

CFG 桩复合地基压缩模量计算方法探讨

刘来新

(北京爱地地质勘察基础工程公司,北京 100144)

摘要:CFG 桩法在高层及多层建筑的地基处理中已有许多成功实例,在变形计算中,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)推荐使用复合模量法,并提供了计算复合土层压缩模量的应力比法公式。这里通过复合地基载荷试验资料,提出一种改进的面积比法公式。应用该法计算的复合地基沉降值,与建筑物的沉降观测值有较好的吻合度。

关键词:CFG 桩复合地基;复合土层压缩模量;应力比法;面积比法

中图分类号:TU473.1⁺2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)08-0057-04

Discussion on Calculation Method of Compression Modulus of CFG Pile Composite Foundation/LIU Lai-xin (Beijing Aidi Geotechnical Investigation & Foundation Engineering Company, Beijing 100144, China)

Abstract: CFG pile has many successful engineering cases in ground treatment of high buildings. Composite modulus method is recommended by "Technical Code for Ground Treatment of Buildings" JGJ 79-2002 in deformation calculation with stress ratio method formula of composite earth layer compression modulus. In this paper, a modified formula of area ratio method is put forward based on the loading test data of composite foundation. The composite foundation settlement value calculated by this method has a good agreement with the building settlement observation value.

Key words: CFG pile composite foundation; compression modulus of composite earth layer; stress ratio method; area ratio method

0 引言

现行建筑地基处理技术规范^[1]中对桩土复合地基承载力的计算主要有2种方法:一种是以水泥粉煤灰碎石桩法(CFG)、夯实水泥土桩法、水泥土搅拌法、高压喷射注浆法为代表的面积比法,适用于半刚性桩,可只在基础范围内布桩;另一种是以振冲法、砂石桩法、石灰桩法、柱锤冲扩桩法为代表的应力比法,适用于柔性桩,需设置保护桩。对复合土层压缩模量的计算也相应地有2种方法,即应力比法和面积比法。

应力比法主要公式有:

$$E_{sp} = \alpha[1 + m(n-1)]E_s \quad (1)$$

$$E_{sp} = \zeta E_s, \quad \zeta = f_{spk}/f_{ak} \quad (2)$$

式中: E_{sp} ——复合土层压缩模量,MPa; α ——系数,可取1.1~1.3,成孔对桩周土挤密效应好或置换率大时取高值; m ——桩土面积转换率; n ——桩土应力比,可取3~4,长桩取大值; E_s ——天然土的压缩模量,MPa; f_{spk} ——振冲复合地基承载力特征值,kPa; f_{ak} ——地基承载力特征值,kPa。

面积比法计算公式为:

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (3)$$

式中: E_p ——搅拌桩的压缩模量,kPa。

式(1)主要用于振冲法、砂石桩法、石灰桩法、柱锤冲扩桩法,式(2)主要用于CFG桩法、夯实水泥土桩法,式(3)主要用于水泥土搅拌法。通过桩土复合地基承载力公式的推导可以得出,式(1)和式(2)其实是统一的,是应力比法的2种不同形式,结果是一致的^[2]。由上可以看出,规范对柔性桩均采用了应力比法,对半刚性桩采用了2种方法,CFG桩法中认为各复合土层的压缩模量等于该层天然地层压缩模量的 ζ 倍,即复合地基承载力提高多少倍,复合土层压缩模量就提高多少倍。

1 改进的面积比法

笔者通过大量现场载荷试验发现,规范中的方法与实际情况有较大差异,随即提出一种改进的面积比法公式:

$$E_{sp} = (1/2)[mE_p + (1-m)E_s] \quad (4)$$

式中: E_p ——CFG桩压缩模量,可取 $E_p = (75 \sim 125)f_{cu}^{[3]}$,面积置换率大,桩长小时取小值,反之,取大值; f_{cu} ——与桩身混合料配合比相同的试块抗压强度平均值。

收稿日期:2012-03-25;修回日期:2012-08-05

作者简介:刘来新(1980-),男(汉族),浙江安吉人,北京爱地地质勘察基础工程公司工程师、注册岩土工程师,岩土工程专业,从事工程勘察、岩土设计与施工工作,北京市石景山区晋元庄路23号,ph99453@163.com。

2 载荷试验

河北省首钢迁安焦化厂所施工的 CFG 桩复合地基,根据室内试验及地基土载荷试验,复合地基的桩间土及桩端持力层和下卧层的力学参数见表 1。

表 1 地层物理力学指标

地层岩性	压缩模量 E_s /MPa	承载力特征值 f_{ak} /kPa
粉质粘土	11.87	160
卵石、碎石	30	300
全风化混合片麻岩	31.9	414

2.1 单桩复合地基载荷试验

为检测复合地基质量,该工程共做载荷试验 32 组,单桩复合地基载荷试验数据见表 2。

表 2 载荷试验数据

项目	桩号	荷载 P /kPa	沉降量 s /mm	桩长 L /m	单桩处理面积 A_c /m ²	承压板直径 d /mm	面积置换率 m /%
3 号焦炉	180	300	6.045	2.45	0.85	1041	14.8
	232		3.132	4.25			
	365		2.674	2.05			
	387		4.049	1.75			
	510		4.054	1.55			
	540		2.622	3.9			
	695		1.945	1.7			
1507	3.328	1.8					
3 号烟道	95	400	4.228	4.75	0.8	1010	15.7
	127		4.64	1.85			
	467		1.991	1.65			
	563		5.034	2			
4 号焦炉	345	400	4.623	3.2	0.85	1041	14.8
	351		3.399	3.8			
	365		4.693	4			
	380		3.519	4			
	400		4.619	4			
	1170		2.26	4.2			
	1190		2.907	3.6			
1225	4.644	4					
4 号烟道	161	400	1.945	4	0.8	1010	15.7
	316		6.139	4			
	727		2.98	3.8			
	732		3.635	3.8			
焦侧除尘	43	400	4.525	4	0.66	917	19
	162		3.021	4			
	261		5.675	4			
推焦机轨道	318	400	4.762	4.25	0.8	1010	15.7
	338		4.153	1.85			
	1079		5.052	2			
	1163		5.094	2.5			
	1192		4.369	2.85			

2.2 复合土层压缩模量

应力比法用式(2)计算,面积比法用式(3)计算,载荷试验计算变形模量参考岩土工程勘察规

范^[4]公式。该公式用于天然地基土浅层平板载荷试验计算变形模量,由于天然土层的变形模量是按均质各向同性半无限弹性介质的弹性理论计算,但对桩土复合土层的变形模量,各文献均未给出具体计算方法,为有所区别,设复合土层的变形模量为 E_0' :

$$E_0' = I_0(1 - \mu^2)pd/s$$

式中: I_0 ——刚性承压板的形状系数,圆形承压板取 0.785,方形承压板取 0.886; μ ——土的泊松比; d ——承压板直径或边长,m; p —— $p-s$ 曲线线性段的压力,kPa; s ——与 p 对应的沉降,mm。

本次 CFG 桩混合料抗压强度平均值 20MPa,桩长较小,面积置换率大,取桩身压缩模量 $E_p = 75f_{cu} = 1500$ MPa。计算得复合土层压缩模量见表 3。

表 3 不同计算方法所得复合模量

项目	压缩(变形)模量 $E_{sp}(E_0')$ /MPa			
	规范应力比法	载荷试验变形模量	面积比法	文中面积比法
3 号焦炉	22.3	51.7~80	232.1	116.1
3 号烟道	29.7	53.9~64.2	245.5	122.8
4 号焦炉	29.7	59.6~96.2	232.1	116.1
4 号烟道	29.7	44.2~91.1	245.5	122.8
焦侧除尘	29.7	43.4~81.5	294.6	147.3
推焦机轨道	29.7	53.5~65.3	245.5	122.8

2.3 复合土层变形量

复合地基变形采用分层总和法,根据上述压缩(变形)模量的不同计算方法,计算得复合土层变形量见表 4。

表 4 不同计算方法所得地基变形

项目	变形量 s /mm			
	规范应力比法	面积比法	文中面积比法	载荷试验实测值
3 号焦炉	13.016~18.503	1.777~2.216	3.259~3.556	2.622~4.054
3 号烟道	13.545~17.973	2.174~2.567	4.03~4.349	4.228~5.034
4 号焦炉	18.524	2.37	4.741	2.907~4.693
4 号烟道	17.973	2.174	4.349	2.98~6.139
焦侧除尘	16.318	1.645	3.29	3.021~5.675
推焦机轨道	14.427~17.973	2.174~2.37	4.03~4.349	4.153~5.094

由上述分析可以看出,采用文中介绍的面积比法计算所得的复合土层压缩模量,在计算复合地基变形时,与载荷试验实测值较为接近。

3 计算实例

北京市通州区果园某工程,高层住宅 10~19 层,框架剪力墙结构,筏板基础,基底埋深 -6.9 m,直接持力层为②、③大层的粉质粘土和砂质粉土,设

计要求地基承载力特征值 260 ~ 400 kPa,地基最终沉降量 < 40 mm,整体倾斜 < 0.002。地基承载力及变形均不能满足设计要求,设计采用长螺旋 CFG 桩复合地基处理方案。地层参数见表 5。

表 5 地层物理力学参数

岩土名称	土层性质	层厚 h/m	压缩模量 E_s/MPa	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa
② ₂	粉质粘土	2.0 ~ 4.0	8 ~ 11.7	180
② ₃	砂质粉土			
③ ₂	粉质粘土			
③ ₄	砂质粉土	2.0 ~ 4.7	30	230
④ ₅	粉细砂			
⑤ ₁	粘土	2.5 ~ 4.0	8.9 ~ 14.2	200
⑤ ₂	粉质粘土			
⑤ ₃	粘质粉土			
⑥ ₂	粉质粘土	2.0 ~ 3.5	25	250
⑥ ₅	粉细砂	3.0 ~ 8.0	38	300
⑦ ₅	粉细砂	> 9.0	40	400

本设计中 CFG 桩混合料强度 15 MPa,取桩身模量 2000 MPa,计算得复合土层压缩模量为 40.5 ~ 96.0 MPa。采用规范分层总和法计算地基变形,与规范应力比法所求复合模量计算的变形对比见表 6。

该工程从基础施工开始便进行沉降观测,在基础上设置观测点(图 1),各观测点的沉降曲线见图 2。

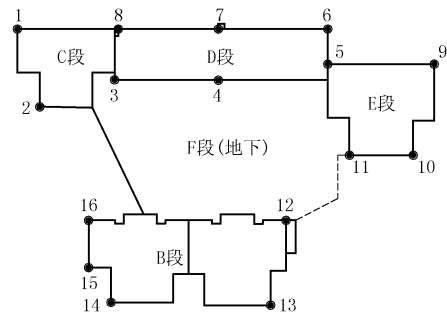


图 1 沉降观测点布设略图

表 6 复合地基设计参数及沉降计算结果

施工分区	层数	基底压力 P_k/kPa	附加压力 p_0/kPa	复合地基承载力特征值 f_{ak}/kPa	有效桩长 L/m	桩径 d/mm	单桩处理面积 A_e/m^2	按规范应力比法计算平均沉降值 s/mm	按文中方法计算平均沉降值 s/mm
E 段	19	400	290	400	12.5	400	2.0	52.24	38.26
C 段	17	380	270	380	13.3	400	2.0	46.18	34.00
D 段	14	320	210	320	6.0	400	1.5	38.80	33.03
	11	280	170	280	6.0	400	1.5	38.80	33.03
B 段	10	260	150	260	5.0	400	1.7	38.93	33.48

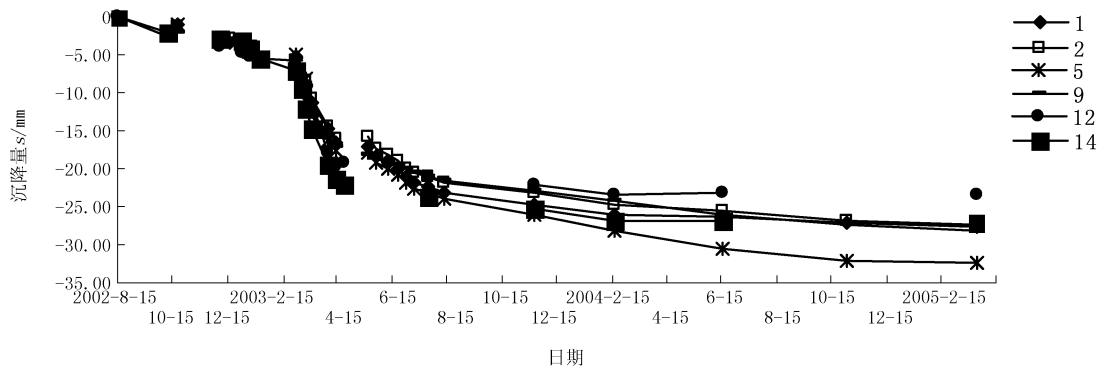


图 2 观测点 1 ~ 16 沉降值

分析各点的总沉降量,最大沉降量为 32.45 mm,为 E 段 19 层住宅楼上的 5 号点,该楼最终平均沉降 29.66 mm。C 段 17 层住宅楼,沉降量最大 31.17 mm,该楼最终平均沉降 28.70 mm。B 段 10 层住宅楼,沉降量最大 27.08 mm,楼最终平均沉降 25.26 mm。与 C 段、E 段相连的 D 段,最大沉降量 31.99 mm,平均沉降 29.86 mm。分析最后一次的观测数据,沉降量已小于每天 0.01 mm,说明楼体沉降已趋于稳定。

根据沉降观测结果可知,用改进的面积比法公

式计算的复合土层压缩模量值,在计算复合地基变形时,比规范中应力比法公式更符合实际。

4 几点探讨

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007 - 2002)^[5]规定,设计等级为甲级、乙级的建筑物,应按地基变形设计,即可能出现承载力满足,而计算变形不满足设计的情况,需要通过增加桩数或桩长来达到变形设计要求。而通过大量的建筑物沉降观测资料可以发现,实测值往往小于计算值,说明计算偏

于安全,当采用文中方法时,可使计算值接近并略大于实测值。

导致复合模量、沉降变形的如此差异,至少有以下几点原因。

(1)承载力深宽修正问题。文献[1]规定经过人工处理的地基只作深度修正,不作宽度修正,且修正系数均取1.0,而研究表明^[6-8]:在有边载作用下,复合地基承载力将大大提高。

(2)实际布桩数问题。由于种种原因,实际布桩数要大于理论计算数,一般要多6%左右^[6],对于独立基础下的布桩还要远高于此数。

(3)天然地基承载力问题。用载荷试验确定承载力目前还不普遍,勘察单位推荐的承载力多偏于保守,而复合地基载荷试验的最大加荷量一般为设计值的2倍,并未压至破坏或极限承载力,即复合地基承载力仍有潜力可挖。

(4)褥垫层厚度与模量问题。在复合地基载荷试验的变形中,有多半都是褥垫层贡献的,因载荷试验的影响深度一般为承压板直径或边长的2~3倍。即真正的桩土复合部分变形很小,复合模量也要高于计算值。

5 结语

(1)从单桩复合地基载荷试验及案例中沉降观测资料可知,在CFG桩复合地基变形计算中,采用式(4)计算的复合模量,在计算复合地基变形时较为合理。

(上接第56页)

移及东侧临近建筑物沉降均在设计要求之内。近6个月的监测表明,支护体墙顶东侧3个点水平位移在16~25 mm;东侧临近建筑物沉降量在5~9 mm。远远小于设计要求。

5 体会和建议

笔者认为,该项目取得成功主要取决于以下因素。

(1)设计方案大胆,为业主节约大量工程投资。据测算,仅施工费一项就为业主节约了200余万元,远远小于桩锚支护体系的费用。目前郑州西区因土质较好,采用复合土钉墙支护方案也较多,采用桩锚支护体系的方案也较多。但在深厚砂土基坑中采用此方案却不多见。

(2)严格按设计要求施工:对注浆体的注浆质量

(2)复合地基的变形计算极为复杂,文中的复合模量是通过载荷试验和沉降实测资料而来,其中已经综合了褥垫层等各种因素,在变形计算时可不考虑其他因素的影响。

(3)文中的面积比法计算复合模量时从表面上看并未考虑桩长和桩间距的影响,实际从 E_p 的取值上已充分考虑了其影响。

(4)文中的复合地基载荷试验及工程实例的变形观测资料都是基于一般第四系粉土、粘性土、砂土地基处理的结果,对于软土等特殊土地基,以上公式可能不适用。

(5)规范法在变形计算中,规定当压缩模量大于某一数值时,沉降经验系数不变,可以发现,当桩间土及复合地基的压缩模量较高时,采用两种方法对变形计算结果影响不大。

参考文献:

- [1] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 韩焯,王玉娥.对复合地基设计方法的几点探讨[J].工程勘察,2000,(4):10-13.
- [3] 黄仙枝.CFG桩弹性模量的试验研究[J].太原工业大学学报,1997,28(4):96-98.
- [4] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范[S].
- [5] GB 50007-2002,建筑地基基础设计规范[S].
- [6] 阎明礼,张东刚.CFG桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [7] 张泽勤.复合土层压缩模量讨论[J].河南科学,2003,21(5):599-601.
- [8] 李春灵.边载作用下CFG桩复合地基性状分析[J].建筑科学,1999,15(4):19-23.

控制较好;土方开挖严格按设计要求认真贯彻执行。

(3)监测到位:期间开展了对支护体、临近建筑物及道路的变形监测,并及时预报,实现了信息化施工。

参考文献:

- [1] GB 50202-2002,建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
- [2] JGJ 120-99,建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] YB 9258-97,建筑基坑工程技术规范[S].
- [4] SJG 05-96,深圳地区建筑深基坑支护技术规范[S].
- [5] CECS 96:97,土钉支护技术规程[S].
- [6] 高大钊,等.深基坑工程(第二版)[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [7] 王荣彦.郑州东区基坑支护型式探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(12).
- [8] 王荣彦.土钉支护技术在松散砂土基坑中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(3).
- [9] 陈肇元,等.土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.