

CFG 桩桩头施工新方法及其不同桩帽 受力特征分析

丁运鹏

(中铁十四局集团第二工程有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要: CFG 桩因其低成本和高效能的特点广泛应用于地基加固, 以提升地基承载力和减少沉降。针对传统 CFG 桩桩头处理方法存在效率低、能耗高的问题, 本文提出一种“前截法”联合桩帽土模法的绿色施工新工艺, 通过优化桩头施工和减少多余土石方, 降低施工过程中的能耗和资源浪费。本工艺采用圆形桩帽, 简化了传统桩头截除工序, 并减少了桩周土扰动。基于有限元模拟分析, 研究了不同桩帽形状(圆形与方形)对 CFG 桩复合地基承载力、桩身轴力以及桩土应力比的影响。结果表明, 相较于传统方形桩帽, 圆形桩帽在加载过程中表现出更均匀的荷载分布与更稳定的受力特性。该工艺在提升施工效率和降低环境影响方面具有显著优势, 为地基处理技术的进一步发展和绿色建筑技术的应用提供了新的技术参考。

关键词: CFG 桩复合地基; 施工工艺; 桩帽形状; 数值模拟; 沉降

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0069-07

A new construction method for CFG pile head and mechanical analysis of different CFG pile caps

DING Yunpeng

(China Railway 14th Bureau Group 2nd Engineering Co., Ltd., Taian 271000, Shandong, China)

Abstract: CFG piles are widely used in foundation reinforcement due to their cost-effectiveness and high efficiency in improving the bearing capacity of foundations and reducing settlement. To address the challenges of low efficiency and high energy consumption in traditional CFG pile head treatment methods, this paper introduces a new “pre-cut method” combined with a soil mold technique for pile caps. This environmental-friendly process optimizes pile head construction and reduces excess excavation, thereby reducing energy consumption and resource waste during construction. The process involves the formation of circular pile caps, simplifying the traditional pile head removal steps and reducing soil disturbance around the piles. Based on finite element simulation analysis, the study investigated the effects of different pile cap shapes (circular and square) on the bearing capacity, axial force of the pile, and pile-soil stress ratio in CFG pile composite foundation. The results indicate that, compared to traditional square pile caps, circular pile caps exhibit more uniform load distribution and more stable load-bearing characteristics during loading. This technique offers significant advantages in improving construction efficiency and reducing environmental impact, providing a valuable technical reference for the further development of foundation treatment technologies and the application of green building techniques.

Key words: CFG pile composite foundation; construction technique; pile cap shape; numerical simulation; settlement

0 引言

CFG 桩是介于刚性桩与柔性桩之间的复合地基处理方式, 其桩身强度等级大多为 C15~C25。由于 CFG 桩的桩身变形模量较高, 在荷载作用下

可以产生比桩间土大得多的桩顶应力, 并通过桩身将荷载向深层土体传递, 从而减少桩间土的荷载压力。CFG 桩不需要配筋, 掺和料来源广泛, 可取自工业废料粉煤灰等, 因此, 工程造价也相对较低。基于上述优势, 其工程应用较为广泛^[1-3]。

随着数值分析方法的不断进步, 数值模拟为桩

基的研究和设计提供了强有力的支持^[4]。许多学者通过数值模拟、实验研究及现场监测,深入探讨了CFG桩在不同土层条件下的力学特性^[5-7]、荷载传递机制^[8-11]、沉降特性^[12-13]等方面的问题。为了减少桩体的刺入现象,产生了带帽CFG桩的复合地基新技术,目前许多国内外学者已经针对带帽桩开展了多方面的研究。姚云龙等^[14]通过现场原位试验,研究了不同垫层厚度和桩帽尺寸对复合地基的桩土应力比、荷载分担比以及沉降变形等的变化规律的影响。雷金波等^[15]采用三维有限元法,研究了带桩帽刚性桩复合地基的沉降规律及等沉面特性,为优化沉降计算模型和工程设计提供了理论依据。高胜利等^[16]通过有限元法和大型有限元软件,模拟了路堤荷载下带桩帽刚性桩-网复合地基模型,研究了复合地基的沉降变形、桩身轴力、桩侧摩阻力和桩土应力比分布的基本规律。刘明泉等^[17]通过数值模拟发现桩帽能大大减小桩顶的应力集中,桩体承载力也有所提高。

近年来,随着可持续建筑实践需求的增加,岩土工程的关注点逐渐转向“绿色”方法,旨在减少能源消耗并尽量减小对环境的扰动。尽管桩基施工技术不断取得进步,但桩头处理的效率和环境的可持续性仍然亟待改进。传统的CFG桩桩头处理方法在桩头切割和水平化过程中存在低效率和高能耗的问题,这不仅导致资源过度消耗,还对环境产生较大影响。针对上述难题,本文提出了一种新的CFG桩桩头的施工工艺,主要采用桩头“前截法”联合桩帽土模法对桩头进行施工,旨在优化施工过程、降低能源消耗并减少对周围土体的扰动。新工艺制成的桩帽为圆形桩帽,而现有对圆形桩帽^[18-19]的研究较少。基于此,本文结合工程实例,使用有限元方法探讨了圆形桩帽与传统方形桩帽在荷载分布、承载力和整体结构稳定性方面的表现差异。

1 施工工艺及流程

本工法适用于CFG桩施工的典型土层,包括黏性土、粉土、淤泥质土、人工填土及松散的砂性土层。对于高密度硬土层、卵石层和含水量过大的软土层,需在具体工程中审慎评估其适用性。

桩身施工前对原地面处理平整至桩帽顶高程,在成桩过程中将桩顶标高准确控制在设计高程位置。钻孔至设计高程后,停止钻进。混合料经坍落度检查合格后开始泵送,混凝土灌注至桩顶设计高程以上20 cm停止灌注,在CFG桩桩身混凝土初凝之前进行桩头前置处理。对桩顶以下2.5 m内的

混凝土进行振捣,并用铁勺清除桩孔内灌注的多余混凝土,高程控制至桩头设计高程,用塑料膜覆盖桩头,保湿养护。在养护7 d后,按设计要求进行桩身强度和完整性检测,合格后进行桩帽孔的开挖。

CFG桩采用“前截法”施工时,桩顶高程准确控制在设计高程,减少了混凝土超灌,成桩后无需截除桩头,省去了处置桩头的环节。使用了出土清运一体化收集系统,此系统通过搅笼收集钻杆钻进中产生的钻渣,两侧螺旋杆传送至输送带进料口,后由传送设备将钻渣运送至自卸车料斗内,自卸车循环利用。此系统实现了随桩随打随完成,实现机械设备一体化,减少工序,节省人力,提高效率。图1为前截法原理示意图,图2为前截法施工流程图。

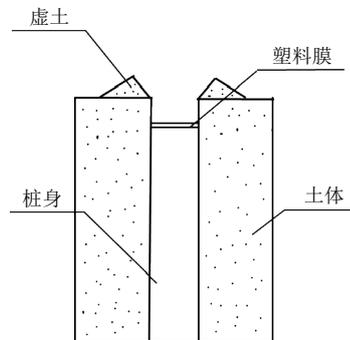


图1 前截法原理示意图

Fig. 1 Diagram of the pre-cut method principle



图2 前截法施工流程图

Fig. 2 Construction process of the pre-cut method

经过前截法处理后,利用小型挖掘机改装而成的桩帽成型器旋挖挤密成孔实现桩帽基坑的开挖,并利用小挖机对渣土进行倒运处理,为保证桩帽尺寸符合要求,可在桩帽顶部设置高度为5 cm的圆形模具。桩帽混凝土采用泵车进行浇筑,振捣后人工收平抹面,待混凝土初凝后再次进行抹面压光,拔出圆形模具,覆盖土工布进行养护。为保证施工质量,在桩帽、桩身连接处应遵循以下质量控制要点:(1)桩顶应平整,无明显高低差,保证桩帽安装的稳定性和受力均匀;(2)在桩帽与桩身连接前,应对连接界面进行清理,确保无泥土、杂质等,保证连接处的紧密性;(3)桩帽混凝土浇筑后,应进行养护,确保其强度和耐久性;(4)在施工过程中和施工完成后,应进行必要的质量检查和验收,确保桩帽与桩身连接的质量达到设计要

求。图 3 为直径 1.1 m 的土模法桩帽结构图，在连接处桩身伸入桩帽 0.1 m。

桩帽完成后，省去了传统 CFG 桩施工中常见的桩间碎石回填碾压工序，直接开始褥垫层全断面施工，减少了对桩间土的扰动，压实质量能得到有效保证。图 4 为土模法桩帽施工流程，圆台型桩帽基坑采用定制的空心旋挖钻筒旋挖，旋挖后形成平整密实的碗状形土模，可直接满灌桩帽混凝土。旋挖时空心钻筒套住桩头，可保护桩头不受扰动，既降低了浅层断桩率又保证了桩头质量。图 5 为 CFG 桩新施工工艺流程。

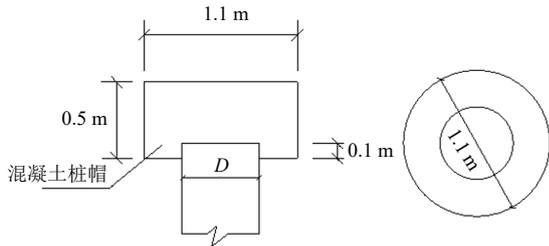


图 3 土模法桩帽结构图

Fig. 3 Pile cap structural diagram of the soil mold method



(a) 旋挖成孔 (b) 开挖成型 (c) 浇筑成型

图 4 土模法桩帽施工流程

Fig. 4 Construction process of pile cap using soil mold method

与传统施工工艺相比，“前截法”联合桩帽土模法施工工艺施工速度更快，桩身混凝土灌注后，对桩顶混凝土进行振捣，将钻渣和桩头超灌混凝土清除，控制桩顶标高与设计标高一致，随后进行人工收面、养护、桩帽施工。钻进过程中通过传送带

配合搅笼及时清除钻渣，实现钻渣实时清理。较传统工艺减少了桩间土开挖、桩头切割、模板安装、桩间碎石回填压实等工序，简化了施工程序，避免了在桩间土开挖及桩头截除过程中造成的浅层断桩，且振捣后的桩头更加密实，不会产生不利的施工缝。表 1 列出了两种工艺的施工工效对比。

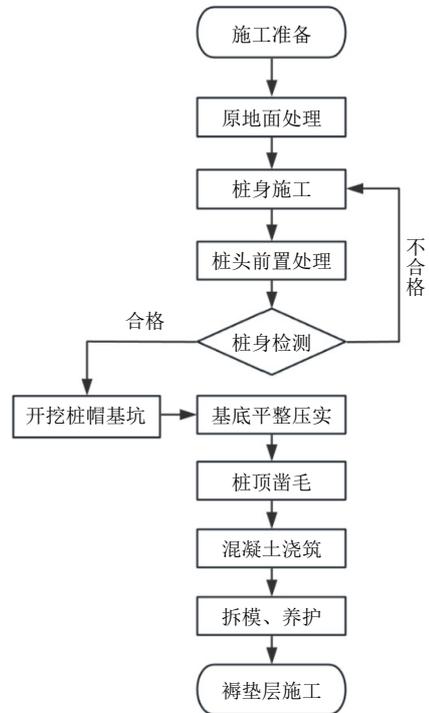


图 5 CFG 桩新施工工艺流程

Fig. 5 New construction process of CFG pile

从表 1 中可以看出，新工艺很大程度上减少了总体施工时间以及使用设备和人员的投入，简化了工序，缩短了工期。传统工艺的矩形桩帽混凝土浇筑采用模板加固，将其优化为土模法施工，使用桩帽成型器开挖完成后无需立模，修整土模后即可浇筑混凝土，无需模板投入，节省了成本，经济效益有所提高。

表 1 两种工艺施工工效对比

Table 1 Comparison of construction efficiency for the two methods

工艺名称	原地面处理/d	CFG成桩/d	桩间土开挖/d	桩头环切及倒运/d	桩帽施工/d	桩帽土清运及桩间土回填/d	工序总时间/d	浅层断桩率/%	每延米综合单价/元
传统工艺	1	1	1	1.7	1.5	2	8.2	2	37.3
新工艺	2	1	—	—	2.0	—	4.0	0	24.7

相比于传统施工工艺，桩头“前截法”联合桩帽土模法工艺桩体完整性更高，桩间土无需开挖回填，减少了对桩头的扰动次数，达到“桩土一体受力”的复合地基处理效果，提高了桩体质量。

综上，本文提出的“前截法”联合桩帽土模法

通过优化 CFG 桩桩头及桩帽的施工流程，使桩帽与桩体更好地结合，形成了具有较高施工效率和稳定性能的 CFG 桩复合地基。该新工艺通过成型圆形桩帽，旨在一定程度上改善桩顶荷载分布、降低浅层断桩率、减少施工过程中的应力集中现象，从

而对复合地基的复合变形模量和复合地基承载力产生积极影响。此外，圆形桩帽在均匀传递荷载方面具有一定优势，有望改善桩土应力承担比。基于此，本文后续将通过有限元分析，探讨该新工艺对 CFG 桩复合地基的具体力学性能影响。

2 工程概况

本文依托石衡沧港城际铁路沧州东站 CFG 桩工程，工程区间内软土路基按照设计要求需进行地基加固处理，地基处理方式 CFG 桩，共计 37 479 根，长度为 650 126 延米。本段路基地质组成有粉土、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土等，原地面承载力约为 65 kPa。路堤正线基底采用 CFG 桩加固，桩径为 0.4 m，C25 混凝土灌注，桩间距为 2 m，正方形布置，挡墙底桩间距为 1.6 m×2.0 m，矩形布置，桩长为 16~22 m。CFG 桩桩顶设 C35 混凝土桩帽，厚 0.4 m。

2.1 单桩竖向抗压静载试验

根据该工程检验检测报告，试验加载采用油压千斤顶，沉降测量采用大量程百分表。试验加载方法采用慢速维持荷载法，对于单桩竖向抗压静载试验，设置 130 kN、195 kN、260 kN、325 kN、390 kN、455 kN、520 kN、585 kN、650 kN 共 9 级荷载。本次单桩竖向抗压静载试验在检测过程中没有异常现象发生， $Q-s$ 曲线平缓，桩顶总沉降均未超过 40 mm，满足设计承载力要求。选取了桩号为 77-2、79-2 和 81-2 的 3 根桩进行对比分析，其试验结果见表 2。

表 2 单桩竖向抗压静载试验汇总表

Table 2 Summary of single pile vertical compressive static load test

荷载/kN	本级沉降/mm			累计沉降/mm		
	77-2	79-2	81-2	77-2	79-2	81-2
130	0.72	0.63	1.17	0.72	0.63	1.17
195	0.53	0.56	0.44	1.25	1.19	1.61
260	0.42	1.18	0.49	1.67	2.37	2.10
325	1.00	1.27	1.35	2.67	3.64	3.45
390	1.16	0.71	0.56	3.83	4.35	4.01
455	1.59	0.40	1.29	5.42	4.75	5.30
520	0.49	1.65	0.73	5.91	6.40	6.03
585	0.60	1.64	0.92	6.51	8.04	6.95
650	0.71	1.06	1.14	7.22	9.10	8.09

2.2 单桩复合地基静载试验

根据该工程检验检测报告，检测方法采用慢速

维持荷载法。对于单桩复合地基静载试验，设置 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa、350 kPa、400 kPa 共 8 级荷载。本次检测的 CFG 桩复合地基静载试验过程中没有异常现象发生， $P-s$ 曲线平缓，没有明显的比例界限，满足设计承载力要求。选取了桩号为 1-3、4-4 和 5-6 的 3 根桩进行对比分析，其试验结果见表 3。

表 3 单桩复合地基静载试验汇总表

Table 3 Summary table of static load test for single pile composite foundation

荷载/kPa	本级沉降/mm			累计沉降/mm		
	1-3	4-4	5-6	1-3	4-4	5-6
50	1.15	1.01	1.11	1.15	1.01	1.11
100	1.30	1.19	1.14	2.45	2.20	2.25
150	1.27	1.28	1.43	3.72	3.48	3.68
200	1.51	1.23	1.37	5.23	4.71	5.05
250	1.80	1.58	1.50	7.03	6.29	6.55
300	1.67	1.63	1.42	8.70	7.92	7.97
350	1.95	1.45	1.86	10.65	9.37	9.83
400	2.01	1.76	1.94	12.66	11.13	11.77

3 地基土中不同桩帽形状单桩承载特性数值模拟

通过 ABAQUS 有限元软件建立分析模型，以比较不同桩帽形式的性能差异。地基土模型水平方向为 8 m，深度为 32 m，采用理想弹塑性摩尔-库伦模型。边界条件设置为约束模型四周对应水平方向位移，约束底部 3 个方向的位移。整个过程中仅对地基受荷及其加载过程进行模拟，对地基卸荷回弹不做考虑。地基土设置参数详见表 4。为了研究桩帽形状对复合地基的性能影响，使所有桩帽的面积保持一致，以排除几何尺寸差异对轴力和桩土应力比的影响。设置无桩帽桩、直径为 1.1 m 的圆形桩帽桩和边长为 0.97 m 的方形桩帽桩 3 种模型，其余参数为：桩长 16 m、桩径 0.4 m、密度 2 000 kg/m³、弹性模量 15 000 MPa、泊松比 0.25、桩帽面积 0.95 m²。假设桩帽与桩体之间的接触是理想化的，不考虑桩帽与垫层之间的相互作用及桩帽的向上刺入变形，以简化模型并减少计算的复杂性。模型属性赋予完毕后，设置分析步，随后施加荷载并设置边界条件，单桩竖向抗压静载试验模拟采用与其工程试验相同的 9 级荷载，单桩复合地基静载试验模拟采用与其工程试验相同的 8 级荷载。分析模型及网格如图 6 所示。

表 4 地基土设置参数
Table 4 Soil parameters

土层	层厚/m	密度/(kg/m ³)	压缩模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
粉土	2	1 950	15.0	0.3	30	19
淤泥质粉质黏土	12	1 920	6.2	0.3	10	13
粉质黏土	14	1 940	16.0	0.3	35	13
黏土	4	1 860	4.6	0.3	11	38

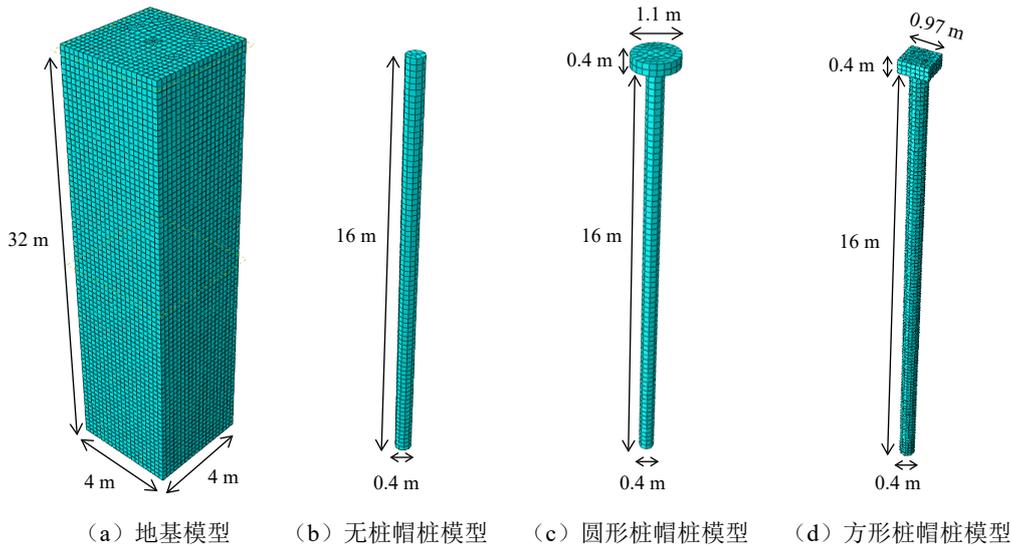


图 6 分析模型及网格

Fig. 6 Analysis model and mesh

4 模拟结果分析

为了更深入地了解不同桩帽形状下复合地基中桩、土应力的变化规律，本次数值模拟分析针对荷载-沉降曲线、桩身轴力和桩土应力比进行了探究。

4.1 荷载-沉降曲线

采用新工艺成桩并到达检测龄期后，分别随机选取 3 根工程桩开展单桩竖向抗压静载试验（标号为 77-2、79-2、81-2）和单桩复合地基静载试验（标号为 1-3、4-4、5-6）。根据试验数据与有限元模拟的数据绘制对比的荷载-沉降曲线图如图 7 所示。其中，图 7 (a) 为单桩竖向抗压静载试验的 $Q-s$ 曲线，图 7 (b) 为单桩复合地基静载试验的 $P-s$ 曲线，实线为有限元模拟数据。从图 7 中可以看出，有限元模拟结果与实测结果差距较小，总体趋势上与实测结果符合。模拟结果规律性较强，造成这种现象的原因可能是模型土体的属性简化为理想的弹塑性模型，且模拟中的土体未能完全表现出土体初期承载性能的复杂变化，故而产生了误差。

4.2 桩身轴力

桩身轴力采用切片工具提取，由桩顶每间隔 1 m 提取一次桩身轴力值，复合地基静载试验模拟中

3 种桩的桩身轴力和其深度之间的关系曲线见图 8。图 8 中可以看出，从桩顶至桩端，其所受到的轴力整体而言呈减小趋势。但在桩身的上半部分，桩相对于其周围土层向上位移，桩侧摩擦阻力的方向向下，即产生负摩擦力，因此桩身上半部分有一小段的桩身轴力呈增大趋势。相比于无桩帽桩和圆形桩帽桩，方形桩帽桩的轴力变化波动较大，可能是由于方形桩帽的边角处出现应力集中现象，荷载分布不如无桩帽和圆形桩帽那样均匀，从而导致桩身轴力分布不均。

4.3 桩土应力比

通过 ODB (Output Database, ABAQUS 的输出数据库) 场变量输出提取桩应力和桩周土应力，复合地基静载试验模拟中 3 种桩的桩土应力比随荷载变化的曲线如图 9 所示。由图 9 可知，在初始荷载阶段，桩土应力比的变化曲线相对稳定，圆形桩帽桩的桩土应力比较大。在中荷载阶段，桩的轴力开始增大，桩土应力比上升较快，方形桩帽桩的桩土应力比剧增，超过圆形桩帽桩。推测是方形桩帽的边缘部位可能出现应力集中现象，导致的局部桩土应力比剧增。圆形桩帽由于其对称性和均匀荷载分布，能够较好地避免这种现象。在高荷载阶段，圆形桩帽桩和无桩帽桩的桩土应力比增长开始变缓。

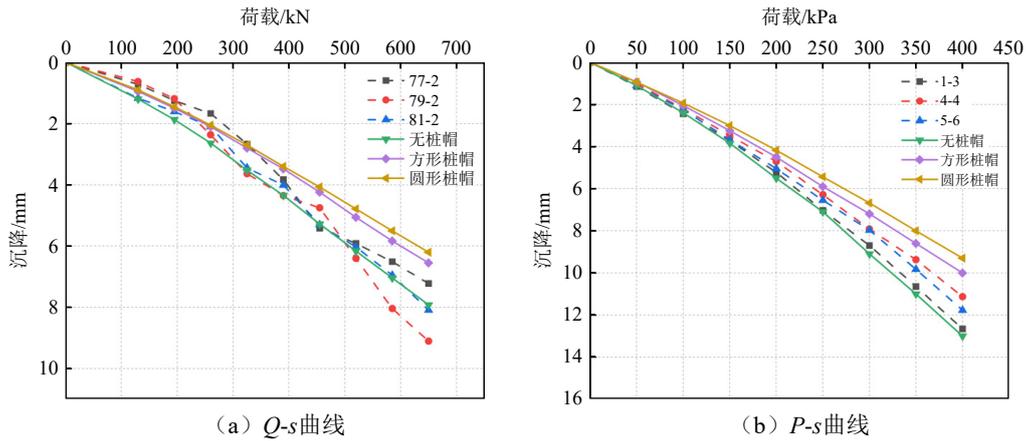


图7 模拟与实测的荷载-沉降曲线对比

Fig. 7 Comparison of simulated and measured load-settlement curves

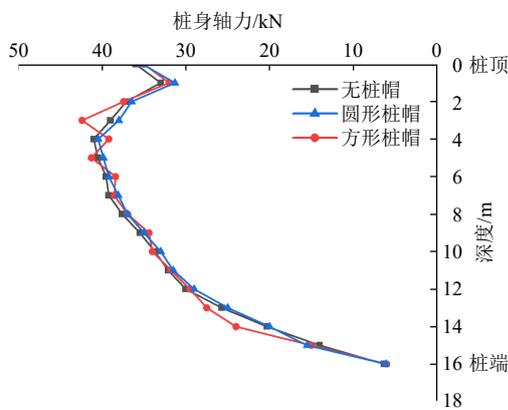


图8 模拟桩身轴力随深度变化

Fig. 8 Simulated pile axial force with depth

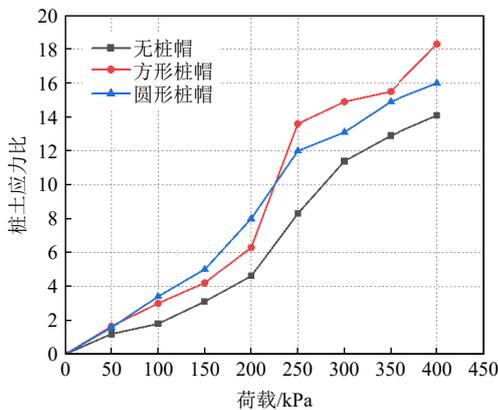


图9 桩顶面处桩土应力比与荷载的关系

Fig. 9 Relationship between the pile-soil stress ratio and the load at the pile top

5 结论

本文提出了一种新的 CFG 桩桩头施工工艺, 对比分析了新方法与传统方法在施工流程、成本投入及施工质量之间的差异。在桩基受力性能方面, 参照现场 CFG 桩单桩竖向抗压静载试验和复合地基静载试验, 对不同桩帽形式的 CFG 单桩和 CFG

桩复合地基的承载特性进行了数值模拟分析。主要得出以下结论:

(1) 通过减少桩间土开挖、桩头处理等工序, “前截法”联合桩帽土模法施工工艺简化了施工程序, 较传统方法, 施工效率提升可达 2 倍左右, 成本节约 1.5 倍左右, 实现了施工的高效节能, 符合绿色岩土工程的低能耗和环保需求。

(2) 基于数值模拟分析, 揭示了不同桩帽形状对复合地基的承载性能和应力承担比的影响, 结果表明, 圆形桩帽在荷载分布和应力均匀性方面表现出一定的优势, 对复合地基的承载力和耐久性有所改善。

(3) 该施工方法在降低施工能耗、优化资源配置和提升地基工程质量方面具有明显优势, 为绿色岩土工程中的地基处理提供了一种可行、经济的技术参考, 也为相关工程的可持续发展提供了新的思路。

本研究主要集中于分析不同桩帽形状对 CFG 桩复合地基承载性能的影响, 未来可以在本研究基础上进一步分析桩帽大小对复合地基受力特征的影响, 以便提供更广泛的技术参考。

参考文献

- [1] 阎明礼, 吴春林, 杨军. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(2): 55-62.
YAN Mingli, WU Chunlin, YANG Jun. Study on the composite foundation with cement-flyash-gravel pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(2): 55-62.
- [2] 董必昌, 郑俊杰. CFG 桩复合地基沉降计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(7): 1084-1086.
DONG Bichang, ZHENG Junjie. Study on the settlement

- calculation of CFG pile composite ground[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 1084–1086.
- [3] 龚晓南. 复合地基理论和技术应用体系形成和发展[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 7–16.
GONG Xiaonan. Formation and development of composite foundation theory and technology application system[J]. *Chinese Ground Improvement*, 2019, 1(1): 7–16.
- [4] 张雅宁, 杨春山, 刘锦伟, 等. 基坑开挖对既有桥梁桩基的数值分析[J]. *广东工业大学学报*, 2014, 31(1): 107–111, 117.
ZHANG Yaning, YANG Chunshan, LIU Jinwei, et al. Numerical analysis of responses of existing bridge piers induced by deep excavation[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2014, 31(1): 107–111, 117.
- [5] CHENG X S, LIU G N, GONG L J, et al. Mechanical characteristics plus differential settlement of CFG pile and cement-soil compacted pile about composite foundation under train load[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 20(2): 155–164.
- [6] UMRAVIA N B, SOLANKI C H. Numerical analysis to study lateral behavior of cement fly ash gravel piles under the soft soil[J]. *International Journal of Engineering*, 2022, 35(11): 2111–2119.
- [7] WANG T T, DU S Y. Numerical simulation of the construction process of long spiral CFG piles[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 6664474.
- [8] 郑光俊, 盛春花, 李振华, 等. CFG 桩复合地基新型嵌入式褥垫层桩-土应力比改善特性[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 133–139.
ZHENG Guangjun, SHENG Chunhua, LI Zhenhua, et al. Improvement effect of pile-soil stress ratio in CFG pile composite foundation with newly embedded cushion[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(12): 133–139.
- [9] UBA UGE B, GUO Y C. Experimental study on load sharing characteristics of long-short CFG pile composite foundation adjacent to rigid retaining wall rotating about its base[J]. *Journal of Engineering Research*, 2023, 11(1B): 125–135.
- [10] UMRAVIA N B, SOLANKI C H. Experimental and numerical study behaviors on single cement flyash gravel pile under the combined effect of axial compression and lateral load[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 814(1): 012002.
- [11] LI X B, ZHANG R Y, YANG Z, et al. Mechanical behavior analysis and bearing capacity calculation of CFG pile composite foundation on coral sand site[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1204989.
- [12] WU X Z, XIN J X. Probabilistic analysis of site-specific load-displacement behaviour of cement-fly ash-gravel piles[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1613–1630.
- [13] UBA UGE B, GUO Y C. CFG pile composite foundation: its engineering applications and research advances[J]. *Journal of Engineering*, 2020, 2020(1): 5343472.
- [14] 姚云龙, 张晓辉, 刘鑫, 等. 基于现场试验的 CFG 桩复合地基桩帽与垫层效应分析[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(5): 815–822.
YAO Yunlong, ZHANG Xiaohui, LIU Xin, et al. Pile cap and cushion effect analysis of CFG pile composite foundation based on field test[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2024, 55(5): 815–822.
- [15] 雷金波, 曹慧兰, 熊杰, 等. 带帽刚性桩复合地基试桩力学性状三维有限元分析[J]. 矿冶工程, 2006, 26(2): 25–29.
LEI Jinbo, CAO Huilan, XIONG Jie, et al. 3D FEM analysis of mechanical characters of composite foundation with capped rigid piles[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2006, 26(2): 25–29.
- [16] 高胜利, 魏宏, 刘天福. 路堤荷载下带帽桩—网复合地基力学性状有限元分析[J]. 铁道建筑, 2010(10): 87–89.
GAO Shengli, WEI Hong, LIU Tianfu. Finite element analysis of mechanical properties of pile-net composite foundation with cap under embankment load[J]. *Railway Engineering*, 2010(10): 87–89.
- [17] 刘明泉, 李晓芝, 刘春原. 带桩帽的刚性桩复合地基受力性能研究[J]. 施工技术, 2016, 45(22): 95–98.
LIU Mingquan, LI Xiaozhi, LIU Chunyuan. Mechanical properties study of capped rigid pile composite foundation[J]. *Construction Technology*, 2016, 45(22): 95–98.
- [18] 彭声应, 张继文, 刘皖怀, 等. 高速铁路 CFG 桩复合地基预制桩帽施工工艺研究[J]. 铁道建筑, 2009(7): 86–87.
PENG Shengying, ZHANG Jiwen, LIU Wanhui, et al. Study on construction technology of precast pile-cap for CFG pile composite foundation of high speed railway[J]. *Railway Engineering*, 2009(7): 86–87.

