

# CFG 短桩复合地基桩间土承载力折减系数值的研究

何世鸣<sup>1</sup>, 张宝河<sup>2</sup>, 杜丛林<sup>3</sup>

(1. 北京建材地质工程公司, 北京 100102; 2. 武警黄金二总队, 河北 廊坊 065000; 3. 山东黄金集团有限公司沂南金矿, 山东 沂南 276300)

**摘 要** 利用 CFG 短桩复合地基、单桩、桩间土的载荷试验成果, 得到了 CFG 短桩复合地基承载力计算公式中桩间土承载力折减系数  $\beta$  值, 为以后 CFG 短桩复合地基设计具有较好的指导意义。

**关键词** CFG 短桩; 复合地基; 承载力; 折减系数

**中图分类号** TU472.3+5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3746(2003)S1-0016-05

**Research on the Value of Reducing Coefficient for Soil Bearing Capacity Between CFG Short Piles/HE Shi-ming<sup>1</sup>, ZHANG Bao-he<sup>2</sup>, DU Cong-lin<sup>3</sup>** (1. Beijing Building Material Geological Engineering Corporation, Beijing 100102, China; 2. Second Gold Team of Armed Police Force, Langfang Hebei 065000, China; 3. Yinan Gold Mine of Shandong Gold Group Co. Ltd, Yinan Shandong 276300, China)

**Abstract**: The  $\beta$  value of reducing coefficient for soil bearing capacity in CFG short pile combined foundation bearing capacity calculation formula was got through the load test on CFG short pile combined foundation, on single pile and on the soil between piles. It can be used as instruction to the future design of CFG short pile combined foundation.

**Key words**: CFG short piles; combined foundation; bearing capacity; reducing coefficient

CFG 短桩是将水泥、粉煤灰、碎石(必要时加沙子)按一定比例加水搅拌均匀, 在已成的孔中, 孔底夯实后浇注并利用振捣棒振密形成的桩。CFG 短桩和桩间土共同作用形成 CFG 短桩复合地基。

CFG 短桩复合地基技术特点是将 CFG 桩端持力层选在北京地层“韵律”的第一层砂层或其它坚硬土层上, 其作用机理可视为端承桩, 其桩长一般为 2.5~5.0 m。成孔工艺是长螺旋干成孔或人工洛阳铲成孔, 孔底用重锤夯实, 灌注 CFG 拌合料时用振捣棒振密成桩。与“长桩方案”相比能节省 20%~60% 的费用, 其显著特点可归纳为: 省钱, 施工质量好, 既能满足设计承载力的要求, 也能满足最终沉降量的要求。

该项技术由笔者[1]于 1998 年 12 月申请了国家发明专利(申请号 98125248.6), 于 1999 年 8 月 4 日《发明专利公报》公布。

根据笔者在北京地区数个工程资料, 本文将利用 CFG 短桩复合地基的载荷试验资料, 探讨桩间土承载力折减系数的取值。

1 实例一 北苑居住区 4-01、4-02 住宅楼地基处理(1997 年 2 月)

该住宅楼均为地上 25 层, 地下 2 层, 框架剪力

墙结构, 基础埋深为 -8 m, 地层情况自上而下为: ①人工填土, 粘质粉土素填土; ②粘质粉土; ③重粉质粘土, 粉质粘土; ④粉质粘土, 粘质粉土; ⑤粉细砂, 中粗砂; ⑤<sub>1</sub> 层局部分布; ⑥粉质粘土。该场地各层土的物理力学性质指标列于表 1。由于直接持力层粉质粘土、粘质粉土④层承载力较低(180 kPa), 不能满足建筑荷载 < 350 kPa 的要求, 因此笔者采用了 CFG 短桩复合地基处理。该场地桩间土、单桩、复合地基的载荷试验成果见表 2。

2 实例二 总参谋部北京地区退休干部住宅小区南 1、2、4、5 号楼地基处理(1998 年 4~5 月, 10~11 月)

原设计均为地上 24 层, 地下 2 层, 结构封顶时地上全增为 28 层。框架剪力墙结构, 箱形基础, 基底埋深 -8.81 m, 地层情况自上而上为: ①人工堆积层, 粉质粘土填土及房渣土; ②新近沉积层: 粉质粘土、粘质粉土; ③第四系沉积层: 粘质粉土、粉质粘土; ④粉质粘土、粘质粉土, 层间分布砂质粉土、粘质粉土④<sub>1</sub> 层和粘土, 重粉质粘土④<sub>2</sub> 层; ⑤细、粉砂。该场地各层土的物理力学性质指标列于表 3。主要处理层④层及④<sub>1</sub>、④<sub>2</sub> 层天然地基承载力标准值为 150 kPa, 不能满足设计值 450 kPa 要求, 笔者采用了

CFG 短桩复合地基技术进行处理。该场地桩间土、单桩、复合地基的载荷试验成果见表 4。

### 3 实例三 :房管一公司大屯职工宿舍 5 号楼地基处理(1999 年 3 月)

该住宅楼为地上 16 层,地下 2 层,框架剪力墙结构,箱形基础,基础埋深为  $-7.55\text{ m}$ ,设计要求处理后复合地基承载力标准值  $275\text{ kPa}$ 。地层情况自上而下为:①人工堆积层,杂填土及粉质粘土填土,厚度为  $1.00\sim 1.60\text{ m}$ ;②砂质粉土、粘质粉土;③粉质粘土,局部分布砂质粉土、粘质粉土③<sub>1</sub>层及粘土③<sub>2</sub>层;④细中砂;⑤砂质粉土、粘质粉土,夹粘土⑤<sub>1</sub>层。该场地各层土的物理力学性质指标列于表 5。直接持力层粉质粘土③层及③<sub>1</sub>、③<sub>2</sub>层天然地基综合承载力值为  $150\text{ kPa}$ ,不能满足设计要求的  $275\text{ kPa}$ 。笔者采用了 CFG 短桩复合地基技术进行处理。该场地桩间土、单桩、复合地基的载荷试验成果见表 6。

### 4 实例四 :建国公寓 A、B 楼地基处理(2000 年 6 月)

该公寓楼为阶梯形,地上由两侧的塔楼和中间的裙楼组成,其中塔楼又分为 A、B 两幢,A 楼南侧楼高 24 层,中间 22 层,北部 20 层,B 楼高 19 层。地下室均为 2 层。设计要求 A 楼地基承载力设计值 24 层  $460\text{ kPa}$ ,22 层  $430\text{ kPa}$ ,20 层  $400\text{ kPa}$ ;B 楼的地基承载力设计值  $380\text{ kPa}$ 。A、B 楼地下室底板埋深为  $-8.8\text{ m}$ ,中间裙楼地下车库底板埋深为  $-9.3\text{ m}$ 。地层情况自上而下为:①人工填土,以建筑垃圾为主,层厚  $1.3\sim 9.5\text{ m}$ ;②粉细砂,夹薄层粉土;③粉质粘土,夹有粉土③<sub>1</sub>层;④细砂;⑤卵石;⑥粉质粘土;⑦细砂;⑧卵石;⑨粉土;⑩卵石。该场地有关土层的物理力学性质指标列于表 7。基础持力层粉质粘土③层、粉土③<sub>1</sub>层及细砂④层,这些地层天然地基承载力标准值分别为  $160、180、250\text{ kPa}$ ,显然不能满足设计对地基承载力  $380\sim 460\text{ kPa}$  的要求,而且极为不均,又为了便于施工故笔者采用了等距不等径 CFG 短桩复合地基进行处理。该场地桩间土、单桩、复合地基载荷试验成果见表 8。

### 5 复合地基桩间土承载力折减系数

CFG 桩复合地基承载力标准值计算公式可表述为:

$$R_k/A_p + \alpha\beta(1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中  $f_{spk}$ ——复合地基承载力标准值,  $\text{kPa}$ ;  $m$ ——面积置换率;  $R_k$ ——单桩竖向承载力标准值,  $\text{kN}$ ;  $A_p$ ——桩的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\alpha$ ——桩间土强度提高系数,表述为加固后桩间土承载力标准值与天然地基承载力标准值之比;  $\beta$ ——桩间土承载力折减系数,或称为桩间土强度发挥系数;  $f_{sk}$ ——天然地基承载力标准值,  $\text{kPa}$ 。

对于非挤土成桩工艺,如长螺旋钻孔灌注成桩或人工洛阳铲成孔灌注成桩,对桩间土一般不发生扰动和挤密,  $\alpha$  取 1.0。

对  $\beta$  通常取  $0.75\sim 1.0$ ,该取值范围较宽,对设计结果影响不小,如取值太过保守,则会造成不小的浪费。因而积累地区经验很有必要。

将表 2、表 4、表 6、表 8 的载荷试验成果综合于表 9 中,按式 1 和表 9 中的单桩、桩间土、复合地基的承载力及面积置换率反算出桩间土承载力折减系数  $\beta$  (见表 9)。假定  $\beta=1.0$ ,按式(1)计算出复合地基的承载力计算值  $f_{spk}'$ ,将计算值  $f_{spk}'$  与测试值  $f_{spk}$  相对比得到表 9 所示的误差值。

由表 9 中可知,  $\beta$  值范围为  $0.907\leq\beta\leq 1.0$ ,  $\beta$  的平均值为 0.967,因而建议桩间土承载力折减系数  $\beta$  采用  $0.9<\beta\leq 1.0$ 。当采用  $\beta=1.0$  时,复合地基承载力的计算值与载荷试验测试值的误差范围为  $0\leq\Delta\leq 4.13\%$ 。

## 6 结论

利用 CFG 短桩载荷试验成果,笔者反算了桩间土承载力折减系数  $\beta$ ,假定  $\beta=1.0$  时,对复合地基承载力的计算值与载荷试验测试值作了对比分析,得出二者的误差均不大于  $4.13\%$ ,根据  $\beta$  值的反算结果,建议式(1)中  $\beta$  采用  $0.9<\beta\leq 1.0$ ,当无试验资料进行桩设计时,也可采用其平均值 0.967,或利用略保守一点的数值 0.95。

## 参考文献:

- [1] 阎明礼. 地基处理技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [2] Q/JY 06-1997,水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)复合地基技术规范[S].
- [3] JGJ 79-91,建筑地基处理技术规范[S].
- [4] 陈群,化建新. CLSC 复合地基承载力发挥系数值的探讨[J]. 军工勘察,1996(1).
- [5] 中华人民共和国国家知识产权局. 发明专利公报[P]. 1999,15(31).
- [6] 何世鸣. CFG 短桩复合地基技术用于高层建筑地基处理的探讨[J]. 探矿工程,1999(4).
- [7] 何世鸣,史常猛. CFG 短桩复合地基技术在某小区地基处理中

- 的应用[ J ]. 探矿工程 2000 ( 3 ).
- [ 8 ] 何世鸣. CFG 短桩复合地基技术在高层建筑地基处理中的应用[ A ]. 第五届全国岩土工程实录交流会岩土工程实录集 [ C ]. 北京 : 兵器工业出版社 2000.
- [ 9 ] 何世鸣, 朱世平. 不等径 CFG 短桩复合地基在某阶梯形高层公寓楼的应用[ J ]. 探矿工程 2001 ( 增刊 ).
- [ 10 ] 刘志强. CFG 短桩复合地基在北苑小区高层建筑地基处理中的应用[ A ]. 北京城建集团有限责任公司. 建筑施工实例应用手册[ C ]. 北京 : 中国建筑工业出版社, 1999.

表 1 北苑居住区 4-01、4-02 楼地层岩性及物理力学性质综合统计

土层	编号	岩性	综合统计指标	$w$	$f$	$S_r$	$e$	$W_L$	$I_p$	$I_c$	$E_s$			$\varphi$	$c$	$N_{63.5}$	波速	承载力标准值/kPa
											$P_{0+0.1}$	$P_{0+0.2}$	$P_{0+0.3}$					
新近沉积地层	③	粉质粘土	平均值	34.8	1.86	97.4	0.946	36.4	14.1	0.67	4.2	4.8	(15)			37	180	
			最小值	28.1	1.79	94.4	0.796	33.6	12.5	0.35	3.7	4.3						140
			最大值	43.2	1.94	99.3	1.049	41.9	16.8	0.85	4.9	5.6						
			变异系数	0.13	0.03	0.02	0.11	0.11	0.13	0.27	0.12	0.11						
	④	粘质粉土	平均值	21.9	2.01	96.9	0.594	27.7	10.6	0.29	7.5	8.6	9.8	19	25		291	
			最小值	15.1	1.04	92.5	0.508	23.3	8.1	0.08	5.6	6.3	7.0	19	17			180
			最大值	31.9	2.09	100	0.689	31.9	13.6	0.61	10.6	11.8	12.8	20	30			
			变异系数	0.22	0.04	0.03	0.10	0.09	0.16		0.26	0.22	0.22		0.19			
第四系冲洪积层	⑤	粉细砂	平均值	(2.10)									(28)		(28)	32	281	
			最小值													27		240
			最大值													36		
			变异系数										(32)		(35)	0.12		
	⑤ <sub>1</sub>	中粗砂	平均值	(2.12)												291		
			最小值													37		280
			最大值													42		
			变异系数															
	⑥	粘质粉土	平均值	19.3	2.08	96.0	0.538	26.5	9.5	0.25	12.9	14.9	16.2		36		291	
			最小值	16.3	2.04	92.3	0.443	21.9	8.0	0.12	8.6	10.4	11.7	19	25			200
			最大值	21.4	2.12	100	0.597	29.9	12.1	0.40	17.7	19.8	22.0	22	42			
			变异系数	0.09	0.01	0.01	0.01	0.09	0.13	0.39	0.23	0.21	0.26		0.21			

表 2 北苑居住区 4-01、4-02 静载荷试验成果

楼号	桩号	试验类型	桩长 /m	桩径 /m	置换率 /%	单桩承载力标准值 /kN	复合地基承载力标准值 /kPa
4-01	F <sub>1</sub>	单桩复合地基	3.5	400	0.18		
	D <sub>1</sub>	单桩	3.5	400		165	420
	D <sub>2</sub>	单桩	3.5	400		180	
	D <sub>3</sub>	单桩	3.5	400		150	
	T <sub>1</sub>	天然地基					(195)
4-02	F <sub>1</sub>	单桩复合地基	3.5	400	0.18		
	D <sub>1</sub>	单桩	3.5	400		165	420
	D <sub>2</sub>	单桩	3.5	400		180	
	D <sub>3</sub>	单桩	3.5	400		190	

表 3 总参住宅区南 1、2、4、5 号楼地层岩性及土的物理力学性质综合统计

土 层	编 号	岩 性	综合统计指标	$w$	$\rho$	$S_r$	$e$	$W_p$	$I_p$	$I_L$	$E_s/\text{MPa}$			$c$	$\varphi$	$N_{63.5}$	波速 $V_s$	容许承载力标准值 /kPa
											100	200	300					
第四系沉积层	④	粉质粘土~粘质粉土	平均值	24.1	1.99	0.87	0.73	17.1	11.9	0.58	5.9	6.8	7.8	18	8.25	8	199	150
			最大值	25.5	2.10	0.97	0.75	18.0	13.4	0.62	6.5	7.5	8.5	28	9	10		
			最小值	22.3	1.90	0.78	0.70	15.9	10.3	0.54	4.5	5.5	6.4	11	7	6		
			变异系数													0.22		
	④ <sub>1</sub>	砂质粉土~粘质粉土	平均值													25	232	180
			最大值	25.5	1.99	0.98	0.70	18.7	9.6	0.71	11.9	15.5	17.4	10	25	28		
			最小值													21		
			变异系数															
	④ <sub>2</sub>	粘土~重粉质粘土	平均值	37.1	1.85	0.97	1.05	23.3	19.6	0.72	5.3	5.9	6.4				199	150
			最大值	40.1	1.89	1.00	1.15	25.0	24.7	0.84	6.5	6.8	7.3	17	8			
			最小值	35.2	1.80	0.95	0.98	20.8	16.5	0.61	4.3	5.0	5.4	11	7			
			变异系数															
	⑤	细砂~中砂	平均值													50	334	280
			最大值													64		
			最小值													40		
变异系数															0.24			
⑤ <sub>1</sub>	细砂~粉砂	平均值													46	334	260	
		最大值													59			
		最小值													36			
		变异系数													0.24			

表 4 总参住宅区南 1、2、4、5 号楼静载荷试验成果

试验点编号及类型	桩长 /m	桩径 /mm	桩截面积 /%	面积置换率 /%	最大荷载 /kPa	最大沉降量 /mm	试验单桩承载力基本值 /kPa	试验复合地基承载力基本值 /kPa	对应沉降 /mm	复合地基承载力标准值 /kPa	备 注
南 1-1 复合	3.0	450	0.159	22.68	597	2.19		517	1.67		天然地基承载力标准值 150 kPa
南 1-2 复合	3.0	450	0.159	22.68	597	2.74		467	1.67	417	
南 1-3 复合	3.0	450	0.159	22.68	597	3.03		445	1.67		
南 2-1 复合	3.0	450	0.159	22.68	849	7.64		425	1.93		
南 2-2 复合	3.0	450	0.159	22.68	597	3.32		407	1.80	417	
南 2-3 复合	3.0	450	0.159	22.68	849	4.96		425	1.67		
南 4-1 单桩	3.4	450	0.159		500	3.69	250		1.2		天然地基承载力标准值 154 kPa
南 4-2 复合	3.4	450	0.159	21.7	760	5.29		380	3.2	461	
南 4-3 复合	3.4	450	0.159	21.7	760	12.41		380	4.0		
南 5-1 单桩	3.6	450	0.159		450	5.26	250		2.0		
南 5-2 复合	3.6	450	0.159	20.4	760	14.27		380	9.6	442	
南 5-3 复合	3.6	450	0.159	20.4	760	13.88		380	6.7		

表 5 房管-大屯 5 号职工住宅楼地层岩性及土的物理力学性质综合统计

土 层	编 号	岩 性	综合统计指标	$w$	$S$	$S_r$	$e$	$W_L$	$W_p$	$I_p$	$I_c$	$E_{s1.0}$	$E_{s2.0}$	$c$	$\varphi$	$N_{63.5}$	波速	承载力标准值/kPa
一般第四系沉积层	③	粉质粘土	平均值	26.3	1.97	0.95	0.71	31.3	19.0	12.3	0.59	6.9	8.0	0.043			200	140
			最大值	37.3	2.06	0.99	0.83	38.7	23.3	13.2	0.91	8.7	9.8	0.050	25			
			最小值	20.0	1.82	0.91	0.64	22.2	13.4	8.8	0.70	5.9	6.4	0.030	10			
			变异系数	0.23	0.04	0.03	0.12	0.18	0.17	0.21	0.36	0.15	0.15	0.270				
	④	细砂~中砂	平均值										30	35			72	287
			最大值														98	
			最小值														46	
			变异系数														0.27	
	⑤	砂质粉土~粘质粉土	平均值	19.6	2.04	0.91	0.54	26.9	17.8	9.0	0.18	18.2	20.7	0.041	33.83		270	
			最大值	24.6	2.12	0.95	0.61	32.1	20.9	13.3	0.44	22.2	25.6	0.050	36			
			最小值	16.6	1.95	0.87	0.48	24.2	15.0	5.9	-0.17	10.6	11.6	0.036	31.5			
			变异系数	0.21	0.04	0.03	0.10	0.20	0.16	0.35	1.34	0.33	0.35	0.180	0.07			

万方数据

表 6 房管 - 大屯 5 号住宅楼静载荷试验成果

测点	桩号	桩长 /m	桩径 /mm	桩截面积 /m <sup>2</sup>	面积置换率 /%	单桩承载力标准值 /kN	桩间土承载力标准值 /kPa	复合地基承载力标准值 /kPa	变形模量 /MPa
1	828	5.0	400	0.1256	11.88			>280	42.43
2	159	5.0	400	0.1256	11.88			>280	50.27
3	478	5.0	400	0.1256	11.88	220	145	>280	27.69

表 7 建国公寓地层岩性及土的物理力学性质综合统计

土层编号	岩性	综合统计指标	w	$\rho$	$S_r$	e	$W_L$	$W_p$	$I_p$	$I_L$	a /MPa <sup>-1</sup>	$E_s$ /MPa	c	$\varphi$	$N_{63.5}$	承载力标准值/kPa
③	粉质粘土	平均值	23.6	2.01	0.95	0.67	29.9	17.1	12.8	0.50	0.25	7.1	53.0	9.4		
		最大值	35.3	2.12	1.00	0.98	41.5	23.9	19.9	0.75	0.34	11.8	64.0	17		
		最小值	17.5	1.87	0.89	0.52	25.3	14.4	7.3	0.21	0.15	4.9	42.0	5.1		160
		变异系数														
③ <sub>1</sub>	粉土	平均值														
		最大值	21.6	2.03	0.95	0.72	27.4	20.1	9.1	0.34	0.34	14.6	56	27.2		180
		最小值	9.3	1.70	0.34	0.58	26.3	17.2	7.3	0.03	0.11	5.0	16	18.5		
		变异系数														
④	细砂	平均值														57.0
		最大值														78.0
		最小值														36.0
		变异系数														
⑤	卵石	平均值														67.7
		最大值														70.0
		最小值														64.0
		变异系数														0.04

表 8 建国公寓静载荷试验成果

测点	桩号	桩长 /m	桩径 /mm	桩截面积 /m <sup>2</sup>	面积置换率 /%	试桩类型	单桩承载力标准值 /kN	复合地基承载力标准值 /kPa	桩间土 /kPa	
A 楼	1	760	4.0	450	0.159	13.406	单桩复合		460	
	2	443	4.0	435	0.149		单桩	306		
	3	199	4.0	420	0.139	11.417	单桩复合		420	
B 楼	1	248	4.0	400	0.1256	9.6	单桩复合		380	
	2	397	4.0	400	0.1256	9.6	单桩复合		390	250
	3	545	4.0	400	0.1256		单桩	222		

表 9 桩间土承载力折减系数  $\beta$  及复合地基测试值与计算值对比

测试编号	桩长 /m	桩径 /mm	$f_{spk}$ /kPa	$R_k$ /kN	$f_{sk}$ /kPa	面积置换率 m/%	反算值 $\beta$	假定 $\beta = 1.0$ 计算的 $f_{spk}'$ /kPa	误差 $ f_{spk}' - f_{spk}  / f_{spk} / \%$	
北苑 4-02	D <sub>2</sub>	3.5	400	420	180	195	18	1.0	420	0
	D <sub>3</sub>	3.5	400	420	190	195	18	0.92	432.2	2.9
总参住宅区	南 4-2	3.4	450	461	250	154	21.7	0.994	461.78	0.169
	南 4-3	3.4	450	461	250	154	21.7	0.994	461.78	0.169
	南 5-2	3.6	450	442	250	154	20.4	0.989	443.34	0.303
	南 5-3	3.6	450	442	250	154	20.4	0.989	443.34	0.303
房管 5 号楼	3	5.0	400	324	220	145	11.88	0.907	335.86	3.66
建国公寓 B 楼	1	4.0	400	380	222	250	9.6	0.93	395.68	4.13
	2	4.0	400	390	222	250	9.6	0.98	395.68	1.46