

CFG 桩复合地基技术及工程应用研究

秦鹏飞

(郑州工业应用技术学院建筑工程学院,河南郑州 451150)

【摘要】 CFG 桩复合地基作为一种有效的地基处理手段,20 世纪 80 年代后在建筑地基基础、路基工程等领域应用日益广泛,取得了良好的社会效益和经济效益,但目前该技术还存在理论研究滞后于工程需要的诸多不足。对 CFG 桩复合地基的工作性状及工程应用新成果进行分析述评,希望能为该技术的发展、完善和成熟尽力,并为广大工程技术人员和科研人员提供有益参考和指导。

【关键词】 CFG 桩;复合地基;工作性状;工程应用

【中图分类号】 TU 472

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2018.04.009

The Working Properties and Engineering Application of CFG Pile Composite Foundation

Qin Pengfei

(School of Architectural Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 450010, Henan, China)

【Abstract】 As an effective foundation treatment method, CFG pile composite foundation has been widely applied in building foundation, subgrade engineering and other fields after 1980s. Good social and economic benefits have been achieved. At present, there are still many shortcomings in the theoretical research of this technology, which lags behind the need of engineering. In this paper, the working characteristics and engineering application of CFG pile composite foundation are analyzed and reviewed, in the hope that the development, perfection and maturity of the technology can be done as best as possible. And for the vast number of engineering and technical personnel and scientific research personnel to provide useful reference and guidance.

【Key words】 CFG pile; composite foundation; working character; engineering application

0 引言

CFG(Cement Fly-ash Gravel pile)桩即水泥粉煤灰碎石桩,是中国建筑科学研究院地基所 20 世纪 80 年代末开发的一项新的地基加固技术。CFG 桩复合地基工作系统由单桩、桩间土和褥垫层等构成,具有较高的地基承载力。CFG 桩复合地基既可充分发挥刚性桩桩体材料的承载潜力,又可充分利用天然地基的承载力,同时设计时不需配筋,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,因此具有较高的经济和社会效益^[1-3]。CFG 桩工作系统在黏性土、粉土、砂土等地基中具有显著优势,目前该技术已被列入国家行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012),在工程中广泛推广

使用。

1 CFG 桩复合地基工作性状

CFG 桩灌注成桩后水泥会与桩体中的其它成分发生化学反应,生成铝酸钙水化物、硅酸钙水化物等不溶于水的稳定结晶化合物,这样就保证形成了具有较高强度的 CFG 刚性桩体。同时桩体顶部铺设褥垫层,垫层材料受静荷载作用发生压密,桩间土受荷载作用产生变形,CFG 桩垫层的作用是协调桩、桩间土变形,调整桩土应力比,发挥桩间土承载力,防止桩顶应力过大集中^[4-6]。

1.1 CFG 桩荷载传递机制

在上部荷载作用下,桩与桩间土受到应力作用而开始发生相应变形。由于桩体压缩变形模量远大

于桩间土体的压缩变形模量,桩间土体发生压缩变形大于桩体的压缩变形,从而使得桩顶平面处桩间土体位移大于桩体位移,在这一过程中桩体顶部将产生应力集中效应^[7-8]。

随着荷载的增加,桩体应力集中效应更加明显。由于褥垫层的设置,桩开始向上部垫层刺入,以协调桩、土间因差异沉降而引起的应力不协调,在桩顶以下一定深度处出现等沉面。等沉面以上桩间土相对桩向下移动,对桩产生负摩阻力,方向向下;而等沉面以下桩受正摩阻力,方向向上^[9-10]。当荷载达到一定程度后,桩端发挥阻力。此后,桩体中的应力增量全部由桩端土承担,桩底产生向下刺入。桩顶与桩端附近土体进入塑性状态。CFG桩荷载传递机制及受力性状请见图1所示。

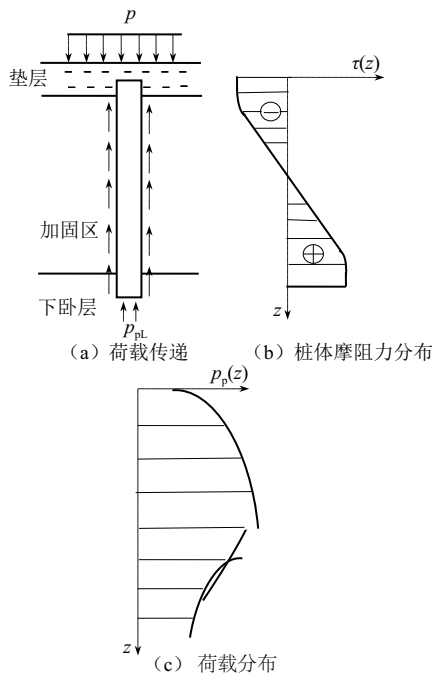


图1 CFG桩复合地基工作性能分析

1.2 承载力分析计算

CFG桩复合地基中单桩竖向承载力直接影响和决定着复合地基的承载力。单桩竖向承载力特征值的取值可通过现场载荷试验确定,初步设计时按式(1)进行估算

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \quad (1)$$

式中: u_p 为桩的周长,m; n 为桩长范围内所划分的土层数; q_{si} 为第*i*层土的侧阻力特征值,kPa; l_{pi} 为第*i*层土的厚度,m; q_p 为端阻力特征值,kPa。

《建筑地基处理技术规范》^[11](JGJ 79—2012)对CFG桩复合地基承载力的计算作出明确规定,复

合地基承载力按式(2)进行计算

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (2)$$

式中: f_{spk} 为桩土复合地基的承载力特征值,kPa; λ 为单桩承载力发挥系数,可取0.8~0.9; m 为复合地基的面积置换率; R_a 为刚性桩单桩承载力特征值,kN; A_p 为桩的截面面积,m²; β 为桩间土承载力折减系数,可取 $\beta=0.9\sim 1.0$; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值,kPa。

随着CFG桩复合地基技术的推广应用,有学者指出现行规范承载力计算方法的不足,发现规范公式与工程实测结果不符。张钦喜^[12]经过改进提出新的计算方法,见公式(3)。

$$f_a = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)[f_{ak} + \eta_b \gamma(b-3) + \eta_d \gamma_m(d-0.5)] \quad (3)$$

式中: f_a 为修正后的复合地基承载力特征值,kPa; f_{ak} 为天然地基承载力特征值,kPa; η_b 、 η_d 分别为基础宽度和深度的修正系数。

1.3 复合地基沉降计算

CFG桩复合地基的沉降量由两部分组成,即加固区沉降量与下卧层沉降量。《建筑地基处理技术规范》规定CFG桩复合地基采用分层总和法进行沉降计算,复合土层的分层与天然地基相同,各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的 ζ 倍, ζ 等于加固后复合地基承载力 f_{spk} 与基础底面下天然地基承载力 f_{ak} 的比值^[13-14]。根据这一规定CFG桩复合地基的最终沉降量为

$$s = s_1 + s_2 = \psi \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{\zeta_i E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \quad (4)$$

式中: s_1 为加固区沉降量; s_2 为下卧层沉降量; p_0 为对应于荷载效应准永久组合时的基础底面处的附加压力,kPa; E_{si} 为基础底面下第*i*层土的压缩模量,MPa; n_1 为加固区土分层数; n_2 为沉降计算深度范围内土层总的分层数; z_i 、 z_{i-1} 分别为基础底面至第*i*和*i-1*层土底面的距离,m; α_i 、 α_{i-1} 分别为基础底面至第*i*和*i-1*层土底面范围内平均附加应力系数; ψ 为沉降计算修正系数。

赵明华^[15]针对CFG桩复合地基中桩、土、垫层相互作用特点,对规范沉降计算方法进行了改进。其沉降计算思路是基于荷载传递法,通过简化桩土单元体竖向相对位移分布模式,引入弹塑性荷载传

递模型,建立起沉降计算的基本微分方程,进而提出一种新的能考虑桩-土-垫层体系共同作用的复合地基沉降计算方法,见式(5)。

$$s = s_1 + s_2 = \frac{2\tau_m L}{k(z_2 - z_1)} + \sum_{i=1}^n \frac{p'_{sl}}{E_{si}}(z_i \sigma_i - z_{i-1} \sigma_{i-1}) \quad (5)$$

式中: s_1 为加固区沉降量, mm; s_2 为下卧层沉降量, mm; τ_m 为桩侧摩擦阻力的极限值, kPa; L 为桩长, m; k 为摩擦阻力的侧阻传递系数; z_1 为负摩擦阻力塑性区极限深度, m; z_2 为正摩擦阻力弹性区极限深度, m; p'_{sl} 为桩底端阻力及桩底端平面处土体应力之和, $p'_{sl} = m p_{pL} + (1-m) p_{sL}$; m 为面积置换率; p_{pL} 和 p_{sL} 分别为桩底端应力和桩底平面处桩间土体应力。

张钦喜^[16]考虑桩侧摩擦阻力及桩端土的性质,对规范方法适当改进,提出了一种新的实用简化计算方法,见公式(6)。

$$s = \psi_1 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{\sigma_s}{E_{si}}(z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \psi_2 \sum_{i=1}^{n_3} \frac{\sigma_d}{E_{si}}(z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \quad (6)$$

式中: ψ_1 、 ψ_2 分别为加固区和下卧层的沉降计算修正系数; σ_s 、 σ_d 分别为桩间土表面土压力和桩端处的附加应力, kPa。

2 工程应用及相关研究

CFG 桩复合地基技术在建筑地基基础工程、高速公路和高速铁路等诸多工程领域均有广泛应用,在不同的工程中其设计计算思路、方法及工程性状有较大区别。针对不同工程的工程特点,以下对最新研究成果进行分类述评。

2.1 建筑地基基础工程

丁小军^[17]针对兰州某饱和黄土场地开展复合地基承载力与变形特性试验研究,该场地所建工程为大型油罐群。试验结果表明,经处理后的 CFG 桩复合地基具有较高的承载力,承载力特征值可达 275 kPa,是原天然地基承载力的 4.6 倍;油罐环墙基础最大沉降量仅为 30 mm,基本符合设计要求;任意直径方向的沉降差最大值为 16.0 mm,而沿弧长方向最大非平面倾斜值为 0.00246,均控制在合理范围;充水测试试验表明,桩土应力比随荷载的增加而逐渐增大,在最大试验荷载下达到 12.6,油罐底部反力沿半径方向呈“V”型分布。研究成果为我国西北地区推广应用 CFG 桩复合地基技术提供了科学指导。

刘熙媛^[18]对某部分开挖基坑内 CFG 桩的施工过程进行跟踪观测,发现松散饱和和粉土、粉细砂层,CFG 桩成孔时在剪切荷载作用下土体液化,导致刚打完处于流动状态桩的桩周土丧失对桩的侧向约束能力,桩体侧向渗出、桩顶下沉并产生窜孔,液化区域连成片甚至导致基坑失稳或周边建筑物倾斜开裂、道路破坏。

陈东佐^[19]通过现场试验研究发现,CFG 桩土复合地基的承载力显著提高,约为天然地基的 2~3 倍;其中面积置换率 m 是桩土复合地基的重要设置参数,复合地基与天然地基的变形比与面积置换率 m 紧密相关, m 增大则变形比减小;试验还得到了桩体的应力分布规律,发现桩体应力沿桩长向下先增加而后减小。

周宸^[20]通过 CFG 足尺桩的现场试验,测定了桩身轴力的分布以及桩侧摩擦阻力等参数,对复合地基沉降、桩身荷载的分担、桩身轴力的分布以及侧摩擦阻力进行了分析,揭示了 CFG 桩的受力特征。研究表明,按规范公式计算复合地基承载力特征值不大于现场载荷试验值,桩土应力比跟褥垫层材料的粒径、压缩模量成正比;CFG 桩复合地基存在负摩擦阻力,与施工条件有较大关系。

2.2 路基工程

与建筑地基基础工程工作性状相似,路基工程中采用 CFG 桩复合地基技术也能显著改善地基本性能,提高地基承载力。徐毅^[21]通过埋设 TYJ-25 型振弦式土压力盒,对佛山某高等级公路 CFG 桩复合地基进行桩土应力和沉降观测。研究发现,桩土沉降差随荷载的增加而快速增加,其变化趋势是先由小变大而后再变小,最后沉降差稳定在特定值。试验结果表明,桩体和桩间土具有较好的变形协调性,桩土承载作用能够得到同步发挥;应力测试结果显示,桩土差异沉降使得桩体顶部出现土拱效应,产生较明显的应力集中,而土工格栅则能较好地调整桩土应力的分布,改善桩土应力比和应力差;研究还发现,疏桩形式有利于发掘桩间土的承载潜力。

薛新华^[22]通过室内模型试验研究发现,CFG 桩成桩过程中由于振捣挤压作用,桩体普遍存在扩径现象,桩径由 30 mm 扩孔成 50~60 mm,外形如不规则“葫芦串”,浅部尤其显著;桩土复合地基中设置的褥垫层能有效的控制桩土应力比,并缓解桩顶的应力集中现象,因此适当增加褥垫层的厚度,可以改善并优化复合地基的工作性能;但研

究表明,褥垫层不宜设置过厚,褥垫层厚度超过 30 cm 后桩体承载作用得不到充分发挥,合理褥垫层厚度应设置为 20~30 cm;桩土应力比与桩长、桩间距等因素密切相关,桩长增加则桩分担的荷载增加,桩土应力比增加;桩间距增加,桩土应力比也显著增加。研究还发现,桩间距对复合地基的工后沉降有较大影响,复合地基设计时应充分考虑桩长、桩间距等因素所起的作用,以保证承载力和沉降等均满足规范要求。

马明正^[23]以京沪高速铁路京徐试验段试验工点的 CFG 桩网和桩筏复合地基为例,通过比较和分析铁路地规法、铁路桥规法和 M-B 联合 $e\text{-lg}p$ 法 3 种解析方法以及数值模拟法的计算结果,研究发现:铁路地规法和 M-B 联合 $e\text{-lg}p$ 法对加固区的沉降计算结果均比工程实测结果偏大,而下卧层的沉降计算结果与工程实测结果较为吻合;他建议指出采用 M-B 联合 $e\text{-lg}p$ 法计算时,对于浅部土层的附加应力,应按照桩间土顶面的应力线性减至零进行计算,之下土层的附加应力应按照 Mindlin 方法进行计算;铁路桥规法由于忽略了加固区的变形,导致计算的下卧层应力偏大,因此沉降的计算结果偏差最大,该方法不适合较低刚度 CFG 桩复合地基的沉降计算;而用数值模拟方法计算的加固区和下卧层沉降结果均较接近实际。

2.3 数值模拟

计算机数值模拟技术具有可信度高、计算耗时少、成本低及可重复性等优势,在复合地基工程设计中也有广泛应用。程宏生^[24]采用数值模拟软件 ANSYS 对 CFG 桩复合地基的工作性状进行了分析,结果发现 CFG 桩的应力及位移分布整体呈现摩擦桩的特征,承载力和沉降计算可参考类似摩擦桩的工程经验;桩侧摩阻力全部向桩间土扩散传递,与附加应力叠加并导致桩间土体显著下沉;而桩土应力比则随着路堤荷载的增加先增加而后减小,并最终趋于稳定值。数值试验研究所揭示的桩、土应力转移和变化规律对工程设计施工具有较高参考价值。

蔡冬军^[25]运用 PLAXIS 软件对某公路 CFG 桩复合地基进行数值模拟,分析研究桩长、桩间距及褥垫层厚度等参数的变化对复合地基工作性状的影响,结果表明复合地基沉降量受临界桩长的影响比较显著,计算显示临界桩长约为 11 m,超过临界桩

长后复合地基水平位移、沉降量均无明显变化;桩间距对路基表面竖直位移影响较小,而对路基表面水平位移影响较大,工程设计中应尽量采用较小的桩间距,建议合理桩间距为 1.4 m;褥垫层厚度从 0.4 → 0.6 → 0.8 m 变化过程中,路基表面水平位移随褥垫层厚度的增大而减小,但路基表面竖直位移变化量并不明显。综合考虑施工技术及施工成本等因素,建议合理褥垫层厚度设置为 0.4 m。

3 结语

CFG 桩复合地基作为一种有效的地基处理手段,20 世纪 80 年代后在建筑地基基础、路基工程等领域应用日益广泛,取得了良好的社会效益和经济效益。目前该技术还存在理论研究滞后于工程需要的诸多不足,如深厚软黏土地有效桩长的选择及高烈度区复合地基的抗震性能等方面亟待加强研究。本文对 CFG 桩复合地基的工作性状及工程应用新成果进行分析述评,希望能为该技术的发展、完善和成熟尽力,并为广大工程技术人员和科研人员提供有益参考和指导。

参考文献

- [1] Liang F, Chen L, Han J. Integral equation method for analysis of piled rafts with dissimilar piles under vertical loading [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(3): 419-426.
- [2] El-Garhy B, Galil A A, Youssef A F, et al. Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 389-399.
- [3] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 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.
- [5] Kim K N, Lee S H, Kim K S. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(4): 235-253.
- [6] Chaudhary M A. FEM modeling of a large pile draft for settlement control in weak rock [J]. Engineering Structures, 2007, 28(11): 2901-2907.
- [7] 周爱军, 栗冰. CFG 桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1803-1808.

(下转封 3 页)