

CFG桩复合地基在数据中心结构 设计中应用分析

Application Analysis of CFG Pipes Composite Foundation in Data Center Structure Design

卢振永¹, 禹光², 关磊², 张琪² (1. 中国联通上海分公司, 上海 200080; 2. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048)
Lu Zhenyong¹, Yu Guang², Guan Lei², Zhang Qi² (1. China Unicom Shanghai Branch, Shanghai 200080, China; 2. China Information
Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

摘要:

结合数据中心建筑实例, 论述在场地适用条件下, 对数据中心结构进行CFG桩复合地基设计的关键点。在规范公式的基础上, 提高设计安全度, 重视下卧层复核, 严格控制绝对沉降值, 从严要求框架结构沉降差。同时分析CFG桩复合地基工期特点, 该地基有利于缩短数据中心建设工期。

关键词:

数据中心; CFG桩; 复合地基; 下卧层; 沉降

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.04.018

文章编号: 1007-3043(2023)04-0086-07

中图分类号: TU248.7

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Based on the example of data center building, it analyzes the key points of designing CFG pipes composite foundation for data center structure under the applicable conditions of the site. On the basis of standardized formula, it improves the design safety, attaches importance to the review of the substratum of composite foundation, strictly controls the absolute settlement value and differential settlement. Meanwhile, it analyzes the characteristics of the construction period of the CFG pipes composite foundation, and the CFG pipes composite foundation is beneficial to shorten the construction period of data center.

Keywords:

Data center; CFG pipes; Composite foundation; Substratum; Settlement

引用格式: 卢振永, 禹光, 关磊, 等. CFG桩复合地基在数据中心结构设计中应用分析[J]. 邮电设计技术, 2023(4): 86-92.

1 研究数据中心结构基础工程的必要性

随着国家数字经济和数据产业的发展以及国家政策对5G和数据中心等新基建的大力支持, 数据中心投资额和建设量迅猛增加。在数据中心的建设成本中, 电源和空调系统的占比超过60%, 房屋结构要承载较重的设备荷载并保证重要性级别, 数据中心结构单位造价相对较高。因此, 研究数据中心结构设计方案对安全性、使用扩展性及经济性意义重大。

在新建数据中心园区项目中, 根据出柜率和平面

功能要求, 采用框架结构类型的房屋建筑占比超过95%, 其楼面均布活荷载10 kN/m²以上, 导致框架柱底部竖向受压荷载大。在基础类型方面, 大部分采用桩基础型式, 桩基承载力高, 建筑物总体沉降量和沉降差小, 但桩基础施工造价高、灌注桩工期较长。

我国幅员辽阔, 北方地区气候寒冷时间长, 电力资源相对丰富, 非常适宜布局数据中心园区, 可以降低PUE值, 因此京津冀、内蒙古、宁夏等省份已经布局大量数据中心园区。针对北方地区的土质情况, 因地制宜, 采用安全、经济、施工速度快的基础方案, 对数据中心的建设有较好效益。一方面可降低土建投资、节约资源, 另一方面符合数据中心快速建成投产、降

收稿日期: 2023-02-20

低时间成本的目标。

本文以某省实际项目为例,研究CFG桩复合地基在数据中心项目中应用时的设计理论和方法。该地区以粉土、粉质黏土、砂土为主,持力层天然地基承载力在110~140 kPa,CFG桩施工后复合地基承载力可达到400 kPa,采用独立基础或筏板基础可满足数据中心的使用要求。该技术在民用建筑中应用成熟,具有造价低、施工工期短、适用性强等优点,在数据中心园区项目应用此技术具有较高经济价值。

2 CFG桩复合地基的工程特性

2.1 作用机理

水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和形成的高黏结强度桩,需要在基础和桩顶之间设置一定厚度的褥垫层,保证桩、土共同承担荷载形成复合地基。

2.2 适用范围

CFG复合地基具有承载力提高幅度大、地基变形小等特点,并具有较大的适用范围,适用的基础形式既可为条基、独立基础,也可为筏板基础。CFG复合地基用于处理黏性土、粉土、砂土和已自重固结的素填土等地基,桩体具有施工简单、噪声低、污染小、沉降变形小、造价低、承载力大幅提高、社会和经济效益明显等优点,被广泛用于建筑物地基处理和加固工程中。

2.3 CFG桩复合地基承载力提高幅度大

CFG桩径范围为0.4~0.6 m,桩长范围从几米到二十多米,桩侧阻力可充分发挥作用,桩承担的荷载占比在55%以上,并根据桩承载力和置换率调整复合地基承载力范围,目前复合地基承载力可达到450 kPa以上。CFG桩复合地基不仅可用于承载力较低的土壤,对承载力较高($f_{sk}=200$ kPa)的地基,若其变形不能满足设计要求,也可采用CFG桩进行加固,减少地基变形。

2.4 CFG桩施工工期

数据中心建设属于重资产投资,建设方对缩短建设工期十分关注,CFG桩复合地基施工工期相对较短,符合建设目标。

3 数据中心结构CFG桩复合地基设计要求

数据中心结构要满足工艺使用要求,柱底竖向总荷载大,且机房内装机时间不确定导致荷载变动幅度

宽,地基承载力要有余量,总沉降量小,沉降差小于规范限值。因此,对于CFG桩复合地基在数据中心结构设计中的应用,应从复合地基承载力计算、软弱下卧层计算、沉降计算、试桩及质量检验等方面重点分析并明确关键参数。

3.1 CFG桩复合地基承载力特征值估算

CFG桩复合地基承载力特征值估算方法应按式(1)计算。

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

其中, λ 是单桩承载力发挥系数,按当地经验取值,无经验时可取0.8~0.9,厚径比小时取大值; β 是桩间土承载力发挥系数,按当地经验取值,无经验时可取0.9~1.0,厚径比大时取大值; f_{sk} 是处理后桩间土承载力特征值(kPa),应按静载荷试验确定,无试验资料时对CFG桩(非挤土成桩)取天然地基承载力特征值; R_a 、 m 值详见规范规定。CFG桩厚径比定义为褥垫层厚度和桩径之比,取0.4~0.6倍桩径时,桩和桩间土承载力均发挥充分。

复合地基承载力可以做深度修正,基础埋深越大,深度修正数量越大,桩承受的竖向荷载越大,设计的桩体强度应越高。因此,有黏结强度复合地基增强体桩身强度应满足式(2)。

$$f_{cu} \geq 4 \times \lambda \times \frac{R_a}{A_p} \left[1 + \frac{\gamma_m(d - 0.5)}{f_{spa}} \right] \quad (2)$$

其中, f_{cu} 、 γ_m 、 d 、 f_{spa} 值详见规范规定。

3.2 软弱下卧层计算

数据中心建筑重要性高,CFG桩复合设计应重视软弱下卧层计算,确保复合地基承载力值达到设计要求。

下卧层是指结构基础持力层以下,并处于压缩层范围内各层地基土。持力层下存在容许承载力小于持力层容许承载力的土层,该土层成为软弱下卧层。

《建筑地基基础设计规范》(GB50007)中对天然地基和桩基础的软弱下卧层验算做出了详细的规定,而《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2012)中未涉及CFG桩复合地基软弱下卧层强度的验算。CFG桩复合地基作为天然地基和桩基础间的一种地基类型,其软弱下卧层的判断和下卧层强度的验算需要结合两者受力机理,按以下2个步骤考虑。

第1步:将桩与桩间土视作实体基础,桩端持力层作为实体基础的持力层,以桩端持力层为下卧层进行

强度计算。

第2步:《桩基》第5.4.1条中明确规定只有当软弱下卧层承载力低于持力层的1/3时才进行软弱下卧层验算。对于CFG桩复合地基,考虑到复合地基桩间土的分担作用,CFG桩端对持力层反力低于桩基础,因此可参考此条规定判断桩端土层以下是否存在软弱下卧层。

CFG桩复合地基作用原理是在基础荷载作用下,利用桩与桩身范围内土体共同受力,附加应力会被传递到基础底面以下较深的土体中。因此,可将桩与桩间土视作实体基础,桩端持力层作为实体基础的持力层,按群桩作用原理进行下卧层地基强度验算。

考虑到复合地基承载力提高较多,同时需要对复合地基进行深度修正,该值远大于桩端持力层天然地基承载力,因此,须对桩端持力层进行地基承载力强度验算。JGJ79-2012关于软弱下卧层的计算执行GB50007第5.2.7条公式:

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (3)$$

p_z, p_{cz}, f_{az} 值详见规范规定。

关于 p_z 的计算,规范中并未提供复合地基的应力扩算模型及参数,但扩算模型和参数决定了软弱下卧层顶面的附加净反力,并最终决定了CFG桩长度和持力层的选择。CFG桩复合地基分层构造剖面如图1所示。

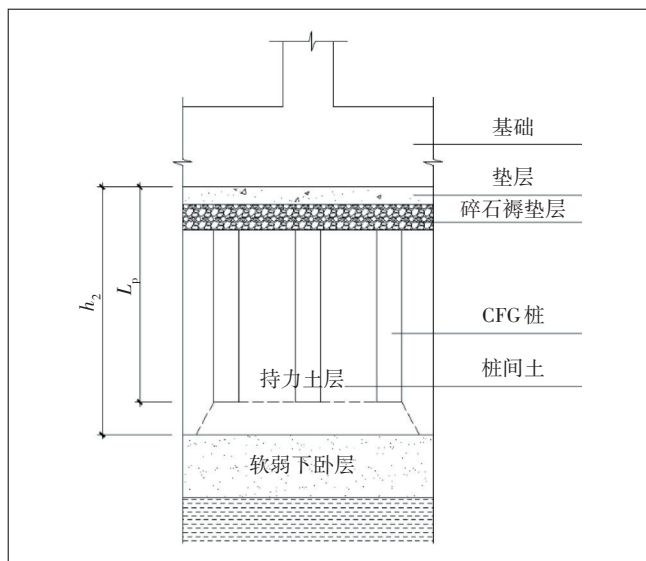


图1 CFG桩复合地基分层构造剖面

按群桩作用原理进行持力层地基强度验算,可采取桩身范围内考虑应力扩散和不考虑应力扩散2种模

型。考虑扩散时,根据GB50007实体深基础计算桩基沉降,扩散角取桩身范围内各土层内摩擦角加权平均值 φ 的1/4。考虑到数据中心重要性,宜按照不考虑桩身范围内的应力扩散,摩擦角取 0° 进行计算。 f_{az} 的计算应考虑桩端持力层承载力的深度修正,深度修正系数依据该土层性质取值;对比结果应满足GB50007第5.2.7条规定。

针对第2步验算,需先进行指标判定,若存在软弱下卧层,则按GB50007第5.2.7条执行,桩端至软弱下卧层顶之间土体压力扩散角按规范中表5.2.7执行。

3.3 复合地基沉降计算和沉降观测

CFG桩应选择承载力和压缩模量相对较高的土层作为桩端持力层。CFG桩地基变形计算采用国家标准GB50007中的规定算法,其中复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的 ζ 倍,复合地基的沉降计算经验系数 ψ_s 按照JGJ79-2012的规定执行, ζ 值与桩顶土层的承载力提高系数一致。

CFG桩复合地基在上覆荷载的条件下导致桩土共同加固区产生压缩量以及下卧层持力产生压缩量,其中下卧层压缩量占主要部分。下卧层压缩量主要是由桩体对下卧层的刺入量以及下卧层受压沉降量构成。很多计算方法都是将下卧层附加应力看作是均布应力,等效作用面位于桩端平面,计算下卧层使用分层总和法。因此复合地基变形计算执行国家标准GB50007的有关规定,地基变形计算深度应大于复合土层的深度。

根据GB50007中第5.3.5条规定的计算公式,对CFG桩复合地基变形进行计算,最终变形量可按式(4)计算。

$$s = \psi_s \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{P_0}{\zeta E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \right] \quad (4)$$

其中, ψ_s 是沉降计算经验系数; ζ 是加固区土的模量提高系数,它取值为复合地基承载力特征值与基础底面天然地基承载力特征值之比;其他值详见规范计算规定。

对于数据中心结构地基处理后的地基沉降,要求建筑物平均沉降量 ≤ 80 mm,整体倾斜值小于0.003。根据工程经验,数据中心结构CFG桩复合地基承载力为300~400 kPa时,可采用独立基础;CFG桩复合地基承载力不足300 kPa时,可采用筏板基础,控制总体沉

降和沉降差。

经地基处理后的建筑物在施工期间和使用期间应由具有相应资质的测量单位进行沉降观测,沉降观测终止时间应符合设计要求,或按国家现行标准《工程测量规范》(GB50026-2007)和《建筑变形测量规范》(JGJ8-2016)的有关规定执行。

3.4 试桩及质量检验

数据中心建筑重要性高,框架柱轴向荷载较大,复合地基基础设计时要重视通过非工程桩试桩及施工后工程桩静载荷试验,确定单桩竖向承载力。

3.4.1 非工程桩试桩

数据中心项目CFG桩施工前应进行非工程桩试桩静载荷试验和复合地基载荷试验,一是可以取得一定的施工控制参数,以便CFG桩施工质量更有保证;二是可以校核计算值和试验结果,以便设计人员确定合理的承载力,避免失误和不必要的浪费。

同一条件下非工程桩试桩及检测数量应取总桩数的1.0%,且不少于3个点。

3.4.2 质量检验

数据中心复合地基施工后需要进行质量检验,包含复合地基承载力检验以及桩身质量和竖向承载力检验。

复合地基载荷试验在成桩施工结束28天后进行,桩身强度需达到设计要求。首先应采用低应变动力试验检测桩身完整性,检查数量不少于总桩数的20%,检验桩身完整性的低应变测桩要求位置分散、均匀,

每个柱下基础检测桩数不应少于1根,对成桩可靠性差的应按100%检测。其次进行复合地基载荷试验和单桩竖向承载力载荷试验,检测数量应为总桩数的0.5%~1.0%,且不少于3个点。

4 案例分析

以某数据中心园区项目为例,该数据中心楼地上5层,无地下室,平面轮廓尺寸为99.6 m×60.5 m,单层建筑面积约为5 800 m²;结构型式为钢筋混凝土框架结构,地基基础采用CFG桩复合地基+独立基础。基础底面处平均压力标准值约400.00 kN/m²。某案例场地土层物理力学统计指标如表1所示,场地典型地质剖面 and 柱状图分别如图2和图3所示。

基础底持力层为第②层粉土层,其承载力特征值取低值110 kPa,基础埋深为2.9 m(相对于室内正负0.00),室内外高差为0.6 m。桩径为0.4 m,矩形布桩,桩距为1.4 m,有效桩长取22.5 m,桩端持力层为第⑥层粉质黏土层,其承载力特征值为140 kPa;褥垫层厚度为0.2 m,厚径比为0.5。单桩承载力发挥系数取大值0.9,桩间土承载力发挥系数取小值0.9。

根据第3章的设计要求,计算地基的承载力特征值、下卧层验算和沉降计算,根据计算的实际桩数量进行不同基础方案的对比分析,具体如下。

a) 根据孔点土体剖面图,计算CFG单桩承载力特征值为737 kN。

b) 根据本文列出的规范公式,满足C25桩身强度

表1 某案例场地土层物理力学统计指标

地层	地基承载力特征值/kPa	土层平均厚度/m	CFG桩		三轴剪标准值		压缩模量段			
			极限侧阻力 q_{sik} /kPa	极限端阻力 q_{pk} /kPa	c_{un} /kPa	$\Phi_{un}/^\circ$	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa	$E_{s0.2-0.3}$ /MPa	$E_{s0.3-0.4}$ /MPa	$E_{s0.4-0.5}$ /MPa
耕土①层	-	0.74	-	-	(5)	(9)	(4)	-	-	-
素填土① ₁ 层	-	0.66	20	-	(6)	(11)	(4)	-	-	-
粉土②层	120	6.82	50	-	6.2	12.9	7.74	-	-	-
粉质黏土② ₁ 层	110	1.33	45	-	15.0	8.0	(5.95)	-	-	-
粉砂② ₂ 层	150	0.94	50	-	(0)	(18)	(15)			
粉质黏土③层	130	4.94	50	-	17.7	6.6	5.38	8.74	-	-
粉质黏土④层	130	2.62	45	-	18.0	6.5	5.57	9.06	-	-
粉土④ ₁ 层	140	1.77	48	-	(6)	(11)	7.16	11.37	-	-
细砂⑤层	160	1.86	50	-	(0)	(20)	(18)			
粉质黏土⑥层	140	5.46	52	600	16.7	6.7	5.48	8.76	13.42	-
细砂⑦层	170	3.42	60	1 000	(0)	(20)	(20)			
粉质黏土⑦ ₁ 层	140	1.67	50	650	(15)	(7)	(5)	-	(12.52)	-
粉质黏土⑧层	150	2.83	50	650	16.5	6.5	5.43	-	13.82	17.97
细砂⑨层	180	3.94	65	1 200	(0)	(20)	(22)			

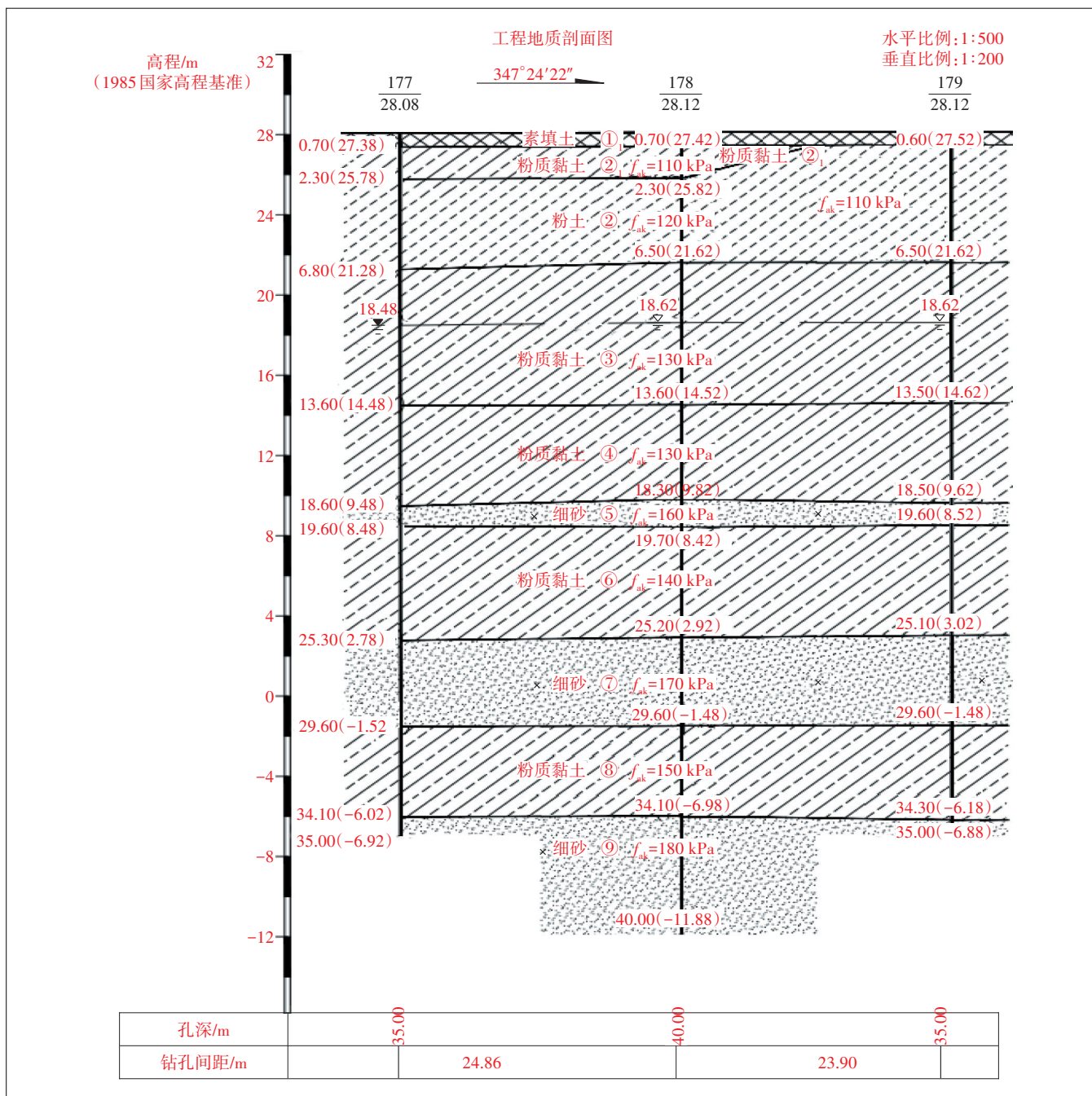


图2 场地典型地质剖面

倒推,单桩承载力特征值为783 kN。

c) 最终单桩承载力特征值考虑折减系数0.9,取660 kN。

d) 根据计算复合地基承载力特征值理论值为390 kPa,实际取值380 kPa。

e) 下卧层验算,对第⑥层粉质黏土层(桩端处土层)进行验算,具体如表2所示。

f) 沉降计算。计算沉降时,压缩模量提高系数 $\zeta=$

$380/120=3.16$,基底平均附加压力 $P_0=400-20\times 2.9=342$ kPa。计算得该建筑物最大变形量(考虑经验系数修正后)约为29.5 mm,沉降计算满足要求。

根据本项目场地条件,选择可行的基础方案,即CFG桩复合地基和预应力管桩基础,首先对这2种方案进行造价对比,其次进行施工工期对比。

本地块复合地基用桩为CFG桩,为长螺丝钻孔灌注桩,场地地下水位在距地面20 m深度范围,采用此

表2 下卧层承载力计算表

序号	输入输出参数	计算公式	数值与结论
1	下卧层承载力特征值 f_{ak} /kPa	-	140
2	扩散角 $\theta/^\circ$	-	0
3	桩端深度修正系数 η_d	-	1.6
4	桩端宽度修正系数 η_b	-	0.3
5	复合地基经修正后的承载力特征值 f_{ak} /kPa	$f_{sp,k} + \eta_b \times \gamma (b-3) + \eta_d \times \gamma_m \times (d-0.5)$	416.00
6	桩端处天然土附加压力值 p_z /kPa	$lb(p-p_c)/(b+2ztg\theta)/(l+2ztg\theta)$	358.00
7	桩端处天然土自重压力值 p_{cz} /kPa	$(L_p+d) \times \gamma$	502.69
8	桩端处天然土总应力 $p_z + p_{cz}$ /kPa	$p_z + p_{cz}$	860.69
9	下卧层经深度修正后的承载力特征值 f_{az} /kPa	$f_{ak} + \eta_d \times \gamma_m \times (d-0.5)$	909.47
10	f_{az} 与 $p_z + p_{cz}$ 比较结果	-	该下卧层强度满足要求

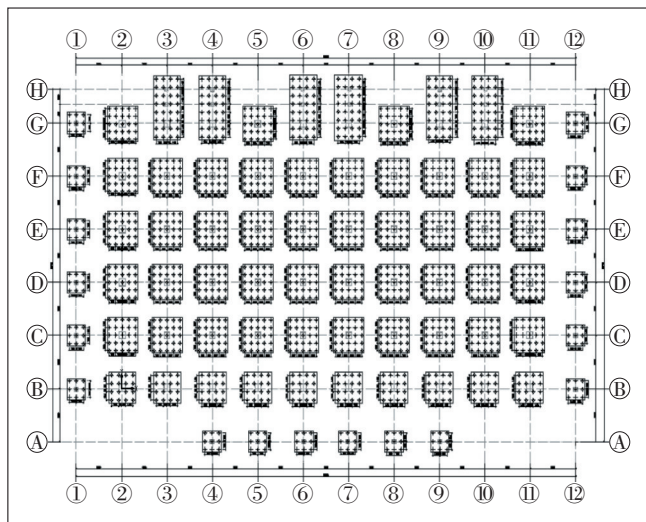


图4 CFG桩平面布置图

表3 造价对比分析(金额不含税)

方案	工程量	单价	总价/万元	
CFG桩复合地基	桩径400mm	22.5×1616=36360m	88~100元/m	320~364
	褥垫层	3300×0.2=660m ³	150~200元/m ³	9.9~13.2
预应力管桩, 桩径600mm	22.5×800=18000m	330~370元/m	594~666	

度快,基本可与静压预应力管桩施工时间一致,桩施工工期控制在30天以内;但CFG桩身混凝土需养护28天,之后进行截桩、静载试验等系列检测验收;而本场地条件下管桩施工后休止10~15天,之后可开展静

载试验等系列检测验收。两者对比,管桩基础方案工期占优,CFG桩因混凝土养护时间长存在工期增加约15天的劣势,但相对灌注桩基础方案仍具有施工工期短的优势。

综上所述,在类似本工程场地的条件下,CFG桩复合地基造价优势明显,在工期整体可控的前提下,可优先选择CFG桩复合地基。

5 研究意义

本文结合实际工程,详细论述了CFG桩复合地基技术在数据中心结构设计中的应用,结合CFG桩复合地基设计要点和数据中心建筑特点,进行针对性分析,拓宽数据中心结构应用的地基基础类型。对于适宜地区,CFG桩复合地基技术可降低土建投资,加快建设工期,利于数据中心园区投资效益,支撑产业发展。

CFG桩复合地基对数据中心建设的意义如下。

a) 基础工期相对较短,同时节约基础投资,对于园区型数据中心项目,能取得良好的经济效益。

b) 安全性高,降低沉降和沉降差。在北方地区采用此地基处理形式,非常适合数据中心项目建设;因此研究此文有利于提高通信建筑设计经验,保障结构安全,并推广CFG桩复合地基处理在数据中心建筑中的应用。

c) 考虑到数据中心建设的重要性,CFG桩复合地基设计时应注意下卧层的核算及桩间土承载力的选择。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 滕延京. 建筑地基处理技术规范理解与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

作者简介:

卢振永, 毕业于浙江大学, 高级工程师, 硕士, 主要从事通信机房楼、数据中心建筑结构设计及建设管理工作; 禹光, 毕业于同济大学, 高级工程师, 学士, 主要从事通信机房楼、数据中心建筑结构设计及科研工作; 关磊, 毕业于武汉水利水电学院, 高级工程师, 主要从事通信机房楼、数据中心建筑结构设计及科研工作; 张琪, 毕业于郑州工业大学, 高级工程师, 主要从事通信机房楼、数据中心园区规划与建筑设计工作。