

CFG 桩复合地基承载力经验公式的修正及应用

陈昌仁¹ 侯新宇² 郭洪涛³

(1. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029 2. 江苏广播电视大学, 江苏 南京 210013;
3. 南京市水利建筑工程有限公司, 江苏 南京 210001)

摘要 对 CFG 桩复合地基在水平和竖向荷载作用下桩、土的受力进行了分析, 在经验公式的基础上, 考虑了边载对承载力的影响, 推导出 CFG 桩复合地基承载力修正公式, 并利用该修正公式计算了某泵站基坑的 CFG 桩复合地基承载力. 计算结果与静载荷试验结果比较表明, 该修正公式能准确反映地基承载力的大小.

关键词 CFG 桩; 复合地基; 褥垫层; 竖向荷载; 桩土应力比

中图分类号 :TU473.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)03-0321-04

CFG 桩是水泥粉煤灰碎石桩(Cement Flyash Gravel Pile)的简称^[1], 是在碎石桩桩体中掺加适量石屑、粉煤灰和水泥加水拌和, 制成具有一定黏结强度和一定压缩性的半刚性桩体. CFG 桩、桩间土和褥垫层一起构成 CFG 桩复合地基. CFG 桩复合地基处理技术应用广泛, 适用于处理淤泥质黏土、软土, 西北湿陷性黄土及承载力在 200 kPa 左右的较密实性土. CFG 桩复合地基同碎石桩复合地基相比, 具有变形模量高, 承载力提高幅度大等特点. 试验证明, CFG 桩自身本构关系呈线弹性模型, 弹性模量受混合料塌落度、石屑率、水泥粉煤灰比影响^[2]. 因此, CFG 桩复合地基可以通过改变桩体材料配比, 使承载力具有较大幅度的提高. 此外, 改变桩体直径、桩长、桩距、垫层厚度等设计参数, 也可以使承载力得以提高, 尤其对承载力较低而要求加固后承载力有较大提高的地基更为适用. CFG 桩不仅可以全桩长发挥桩的侧阻作用, 桩端落在好土层上也可很好地发挥端阻作用. 因此, CFG 桩复合地基在基础工程中得到越来越广泛的应用.

1 CFG 桩复合地基承载力经验公式的修正

CFG 桩复合地基具有置换作用、挤密作用、边载作用和对土的约束作用等复合地基效应. CFG 桩和桩间土的相互作用是影响其复合地基竖向承载力的主要因素, 褥垫层起着极其重要的作用.

1.1 CFG 桩复合地基中褥垫层的作用机理^[3-4]

在复合地基中, 桩体的压缩模量远远大于土的压缩模量, 桩在竖向荷载下产生的变形要小于土的变形, 褥垫层能够起到协调这种变形的作用. 桩体刺入褥垫层, 构成褥垫层的颗粒状散体材料不断补充到桩间土表面上, 基础通过挤压褥垫层和桩间土接触, 使得桩和桩间土始终参与工作, 并使桩间土在桩体沉降不断增加的情况下能不断发挥其承载力作用. 随着时间的推移, 桩和桩间土的荷载分担趋于一常值, 见图 1(图中 P_p 为桩承受荷载, P_s 为桩间土承受荷载). 褥垫层的存在, 不论桩端土层性质如何, 从开始加载桩就存在一个负摩擦区. 在这一负摩擦区深度为 Z_0 的范围内, 土的位移大于桩体位移, 桩的轴力随深度增大; Z_0 处桩体和土的位移相等, 该位置为桩体的中性点, 也就是最大轴向应力位置; Z_0 深度以下, 桩的位移大于土的位移, 桩间土对桩体产生正摩擦阻力, 而且随深度增加逐渐减小(图 2).

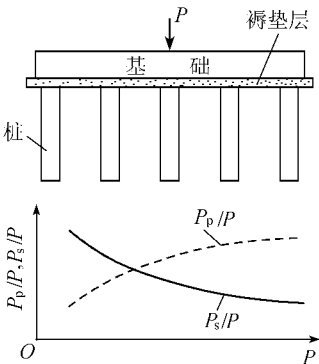


图 1 CFG 桩和桩间土荷载分担比
随荷载变化曲线

Fig.1 Curve for load sharing between
CFG piles and soil

1.2 CFG 桩的置换作用

复合地基的置换作用主要取决于桩体材料的组成,CFG 桩中的细骨料粉煤灰可增加桩体的黏结强度,而且具有明显的后期强度.在复合地基增强体(桩体)系列中,CFG 桩的置换作用最强,而且可以全长发挥侧阻作用.加大桩长可使复合地基置换作用显著提高,承载力也有所增强.CFG 桩复合地基的面积置换率较低(一般在 10% 以内),桩对土的影响相对较小,桩间土具有类似天然地基的性状.CFG 桩一般按 C7.5~C15 混凝土强度等级设计,其桩身压缩性能明显比周围土体要小,故能使复合地基强度提高,达到置换作用.

1.3 CFG 桩的挤密作用

由于 CFG 桩属于高黏结强度桩,其复合地基的挤密作用在一般软弱土层中表现并不明显,远不如散体桩(碎石桩)和一般黏结强度桩(如石灰桩、二灰桩等),但在挤密效果良好的土层中成桩,桩间土的挤密效果也很好.因为基础荷载通过褥垫层作用于桩间土,使桩间土竖向附加应力 σ_z 增加,桩间土水平附加应力 $\sigma_x = \sigma_z \mu / (1 + \mu)$ (μ 为桩间土泊松比)也随之增加,达到挤密的作用. σ_x 增加对桩承载力有 2 方面影响:(a) σ_x 是桩间土对桩侧的正压力,正压力的提高,使桩的侧摩阻力加大,从而提高了桩的竖向承载力;(b)在针对桩体材料的室内三轴试验中, σ_x 的作用相当于围压 σ_3 ,加大围压,可以提高桩体的抗压强度,增强 CFG 桩桩顶部位抵抗受压破坏的能力.

1.4 边载对 CFG 桩复合地基承载力的影响^[5]

边载对复合地基承载力的提高具有明显作用.边载对 CFG 桩复合地基的影响主要是提高桩间土的承载力,而对复合地基中 CFG 桩本身承载力影响较小(图 3).

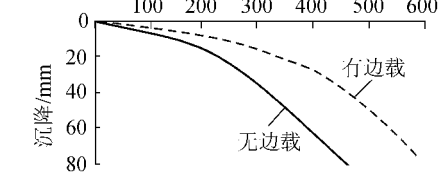


图 3 有、无边载条件下的荷载-沉降曲线
Fig.3 Comparison of load-settlement curves with and without side loads

1.5 经验公式的修正

综上所述,在考虑诸多因素的情况下,对 YB9258—97《建筑基坑工程技术规范》中关于 CFG 桩复合地基承载力普遍经验公式进行修正,得出考虑边载影响的承载力估算公式:

$$f_{\text{spk}} = m \frac{R_k}{A_p} + \lambda \alpha \beta (1 - m) f_k \tag{1}$$

式中: f_{spk} ——复合地基承载力标准值,kPa; R_k ——CFG 桩单桩承载力标准值,kN,可依据 GJ 94—94《建筑桩基技术规范》计算得出; f_k ——天然地基承载力标准值,kPa; A_p ——CFG 单桩截面面积, m^2 ; m ——面积置换率; α ——桩间土强度提高系数; β ——桩间土强度发挥系数,根据地区经验取值,无经验时可取 $\beta = 0.75 \sim 0.95$; λ ——边载修正系数,建议取 $\lambda = 1.0 \sim 1.2$.

2 CFG 桩复合地基在水平荷载作用下的性状^[6]

CFG 桩复合地基水平承载力受如下因素影响:桩顶是否受竖向荷载作用、褥垫层厚度、基础埋深、CFG 桩置换率等.

2.1 桩顶竖向荷载对水平承载力的影响

桩顶无竖向荷载时,CFG 桩表现出与加筋刚性桩(钢筋混凝土桩等)不同的变形特性.桩顶有竖向荷载时,CFG 桩变形曲线类似加筋刚性桩的变形曲线.实际工程中的 CFG 桩复合地基,其桩顶一般均会作用竖向荷载,故桩抵抗水平荷载能力要比单个自由桩强.

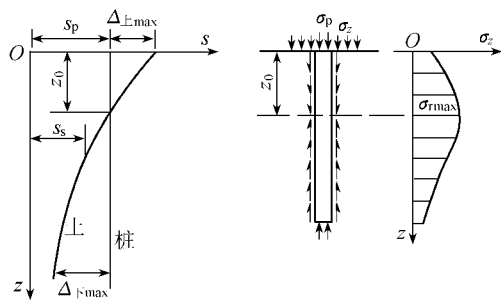


图 2 桩土位移和桩体轴力随深度变化对照
Fig.2 Comparison of pile and soil displacements and axial stress of piles along the depth

2.2 褥垫层厚度对 CFG 桩复合地基水平承载力的影响

在桩顶水平荷载不变的条件下,褥垫层越厚,桩顶压力越大,则桩顶水平位移越小;褥垫层越薄,桩顶压力越小,桩顶水平位移就越小,也就是说,褥垫层越厚,桩土的水平荷载分担比越小;褥垫层越薄,桩土水平荷载分担比越大。

综合来看,确定褥垫层的厚度是 CFG 桩复合地基设计的关键。褥垫层厚度大,桩间土承载力能够得到充分发挥,桩体承担竖向荷载减小,但地基水平和竖向变形都会增大;相反,褥垫层厚度小,桩土竖向荷载分担比加大,桩间土承载力不能得到充分发挥,需要增加桩的数量和桩长,而且桩对基础的应力集中明显,但其优点是复合地基的沉降量小。大量实践证明,褥垫层厚度大于 10 cm 时,桩体在水平荷载作用下,不会发生断裂破坏,因此褥垫层厚度取 10 ~ 30 cm 较为合理。

2.3 基础埋置深度对水平承载力的影响

基础对面土的抗力和基础侧面土的摩阻力可以分担一部分桩顶水平荷载,相应桩顶受力减小,桩顶位移也减小。这种土抗力和摩阻力随深度的增加而增加,因此,基础埋置越深,桩顶水平剪力越小,桩顶水平位移就越小。

3 工程实例

南京河西地区某综合性泵站,其基坑开挖深度 7 m,地下水位高,地质情况复杂,基坑面积大(49 m × 40 m),土层参数见表 1^[7]。基坑底部采用 CFG 桩加固地基,以改良后的复合地基作为基础持力层,要求复合地基承载力特征值为 100 kPa,单桩桩身采用素混凝土,混凝土等级 C10,桩径 377 mm,桩纵横间距 1 400 mm,桩长 6.5 ~ 7.8 m,桩端进入 2~4 层粉细砂 2.5 m,共施工 1 086 根工程桩。

利用修正经验公式,选取部分特征桩位,计算复合地基承载力。由于 CFG 桩位于基坑底部,基坑侧壁可以看作边载来处理,相应修正经验公式中的 λ 取 1.1,计算得到承载力标准值达到 130 ~ 160 kPa,能够满足承载力设计要求。

该工程 CFG 桩采用振动沉管施工工艺成桩。施工过程中,为了防止桩身混凝土上浮,混凝土投料振实后,加入碎石,用量以加入碎石振实后必须超出地面 0.5 m 以上控制。

为避免出现缩颈、断桩现象,拔管速度必须严格控制,淤泥质土段拔管速度控制在 0.5 m/min 左右,上部拔管速度控制在 0.8 ~ 1.0 m/min 之间,总拔管时间控制在每根桩 16 min 以上。施工结束后,为了复核加固后 CFG 桩复合地基是否满足工程要求,抽测 3 组试验点进行复合地基静载荷试验,试验点 1 为 1 根桩,试验点 2、3 均为 4 根桩。静载荷试验 Q ~ s 曲线见图 4。每组试验得出的 CFG 桩特征值均超过了 110 kPa,综合特征值为 153 kPa,能够满足工程要求,同时证实了估算公式的合理性。静载荷试验结果见表 2。

表 1 场地土层主要计算参数

Table 1 Characteristic parameters of soil layer for calculation

土层序号	土层名称	土层厚度/m	极限侧阻力/kPa	承载力综合特征值/kPa
1-1	杂填土	0.3 ~ 4.7	15	55
1-2	素填土	0.5 ~ 2.2	18	65
2-1	粉质黏土	0.6 ~ 3.1	30	80
2-2	淤泥质粉质黏土	1.9 ~ 11.5	16	70
2-3	粉土	1.5 ~ 7.9	18	85
2-4	粉细砂	2.5 ~ 21.5	32	160
2-4(a)	粉质黏土	1.7 ~ 4.0	20	100
2-5	粉砂夹黏土	6.5 ~ 7.2	30	135
2-6	粉质黏土	未揭穿	25	110

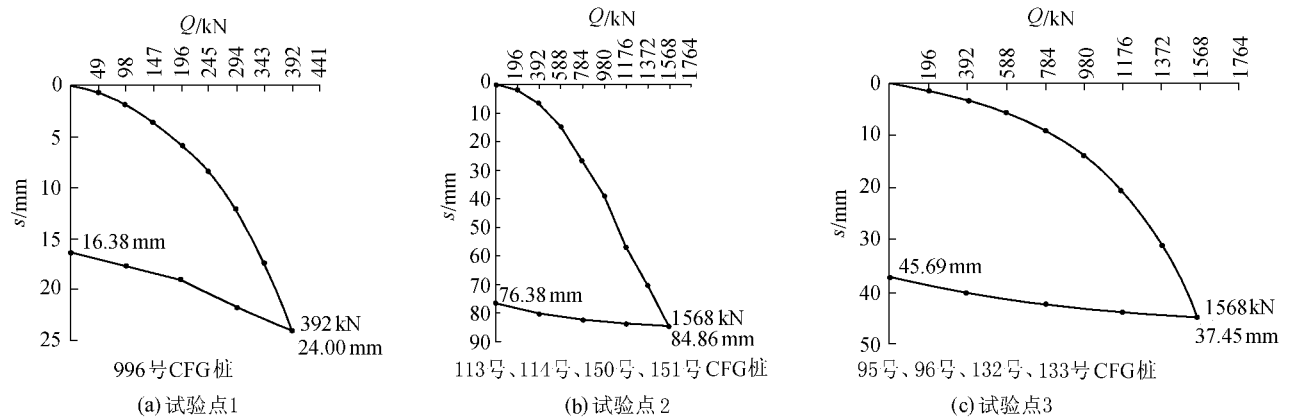


图 4 静载荷试验 Q ~ s 曲线

Fig.4 Q ~ s curve from static loading tests at selected points

4 结 论

本文对 CFG 桩在竖直及水平荷载作用下变形和受力特性进行了定性分析,阐述了褥垫层在 CFG 桩复合地基中的重要作用.在经验公式的基础上,考虑边载对复合地基承载力的影响,对竖向承载力经验公式进行了修正.结合工程实践,对修正公式进行验证,计算结果趋于合理,但与静载荷试验数据结果相比存在一定差异,其因为 (a)静载荷试验桩数量远远少于计算桩的数量 (b)由于土层厚度分布不均,桩间土强度发挥经验系数 β 的单一取值无法适合大面积地基中的每根桩 (c)由于开挖放坡引起边载分布不均匀,边载修正系数 λ 不能完全反映这种荷载差异.

因此,在 CFG 桩复合地基的设计过程中,应根据具体情况,选择适宜的桩长、桩距、垫层厚度以及合理的施工工艺等,就可以达到良好的加固效果.同样通过参数的合理取值也可以使修正公式能准确反映地基承载力的大小.

表 2 静载荷试验结果
Table 2 Result of static loading tests

试验点	$s:b/mm$	对应的荷载/kN	复合地基承载力/kN	CFG 特征值/kPa	设计要求 CFG 特征值/kPa
1	16.8	334	334	170	100
2	33.6	890	890	113	100
3	33.6	1401	1401	178	100

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:中国水力水电出版社,2001.
[2] 黄仙枝.CFG 桩弹性模量的试验研究[J].太原工业大学学报,1997,28(增刊):31-34.
[3] 郑东明,邓安福,吕镇江.CFG 桩复合地基褥垫层效用的有限元分析[J].地下空间,1999,19(6):34-37.
[4] 张建伟,戴自航.CFG 桩复合地基褥垫层效用的有限元分析[J].岩土力学,2005(5):171-174.
[5] 叶书麟.地基处理工程实例应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
[6] 吴春林,阎明礼.CFG 桩及其复合地基水平荷载作用下的性状[J].工程勘察,1996(4):18-21.
[7] 李少和,易发成.CFG 桩复合地基的基本原理及工程应用[J].西部探矿工程,2005(9):19-21.

Modification of empirical formula for bearing capacity of
CFG pile composite foundation and its application

CHEN Chang-ren¹, HOU Xin-yu², GUO Hong-tao³

- (1. Department of Water Resources in Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
2. Jiangsu Radio and TV University, Nanjing 210013, China;
3. Nanjing Water Construction Engineering Ltd., Nanjing 210001, China)

Abstract :An analysis was made of the interaction between piles and soil of CFG pile composite foundation under actions of horizontal loads and vertical loads, and the functions of cushions were expatiated. In consideration of the influences of side loads on the bearing capacity of the foundation, a modified formula for the bearing capacity of CFG pile composite foundation was derived based on the empirical formula, and the formula was applied to a foundation pit strengthening project reinforced with CFG piles at a pumping station. The comparison of the calculated result with the experimental data from static loading tests shows that the modified formula can reflect the bearing capacity of the composite foundation with reasonable accuracy.

Key words :CFG pile; composite foundation; cushion; vertical load; pile-soil stress ratio