

文章编号: 1674—8247(2021)04—0073—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.015

基于土拱效应的 CFG 桩复合地基承载力设计方法

姜 雷

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:现行规范 CFG 桩复合地基承载力设计主要基于半经验半理论的方法,设计者对经验系数取值随机性较大,导致不同设计者的设计结果可能偏差较大。在实际工程中,设计者对经验系数的取值也往往偏于保守,从而导致设计结果偏于保守。本文基于土拱效应理论,探讨了全新的 CFG 复合地基承载力设计方法,并给出了算例。基于土拱效应的设计方法,对桩间土承载力和单桩竖向承载力分别进行验算并作为判定复合地基承载力是否满足设计要求的依据,使其更符合 CFG 桩与土相互作用实际规律,较好的解决了因经验系数取值的随机性可能导致设计结果偏差较大的问题。本文研究成果可为铁路路基 CFG 桩复合地基承载力设计方法的改进和完善提供一定的借鉴。

关键词:CFG 桩; 复合地基; 桩间土承载力; 单桩竖向承载力; 土拱效应; 设计方法

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A

Design Method for Bearing Capacity of CFG Pile Composite Foundation based on Soil Arching Effect

JIANG Lei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The design of bearing CFG pile composite foundation in current code is mainly based on a semi-empirical and semi-theoretical method, for which the designers take the values of empirical coefficients randomly, so that different designers would obtain different design results. In practice, the values of empirical coefficients chosen by the designers are often conservative, which leads to conservative design results. Based on the theory of soil arching effect, this paper discusses a new design method for bearing capacity of CFG composite foundation with examples. For the purpose of the design method based on the soil arching effect, checking calculations are made separately for the bearing capacity of the soil between piles and the vertical bearing capacity of a single pile, and the results are used as the basis to determine whether the bearing capacity of composite foundation meets the design requirements, which makes it more in line with the actual law of interaction between CFG pile and soil, and better solves the problem that the design results may deviate greatly due to the randomness of empirical coefficient. The results of this paper may provide some reference for improving and perfecting the design method for bearing capacity of CFG pile composite foundation of railway earthworks.

Key words: CFG pile; composite foundation; bearing capacity of soil between piles; vertical bearing capacity of the single pile; soil arching effect; design method

CFG 桩复合地基处理技术在铁路路基工程中应用广泛^[1],其具有刚度大、承载力高、沉降控制优良、经济合理、适用范围广等特点,CFG 桩复合地基承载力设计是工程不可缺少的环节之一。根据现行规

收稿日期:2020-07-15

作者简介:姜雷(1975-),男,工程师。

引文格式:姜雷. 基于土拱效应的 CFG 桩复合地基承载力设计方法[J]. 高速铁路技术,2021,12(4):73-76.

JIANG Lei. Design Method for Bearing Capacity of CFG Pile Composite Foundation based on Soil Arching Effect[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4):73-76.

范^[2],CFG 桩复合地基承载力计算主要基于半经验半理论的公式,公式内包括了经验系数,如桩间土承载力折减系数、地基承载力计算修正系数等,这些系数均不是定值,而是给出了一定的范围,设计者依据经验取值。不同设计者对经验系数取值的随机性较大,导致不同设计者的设计结果也有较大偏差。在实际工程中,设计者对经验系数的取值往往偏于保守,从而导致设计结果偏于保守。

根据土力学的基本定义,地基承载力是地基承担荷载的能力,其大小除与桩及地基土的本身性质有关外,还与桩顶荷载的边界条件有关。如 CFG 桩顶设置桩帽时,外部荷载通过桩帽传递至桩基,外部荷载主要由桩基承载,桩间土的承载作用则明显减弱,国内的相关研究成果也证实了这一点^[3]。

根据现有的研究成果,桩基与桩间土共同承担上部荷载,只要明确其分摊比例,则可分别对桩基和桩间土进行承载力验算。为此,本文基于桩间土拱效应^[4-5],探讨了全新的 CFG 复合地基承载力设计方法:首先计算出桩基和桩间土分别承担的荷载,然后对桩间土承载力和单桩竖向承载力分别进行验算,作为判定复合地基承载力是否满足设计要求的依据。以期对铁路路基 CFG 桩复合地基承载力设计方法的改进和完善提供一定的借鉴。

1 现行规范方法

铁路路基 CFG 桩复合地基设计目前主要根据 TB 10106-2010《铁路工程地基处理技术规程》。采用 CFG 桩复合地基处理后的地基,其承载力应满足下式要求:

$$P_k \leq k\sigma_{sp} \quad (1)$$

式中: P_k ——路基底面处压力值(kPa);

σ_{sp} ——复合地基承载力(kPa);

k ——地基承载力计算修正系数。对于挡土墙、涵洞等刚性基础地基,其值取 1;对于路堤、场坪等柔性基础地基,其值取 1.2 ~ 1.5。

路堤、场坪地基承载力计算修正系数的取值范围为 1.2 ~ 1.5,取最大值的地基承载计算结果比取最小值的地基承载力计算结果大 25%,承载力计算结果的变化幅度较大,对设计结果影响较大,实际工程中,设计者往往偏向于取最大值进行设计,从而导致设计结果偏于保守,造成工程浪费较大。

采用 CFG 桩复合地基处理后的地基,其复合地基

承载力按 TB 10106-2010《铁路工程地基处理技术规程》第 14.2.6 条进行设计,CFG 桩复合地基承载力可按下式计算:

$$\sigma_{sp} = m \frac{[P]}{A_p} + \beta(1 - m)\sigma_s \quad (2)$$

式中: $[P]$ ——单桩竖向容许承载力(kN);

σ_{sp} ——复合地基承载力(kPa);

m ——面积置换率;

A_p ——桩身截面积(m^2);

β ——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;

σ_s ——处理后桩间土容许承载力(kPa),宜按当地经验取值,如无经验时,可取天然地基容许承载力。

此处,桩间土承载力折减系数,取值范围为 0.75 ~ 0.95,取最大值计算的桩间土承载力较取最小值计算的桩间土承载力大约 26.7%,桩间土承载力计算结果的变化幅度较大,对设计结果影响较大,实际工程中,设计者往往偏向于取最小值进行设计,从而导致桩基设计偏于保守,造成工程的浪费。

使用桩间土承载力折减系数的目的是为了修正桩间土在复合地基承载力中发挥的作用,避免桩间土分担过大,桩基分担过小,从而桩基承载力考虑不足。由此可见,复合地基承载力验算仍然无法回避桩间土和桩基荷载分担比例问题,只是通过对桩间土承载力折减来予以解决,但该处理方法易导致设计过于保守。

综上所述,规范对 CFG 桩复合地基承载力的验算分为两步,第一步是求解复合地基承载力,第二步是验算复合地基承载力。求解复合地基承载力时,桩间土承载力折减系数取值范围为 0.75 ~ 0.95,此时,若 CFG 桩桩顶设置桩帽,则计算公式的适用性有待商榷。验算复合地基承载力时,对于路堤、场坪等柔性基础地基,其地基承载力计算修正系数的取值范围为 1.2 ~ 1.5。无论是求解复合地基承载力还是验算复合地基承载力均为经验系数,经验系数取值的高低随机性较大,两个经验系数的叠加效应,往往会导致设计结果偏差更大。

2 基于土拱效应的设计方法

2.1 土拱效应

土拱效应是广泛存在的自然现象^[6]。CFG 桩桩身强度一般不低于 C15 混凝土强度,是典型的刚性

桩。在基础竖向填土荷载作用下,刚性桩复合地基桩与桩间土都发生变形,由于桩的变形与桩间土的变形不一致,桩顶填土和桩间填土发生相对位移,在桩间形成土拱。根据结构力学分析,土拱的合理拱轴线一般视为抛物线形或三角形。

为便于计算,本文假定土拱为三角形,如图 1 所示。由土拱效应理论及力学原理可知,图 1 中土拱范围内的填土土压力由桩间土承担,土拱范围外的填土土压力由桩承担。图 1 中 q 为土拱上部填土荷载强度, h 为土拱高度。

根据土拱效应假定模型,可将上部填土荷载分为两部分,分别作用在桩间土和桩基上;两部分荷载均为土压力,可根据填土体积和容重计算求得,以此解决上部荷载分担比例问题。

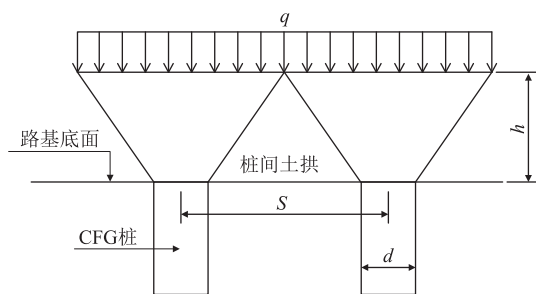


图 1 CFG 桩土拱效应示意图

由图 1 可知,土拱高度 h 是较为关键的指标,土拱高度不仅与桩间距有关,还与路基填料性质、路堤高度、桩径等多种因素有关^[7-8]。其受摩擦角、桩径大小和桩间距影响较大。在实际工程中,土拱高度大多集中在 1.02 ~ 1.42 倍桩净间距范围内。GB/T 50783 - 2012《复合地基技术规范》^[9]给出了采用正方形布桩时土拱高度的计算公式,采用三角形布桩时,可参照正方形布桩按照几何图形的关系折减估算。根据假设条件,采用正方形布桩时,土拱为正四棱锥,采用正三角形布桩时,土拱为正三棱锥,上述锥体的侧面倾角相等。根据上述关系计算出折减系数为 0.577,既而桩间距和桩径相同时,正方形布桩的土拱高度乘以 0.577 折减系数,即为正三角形布桩的土拱高度。

2.2 设计方法

根据土拱效应,填土荷载被划分为两部分,一部分为桩间土拱内填土荷载,作用在桩间土上;一部分为桩间土拱外填土荷载,作用在桩上。此时,CFG 桩复合地基承载力验算可分为两步走:第一步对桩间土地基承载力进行验算,第二步对单桩竖向承载力进行验算。当两者均满足设计要求时,认为 CFG 桩复合地基承载

力满足设计要求。因此,CFG 桩复合地基承载力设计应满足:

$$\sigma_g \leq \sigma_s \quad (3)$$

$$P_z \leq U \sum_{i=1}^n q_i l_i + A_p q_p \quad (4)$$

式中: σ_g ——路基底面处桩间土压力值(kPa);

P_z ——单桩桩顶竖向荷载(kN);

U ——桩身截面周长(m);

q_i ——桩周第 i 层地层的容许侧阻力(kPa);

l_i ——桩周第 i 层土的厚度(m);

q_p ——桩底地层容许端阻力(kPa)。

根据土拱效应简化模型,将土拱视为三角形,土拱范围内填土对桩间土的土压力也为三角形分布,最小土压力发生在与桩相交位置,强度为 0,最大土压力发生在土拱中心位置,其强度为土拱填土容重与土拱高度的乘积,则路基底面处桩间最大土压力值可按下式计算求得:

$$\sigma_g = \gamma h \quad (5)$$

式中: γ ——填土荷载容重(kN/m³);

h ——土拱高度(m),正方形布桩时, $h = 0.707(s - d)/\tan \varphi$,三角形布桩时, $h = 0.61(s - d)/\tan \varphi$;

s ——桩间距(m);

d ——桩径(m),桩顶设置桩帽时,取桩帽边长;

φ ——桩顶填土摩擦角,黏土取综合内摩擦角。

填土荷载作用在桩顶的竖向荷载可采用如下思路求解:首先假设桩顶填土荷载全部作用在桩上,求解出桩顶竖向荷载,然后减去桩间土承担的荷载,即为考虑土拱作用的桩顶实际竖向荷载。桩间土承担荷载可采用平均土压力与桩间土面积的乘积求得,假设土压力按三角形分布,则平均土压力为最大土压力的一半。

根据上述思路,可推导出单桩桩顶竖向荷载计算公式:

$$P_z = \gamma H A - \sigma_g (A - A_p)/2 \quad (6)$$

式中: A ——单根桩上荷载作用面积,正方形布桩为 $1.0 s^2$,三角形布桩为 $0.865 s^2$;

H ——填土高度(m)。

考虑列车荷载时,桩顶竖向荷载尚应计入列车荷载作用产生的附加应力,附加应力计算可参照相关文献或专著的计算方法,附加应力局部范围内简化为均布荷载,并以最大附加应力值来控制设计,此处不再赘述。

本文采用式(2)和式(3)进行 CFG 桩地基承载力设计,将桩间土承载力和单桩竖向承载力分别进行验

算,与规范采用式(1)对复合地基承载力进行验算相比,该方法思路更清晰,更符合 CFG 桩与土相互作用的实际规律,能较好地解决因经验系数取值随机性大而导致设计结果偏差较大的问题。需要注意的一点是,该方法的前提是 CFG 桩形成了完整的土拱。因此,该方法的适用条件为填土高度大于土拱计算高度。

3 算例

某填方路基工点,断面示意如图 2 所示。路基基底土层参数及填土参数如下:<9-2>:软粉质黏土,容许侧阻力 7.2 kPa,土层厚度 5.3 m,修正后的地基承载力 60 kPa;<2-2>:含黏土细沙,容许侧阻力 30 kPa,修正后的容许端阻力 500 kPa;填土高度为 5 m,填土容重 20 kN/m³,摩擦角 35°。路基基底采用 CFG 桩进行加固,桩直径 0.6 m,桩间距 1.8 m,正方形布置,桩顶设置边长 1 m 的矩形桩帽。采用本文提出的设计方法验算填土荷载作用下,复合地基的承载力是否满足设计要求。

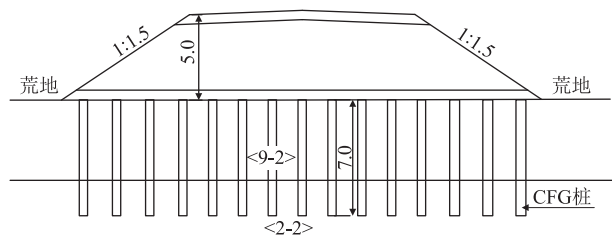


图 2 算例断面示意图(m)

(1)本文方法:

①验算桩间土承载力

根据式(5)求解桩间土承载力:

$$\sigma_g = \gamma h = 20 \times 1.21 = 24.2 \text{ kPa} < 60 \text{ kPa}$$

桩间土计算最大压应力为 24.2 kPa,小于桩间土承载力 60 kPa,承载力满足设计要求。

②验算单桩竖向承载力

首先,根据式(4)求解单桩竖向承载力:

$$[P] = U \sum_{i=1}^n q_i l_i + A_p q_p = 1.884 \times (5.3 \times 7.2 + 1.7 \times 30) + 0.2826 \times 500 = 309.3 \text{ kN}$$

然后,根据式(6)求解作用在桩顶的单桩竖向力:

$$P_z = \gamma H A - \frac{\sigma_g (A - A_p)}{2} = 20 \times 5 \times 1.8^2 - 12.1 \times (1.8^2 - 0.2826) = 288.2 \text{ kN}$$

最后,验算单桩竖向承载力:

$$P_z = 288.2 \text{ kN} \leq [P] = 309.3 \text{ kN}$$

作用在桩顶的单桩竖向力为 288.2 kN,小于单桩

竖向承载力 309.3 kN,满足设计要求。

可见,在填土荷载作用下,该工点 CFG 桩桩间土承载力和单桩竖向承载力均满足设计要求,因此该工点 CFG 桩的复合地基承载力满足设计要求。

(2)规范方法:

①求复合地基承载力

$$\begin{aligned} \sigma_{sp} &= m \frac{[P]}{A_p} + \beta(1-m)\sigma_s = \\ &0.0606 \times \frac{309.3}{0.1963} + 0.75(0.95) \times 0.9394 \times 60 = \\ &95.48 + 42.27(53.55) = 137.75(149.03) \text{ kPa} \end{aligned}$$

②验算复合地基承载力

$$\begin{aligned} P_k &= 100 \text{ kPa} \leq k\sigma_{sp} = \\ &1.2(1.5) \times 137.75(149.03) = \\ &165.3(223.6) \text{ kPa} \end{aligned}$$

可见,在填土荷载作用下,该工点 CFG 桩复合地基承载力满足设计要求。

综上可知,采用规范方法求解的该工点复合地基承载力的最小值为 165.3 kPa,最大值为 223.6 kPa。最大值比最小值大了约 35%。

4 结束语

对于铁路路基 CFG 桩复合地基承载力,现行规范主要基于半经验半理论的方法进行设计,设计者对经验系数取值随机性较大,导致设计结果偏差较大。根据土拱效应原理,桩顶填土在桩间形成土拱,土拱范围内的填土土压力由桩间土承担,土拱范围外的填土土压力由桩承担。本文据此探讨了全新的设计方法,对桩间土承载力和单桩竖向承载力分别进行验算,作为判定复合地基承载力是否满足设计要求的依据。

基于土拱效应的承载力设计方法更符合 CFG 桩与土相互作用的实际规律,较好地解决了因经验系数取值随机性大而导致设计结果偏差较大的问题。

参考文献:

- [1] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册—路基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
The First Design Institute of Railway Ministry. Technical Manual of Railway Engineering Design[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.
- [2] TB 10106—2010 铁路工程地基处理技术规程[S].
TB 10106—2010 Technical Code for Ground Treatment of Railway Engineering[S].

(下转第 102 页)

Engineering, 1996, 18(1): 46 – 53.

[2] 时亚昕, 王明年. 隧道仰拱组合结构的现场试验研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(1): 70 – 74.

HI Yaxin, WANG Mingnian. Field Test Study on Composite Construction of Tunnel Invert [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(1): 70 – 74.

[3] 钟正强, 彭振斌, 彭文祥. 基于 Hoek-Brown 准则的层状岩体隧道开挖响应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1689 – 1694.

ZHONG Zhengqiang, PENG Zhenbin, PENG Wenxiang. Excavation Response of Tunnel in Stratified Rock Mass Based on Hoek-Brown Criterion [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1689 – 1694.

[4] 王立川, 肖小文, 林辉. 某铁路隧道底部结构隆起病害成因分析及治理对策探讨[J]. 隧道建设, 2014, 34(9): 823 – 836.

WANG Lichuan, XIAO Xiaowen, LIN Hui. Analysis on Causes for and Renovation of Floor Structure of a High-speed Railway Tunnel Located in Slightly – Dipping Interbedded Rock Mass [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(9): 823 – 836.

[5] 李奎, 刘凯. 某客专隧道洞口段道床隆起病害分析与整治[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(11): 1910 – 1918.

LI Kui, LIU Kai. Analysis of Heaving Disease of Track Bed in Entrance Section of a Passenger-Dedicated Railway Tunnel and Its Countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(11): 1910 – 1918.

[6] 汪洋, 唐雄俊, 谭显坤, 等. 云岭隧道底鼓机理分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2530 – 2534.

WANG Yang, TANG Xiongjun, TAN Xiankun, et al. Mechanism Analysis of Floor Heave in Yunling Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2530 – 2534.

[7] 李德武, 高峰, 韩文峰. 列车振动下隧道基底合理结构型式的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2292 – 2297.

LI Dewu, GAO Feng, HAN Wenfeng. Study on Rational Structure of Railway Tunnel Bed under Dynamic Vibration Load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2292 – 2297.

[8] 施成华, 雷明锋, 彭立敏, 等. 隧道底部结构受力与变形的现场测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 879 – 884.

SHI Chenghua, LEI Mingfeng, PENG Limin, et al. In – Situ Monitoring and Analysis of Mechanical Characteristics and Deformation of Bottom Structure of Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 879 – 884.



(上接第 76 页)

[3] 曾俊铖, 张继文, 童小东, 等. 高速铁路 CFG 桩复合地基应力特性试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5): 91 – 96.

ZENG Juncheng, ZHANG Jiwen, TONG Xiaodong, et al. In-Situ Test of Stress Characteristics of CFG Pile Composite Foundation of High – Speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(5): 91 – 96.

[4] 陈昌富, 米汪, 赵湘龙. 考虑高路堤土拱效应层状地基中带帽刚性桩复合地基的承载特性[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 1 – 9.

CHEN Changfu, MI Wang, ZHAO Xianglong. Bearing Characteristic of Composite Foundation Reinforced by Rigid Pile with Cap in Layered Ground Considering Soil Arching Effect of High Embankment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 1 – 9.

[5] 武崇福, 郭维超. 刚性桩复合地基桩间土拱效应分析及桩土应力比计算[J]. 施工技术, 2015, 44(1): 67 – 72.

WU Chongfu, GUO Weichao. Analysis of the Soil Arching Effect between Piles of Rigid Pile Foundation and Calculation of the Pile-Soil Stress Ratio [J]. Construction Technology, 2015, 44(1): 67 – 72.

[6] 徐超, 张兴亚, 韩杰, 等. 加载条件对土拱效应影响的 Trapdoor 模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 726 – 732.

XU Chao, ZHANG Xingya, HAN Jie, et al. Trapdoor Model Tests on Impact of Loading Conditions on Soil Arching Effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 726 – 732.

[7] 强小俊, 赵有明, 张长生. 桩承地基土拱高度计算方法的研究及分析[J]. 铁道建筑, 2012, 52(5): 90 – 94.

QIANG Xiaojun, ZHAO Youming, ZHANG Changsheng. Study and Analysis of Calculation Method of Arching Height for Pile Foundation [J]. Railway Engineering, 2012, 52(5): 90 – 94.

[8] 蒋楚生, 李庆海, 梁瑶, 等. 桩间复合结构土拱效应试验研究与应用[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(6): 17 – 20.

JIANG Chusheng, LI Qinghai, LIANG Yao, et al. Experimental Study and Its Application on Soil Arch Effect of Combined Structure between Piles [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(6): 17 – 20.

[9] GB/T 50783 – 2012 复合地基技术规范[S].

GB/T 50783 – 2012 Technical Code for Composite Foundation [S].