基载荷试验承压板尺寸分别为 0.525m×0.525m、1.05m×1.05m 和 1.575m×1.575m，承压板下铺设厚 100mm 砂垫层，地基土为粉土和黏土。制桩时采用非挤土成桩工艺，即桩间土没有挤密作用，且土是均质的。

图 3 为自由单桩和复合地基中单桩荷载-沉降曲线。由图 3 可以看出，复合地基中单桩承载力要比自由单桩承载力大。

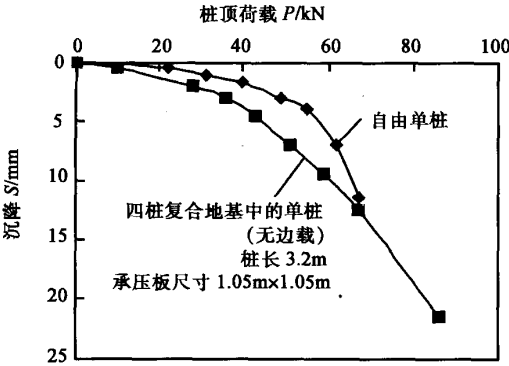


图 3 复合地基中单桩与自由单桩的荷载-沉降曲线  
Fig.3 The load-settlement curves for one single pile in composite foundation and for a free single pile

将复合地基载荷试验时测得的桩间土表面的平均应力和土表面的变形（复合地基中桩对土产生的荷载未能表示出来），与相同荷载下天然地基的土表面变形进行对比，结果如图 4 所示。

可以看出，复合地基中桩间土承载力特征值大于天然地基承载力特征值。此外，由于复合地基中负摩擦区的存在，当桩间土荷载较小时，桩间土的变形都小于天然地基的变形；随着荷载的增加，桩对土产生的应力使得两者的变形相等，之后则有桩间土的变形大于天然地基的变形。

利用式 (1) 计算上述模型试验 CFG 桩复合地基承载力特征值。4 桩复合地基中单桩承载力特征值  $R_a = 34\text{kN}$ ，桩间土承载力特征值  $f_{sk} = 150\text{kPa}$ ，面积置换率  $m = 0.064$ ， $\beta$  取 1，计算得复合地基承载力特征值为 263kPa；载荷试验确定的 4 桩复合地基承载力特征

值为 300kPa。

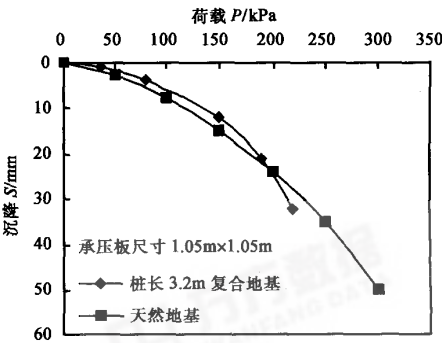


图 4 复合地基桩间土与天然地基的荷载-沉降曲线  
Fig.4 The load-settlement curves for a natural foundation and the soil surrounding piles in composite foundation

可见，利用式 (1) 估算复合地基承载力特征值，公式计算结果一般小于载荷试验结果。

当通过现场复合地基载荷试验确定复合地基承载力特征值时，应注意复合地基载荷试验要准确模拟工程实际条件，除了考虑地基土特性外，特别注意施工工艺对地基土的影响。复合地基施工工艺可分为两类：一是挤土成桩工艺，即对桩间土产生扰动或挤密，如振动沉管打桩机成孔制桩；二是非挤土成桩工艺，即对桩间土不产生扰动和挤密作用，如长螺旋钻孔灌注成桩工艺。

南京造纸厂清除胶印纸车间地基处理采用 CFG 桩复合地基处理方案，施工采用振动沉管打桩机成桩。为确定复合地基承载力和设计方案，进行了 CFG 桩单桩复合地基载荷试验（试验 1）和 4 桩复合地基载荷试验（试验 2）。被加固土层为  $f_{sk} = 80\text{kPa}$  的淤泥质粉质黏土和  $f_{sk} = 100\text{kPa}$  的淤泥质粉土。CFG 桩桩径为 350mm，桩长 10m。试验区靠近拟建场地边缘处，施工采用振动沉管打桩机成桩。图 5 为载荷试验平面布置图。

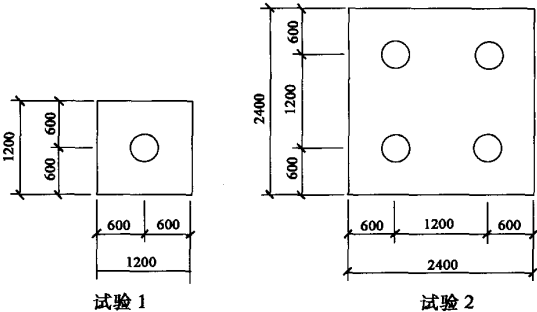


图 5 载荷试验平面布置图（单位：mm）  
Fig.5 Arrangement of loading test

表 1 地层的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil

类别	土层名称	含水量 $w(\%)$	重度 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	孔隙比 $e$	压缩系数 $a_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_s(\text{MPa})$
加固前	淤泥质粉质黏土	41.6	17.8	1.178	0.80	3.00
	淤泥质粉土	37.4	18.1	1.069	0.37	4.00
加固后	淤泥质粉质黏土	36	18.4	1.01	0.60	3.11
	淤泥质粉土	25	19.8	0.71	0.18	9.27

表 1 为加固区土层施工前后物理力学性质对比情况,可以看出,淤泥质粉土属挤(振)密效果好的土,经过挤(振)密作用后,孔隙比由 1.069 降至 0.71,压缩模量由 4.0MPa 提高至 9.27MPa,挤(振)密效果显著;淤泥质粉质黏土则属于可挤(振)密土,经过挤(振)密作用后,孔隙比略有降低,压缩模量则稍有提高。

28 天后做静载荷试验,试验结果如图 6 所示。4 桩复合地基承载力特征值远远大于单桩复合地基承载力特征值。分析原因,主要是因为加固区土层为挤(振)密效果好的土和可挤(振)密土,采用振动沉管成桩工艺使地基土产生挤(振)密作用,试验 2 中 4 根桩对桩间土的挤(振)密效果要好于试验 1 中 1 根桩的情况。因此,当设计方案为多桩复合地基时,应采用试验 2 的载荷试验结果作为复合地基承载力特征值;当设计方案为条基下单排布桩或独立基础下单桩复合地基时,应采用试验 1 的载荷试验结果作为复合地基承载力特征值。

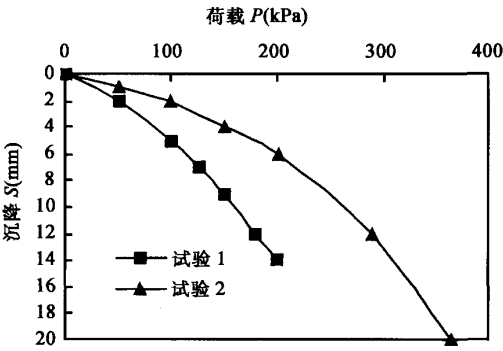


图 6 南京造纸厂复合地基的荷载-沉降曲线

Fig.6 The load-settlement curves for the composite foundation of Nanjing Paper Mill

由上述分析可以看出,利用载荷试验确定复合地基承载力特征值时,要结合工程实际情况,充分考虑场地地基土特性和施工工艺对地基土的影响,合理选择载荷试验方案。

3.2 复合地基竣工验收阶段

由以上分析可知,复合地基承载力的公式计算结果一般偏于安全,在复合地基设计阶段,从工程安全角度考虑,可以用公式(1)估算复合地基承载力。

万方数据

但是,  $R_a$ 、 $f_{sk}$ 、 $\beta$  等的取值可能会因人而异,对于同一复合地基,有时会得出不同的计算结果,这样就不能保证复合地基承载力的唯一性。因此,《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)规定复合地基竣工验收时,承载力检验必须采用复合地基载荷试验。

3 CFG 桩复合地基载荷试验应注意的问题

CFG 桩复合地基载荷试验要点可详见《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)。此外试验时还应注意以下几点:

(1) 褥垫层厚度与铺设方法

合理的褥垫层厚度是保证试验结果准确性的重要环节,褥垫层厚度偏小,会导致桩顶应力集中,桩间土承载能力不能充分发挥,应该由桩间土承担的荷载转移至桩上,容易发生桩头压碎,复合地基承载力偏低。《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)规定,CFG 桩复合地基载荷试验褥垫层厚度可取 150mm。褥垫层的底标高与桩顶设计标高一致,褥垫层底面平整,铺设面积与承压板面积相同。褥垫层周围预留原状土约束形成侧限条件。放置承压板前,褥垫层要压实,褥垫层与承压板密切接触,以免由于褥垫层压缩量占复合地基总沉降量比例过大,致使按沉降比确定的承载力比复合地基实际承载力偏低。图 7 为载荷试验褥垫层铺设示意图。

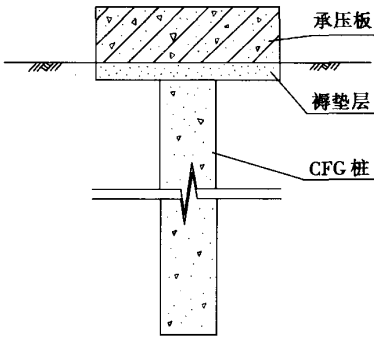


图 7 载荷试验褥垫层铺设示意图

Fig.7 Cushion paving in loading test

(2) 由载荷试验曲线确定 CFG 桩复合地基承载

## 力特征值

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)规定,当压力-沉降曲线( $p-s$ 曲线)是平缓的光滑曲线时,可按相对变形值确定承载力特征值,且该值不应大于最大加载压力的一半。对于CFG桩复合地基,当以卵石、圆砾、密实粗中砂为主的地基,可取 $s/b$ (或 $s/d$ )等于0.008所对应的压力;当以黏性土、粉土为主的地基,可取 $s/b$ (或 $s/d$ )等于0.01所对应的压力为复合地基承载力特征值。

工程中常遇到如下两个问题:其一,为使试验结果能够满足设计要求,减少每级荷载下的变形量,故意减少褥垫层厚度,其结果是给定的变形比( $s/b$ )对应的荷载加大了,但 $p-s$ 曲线发生了陡降,复合地基承载力由极限承载力控制,承载力反而降低;其二是只注意了最大加载压力的一半为承载力特征值,却忽略了按相对变形值确定承载力特征值的控制条件。

## 4 结 语

通过以上分析,可以得出如下结论:

- (1) CFG桩、桩间土和褥垫层构成刚性桩复合地基,属于地基范畴;复合桩基是桩基,属于基础范畴。
- (2) 复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定,试验方案要充分考虑地基土的挤(振)密性、成桩工艺等因素的影响,合理模拟工程

实际条件。

(3) 在设计阶段初步设计时可按公式(1)估算复合地基承载力特征值,要结合地区工程实践经验,合理选择 $R_a$ 、 $f_{sk}$ 、 $\beta$ 的取值。

(4) CFG桩复合地基中单桩承载力大于自由单桩承载力,复合地基桩间土承载力一般情况下大于天然地基承载力。公式计算结果一般不大于载荷试验结果。

(5) CFG桩复合地基载荷试验中,褥垫层厚度取150mm,褥垫层周围预留原状土约束形成侧限条件,放置承压板前,褥垫层要压实。

(6) 对于 $p-s$ 曲线为平缓光滑的缓变型曲线,注意按不大于最大加载压力的一半和相对变形值两个控制条件,来确定复合地基承载力特征值。

## 参 考 文 献

- [1] 建筑地基基础设计规范(GB5007-2002) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [2] 建筑地基处理技术规范(JGJ79-2002) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [3] 建筑桩基技术规范(JGJ94-94) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995
- [4] 闫明礼、杨军等. CFG桩复合地基试验研究 [R]. 北京:中国建筑科学研究院研究报告, 1992
- [5] 闫明礼、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

佟建兴 工程师, 博士研究生, 从事土的工程性质、地基处理等领域的研究开发工作。通讯地址: 100013 北京市北三环东路30号中国建筑科学研究院地基所

胡志坚 工程师, 硕士。

闫明礼 研究员, 博士生导师。

王明山 工程师, 博士。