

# CFG桩与PHC管桩组成的刚性桩复合地基联合承载机理与协调变形研究

吕思豪<sup>1</sup>, 李明超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南省第五地质勘察院有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月11日; 发布日期: 2025年1月23日

## 摘要

刚性桩复合地基凭借其工后沉降小、施工周期短、整体稳定性强、社会效益高等优势, 逐渐得到广泛应用。为研究刚性桩复合地基的承载特性与变形规律, 以某市某建筑地基处理工程作为实例, 通过Midas/GTS/NX建立了PHC管桩与CFG桩复合地基有限元分析模型, 研究了此刚性桩复合地基的承载力与变形特性, 对于两种桩分别选取了合适的桩端持力层以及桩参数。结果表明, 采用PHC管桩与CFG桩进行地基处理能很好的发挥复合地基承载力, 且两种桩变形均在合理范围之内, 沉降较为均匀。随荷载增加桩土应力比发生变化, 桩承担荷载逐步增大。选择第8、9层土层分别作为PHC管桩与CFG桩的桩端持力层是合理的。

## 关键词

PHC管桩, CFG桩, 复合地基, 数值模拟

# Research on Joint Bearing Mechanism and Coordinated Deformation of Rigid Pile Composite Foundation Composed of CFG Pile and PHC Pipe Pile

Sihao Lv<sup>1</sup>, Mingchao Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Henan Fifth Geological Survey Institute Ltd., Zhengzhou Henan

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 11<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2025

文章引用: 吕思豪, 李明超. CFG 桩与 PHC 管桩组成的刚性桩复合地基联合承载机理与协调变形研究[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 101-110. DOI: 10.12677/hjce.2025.141013

## Abstract

Rigid pile composite foundations have been widely used by virtue of their advantages such as small post-construction settlement, short construction period, strong overall stability and high social and economic benefits. In order to study the bearing characteristics and deformation law of rigid pile composite foundation, a building foundation treatment project in Kaifeng city is taken as an example, and a finite element analysis model of PHC pipe pile and CFG pile composite foundation is established by Midas/GTS/NX, and the bearing capacity and deformation characteristics of this rigid pile composite foundation are studied, and suitable pile end holding layer and pile parameters are selected for the two kinds of piles respectively. The results show that the foundation treatment with PHC pipe pile and CFG pile can play a good role in the composite foundation bearing capacity, and the deformation of both piles is within a reasonable range, and the settlement is more uniform. The pile-soil stress ratio changes with the increase of load, and the pile bearing load increases gradually. It is reasonable to choose the 8th and 9th soil layers as the pile end bearing layer of PHC pipe piles and CFG piles respectively.

## Keywords

PHC Pipe Pile, CFG Pile, Composite Foundation, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着工程建设的飞速发展,地基处理手段也日趋多样化,复合地基由于其充分利用桩间土和桩共同作用的特有优势和相对低廉的工程造价得到了越来越广泛地应用。组合型复合地基有的称为多元复合型地基,有的称为多桩型复合地基,它是指竖向增强体由两种或两种以上的桩体组成。组合型复合地基能充分发挥各层土的承载能力,满足工程需要,具有显著的经济效益。地基基础作为建筑物的重要组成部分,其质量关系到整栋建筑物的结构安全,和人们的生命财产安全息息相关,基础的设计与施工质量的好坏直接影响到建筑物的经济性、合理性和安全性。

## 2. 基本原理

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强,或被置换,或在天然地基中设置加筋材料加固区是由天然地基和增强体两部分组成的人工地基,复合地基的本质是桩和桩间土(增强体与地基土)共同直接承担荷载[1]-[3]。其加固主要目的:设置增强体分担天然地基承担的荷载,将基础底面部分附加荷载通过桩体传至桩端,再传给桩端以下压缩量较小、承载力较高的地基岩土层,减少天然地基承担的附加荷载,其沉降量也相应减少[4][5],从而达到减少或有效控制地基基础沉降量。

复合地基设计中,基础与桩和桩间土之间设置一定厚度散体粒状材料组成的褥垫层,是复合地基的一个核心技术[6]。基础下是否设置褥垫层,对复合地基受力影响很大。若不设置褥垫层,复合地基承载特性与桩基础相似,桩间土承载能力难以发挥,不能成为复合地基。基础下设置褥垫层,桩间土载力的发挥就不单纯依赖于桩的沉降,即使桩端落在好土层上[7][8],也能保证荷载通过褥垫层作用到桩间土上,使桩土共同承担荷载[9]。图1为复合地基示意图。

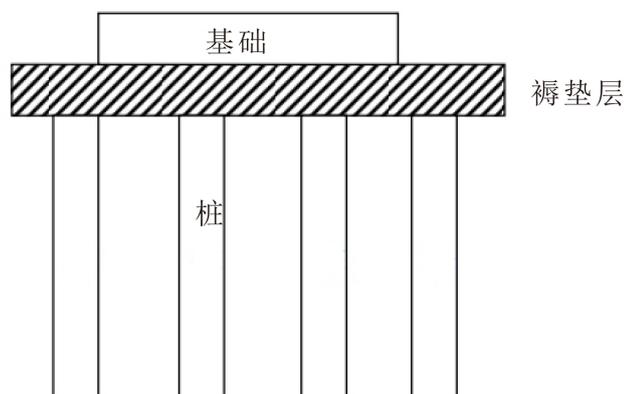


Figure 1. Schematic diagram of composite foundation  
图 1. 复合地基示意图

### 3. 工程概况

#### 3.1. 建筑地基工程说明

拟建某项目为住宅小区二期工程, 由于该二期工程的规划出现变更, 原规划建筑地基基础存在有旧的预应力混凝土管桩基础, 故需要对该工程项目地基进行专项处理。充分利用旧的 PHC 管桩基础, 采用 CFG 桩与原有的 PHC 管桩共同组成刚性桩复合地基, 使得处理后的地基承载力高, 复合地基承载力及变形由 PHC 桩、CFG 桩和桩间土来共同发挥作用满足设计要求。本次研究建筑物地基为 6 号楼。建筑物特征见表 1。

Table 1. Engineering characteristics of the proposed buildings  
表 1. 拟建建筑物工程特征表

建筑物名称	地上层数	基底标高	地基基础设计等级	拟采用基础型式	平均荷载(kpa)	结构类型
6#楼	25 层	64.75	乙级	管桩/CFG	450	框剪

#### 3.2. 竖向增强体设计参数

本工程采用的 PHC 管桩与 CFG 桩复合地基的地基处理方式, 建筑物基础范围内布设 PHC 管桩和 CFG 桩, 采用近似正方形布桩方式、桩间距 $\leq 1.75$  m、桩径 500 mm、PHC 管桩设计桩长 17 m、CFG 桩设计桩长为 21.5 m。

### 4. 场地工程地质条件

#### 4.1. 工程环境条件及地形地貌

勘察场地为拆迁场地和耕地, 地形相对平坦, 各勘探孔孔口标高变化在 72.64~73.10 m 之间, 场地地貌单元属华北黄河冲积平原。

#### 4.2. 地层结构

经钻探、静探揭露, 自然地坪下 65 m, 勘探深度内地层均属第四系地层, 地质成因以冲洪积及人工堆填为主。根据土的类型、颜色、状态及包含物等差异, 并结合原位测试和室内土工试验资料, 将勘探深度内地层分为十二层。各土层特征描述如下。



限元分析软件, 支持静力分析、动力分析、渗流分析、应力渗流耦合分析、固结分析、施工阶段分析、边坡稳定分析等多种分析类型, 适用于地铁、隧道、边坡、基坑、桩基、水工、矿山等各种实际工程的准确建模与分析, 并提供了多种专业化建模助手和数据库。GTS/NX 基于 CAD 和有限元建模的操作方式, 提供多样的几何建模和网格划分功能, 并且提供实体、曲面、线等多种要素的混合建模方法, 确保前/后处理的快捷及准确性。

## 5.2. 基本假定

为了简化计算过程, 加快计算速度, 对六号楼复合地基数值计算模型的建立基于以下假定: (1) 假定土层均匀分布, 土体性质为各向同性。(2) 假定土体为理想弹塑性体, 并采用摩尔-库伦模型进行模拟; 假定 CFG 桩与 PHC 管桩结构为线弹性体, 并采用符合广义胡克定律的线弹性模型进行模拟。(3) 忽略土体的固结过程和地下水渗流作用产生的影响。(4) 对计算模型进行加载时, 忽略加载过程和时效性的影响, 只考虑加载后的最终结果。

## 5.3. 模型参数的确定

确定合理准确的材料参数对于数值模拟结果的准确程度至关重要, 本文在进行模拟计算的过程中, 对于土体和褥垫层应用摩尔-库伦模型, 地基土承载力特征值及变形参数根据地基土成因时代、物理力学指标、原位测试成果综合确定, 建议值见表。其中土体摩尔-库伦模型中弹性模量取压缩模量的 2~3 倍, 具体参数见表 2。对于两种桩体均选择线弹性模型, 1 d 植入式梁单元来模拟, 具体参数见表 3、表 4。

Table 2. Soil physical property parameters

表 2. 土体物理性质参数

层号	土层名称	层厚(m)	$\gamma$ (kN·m <sup>-3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	压缩模量(MPa)	泊松比
1	粉土	3.5	17.5	12.5	18.3	7.6	0.23
2	粉土	2.5	17.2	15.5	17.6	5.6	0.24
3	粉质黏土	1.5	17.5	21.5	14.5	4.8	0.24
4	粉土	2.5	17.3	15.8	17.8	6.3	0.24
5	粉土	2.0	17.8	14.8	17.5	4.9	0.23
6	粉砂	6.0	19.0	1.00	30.0	12.3	0.34
7	粉质黏土	3.5	17.6	21.8	14.8	8.5	0.25
8	细砂	9.0	19.5	1.00	21.0	18.5	0.34
9	粉土	10.0	18.2	15.2	17.4	10.3	0.26
10	中砂	10.5	19.5	1.00	30.0	16.4	0.33
11	黏土	9.5	18.8	15.0	22.0	12.3	0.33
12	中砂	5.0	19.5	1.00	30.0	24.2	0.33

Table 3. Structural material parameters

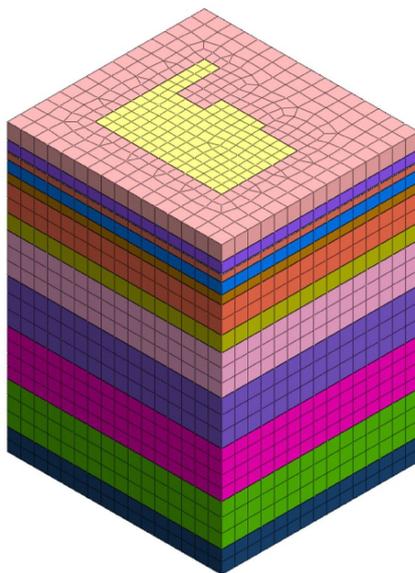
表 3. 结构材料参数

材料名称	本构模型	弹性模量 E/pa	泊松比 $\mu$	容重/kN·m <sup>-3</sup>
C30 混凝土	弹性	3.00e10	0.20	23.5
C80 混凝土	弹性	3.80e10	0.19	26.0

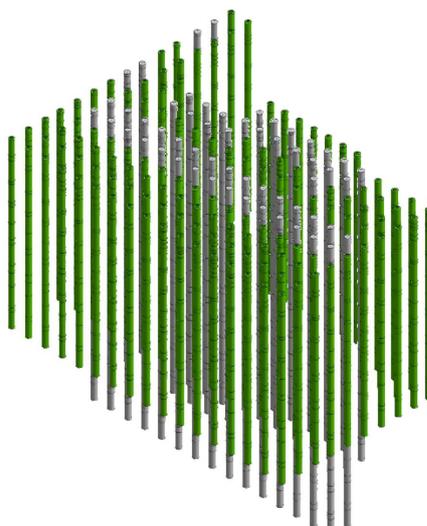
**Table 4.** Model structure and pile properties  
**表 4.** 模型结构及桩属性

结构名称	单元类型	本构模型	所用材料	截面形状	截面尺寸
土体	3D 实体单元	MC	—	实体	—
褥垫层	3D 实体单元	MC	—	实体	—
PHC 管桩	1D 植入式梁单元	弹性	C80 混凝土	管形	0.126 m <sup>2</sup>
CFG 桩	1D 植入式梁单元	弹性	C30 混凝土	实体圆柱	0.196 m <sup>2</sup>

### 5.4. 有限元模型的建立



**Figure 2.** Composite foundation modeling diagram  
**图 2.** 复合地基模型图



**Figure 3.** CFG pile and PHC pipe pile modeling diagram  
**图 3.** CFG 桩与 PHC 管桩模型图

根据土体桩体各项物理参数, 为了尽可能消除边界效应的影响沿着不规则地基基础桩线两条长边分别向外扩展两倍来作为模型边界, 在深度方向上由于地层深度超过了桩端影响范围, 故而不需要扩展。据此得到整体的有限元模型, 图 2 与图 3 分别是整体的有限元模型与 PHC 管桩与 CFG 桩的有限元模型。

## 5.5. 有限元模型结果分析

### 5.5.1. CFG 桩与 PHC 管桩竖向位移分析

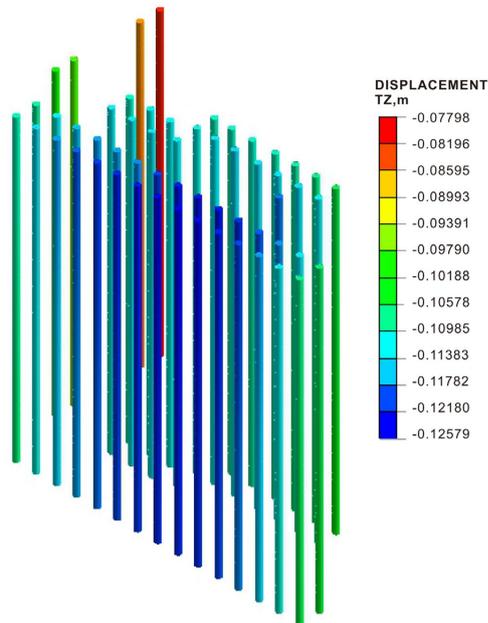


Figure 4. Vertical settlement cloud diagram of CFG pile  
图 4. CFG 桩竖向沉降云图

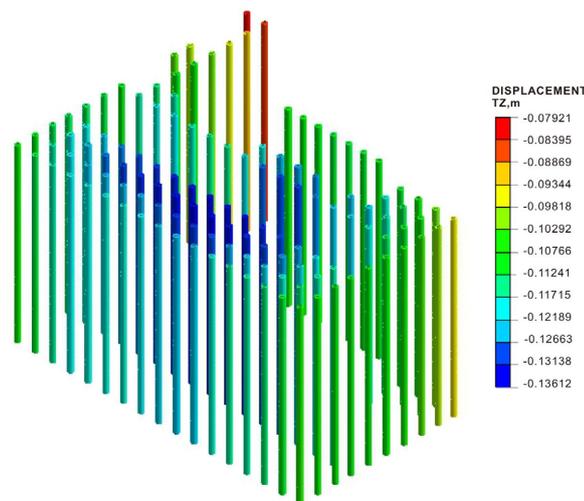


Figure 5. Vertical settlement diagram for PHC pipe pile  
图 5. PHC 管桩竖向沉降图

在整个复合地基施工完成后, 对地基施加均布 450 kpa 荷载, 研究 CFG 桩与新旧 PHC 管桩的沉降特性。发现 CFG 桩与 PHC 管桩沉降范围均在 77 mm~136 mm 范围内, 且 CFG 桩的沉降值略小于 PHC 管

桩的沉降值。由于该地基并不完全规整的方形地基，较为关注的边桩沉降值均小于中心桩的沉降值。可以反映出边桩也可以很好的承担上部荷载。根据国内标准《建筑桩基技术规范》对桩基沉降变形允许值做出的相关规定，以上沉降均小于标准的 200 mm。可知，该复合地基采用的 CFG 桩与新旧 PHC 管桩复合地基能满足设计要求。如图 4 与图 5 所示。

### 5.5.2. CFG 桩与 PHC 管桩复合地基承载与变形分析

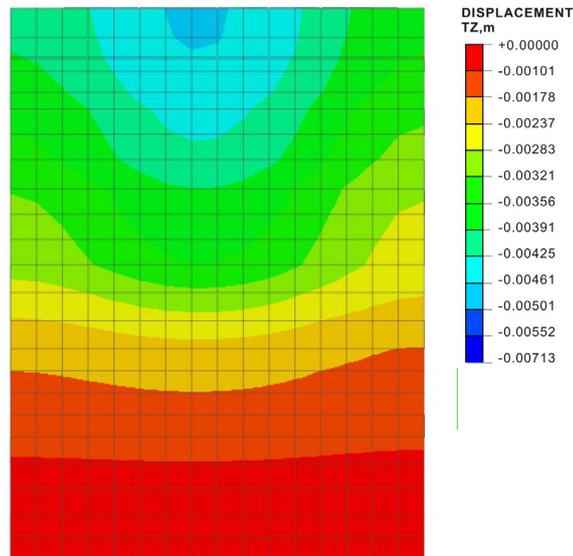


Figure 6. Initial settlement contour of composite foundation  
图 6. 复合地基初始沉降等值线

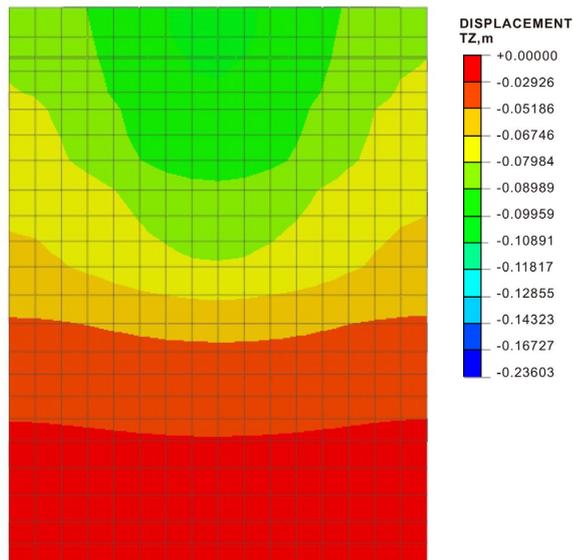


Figure 7. Settlement contours at the end of loading of composite foundation  
图 7. 复合地基加载结束沉降等值线

在加固区上部，桩土沉降等值线呈“上凹”状，桩周土的沉降大于桩体的竖向位移，桩体相对于桩周土有向上运动的相对趋势，桩间土产生有阻止桩体向上运动趋势的方向向下的拽力，这就是所谓的负

摩阻力, 在该范围内土体对桩体形成负摩阻区; 在加固区中下部, 桩土沉降等值线呈“下凸”状, 桩体的竖向位移大于桩周土的沉降, 桩体相对于桩周土而言, 有向下运动的趋势, 桩周土产生有阻止其向下运动的方向向上的拽力, 这就是桩体上部产生的正摩阻力, 这对桩体的承载力而言是有利的; 而在临界的位置, 桩土沉降一致, 即所谓的中性点位置。如图 6 与图 7 所示。

### 5.5.3. 水平位移分析

在上部荷载的作用下刚性桩复合地基一定会产生沉降, 在沉降过程中会对桩间土产生较大挤压作用, 使得土体向四周运动从而产生水平位移。而土体的水平位移同样会引起桩体的水平位移如图 8 所示, 在无荷载的作用下群桩的水平位移普遍较小, 几乎可以忽略不计。在加荷载之后可以发现群桩的水平位移开始增大, 但整体较为平均。由图 9 得知随着深度增加群桩的水平位移也呈现出减小的趋势且桩体上部水平位移大于下部水平位移, 这主要是因为随着深度增加桩端进入良好的持力层, 承载力增大且受到上部荷载作用也减小。

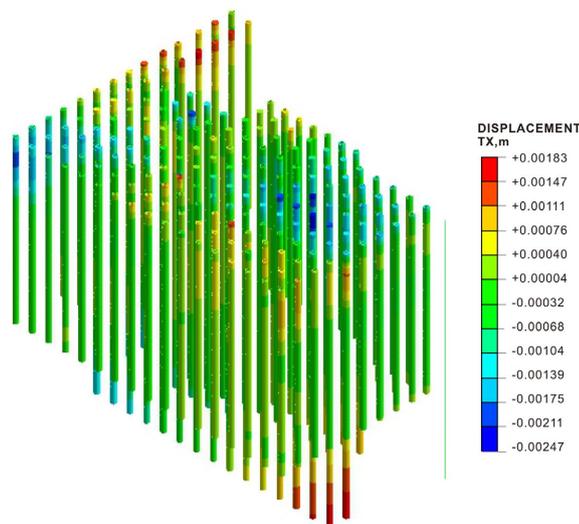


Figure 8. Initial horizontal displacement of group piles

图 8. 群桩初始水平位移

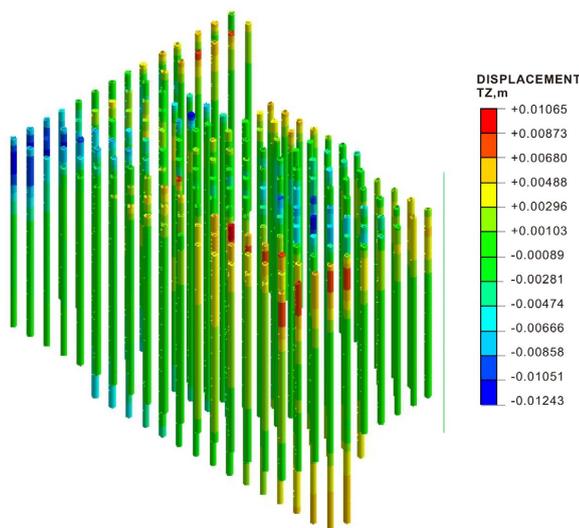


Figure 9. Horizontal displacement after loading of group piles

图 9. 群桩加载后水平位移

## 6. 结论

依照某建筑地基处理工程作为实例, 通过有限元数值分析软件 Midas/GTS NX 建立复合地基有限元数值模型并进行计算, 研究了利用新 PHC 管桩与 CFG 桩与工程中已经存在的部分旧 PHC 管桩共同组成复合地基的可行性。得到如下结论:

(1) 随着荷载的不断增大 PHC 管桩与 CFG 桩的沉降量也逐步增大, 且两种桩型的沉降趋势基本相同, 二者的沉降差值也比较小, 意味着整个复合地基受到不均匀沉降的影响较小, 这对复合地基的承载力与稳定性是有益处的。

(2) 随着荷载的增加, 桩土应力比在不断地发生改变, 桩承担的荷载也在逐步地增大, 在这一过程中, 土的位移同样也时刻随着荷载的变化而发生改变, 这与复合地基所特有的基本规律一致。群桩的水平位移随着荷载增加逐渐增大但整体位移较为平均且数值较小。

(3) 根据分析结果选择第 8 层土层作为 PHC 管桩的桩端持力层以及选择第 9 层土层作为 CFG 桩的桩端持力层以及对于该复合地基 PHC 管桩与 CFG 桩桩长分别选用 17 m 与 26m 且桩径均为 500 mm 是合理的。

## 参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基发展概况及其在高层建筑中的应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 3-10.
- [2] 余雷. 刚性桩复合地基工作性状的现场研究[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(3): 41-46.
- [3] 阎明礼, 杨军, 吴春林, 等. CFG 桩复合地基在工程中的应用[J]. 施工技术(建筑技术通讯), 1991, 20(2): 15-17.
- [4] 方家升. 刚性桩复合地基与管桩基础方案比选[J]. 山西建筑, 2019, 45(11): 76-78.
- [5] 高翔, 孙剑平, 夏凤敏. 多桩型长短桩复合桩基在高层建筑桩基加固中的应用[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 57-60, 28.
- [6] 杨飞鹏, 张志霞. 水利工程中不同种组合多桩型复合地基的应用[J]. 山西水利科技, 2022(2): 26-28.
- [7] 杨波. CFG 桩复合地基检测常见问题及解决措施[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(8): 47-50.
- [8] 宋胤恺, 佟建兴, 唐秋丰, 等. CFG 桩加碎石桩两种桩型复合地基工程应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 2303-2307.
- [9] 毛斌, 郭倩倩, 赵子荣. 悬浮刚性桩复合地基沉降简易计算方法研究[J]. 科技与创新, 2018(15): 47-51.