

CGF 桩在处理湿陷性黄土地基中的应用研究

闫韩生¹, 曹森虎², 韩茂蔚³

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 中国建筑西北设计研究院, 陕西 西安 710003;
3. 长安大学建筑学院, 陕西 西安 710061)

摘要:湿陷性黄土地基的处理一直是工程难题,通过分析 CFG 桩复合地基的受力变形特点,论述了 CFG 桩加固湿陷性黄土地基的机理,并按照挤密桩法进行了复合地基的试设计. 结合工程实例,在分析工程地质特点及经济性的基础上,推荐 CFG 桩复合地基方案. 处理后对地基的检测结果表明,CFG 复合地基承载力和沉降变形均满足设计要求,证明 CFG 桩可以较低的代价消除黄土湿陷性影响、提高地基承载力.

关键词:CFG 桩; 复合地基; 湿陷性黄土; 基础

中图分类号: TU-9

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2008)02-0218-06

*

近年来,随着多层和高层建筑的发展,大柱网的普遍使用,对地基强度和变形的要求越来越高. 湿陷性黄土地基处理采用的灰土垫层法,灰土挤密桩法,碎石振冲桩法等不能满足使用要求,不得不采用桩基,但桩基施工周期长,工程造价较高. 因而各种复合地基的研究和设计日新月异,彼此各有不同的适用范围. CFG 桩复合地基便是其中一种,近年来在多高层建筑中逐步得到了应用,经济效果较好,但其在湿陷性黄土地基处理中使用较少,特别是对大荷载的高层建筑物地基处理缺乏成熟经验. 本文结合 CFG 桩在湿陷性黄土地基处理中的应用实例,对其作用机理和适宜性进行了初步探讨.

1 CFG 桩的特点及作用机理分析

CFG 桩与天然地基同属地基范畴,但其组成材料,应力分布及变形过程不尽相同;CFG 桩与桩基都是以桩的形式处理地基,两者有相似之处. 但 CFG 桩属于地基范畴,而桩基属于基础范畴. CFG 桩中桩体与基础不直接相连,它们之间通过碎石或者砂石连接;而桩基中桩体与基础直接相连,两者形成一个整体. 因此,它们的受力特性也存在着明显的差异. CFG 桩的主要受力层在加固体内,而桩基的主要受力层是在桩尖以下一定范围的土内,见图 1 所示.

CFG 桩复合地基计算理论的基本假定为桩与桩间土的协调变形,它的实质就是考虑桩土的共同作用. 这种共同作用与桩基中考虑土的作用是有本质区别的,这种区别导致了桩基中桩和复合地基中桩的施工工艺和结构连接的不同. 例如,桩基中土对桩的负摩擦作用会降低桩的承载力;而 CFG 桩复合地基中土对桩的负摩擦作用能提高桩间土的承载力,减少复合地基的沉降变形. 再如,桩基中存在着群桩效应,可能提高桩的承载力,也可能降低桩的承载力;而 CFG 桩从理论上讲,就不存在群桩效应问题.

图 2 是实测到的 CFG 桩复合地基中桩土应力比 n , 桩间土与桩承担的荷载比 η_s 曲线. 载荷初期,由于垫层作用,桩土共同承担上部荷载,此时复合地基变形较小, n 值相应较小, η_s 较大. 随着荷载的进一

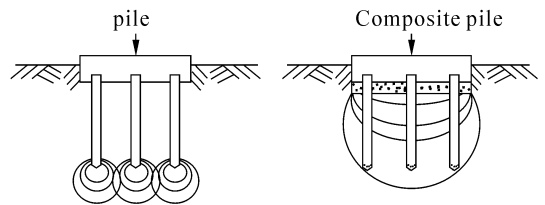


图 1 桩基和 CFG 桩复合地基受力性能比较
Fig. 1 Comparison of mechanical behavior of composite foundation of pile with CFG pile

步增加,桩顶逐渐向垫层刺入,同时垫层材料向桩间土流动,荷载向桩上集中, n 值逐渐增大, $7P$ 值逐渐减小.当荷载增加到一定值时($P/P_u = 0.6$ 左右), n 值与 η_s 值分别出现峰值和底谷,此时与单桩极限承载力相比,桩已发挥极限承载力的70%左右,它标志着桩对垫层的刺入量已基本完成.若进一步加大荷载,桩尖向下刺入并进入塑性变形阶段, n 值降低, η_s 值增大,桩土变形已趋一致,桩间土分担的荷载增量大于桩的荷载增量,直至桩发生刺入破坏.再增加荷载,桩将不能承担更多荷载.荷载增量全部由桩间土承担,最后达到极限,即复合地基破坏. CFG 桩复合地基上述受力过程及施工工艺决定了其加固湿陷性黄土的机理主要有以下三个方面:

(1) 挤密作用 CFG 桩一般采用振动沉管成孔,由于桩管振动和桩尖土侧向挤压作用使桩间土得到了挤密,消除了桩间土的湿陷性,提高桩间土的承载力.

(2) 置换作用 CFG 桩具有一定粘结强度,设计时一般按 C10 ~ C15 砼强度设计,荷载作用下桩身压缩性比周围土小许多,桩土应力比可达到 10 ~ 30,甚至更高,这一点是其他柔性桩无法比拟的,其复合地基强度较高.

(3) 桩体作用 CFG 桩属于刚性桩,它和桩间土共同作用,既具有复合地基的特点,也具有桩基的某些特征,在处理范围内桩身的变形控制复合地基的变形,变形量很小.

2 CFG 桩的设计原则和方案

湿陷性黄土地区,以消除湿陷性和提高地基土承载力为目的时,CFG 桩可按挤密桩法进行试设计.

2.1 桩径设计

CFG 桩采用振动沉管施工,桩径由沉管确定,西安地区一般有 350 mm,400 mm,450 mm 三种可供选择.

2.2 桩距设计

桩距宜按正三角形布置,桩距按式(1)计算,且不应小于 3d.

$$S = 0.95d [\lambda c \rho_{dmax} / (\lambda c \rho_{dmax} - \rho_d)]^{1/2} \tag{1}$$

式中: S 为桩孔中心距离; d 为桩孔直径; ρ_{dmax} 为桩间土的最大干密度;

λc 为地基挤密后,桩间土的平均压实系数,宜取 0.93; ρ_d 为地基挤密前土的平均干密度.

2.3 地基承载力确定

CFG 桩复合地基承载力标准值,应通过载荷试验确定.设计中常采用下式进行估算:

$$f_{sp,k} = mR_k/A_p + a\beta(1 - m)f_k \tag{2}$$

式中: $f_{sp,k}$ 为复合地基承载力标准值; m 为桩面积置换率, $m = A_p/SS'$, S 、 S' 分别为桩距、排距; A_p 为桩身截面面积;

A 为桩间土强度提高系数, $a = f_{sk}/f_k$;

f_k 、 f_{sk} 为处理前后桩间土承载力标准值;

β 为桩间土强度发挥系数,根据建筑物重要性取 0.75 ~ 1.0;

R_k 为单桩承载力标准值, $R_k = Q_{uk}/K$;

$$Q_{uk} = U \sum_{qsik} L_i + qp_k A_p \tag{3}$$

Q_{uk} 按不同的成桩工艺采用桩基规范规定的计算方法进行计算.

3 CFG 桩的工程应用实例分析

某水塔高 40 m,容积 200 m³,倒圆锥壳基础,直径 $D = 11.6$ m,对差异沉降敏感.

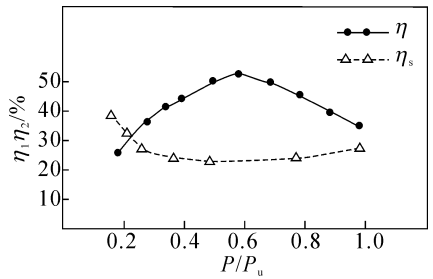


图2 CFG 桩 n 和 η_s 曲线

Fig. 2 Curve of n and η_s of CFG pile

3.1 地质概况

该水塔位于西安北郊,四周均为已建成的六层砖混住宅.地貌单元属于渭河南岸Ⅱ级阶地,据勘探揭露,场地内地层为:

- a. 素填土(Q_4^{m1})①层:主要由粘性土组成,含砂及块石等,层厚 0.50 m.
 - b. 黄土(Q_3^{eol})②-1 层:黄褐~褐黄色,大孔结构,含少量白色钙质条纹,偶见蜗牛壳,具湿陷性,硬塑~可塑.层厚 3.50~4.50 m.
 - c. 黄土(Q_3^{eol})②-2 层:岩性同②-1 层,具湿陷性,可塑.层厚 3.0 m.
 - d. 黄土(Q_3^{eol})②-3 层:黄褐色,大孔结构,含少量白色钙质条纹及蜗牛壳,不具湿陷性,可塑.层厚 1.20~2.20 m.
 - e. 黄土(Q_3^{eol})②-4 层:黄褐色,岩性同②-3 层,软塑.层厚 3.80~4.20 m.
 - f. 古土壤(Q_3^{eol})③层:红褐色,具针状孔隙,含白色钙质条纹及少量钙质结核,可塑~软塑.层厚 2.90~3.50 m.
 - g. 粉质粘土(Q_3^{eol})④层:黄褐-灰黄色,含钙质结核及氧化铁斑点,局部有粉土薄夹层,可塑.层厚 3.30~3.70 m.
 - h. 中砂(Q_3^{lal})⑤层:褐黄~灰褐色,石英~长石质,混粒结构,密实,未穿透.
- 地下水位埋深 11.10~11.30m,各层土主要力学性质详见表 1.

表 1 地基处理前后桩间土主要物理力学性质指标对比

Tab. 1 Comparison of main physical and mechanical parameter of soil before and after the disposal of foundation

Stratum number		Loess②-1	Loess②-2	Loess②-3	Loess②-4	Ancient soil	Silt clay ①	Silt, medium sand⑤
Natural water content $W/\%$	before	20.00	22.10	24.10	29.20	26.50	23.80	19.60
	after	21.60	21.90	24.90	28.00			
Dryness weightness $/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	before	12.08	13.00	13.70	13.90	15.30	15.70	17.10
	after	15.10	15.40	15.00	14.80			
Void ratio e	before	1.079	1.044	0.945	0.916	0.736	0.703	0.552
	after	0.767	0.734	0.776	0.806			
Saturation $S_r/\%$	before	51.00	57.70	69.80	86.60	97.50	90.60	95.80
	after	76.50	81.60	86.70	94.30			
Compression coefficient GaG_{1-2}/MPa	before	0.640	0.340	0.240	0.310	0.920	0.230	0.110
	after	0.170	0.220	0.190	0.230			
Comepession modulus E_{s1-2}/MPa	before	4.500	7.000	8.800	6.600	6.300	10.80	14.40
	after	10.30	8.300	8.900	8.000			
Collapsibility coefficient δ_{20}	before	0.043	0.035					
	after	0.002	0.002					

3.2 塔对地基的设计要求

(a) 基础埋深 $D=2.50\text{ m}$; (b) 地基土不具湿陷性; (c) 地基土孔隙比 $e<0.85$, 液性指数 $I_L>0.85$, 压缩模量 $E_0\geq 6.0\text{ Mpa}$; (d) 地基承载力 $[f]\geq 200\text{ kPa}$.

由表 1 知基础埋深 2.50 m 时水塔基底处在②-1 层黄土内. 第一, 该层黄土和下层黄土(②-2)均为 I 级非自重湿陷性黄土; 第二, 该层黄土孔隙比 $e=1.079>0.85$, 压缩模量 $E_s=3.40\text{ MPa}<6.0\text{ MPa}$; 第

三,该层黄土天然地基承载力设计值 $f=f_k + \eta_d \gamma_0 (d - 1.5) = 169.80 \text{ kPa} < 200 \text{ kPa}$ 。综上所述,第②层黄土天然地基不能满足标准设计对地基的(b),(c),(d)三条设计要求,必须进行人工处理。

3.3 地基处理方案比选

(1)强夯.首先,据勘察报告书,各层土的天然含水量 W 、塑限含水量 W_p 和最优含水量 W_{opt} 的平均值见表2。《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25-90)要求强夯土层必须 $W - W_p \leq 1 - 3\%$,该地基土层的强夯适宜性评价见表3。第②-2和②-3两层黄土 $W - W_p > 3\%$,不满足规范要求,若要强夯需适当降低含水量。其次,水塔基础外缘距周边建筑物基础外缘仅10.0 m左右,强夯时的隔震问题无法解决。再次,从本场地已强夯的地基看,效果不够理想,承载力很难满足 $f = 200 \text{ kPa}$ 的要求。综上所述,强夯处理无法满足要求。

表2 各层土天然含水量(%)

Tab.2 Natural water content of the layer(%)

Stratum number	Natural water content W	Most natural water content W_{max}	Least natural water content	Plastic limit water content	Optimal water content
			W_{min}	W_p	W_{opt}
Loess②-1	20.00	20.20	18.30	18.00	16.60
Loess②-2	22.10	22.70	21.80	18.40	17.10
Loess②-3	24.10	24.80	22.90	18.40	17.70

表3 强夯适宜性评价

Tab.3 Estimate of dynamic compaction suitability

Stratum number	Dynamic Compaction		$W - W_p / \%$	$W_{max} - W_{min} / \%$	Suitability
	reinforce layer thickness/m				
Loess②-1	0.0755 ~ 1.25		2.00	3.90	Appropriate
Loess②-2	2.00		3.70	0.90	Inappropriate
Loess②-3	1.20 ~ 2.20		5.70	1.90	Inappropriate

(2)换填.由表1知②-1和②-2层黄土具有湿陷性,设计要求全部消除。此时换土深度5-7m,因场地狭窄,无法提供足够的施工场地,故不能采用换填法处理。

(3)桩基.由现场资料知,可以采用预制静压桩,其施工方便,质量有保证。由详勘报告知,采用400×400方桩,有效桩长17.5 m,预估单桩承载力标准值 $R_k = 480 \text{ kN}$,共需布置41根。经济性能比较见表4。可见其经济性较差。

表4 强夯适宜性评价

Tab.4 Estimate of dynamic compaction suitability

Categories	Precast static pressure pole	Plain concrete composite foundation	CFG-pile composite foundation
Unit price of pile /yuan·m ⁻³	850	320	265
Direct charge /million yuan	18.10	12.20	10.40
Unit price ratio		3.208: 1.208: 1.0	
Total charge ratio		1.740: 1.173: 1.0	

(4)复合地基.复合地基可以采用素砼桩复合地基和CFG桩复合地基。这两种复合地基工程性能,施工工艺都相同,都属于刚性桩复合地基,能较大幅度提高地基承载力,降低地基变形,施工容易,取材方便,均能满足工程要求。两种复合地基相比,素砼复合地基经济性较差,CFG桩复合地基掺有粉煤灰。变废为宝,保护环境,经济和社会效益较好。

根据以上分析,本工程采用 CFG 桩复合地基,简要设计过程如下:桩径 $\Phi = 350\text{mm}$, 桩间土承载力标准值 $f_k = 150\text{ kPa}$, 桩距 $S' = 1\ 200\text{ mm}$, 排距 $S = 1\ 000\text{ mm}$, 桩间土强度提高系数 $a = 1.10$, 桩间土强度发挥系数 $\beta = 0.75$ (变形控制严格,取小值), 桩尖位于古土壤③内 3.5 d 处,有效桩长 $L = 9.40\text{ m}$.

经计算 $Q_{uk} = 342\text{ kN}$, $f_{sp,k} > 256\text{ kPa} > 200\text{ kPa}$, 满足要求.

3.4 处理效果分析

根据规范规定,结合在该场地已做的大量工程检测资料,检测内容见表 5 所示. 因施工机械的原因桩径实际改为 400 mm 理论计算 $Q_{uk} = 405\text{ kN}$, $f_{sp,k} = 280\text{ kPa}$, 各种检测成果见表 6 ~ 表 8 所示. 由表 1 ~ 表 6 知,地基处理后,桩间土主要物理力学指标得到明显改善,干重度 γ_d 增加 6.5% ~ 17.9%, 孔隙比 e 降低 12.0% ~ 29.7%, 压缩系数 a_{1-2} 降低 20.8% ~ 73.4%. 第②-1 和②-2 层黄土湿陷系数均小于 0.015, 即湿陷性已经完全消除. 同时桩间土的密实度得到较大改善,最小挤密系数见表 7. 桩间土承载力标准值见表 8 所示,强度提高系数 $a = 1.063 \sim 1.364$. 在基坑开挖后,从暴露出的桩体观察可知,柱头浮浆大约 50 cm 左右,桩身垂直,与土体结合紧密,桩身质量完好,桩径大于 400 mm,低应变变动测 10 个桩体中,有两个在桩顶 2.0 m 处,发生扩径,未发现缩径桩体. 桩身截取芯块 12 组得到轴心抗压强度 11.3 ~ 14.0 MPa, 满足 C10 要求.

实测单桩极限承载力 $Q_{uk} = 420\text{ kN}$, 复合地基承载力 $f_{sp,k} = 327\text{ kPa}$.

复合地基变形模量达 74.10 ~ 101.90 MPa, 承载力和沉降变形均满足设计要求.

表 5 地基检测内容一览表

Tab.5 Schedule of foundation test

Serial number	Test item	Unit	Number
1	Construction procedure of CFG pile	radix	1
2	Load test		
	Non-destructive test of single pile	radix	2
	Composite foundation test of single pile	locate	2
3	Former location test of soil	hole	2
4	Dynamic test of pile	radix	10
5	Test of core-taken	group	12

表 6 地基处理前后桩间土物力学性质对比

Tab.6 Comparison of mechanical parameter of soil before and after disposal of foundation

Serial number of layer	Loess②-1	Loess②-2	Loess②-3	Loess②-4
γ_d (average)	+ 17.90	+ 18.50	+ 9.50	+ 6.50
E (average)	- 28.90	- 29.70	- 17.90	- 12.0
a_{1-2} (average)	- 73.40	- 35.30	- 20.80	- 25.80

表 7 各层桩间土最小挤密系数 η_{emin} 汇总

Tab.7 Collection of the leaste compaction coefficient of soil in each layer

Serial number of layer	Loess②-1	Loess②-2	Loess②-3	Loess②-4
0.88	0.90	0.88	0.87	

表 8 地基处理前后桩间土承载力标准值对比

Tab.8 contrast of standard value of soil capacity before and after foundation disposal

Serial number of layer	Loess②-1	Loess②-2	Loess②-3	Loess②-4
Before disposal	150	160	150	110
After disposal	175	170	170	150
Enhanced extent%	16.60	6.30	13.30	36.40

4 结 论

以上理论分析和工程实践表明,CFG 桩复合地基可消除黄土湿陷性,提高地基承载力,降低地基变形,施工容易,取材方便,具有明显的经济和社会效益。

(1)在非饱和黄土地层,若土的密实度较好,为了获得较高的桩端承载力,可以在桩端进行适当反插。若土质松散,应严禁反插。

(2) K 值建议取 1.50~1.75,在湿陷性黄土地区,CFG 桩复合地基使用较少,经验不足,应取较大值。

(3)桩距 $S=(3\sim 6)d$,在湿陷性黄土地区,为了消除湿陷性,提高密实度,降低压缩性,应取较小值,一般为 $(3\sim 4)d$ 。

(4)粉煤灰砣的坍塌度应严格控制,施工单位习惯采用砣的坍塌度为 60~80 mm,这样桩顶浮浆过大,桩身质量不易保证。坍塌度为 30 mm 左右时,能获得较好的施工质量。

(5)静载实验用 s/b 来确定复合地基承载力,建议采用 $s/b=0.01$ 。对重要的沉降变形敏感的建筑物应取更小值。本工程为 200 m³ ($H=40$ m) 水塔,对不均匀沉降要求严格,故采用 $s/b=0.003$ 为复合地基承载力标准值。

参考文献 References

- [1] 阎明礼. 地基处理技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,1993.
YAN Ming-li. Technology of foundation treatment[M]. Beijing:China Environmental Science Press,1993.
- [2] 张 雁,黄 强. 非砾石类复合地基试验研究[C]//第六届土力学及基础工程学术会议论文集,1991.
ZHANG Yan,HUANG Qiang. Experimental studies on non-gravelled composite foundation[C]// Memoir of 6th scientific conference on soil mechanics and foundation engineering,1991.
- [3] JGJ94-94,建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.
JGJ94-94, Criterion of Construction pile foundation[S]. Beijing:China Architecture and Building Press,1995.
- [4] GBJ146-90,粉煤灰砣应用技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,1991.
GBJ146-90, Technology specification of fly ash concrete using[S]. Beijing:China Program Press,1991.
- [5] Q/TY06-1997,水泥粉煤灰碎石桩 CFG 桩复合地基技术规定[S].
Q/TY06-1997, Technology specification of cement-fly ash-gravel pile and CFG pile composite foundation[S].

Mechanism analyses of disposal of collapsed loess with CFG pile

YAN Han-sheng¹, CAO Sen-hu², HAN Mao-wei³

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. China Northwest Architecture Design Academe, Xi'an 710003, China; 3. Dept. of Architecture Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The disposal of collapsed loess foundation has always been a problem in construction engineering. In this paper the mechanism of consolidating collapsed loess with CFG pile is discussed by analysing the characteristic of mechanical behavior of CFG pile composite foundation. Composite foundation is designed according to measure of compacted pile. So the program which is CFG pile composite foundation is proposed on the basis of analysing engineering geological feature and economical problem combined with engineering instances. The detection of foundation after the disposal shows that both of capacity and subsidence formation of CFG composite foundation can meet the requirements. It is proved that CFG pile composite foundation can eliminate the collapsed loess and enhance the foundation capacity. *

Key words: CFG pile; composite foundation; collapsed loess; foundation.