

碎石桩-CFG 桩组合型复合地基 设计理论与工程实践

王贵和 季荣生 马孝春
(中国地质大学(北京),北京 100083)

【摘要】 结合具体工程实例,对碎石桩-CFG 桩组合型复合地基的应用和设计计算方法进行了分析,提出了合理的计算方法。

【关键词】 组合型复合地基;承载力特征值;复合模量;变形计算

【中图分类号】 TU 472

Theory and Application of Composite Foundation With Gravel Pile and CFG Pile

Wang Guihe Ji Rongsheng Ma Xiaochun

(China University of Geosciences (Beijing), Beijing 10083 China)

【Abstract】 The application and the design calculation methods of composite foundation with gravel pile and CFG pile based on engineering practice are analyzed, and the rational calculation methods are presented.

【Key Words】 combined composite foundation; characteristic of bearing capacity; composite modulus; deformation calculation

0 引言

随着复合地基技术的发展和完善,工程实践中由两种或两种以上的桩型组成的复合地基得到越来越广泛的应用。由不同桩型(或同种类型而长度不同)组成的复合地基称为多桩型复合地基、组合型复合地基或多元复合地基。组合型复合地基结合单一桩体复合地基特长,达到强度和变形的协调、经济和技术的有机统一,发挥出巨大的优越性,但组合型复合地基中受力机理、地基承载力和变形的计算还有待进一步研究和工程实践^[1-6]。本文就具体碎石桩-CFG 桩组合型复合地基工程实例进行探讨分析。

1 碎石桩-CFG 桩组合型复合地基的设计理论

碎石桩-CFG 桩复合地基的工程应用一般存在两种情况。①当复合地基承载力相对天然地基土提高幅度较大时,碎石桩的设置主要是消除地基液化,而地基承载力的提高和变形控制则由 CFG 桩承担,碎石桩起辅助作用;②当复合地基承载力相对天然地基土提高幅度不大时,碎石桩的设置除消除地基液化外对地基承载力起主要作用,CFG 桩的设置一般布置在节点或荷载较大的承重墙下,主要是控制变形。

1.1 碎石桩-CFG 桩组合型复合地基的承载力计算

1) 第一种情况复合地基承载力计算

目前关于第一种情况复合地基承载力计算有以下 2 种计算方法。第一种计算方法[式(1)]是先由天然地基和碎石桩复合形成复合地基,视为一种新的等效天然地基,然后再和 CFG 桩复合形成碎石桩-CFG 桩组合型复合地基。第二种方法[式(2)]是先确定 CFG 桩、碎石桩和桩间土的承载力特征值,然后将桩体和桩间土同时按面积加权叠加。

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_a}{A_p} + \alpha(1 - m_1) \times [m_2 f_{pk} + \beta_1(1 - m_2) f_{sk}] \quad (1)$$

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_a}{A_p} + \beta_2 m_2 f_{pk} + \beta_1(1 - m_1 - m_2) f_{sk} \quad (2)$$

式中: f_{spk} 为组合型复合地基承载力特征值, kPa; α 、 β_1 、 β_2 为碎石桩复合地基承载力、桩间土强度、碎石桩承载力发挥系数,一般小于 1,可根据工程重要性、变形要求取值并考虑土层条件和施工因素; f_{pk} 为碎石桩承载力特征值, kPa; f_{sk} 为桩间土承载力特征值, kPa; m_1 、 m_2 为 CFG 桩、碎石桩面积置换率; R_a 为 CFG 桩承载力特征值, kN; A_p 为 CFG 桩截面

积, m^2 。

以上两种计算方法在工程实际中均得到应用, 但从受力特性考虑, 在刚性基础下组合型复合地基中的 CFG 桩和碎石桩同时达到极限状态的几率很小, 一般 CFG 桩先于碎石桩达到极限状态, 或者说碎石桩的承载力很难完全发挥, 因此笔者认为式(2)的计算方法更为合理, 计算结果更接近工程实际。

2) 第二种情况复合地基承载力计算

由于 CFG 桩桩数很少, 在计算组合型复合地基承载力时可以不考虑其对承载力的贡献, 而是将其承载作用作为安全储备, 计算方法同碎石桩复合地基⁷⁾。

1.2 碎石桩-CFG 桩组合型复合地基的变形计算

1) 第一种情况复合地基变形计算

目前一般采用《地基基础设计规范》(GBJ 5007—2002)方法进行计算⁸⁾, 按天然地基土层和桩端分界面进行分层, 计算公式为

$$s = \Psi_s s' = \Psi_s \left[\sum_{i=1}^{n_1} p_0(z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) / E_{spi} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} p_0(z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) / E_{si} \right] \quad (3)$$

应用式(3)计算组合型复合地基变形的关键是如何确定加固区复合压缩模量。目前关于加固区复合压缩模量一般有 2 种方法。

阎明礼等提出用天然地基土的某个倍数来表示加固区复合压缩模量⁹⁾, 计算公式为

$$E_{spi} = \zeta \cdot E_{si} \quad (4)$$

式中: ζ 为加固区土层模量提高系数, $\zeta = f_{spk} / f_{ak}$, f_{spk} 为组合型复合地基的承载力特征值, kPa, f_{ak} 为天然地基承载力, kPa; E_{si} 为天然地基土层的压缩模量, MPa。

另外一种是用桩和土的模量的叠加来表达组合型复合地基的复合模量⁷⁾, 计算公式为

$$E_{spi} = m_1 E_{p1} + m_2 E_{p2} + (1 - m_1 - m_2) E_{si} \quad (5)$$

式中: E_{p1} 为 CFG 桩的压缩模量, MPa; E_{p2} 为碎石桩的压缩模量, MPa。

式(4)复合模量计算法体现了桩长和地基土(包括桩端土)性质对复合模量的贡献, 因此更符合实际, 且计算方便。式(5)复合模量计算方法只考虑桩体和桩间土对复合模量贡献, 不能体现桩长和桩端土性质的贡献, 且实际工程中 E_{p1} 和 E_{p2} 很难准确确定, 因而计算出的复合模量偏差较大⁹⁾。

若 CFG 桩和碎石桩的桩长不同时, 可分区进行加固区复合模量的计算(见图 1), 采用式(6)进行复合地基变形计算¹⁰⁾。

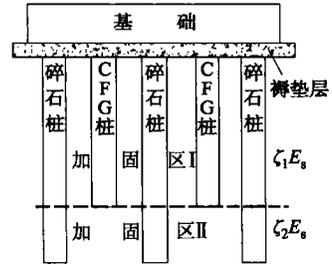


图 1 碎石桩-CFG 桩组合型复合地基示意图

$$s = \Psi_s s' = \Psi_s \left[\sum_{i=1}^{n_1} p_0(z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) / \zeta_1 E_{csi} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} p_0(z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) / \zeta_2 E_{csi} + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} p_0 \times (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) / E_{si} \right] \quad (6)$$

式中: $\zeta_1 = f_{spk1} / f_{ak}$, $\zeta_2 = f_{spk2} / f_{ak}$, f_{spk1} 为组合型复合地基的承载力特征值, kPa, f_{spk2} 为碎石桩复合地基的承载力特征值, kPa, f_{ak} 为天然地基承载力, kPa; E_{si} 为天然地基土层的压缩模量, MPa。

2) 第二种情况复合地基变形计算

采用式(3)计算, 可对地基计算模型进行简化, 不考虑 CFG 桩对复合地基模量的贡献, 但在计算基底附加压力时应扣除 CFG 桩所承担的部分荷载⁷⁾。

2 工程实例

2.1 工程条件

某工程位于北京通州区地区, 拟建物为 9.5~11.5 层剪力墙结构住宅楼, 设一层地下室, 基础埋深 3.0 m。地基处理主要涉及新近沉积的粘质粉土、粉质粘土②层, 砂质粉土②₁层, 细、粉砂②₂层, 细、粉砂③层, 中、细砂④层。地基液化等级为严重。设计除消除液化要求外, 还要求处理后的地基承载力特征值不小于 200 kPa, 建筑物最大沉降小于 50 mm。其典型地层剖面见图 2。地基土层参数见表 1。

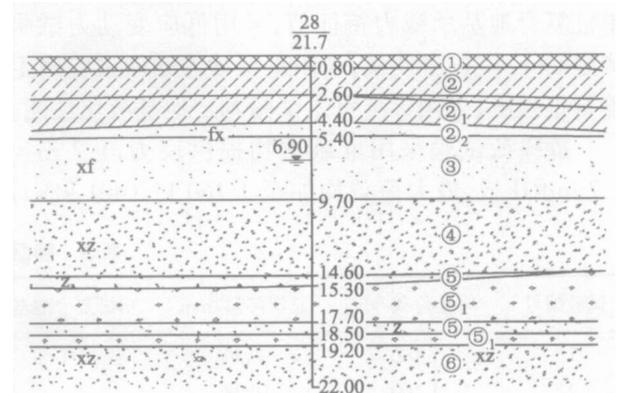


图 2 典型地层剖面图

表1 地基土层参数

土层	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa	承载力特征值 f_{sk}/kPa
②粉质粘土、粘质粉土	19.1	18.3	0.76	8.0	130
② ₁ 砂质粉土	13.0	17.6	0.81	15.5	180
② ₂ 粉、细砂				10.0	110
③细、粉砂				13.0	130
④中、细砂				18.0	160
⑤中砂				35.0	280
⑤ ₁ 圆砾、卵石				60.0	
⑥细、中砂				42.0	

2.2 地基处理方案设计

本工程采用碎石桩-CFG桩复合地基方案。碎石桩桩径800 mm, 桩长9.0 m, 设计单桩承载力特征值 $f_{pk}=550\text{ kPa}$, 面积置换率 $m_2=0.087$, 采用冲打法施工碎石桩以消除地基土的液化; CFG桩桩径410 mm, 桩长6.5 m, 设计单桩承载力特征值 $R_a=275\text{ kN}$, 面积置换率 $m_1=0.023$, 桩身强度C15, CFG桩与碎石桩等间距间隔正方形布置, 桩中心距为1.7 m。先施工碎石桩并进行完液化检测后采用中心压灌法施工CFG桩。设计计算

时,天然地基土承载力特征值取 $f_{sk}=130\text{ kPa}$, $\beta_1=\beta_2=0.95$, 采用式(2)计算得组合型复合地基承载力特征值 $f_{spk}=203\text{ kPa}>200\text{ kPa}$, 符合设计要求。

复合地基的变形计算主要参数取值见表2。基础平面尺寸为 $75\text{ m}\times 16\text{ m}$, 基础底面处的附加压力为 198 kPa 。采用式(6)进行计算机编程计算, 按规范方法确定计算深度和修正系数^[8], 最终计算的复合地基变形量为 26.3 mm , 小于设计要求的 50 mm 。

表2 复合地基变形计算主要参数取值

土层	土层厚度/m	压缩模量 E_s/MPa	ζ_1	ζ_2	$\zeta_1^\circ E_{si}/\text{MPa}$	$\zeta_2^\circ E_{si}/\text{MPa}$
②粉质粘土、粘质粉土	0.8	7.3	1.58		11.53	
② ₁ 砂质粉土	1.5	14.5	1.58		22.91	
② ₂ 粉、细砂	0.9	10.0	1.58		15.80	
③细、粉砂	3.3	13.0	1.58		20.54	
③细、粉砂	1.0	13.0		1.26		16.38
④中、细砂	1.5	18.0		1.26		22.68
④中、细砂层	3.4	35.0				
⑤中砂	0.7	60.0				
⑤ ₁ 圆砾、卵石	2.4	35.0				
⑤中砂	0.8	60.0				
⑤ ₁ 圆砾、卵石	0.7	35.0				
⑥细、中砂	6.0	42.0				

2.3 地基检测与变形观测结果

复合地基检测采用静力荷载试验确定CFG桩单桩复合地基承载力特征值, 采用低应变动力试验测定CFG桩桩身质量, 采用重型动力触探试验确定碎石桩强度, 采用标准贯入试验判定地基液化性能。

静荷载试验采用堆载重物提供反力, $1.7\text{ m}\times 1.7\text{ m}$ 承压板, 最大荷载均加至 $1\ 160\text{ kN}$ (401 kPa),

分10级进行。3组单桩复合地基静荷载试验在最大荷载时, 均未达到极限状态, $p-s$ 曲线中各桩的比例极限点均不明显, 1[#]、2[#]和3[#]单桩复合地基静荷载试验点分别按 $s/b=0.001$ 、 0.0008 和 0.0006 所对应的沉降量确定各单桩复合地基承载力特征值。各单桩复合地基静荷载试验分析结果见表3。

表3 静荷载试验分析结果

试验编号	终止荷载/kN	总沉降量/mm	单桩复合地基承载力特征值/kPa	对应沉降量/mm	复合地基承载力特征值/kPa
1 [#]	1 160	7.39	200	1.62	
2 [#]	1 160	10.96	200	1.30	≥ 200
3 [#]	1 160	6.54	200	1.02	

碎石桩桩体重型动力触探试验结果见表 4。根据动力触探试验结果确定碎石桩桩身强度不小于 550 kPa,单桩承载力特征值不小于 275 kN。

表 4 碎石桩桩体重型动力触探试验结果

试验编号	平均值/击	最大值/击	最小值/击	变异系数
1#	20.3	25.0	9.0	0.23
2#	21.8	27.0	10.0	0.29
3#	19.9	26.0	9.0	0.24

对施工场地桩间土进行 6 个孔的标贯试验,试验孔深 8.8~9.3 m,从地下 3 m 施工,标贯间隔 1.0 m,并进行土层颗粒分析。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50001—2001)有关规定^[1],计算液化判别标贯试验锤击数临界值 N_{cr} 。处理后地基土实测标贯锤击数与 N_{cr} 随深度变化曲线,可以看出本复合地基完全消除液化(见图 3)。

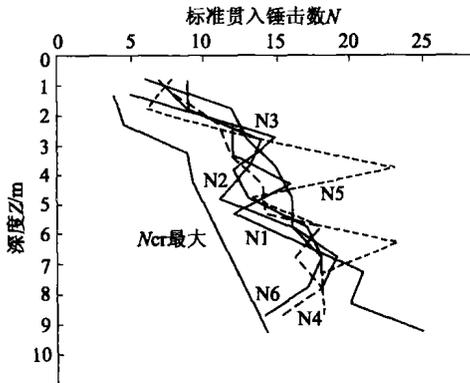


图 3 处理后地基土标贯锤击数与 N_{cr} 随深度变化曲线

2.4 地基变形观测结果

从建筑物施工至地上 1 层开始进行沉降观测,沉降观测布置图见图 4,共设置 10 个观测点。各观测点沉降数据值见表 5。观测结果表明,建筑物封顶时建筑物沉降量为 13.3~17.6 mm;全部完成装修 1 年后的建筑物沉降量为 27.9~32.6 mm,沉降趋于稳定,与设计计算结果基本吻合。



图 4 沉降观测点布置图

表 5 观测点沉降数据值

观测点编号	结构封顶时的沉降/mm	装修 1 年后的沉降/mm
S1	13.3	27.9
S2	14.0	30.1
S3	14.3	31.8
S4	16.0	31.5
S5	17.6	32.6
S6	16.3	31.4
S7	16.1	31.6
S8	14.9	30.8
S9	15.4	30.6
S10	14.8	30.2

3 结论

采用碎石桩-CFG 桩组合型复合地基处理液化地基,除消除地基液化和提高地基承载力外,可以合理控制建筑物的变形,但必须针对具体的地质条件和设计要求选择合理的设计计算方法,地基检测和建筑物沉降观测结果证明,本文提出的设计计算方法是可行的。

参 考 文 献

- [1] 郭志强,张晓哲,刘丰军,等. 组合型复合地基的工程实例[J]. 工程勘察,2003,(2):34-37.
- [2] 李 强. 沉管挤密碎石桩和 CFG 桩复合地基承载力分析[J]. 山西建筑,2003,29(3):40-41.
- [3] 赵杰伟,王志智,尚润祥. 北京某住宅楼复合地基处理实践[J]. 岩土工程技术,2006,20(1):29-32
- [4] 王颖光. 组合型复合地基处理大型储罐软土地基的设计探讨[J]. 炼油技术与工程,2004,34(9):56-59.
- [5] 周爱红,王建新. 组合型复合地基的特点分析[J]. 建筑技术开发,2003,30(1):21-22
- [6] 李斌宇,陈友明,郭 印. 低强度混凝土桩与散体桩组合型复合地基的应用[J]. 山西建筑,2003,29(18):32-33.
- [7] 郑俊杰,区剑华,吴世明,等. 多元复合地基的理论与实践[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):208-212
- [8] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002
- [9] 闫明礼,王明山,闫雪峰,等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报,2003,25(3):352-355.
- [10] 孙艳林. 长短桩复合地基设计计算的探讨[J]. 岩土工程技术,2004,18(5):252-254
- [11] GB 5001—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

收稿日期:2006-07-31