

文章编号: 1007-2993(2023)03-0314-06

# CFG 桩复合地基质量问题的检测与分析

宋德朝 郑燕 常勤慧 赵智超

(河南省航空物探遥感中心, 河南郑州 450053)

**【摘要】** 某工程场区地层以粉土、黏性土及砂性土为主, 地下水位较高, 设计采用 CFG 桩复合地基。CFG 桩复合地基检测结果显示, 单桩及复合地基承载力均达不到设计要求, 针对出现的质量问题采用低应变法和钻芯法检测对比查找并分析出现质量问题的原因。采用高压旋喷桩对地基进行补强加固处理, 并对补强加固后的复合地基进行检测, 检测结果显示复合地基承载力满足设计要求, 建筑物沉降观测结果表明, 建筑最大沉降量与整体倾斜值均满足设计与相关规范要求。可为解决同类工程质量问题提供参考。

**【关键词】** CFG 桩复合地基; 承载力; 检测; 低应变法; 钻芯法

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.010

## Testing and Analysis on the Quality Problems of CFG Pile Composite Foundation

Song Dechao Zheng Yan Chang Qinhui Zhao Zhichao

(Henan Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Zhengzhou 450053, Henan, China)

**【Abstract】** The stratum of a project site is mainly composed of silt, cohesive soil, and sandy soil, and the groundwater level is high. CFG pile composite foundation is designed. The test results of CFG pile composite foundation show that the bearing capacity of both single pile and composite foundation cannot meet the design requirements. The low strain method and core drilling method were used to detect and compare the quality problems, and the reasons for the quality problems were analyzed. High pressure jet grouting piles were used to reinforce the foundation, and the reinforced composite foundation was tested. The test results show that the bearing capacity of the composite foundation meets the design requirements. The observation results of building settlement indicate that the maximum settlement and overall inclination of the building meet the design and relevant specifications. It can provide reference for solving similar engineering quality problems.

**【Key words】** CFG pile composite foundation; bearing capacity; testing; low strain testing; core drilling method

### 0 引言

CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基是目前应用较为广泛的一种地基处理方式。在实际应用过程中, 由于桩基施工设备及人员技术等原因易造成桩身质量问题<sup>[1-2]</sup>, 施工过程质量控制与加固效果检测至关重要。目前 CFG 桩复合地基常用的检测方法有载荷试验<sup>[3-4]</sup>、低应变法<sup>[5-6]</sup>、钻芯法试验, CFG 桩复合地基承载力通过载荷试验确定, 桩身完整性检测通过低应变法和钻芯法试验确定。针对某工程 CFG 桩复合地基不满足设计要求, 分析承载力不足及桩身缺陷的原因, 对补强加固后的复合地基进行检测评价, 为类似工程问题提供借鉴。

### 1 工程概况

#### 1.1 项目概况

项目为高层住宅, 地上 30 层, 地下 2 层, 建筑平面尺寸: 长 68.1 m、宽 14.9 m, 主楼高度 89.9 m, 剪力墙结构, 筏板基础, 基础埋深约 9 m, 采用 CFG 桩复合地基。

#### 1.2 工程地质情况

该工程场地地貌属黄河冲积平原, 地层为第四系全新统和上更新统河流相冲积沉积物, 主要岩性为粉土、黏性土及砂类土, 地下水类型为潜水, 埋深 4.5 ~ 5.1 m。典型地质剖面图见图 1, 各土层主要参数见表 1。

**作者简介:** 宋德朝, 男, 1986 年生, 汉族, 河南民权人, 硕士, 工程师, 主要从事地基基础检测及岩土体稳定性方向研究工作。E-mail: 631651994@qq.com

**通讯作者:** 郑燕, 女, 1986 年生, 汉族, 四川宣汉人, 大学本科, 工程师, 主要从事矿产勘查、地基基础检测工作。E-mail: 21572087@qq.com

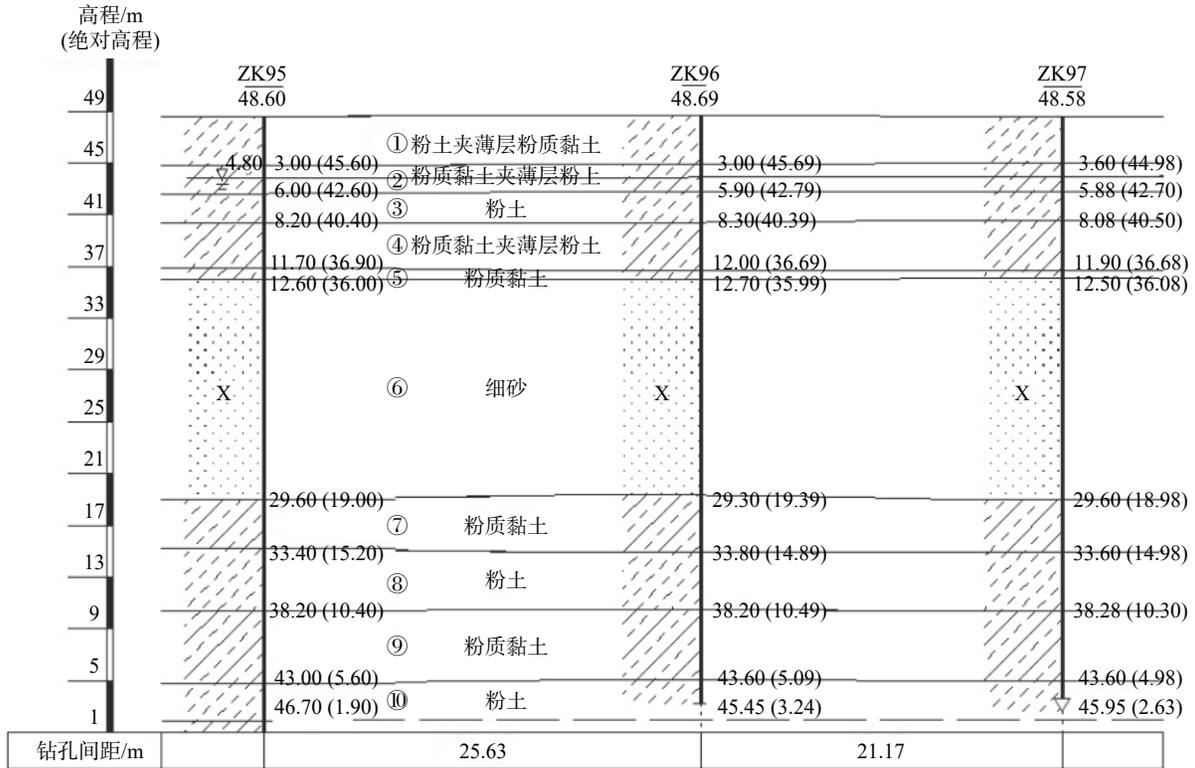


图 1 典型地质剖面图

表 1 地基各土层参数表

土层号	土层名称	层厚/m	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa	桩侧阻力特征值 $q_{s_i}$ /kPa	桩端阻力特征值 $q_p$ /kPa
①	粉土夹薄层粉质黏土	3.3 ~ 4.9	120	10.5	21	
②	粉质黏土夹薄层粉土	1.4 ~ 3.6	105	4.2	25	
③	粉土	0.7 ~ 2.7	125	11.2	22	
④	粉质黏土夹薄层粉土	3.3 ~ 5.7	115	4.5	26	
⑤	粉质黏土	0.5 ~ 2.0	140	5.2	30	
⑥	细砂	14.3 ~ 17.3	240	18.7	33	1000

### 1.3 CFG 桩复合地基设计

基础埋深 9.01 m, CFG 桩复合地基桩间土直接持力层为第④层粉质黏土夹薄层粉土,天然地基承载力特征值为 115 kPa, CFG 桩以第⑥层细砂作为桩端持力层,设计桩径为  $\phi 400$  mm,设计桩长 17.0 m,桩位呈梅花形布置,桩间距 1.3 m,面积置换率为 0.086,设计桩数 713 根,设计桩身混凝土强度等级为 C25,设计单桩竖向抗压承载力特征值为 773 kN,复合地基承载力特征值为 549 kPa。CFG 桩复合地基平面布置及剖面示意图见图 2。

## 2 现场检测

### 2.1 承载力检测

CFG 桩施工完成后,根据《建筑地基检测技术规范》<sup>[7]</sup>要求,现场抽选 6 根 CFG 桩(竖向增强体)进行单桩竖向抗压静载试验,最大加载量取设计单桩竖向

抗压承载力特征值的 2 倍(1546 kN),加荷分级为 10 级,每级加载量为 155 kN,其中第一级取分级荷载的 2 倍。单桩竖向抗压静载试验荷载-沉降( $Q-s$ )曲线见图 3,静载试验成果见表 2。

由图 3 可以看出,6 根试验桩在尚未加至最大荷载时  $Q-s$  曲线均已出现陡降段,且总沉降量超过 40 mm,表明 6 根试验桩均已达到极限状态,试验终止。

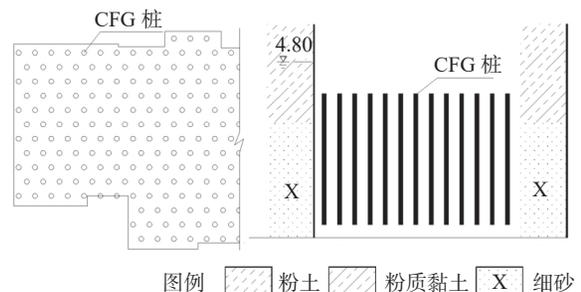


图 2 CFG 桩复合地基平面布置及剖面示意图

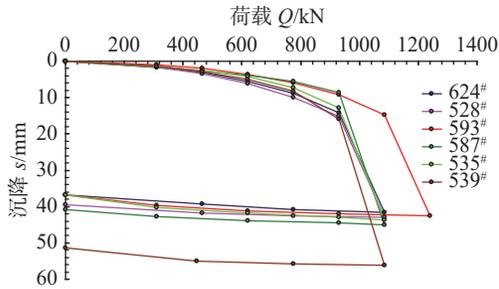


图3 单桩静载试验荷载-沉降(Q-s)曲线

表2 增强体竖向抗压静载试验成果表

桩号	最大加载量/kN	最大沉降/mm	最大回弹量/mm	极限承载力/kN	平均极限承载力/kN	承载力特征值/kN
624#	1085	41.52	4.68	930		
528#	1085	42.93	3.41	930		
593#	1240	42.63	5.75	1085		
587#	1085	45.09	4.31	930	955.8	477
535#	1085	43.66	6.78	930		
539#	1085	56.22	4.88	930		

通过表2可知,593#桩最大加载量为1240 kN,极限承载力为1085 kN,其余5根最大加载量为1085 kN,极限承载力为930 kN。累计沉降量为41.52~56.22 mm,最大回弹量3.41~6.78 mm。6根试验桩承载力的极限承载力均能确定,且满足极差不超过平均值的30%,取其平均值作为单桩竖向抗压极限承载力,单桩竖向抗压承载力特征值按极限承载力的一半取值为477 kN,小于设计单桩竖向抗压承载力特征值773 kN。

CFG桩复合地基静载试验抽检6个点,承压板为直径1365 mm圆形钢板(相当于单桩处理面积),最大加载量取设计复合地基承载力特征值的2倍(约为1098 kPa),加荷分级为8级,每级加载量为138 kPa。复合地基静载试验压力-沉降(P-s)曲线见图4,静载试验成果见表3。

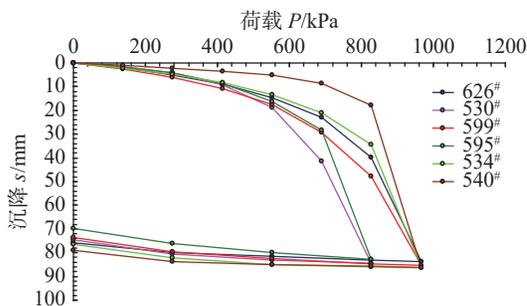


图4 复合地基静载试验压力-沉降(P-s)曲线

由图4可以看出,6个试验点在尚未加至最大荷载时P-s曲线均已出现陡降段,且承压板累计沉降量

表3 复合地基静载试验成果表

桩号	最大加载量/kPa	最大沉降/mm	最大回弹量/mm	极限承载力/kPa	平均极限承载力/kPa	承载力特征值/kPa
626#	966	83.85	8.01	828		
530#	828	84.47	9.94	690		
599#	966	85.38	11.89	828	782	391
595#	966	86.46	9.88	828		
534#	966	86.42	7.38	828		
540#	828	79.23	7.51	690		

超过承压板直径的6%,表明6个试验点复合地基已达到极限状态,终止加载。由表3可知,626#、599#、595#、534#桩复合地基最大加载量为966 kPa,极限承载力为828 kPa,530#、540#桩复合地基最大加载量为828 kPa,极限承载力为690 kPa,累计沉降量为79.23~86.46 mm,最大回弹量7.38~11.89 mm。复合地基的极限承载力均能确定,且满足极差不超过平均值的30%,取其平均值作为复合地基极限承载力,复合地基承载力特征值按极限承载力的一半取值为391 kPa,小于设计复合地基承载力特征值549 kPa。

通过静载试验可知,本场地6组单桩和6组复合地基承载力特征值均不满足设计要求。

## 2.2 完整性及强度检测

现场抽选145根CFG桩进行低应变检测,经检测分析,共有42根为Ⅲ、Ⅳ类桩。根据规范要求,在未检桩中继续扩大检测。低应变检测桩共551根,其中Ⅰ类桩64根,占检测总数的11.6%,Ⅱ类桩155根,占检测总数的28.1%,Ⅲ类桩241根,占检测总数的43.7%,Ⅳ类桩91根,占检测总数的16.5%。桩身缺陷主要分布在桩顶下5 m范围内,以浅部缺陷为主。

现场抽检5根CFG桩做完整性对比检测,检测桩号依次为357#、359#、462#、464#、470#。通过低应变法和钻芯法进行桩身完整性检测,低应变法属于间接检测方法,钻芯法<sup>[8]</sup>属于直观检测方法。钻芯取样进行抗压强度检测,桩身上、中、下部取三组芯样做抗压试验,进一步分析桩身强度是否能达到设计要求。

由图5可知,357#桩低应变法检测完整性类别为Ⅰ类。钻芯法芯样显示0.0~11.6 m混凝土芯样连续,岩芯呈柱状,表面较光滑,局部见直径0.5~1.5 cm的沟槽、小气孔、空洞,断口吻合,混凝土胶结较好,11.6~13.5 m混凝土芯样连续性较差,岩芯呈短柱状、块状,表面粗糙,蜂窝麻面夹泥砂,断口不吻合,胶结较差,钻芯倾斜偏出桩身。钻芯法完整性类别为Ⅲ类。

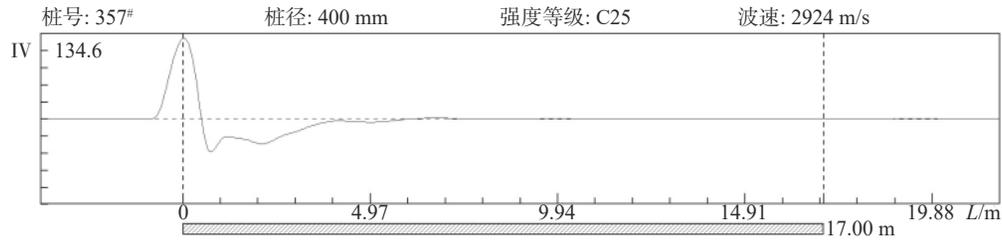


图5 357#桩时域信号曲线图

357#桩三组芯样抗压强度平均值分别为: 20.70 MPa、17.40 MPa、19.28 MPa, 桩身强度代表值取 17.40 MPa。

由图6可知, 359#桩低应变法检测桩身在 2.2 m、3.8 m 有轻微缺陷, 桩头信号显示为缩径, 桩底有轻微反射信号, 完整性类别为Ⅱ类。钻芯法芯样显示

0.0 ~ 8.9 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面粗糙, 蜂窝麻面较重, 断口吻合, 混凝土胶结较好, 8.9 ~ 16.3 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面粗糙, 蜂窝麻面较严重, 沟槽直径大于 3 cm, 沟槽内夹泥严重, 断口不吻合, 胶结较差, 钻芯钻至桩底, 桩长为 16.3 m。钻芯法完整性类别为Ⅳ类。

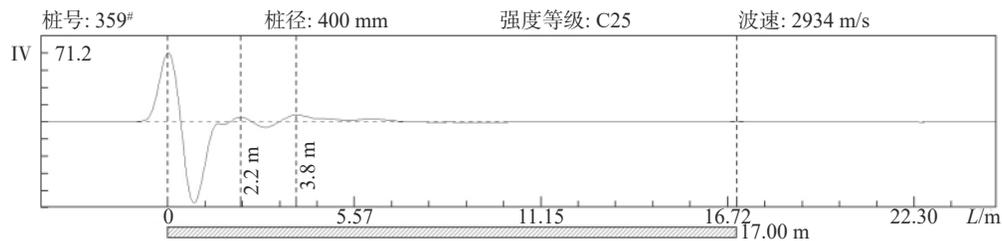


图6 359#桩时域信号曲线图

359#桩三组芯样抗压强度平均值分别为: 22.26 MPa、25.67 MPa、29.50 MPa, 桩身强度代表值取 22.26 MPa。

由图7可知, 462#桩低应变法检测桩身在 1.7 m、4.1 m、6.1 m 有轻微缺陷, 桩头信号显示为缩径, 桩底有轻微反射信号, 完整性类别为Ⅱ类。钻芯法芯样显示 0.0 ~ 5.7 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面较光滑, 见直径为 0.5 ~ 2.5 cm 的气孔、空洞, 断口

吻合, 混凝土胶结较好, 5.7 ~ 15.8 m 混凝土芯样连续性较差, 岩芯呈短柱状, 表面粗糙, 蜂窝麻面较严重, 沟槽直径大于 4 cm, 沟槽内夹泥严重, 断口不吻合, 胶结较差, 出现断桩现象, 钻芯钻至桩底, 桩长为 15.8 m。钻芯法完整性类别为Ⅳ类。

462#桩三组芯样抗压强度平均值分别为: 23.25 MPa、17.60 MPa、19.66 MPa, 桩身强度代表值取 19.66 MPa。

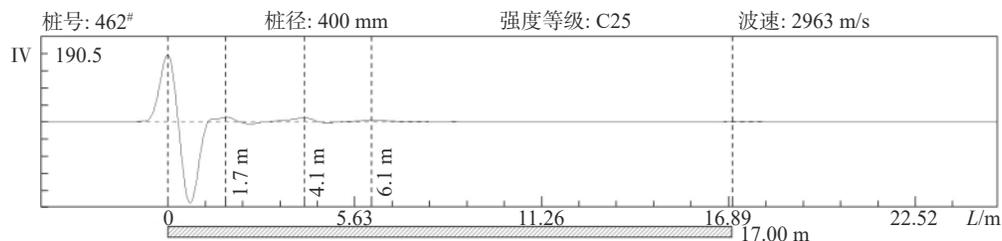


图7 462#桩时域信号曲线图

由图8可知, 464#桩低应变法检测桩身在 3.2 m 有缺陷, 桩底未见反射信号, 完整性类别为Ⅲ类。钻芯法芯样显示 0.0 ~ 8.6 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面较光滑, 见直径为 0.5 ~ 3.0 cm 的气孔、空洞, 断口吻合, 混凝土胶结较好。8.6 ~ 10.6 m 混凝土芯样连续性较差, 岩芯呈短柱状, 表面粗糙, 蜂窝麻面较严重, 沟槽直径大于 3 cm, 沟槽内夹泥严重, 断口

不吻合, 胶结较差, 钻芯倾斜偏出桩身。钻芯法完整性类别为Ⅲ类。

464#桩三组芯样抗压强度平均值分别为: 21.85 MPa、26.60 MPa、26.74 MPa, 桩身强度代表值取 21.85 MPa。

由图9可知, 470#桩低应变法检测桩身在 1.1 m、3.3 m 有缺陷, 桩底未见反射信号, 完整性类别为

Ⅲ类。钻芯法芯样显示 0.0~3.2 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面较光滑, 见直径为 0.5~2.0 cm 的气孔、空洞, 断口吻合, 混凝土胶结较好。3.2~4.1 m 混凝土芯样连续性较差, 岩芯呈短柱、块状, 表面粗糙, 蜂窝麻面较严重, 沟槽内夹泥严重, 断口不吻合, 胶结较差。4.1~12.9 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面较光滑, 见直径为 0.5~2.5 cm 的气孔、空洞,

断口吻合, 胶结较好。12.9~14.5 m 混凝土芯样连续, 岩芯呈柱状, 表面粗糙夹泥, 见气孔、空洞, 断口吻合性差, 胶结较好, 钻芯偏出未见桩底。钻芯法完整性类别为Ⅳ类。

470#桩三组芯样抗压强度平均值分别为: 16.49 MPa、20.59 MPa、13.74 MPa, 桩身强度代表值取 13.74 MPa。

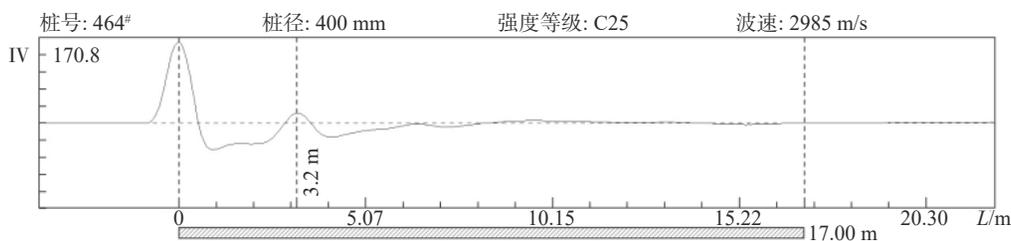


图8 464#桩时域信号曲线图

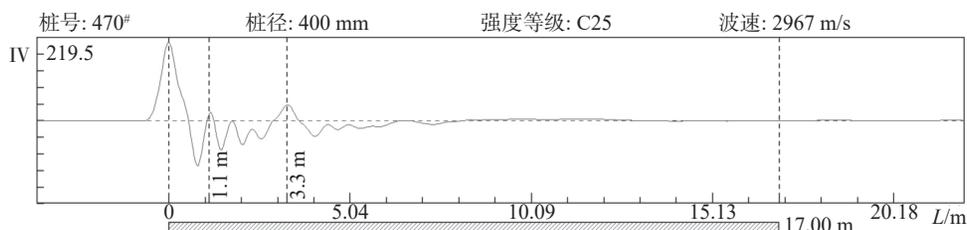


图9 470#桩时域信号曲线图

综合分析, 357#、464#桩身完整性为Ⅲ类, 359#、462#、470#三根桩桩身完整性为Ⅳ类。359#桩长为 16.3 m、462#桩长为 15.8 m, 桩长不满足设计要求; 芯样抗压强度为 13.74~22.26 MPa, 桩身实测强度不满足设计强度要求。

### 3 质量问题分析

通过检测可知, CFG 桩复合地基承载力、桩身完整性、桩身强度均不满足设计要求。经调查与综合分析, 造成桩身质量缺陷的主要原因是由于 CFG 桩成桩过程中提钻速度与混凝土泵送压灌速度不匹配, 提钻速度过快导致混凝土灌注不连续, 出现离析, 在孔壁水土压力作用下出现缩径、塌孔, 并产生桩身夹泥现象, 致使桩身存在缺陷, 桩体材料强度达不到设计要求。

### 4 加固后检测

针对 CFG 桩复合地基承载力不足, 采用高压旋喷桩<sup>[9]</sup>对 CFG 桩复合地基进行了补强加固。旋喷桩设计桩径  $\phi 500$  mm, 有效桩长 14.0 m, 三角形布桩, 桩间距 1.3 m, 总设计桩数 687 根。加固后的桩位布置见图 10。

复合地基补强加固完成后, 抽选 4 个点进行静

载试验, 承压板为直径 1365 mm 圆形钢板(相当于单桩处理面积, 见图 10), 加荷分级为 8 级, 每级加载量为 138 kPa, 复合地基静载试验压力-沉降( $P-s$ )曲线见图 11。4 个试验点的压力-沉降( $P-s$ )曲线最大加载量为 1104 kPa, 累计沉降量为 18.38~27.57 mm, 最大回弹量 4.50~7.62 mm。曲线为平缓的光滑曲线, 相对变形值 0.01 $b$ (13.95 mm)对应的压力值均大于最大试验荷载的一半(552 kPa), 因此复合地基承载力特征值取为 552 kPa, 满足设计要求。

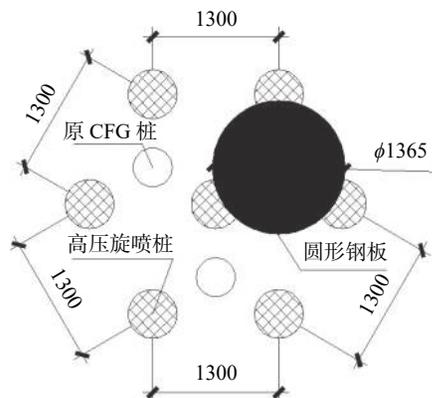
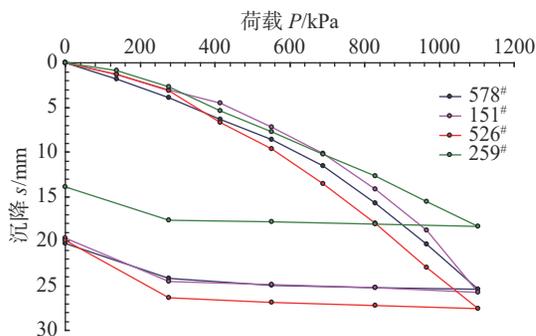


图10 高压旋喷桩与CFG桩桩位布置

图 11 复合地基静载试验压力-沉降( $P-s$ )曲线

## 5 加固后沉降观测

主体结构施工期间,对建筑物进行了加密沉降观测,施工期间观测 1 次/层,主体封顶后观测 1 次/月。建筑物沉降观测曲线见图 12,建筑物沉降等值线图见图 13。

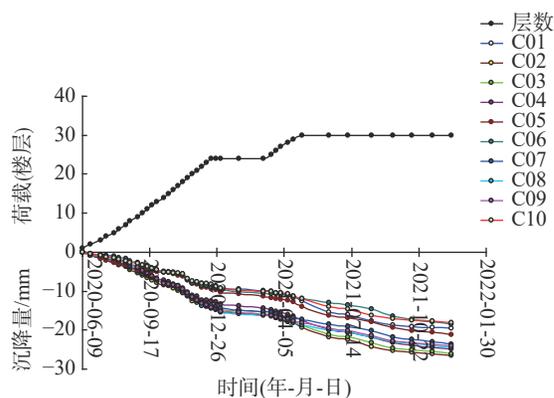


图 12 建筑物沉降观测曲线图

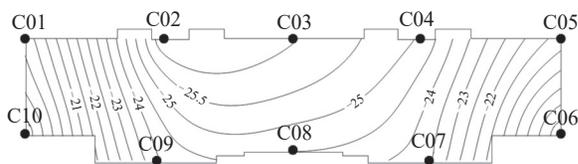


图 13 建筑物沉降等值线图(单位:mm)

由图 12 和图 13 可知,建筑物累计沉降量为 18.11~26.44 mm,最大沉降量点号 C02,最小沉降量点号 C10,最大沉降差为 8.33 mm,通过最大沉降差计算出基础倾斜度为 0.00038,最后 100 d 的最大沉降速率为 0.034 mm/d。本工程主体建筑高度 89.9 m,整体倾斜值和最后 100 d 沉降速率均满足《建筑变形测量规范》<sup>[10]</sup>相关要求。

## 6 结论

(1)静载试验结果表明,该工程 CFG 桩复合地基

单桩承载力和复合地基承载力均达不到设计要求;低应变法和钻芯法检测表明,CFG 桩完整性差,桩身下部芯样不连续,存在夹泥现象,桩身强度达不到设计要求。

(2)造成桩身质量缺陷的主要原因是 CFG 桩灌注成桩过程中提钻速度与混凝土泵送压灌速度不匹配,提钻速度过快导致混凝土灌注不连续,出现离析,在孔壁水土压力作用下出现缩径、塌孔,并产生桩身夹泥现象,致使桩身存在缺陷,桩体材料强度达不到设计要求。建议 CFG 桩施工做好桩身混合料调度,避免灌注过程中出现等料、堵管等问题,并严格按照施工规程控制提钻速度,使之与混合料压灌速度匹配,确保灌注的连续性。

(3)采用高压旋喷桩对 CFG 桩复合地基进行补强加固,补强加固后的复合地基检测结果显示,经补强后的复合地基承载力满足设计要求,建筑物沉降观测结果表明,建筑最大沉降量与整体倾斜值均满足设计与相关规范要求。

## 参考文献

- [1] 曹江涛. 某工程 CFG 桩复合地基质量问题分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(11): 32-35.
- [2] 付宏. 某工程 CFG 桩复合地基承载力不足原因分析及检测[J]. 山西建筑, 2016, 42(29): 61-62.
- [3] 葛岩, 潘卫东, 冯远景. CFG 桩复合地基承载力的试验研究[J]. 路基工程, 2008, (5): 105-107.
- [4] 石少敏, 刘军林. 载荷试验计算两层土复合地基变形模量[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(6): 304-307.
- [5] 林道俊, 刘济鹏, 韩彦芳. 初探低应变反射波法在桩基检测中的实践[J]. 岩土工程技术, 2013, 27(6): 288-291.
- [6] 张金铃. 基桩低应变检测缺陷程度的定量分析方法[J]. 西部探矿工程, 2006, (1): 22-25.
- [7] JGJ 340—2015 建筑地基检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [8] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [9] 王勃, 行小盈. 高压旋喷桩单桩承载力分析[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(1): 48-52.
- [10] JGJ 8—2016 建筑变形测量规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

收稿日期: 2022-04-02