

文章编号: 1000-7598-(2008)01-0081-06

CFG 桩复合地基试验研究

任 鹏, 邓荣贵, 于志强

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: CFG 桩复合地基广泛应用于土木工程各个领域, 但就 CFG 桩复合地基的工作性态及桩-土共同作用机制尚不十分清楚, 需要进一步研究。通过对 CFG 桩复合地基在川北某高层建筑中现场测试项目的资料分析, 得出了 CFG 桩的桩-土应力分担的变化规律, 对褥垫层上下的应力状态有了更为清晰的了解。测试荷载是实际的结构荷载, 测试环境是实际的基础环境, 测试结果更具实用性。测试结果显示, 随着外加荷载的增加, 桩-土应力比比例增加。当施工荷载为 210 kPa 时, 桩-土应力比可达 16。随着施工荷载的增加, 桩体所分担的荷载增加较快, 桩间土体分担荷载增加较慢。

关 键 词: CFG 桩; 复合地基; 承载力; 褥垫层; 变形模量

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Experimental research on composite foundations with CFG piles

REN Peng, DENG Rong-gui, YU Zhi-qiang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on researching the load test of the cement flyash gravel(CFG) pile composite foundation, the bearing capacity and deformation characteristics of CFG piles are analyzed. And through the medium of the earth stress cells buried above the cushion and below the cushion, tested stress characteristic of CFG piles and the soil stress between piles are obtained. According to these measurements, the vertical stress of the CFG pile is about 16 times bigger than the earth stress between pile when the working load is 210 kPa. Along with the increment of working load, the sharing load of the pile increases fast, but the sharing load of the soil between piles increases slowly.

Key words: CFG pile; composite foundation; bearing capacity; cushion; modulus of deformation

1 引 言

CFG 桩(Cement Flyash Gravel Pile)复合地基是由水泥、粉煤灰、砂及卵碎石夯实形成的桩体、桩间土及褥垫层构成。该技术由中国建筑科学研究院地基所于 20 世纪 80 年代末开发并逐渐推广应用。因其技术上的可靠性和经济性被广泛应用于填土、黏性土、松散砂土等软弱或相对软弱地基土的加固处理^[1, 2]。

CFG 桩复合地基的加固机制为褥垫层受上部基础荷载作用产生变形后以一定的比例将荷载分摊给桩及桩间土, 使二者共同受力。同时土体在 CFG 桩施工中受到桩的挤密而提高其承载力, 桩又由于其周围土体挤密对桩的约束加强桩的受力性态, 二者共同工作, 形成了一个复合地基的受力整体, 共

同承担上部基础传来的荷载^[1, 2]。显然, 上部荷载作用大小及桩土的结构性态和力学特性不同, 准确了解桩及桩间土的受力情况在 CFG 桩复合地基工程设计中是非常重要的。目前, 在 CFG 桩复合地基的工作机制, 桩、土在复合地基中各自发挥怎样的作用, 以及桩、土间相互作用特征, 在影响 CFG 桩复合地基充分发挥承载能力及变形等方面开展过一些研究, 取得了一些进展。具有代表性如潘纪顺、刘志伟等对 CFG 桩复合地基承载性状进行的探讨^[1, 2]。因 CFG 桩复合地基的承载性能与原地基土类型、地下水条件等多种因素有着复杂的关系, 目前仍有许多问题尚不清楚, 如就 CFG 桩复合地基的归类仍然没有统一的看法, 有的学者或工程技术人员将其划归为低等级混凝土群桩基础, 而部分学者认为应划归为复合地基等等。因此, 为了扩大 CFG 桩复合地

基的应用范围,增强其实用性,对 CFG 桩复合地基各部分在建(构)筑物基底荷载作用下的应力状态和变形特征进行深入的研究是必要的。为此,结合四川省南充市某高层建筑 CFG 桩复合地基工程,就 CFG 桩体、桩间土、褥垫层不同部位的应力随建筑物荷重增加的变化特征等进行了原位试验研究,所得成果对 CFG 桩复合地基的应用、设计、施工及检测等均有参考意义^[3-8]。

2 工程概况及场地地基土基本特征

2.1 工程概况

该高层建筑群位于南充市玉带路,由 4 栋高层电梯公寓组成,建筑物最高为 69.3 m,地上 16 层,地下 1 层,主体结构类型为框架剪力墙结构,建筑物安全等级为 1 级,属于 I 类高层建筑(见图 1)。

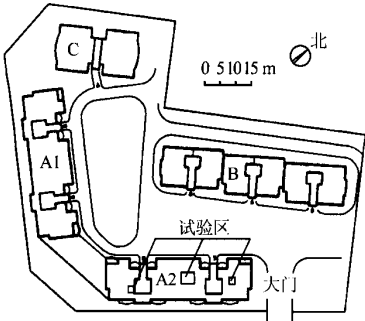


图 1 建筑群平面布置简图
Fig.1 Plan of buildings

基础为筏板基础,基底埋深为 5.2 m。地基土为粉质黏土、粉土和粉砂,不能直接作为基础持力层,需要进行加固处理或采用桩基础。经过论证采用了 CFG 桩复合地基方案,CFG 桩桩长为 8~11.2 m,直径为 670 mm,间距为 2.15 m×2.35 m,矩形布置,面积置换率为 0.069。桩端置于稍密卵石层上,桩体下端 1.5 m 段用柱锤夯扩成干硬性混凝土桩(直径为 800~1 000 mm);其他为浇注 C15 素混凝土桩(直径为 670 mm)。单桩竖向承载力特征值要求为 1 750 kN,复合地基承载力特征值 f_{spk} 满足 360 kPa。

2.2 场地地基土特征

建筑场地地貌上属嘉陵江 I 级阶地,地形较平坦,相对高差约为 1.00 m。场地上覆土层主要由第四系全新统冲洪积黏性土层及砂卵石层组成,下卧基岩为侏罗系遂宁组泥岩。自上而下各地层特征如下:

万方数据

(1) 人工填土层(Q_4^{ml}): 杂填土①(1)-1: 松散,稍湿,以建筑垃圾为主,揭露厚度为 0.50~1.80 m。素填土①-2: 可塑,稍湿~湿。以粉质黏土为主,揭露厚度为 0.40~2.40 m,连续分布。

(2) 冲、洪积层(Q_4^{al+pl}): 粉质黏土②-1: 可塑,厚度为 1.10~8.10 m,连续分布。粉质黏土②-2: 可塑~软塑,厚度为 1.20~6.80 m,连续分布。粉土③: 稍密,湿~饱和,零星分布,厚度为 0.60~4.70 m。粉砂④: 松散,饱和。部分地段圆砾含量增多,相变为圆砾层,厚度为 0.50~4.80 m,以薄层状和透镜体分布于卵石层中,场地分布较广。圆砾⑤: 松散,饱和,层厚为 0.60~3.10 m,薄层状分布于卵石层上部或以透镜体形式分布于卵石层中,分布较广。卵石⑥: 饱和。卵石层顶板埋深为 12.00~13.20 m,有 3 个亚层: 稍密卵石⑥-1,厚度为 0.60~13.10 m,全场分布, N_{120} 为 3.9 击; 中密卵石⑥-2,厚度为 0.40~2.70 m,局部零星分布, N_{120} 为 7.7 击; 密实卵石⑥-3,揭露厚度为 0.20~0.70 m,局部零星分布, N_{120} 为 11.3 击。

(3) 侏罗系中统遂宁组(J_{2sn}): 紫红色泥岩, 强风化层厚为 1.80~2.50 m; 中风化层厚为 0.30~4.50 m; 微风化层厚 0.5 m。碎裂装~块状结构,层面近水平。

地基土特征见图 2,其主要物理力学参数见表 1,表中 f_{ak} 为承载力特征值, q_{sik} 和 q_{pk} 为极限侧阻力标准值及端阻力标准值。

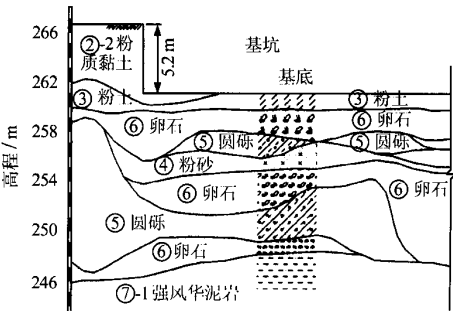


图 2 场地地层剖面简图(单位: m)
Fig.2 Geological section of site(unit: m)

3 CFG 桩复合地基试验

为了解复合地基的承载力特征和桩体、桩间土和褥垫层的工作状态,进行了静力载荷试验和建筑物修建中桩体、桩间土及褥垫层典型部位的应力状态测试。考虑到施工顺序和场地地基土代表性,试验选在 A2 栋住宅楼。试验点位置见图 3。

表 1 场地土层主要特征参数
Table 1 Parameters of site soils

层号	岩土名称	γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	c / kPa	ϕ / $(^\circ)$	f_{ak} / kPa	q_{sk} / kPa	q_{pk} / kPa
②-1	粉质黏土	19.5	30	15	160	55	
②-2	粉质黏土	19.0	20	10	130	55	
③	粉土	18.5	10	20	120	55	
④	粉砂	18.5	10	25	120	60	
⑤	圆砾	20.0	0	20	180	70	
⑥-1	稍密卵石	21.0	0	35	320	85	2 500
⑥-2	中密卵石	22.0	0	40	550	90	6 500
⑥-3	密实卵石	24.5	0	45	800		6 500
⑦-1	强风化泥岩	22.0			250		
⑦-2	中风化泥岩	24.0			800		
⑦-3	微风化泥岩	25.0			1 500		

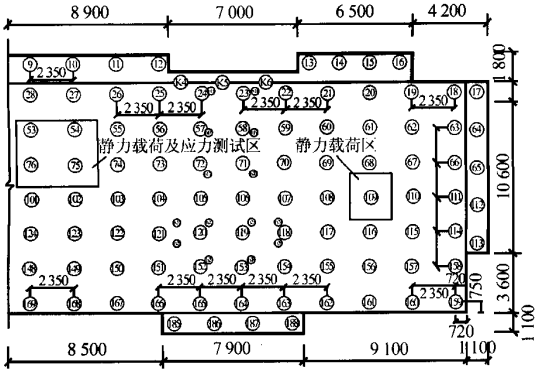


图 3 桩位布置图(单位: mm)
Fig.3 Arrangement of piles(unit: mm)

3.1 CFG 桩复合地基静载试验

3.1.1 试验方案

A2 栋基底面积为 51 m×15 m，软弱土地基厚为 8~15 m，以下为密实卵石层。因上部结构设计对复合地基承载力特征值要求达到 360 kPa 以上，根据文献[9~12]，采用单桩复合地基静载试验，所需配载或反力要求不低于 5 000 kN。因当地的试验条件及周围环境限制难以实现，因此，经过论证采用了桩、土分做方式：（1）桩间土体采用普通平板载荷试验，刚性压板面积为 0.5 m²，试验加载采用慢速维持载荷法，试验测试标准参照文献[9]等有关规范；（2）对 CFG 桩体，测定其单桩承载力，试验方法参照文献[9]及文献[11]等有关规范；（3）复合地基承载力根据上述测得的单桩和桩间土承载力按文献[10]推荐的下式计算确定：

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

式中： f_{spk} 为复合地基承载力特征值（kPa）；
万方数据

m 为面积置换率，为 0.069； R_a 为单桩竖向承载力特征值，测值为 1 750 kN； A_p 为 CFG 桩身截面积，设计为 0.35 m²； β 为桩间土承载力折减系数，根据文献[9~12]取 0.75； f_{sk} 为桩间土承载力特征值（kPa）。

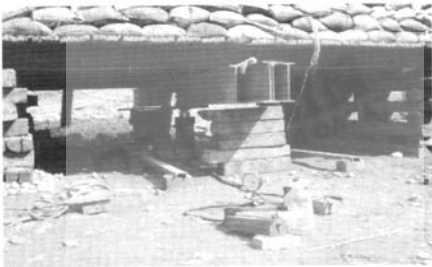


图 4 现场静载试验
Fig.4 Static load test in-situ

3.1.2 试验结果及分析

桩、土静载荷试验结果列于表 2 中。

表 2 地基载荷试验成果表
Table 2 The results of foundation load test

测点位置	测点编号	桩号或位置	实际最大加载量 / kPa	实测最大沉降量 / mm	承载力实测值 / kPa	备注
桩间土	1 [#]	109 [#] ~68 [#]	390.4	41.519	170	特征值
	2 [#]	129 [#] ~128 [#]	390.4	19.990	195	特征值
	3 [#]	75 [#] ~74 [#]	390.4	35.038	175	特征值
桩体	1 [#]	109 [#]	10 000	10.957	10 000	
	2 [#]	129 [#]	10 000	9.230	10 000	
	3 [#]	75 [#]	10 000	12.930	10 000	

本次试验的 Q - S 曲线为渐变下凹型，极限承载力可按文献[4]的规定，采用推荐的式（1）计算确定承载力，结果列于表 3 中。

表 3 复合地基承载力
Table 3 Bearing capacity of composite foundation

参数	编号		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]
复合地基承载力 / kPa	440	450	440

注：表中数值均为特征值。

由 Q - S 和 P - S 曲线（图 5、图 6）可见，CFG 桩复合地基不均匀性明显，原因主要为：（1）土质不均匀。场地局部地段土质与大部分地段相比有明显的差异。如 1[#]试验点桩间土比 2[#]试验点桩间土的承载力低很多。（2）竣工后稳定时间有差异：因制桩结束后桩间土强度的恢复与时间有关，试验点竣

工时间相差达 1 个月。

综上所述,利用 CFG 桩进行地基处理,往往处理后的地基存在一定的不均匀性。在桩基检测中,应查清地基承载力不均匀的原因,并采取有针对性的补强措施。

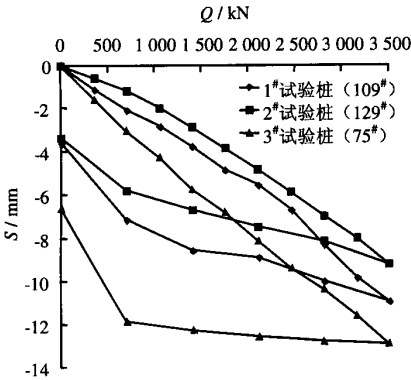


图 5 单桩载荷试验 Q-S 曲线
Fig.5 Q-S curves of single pile

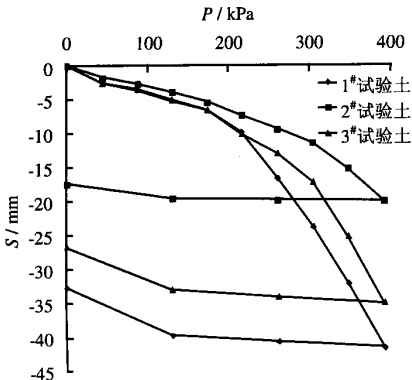


图 6 桩间土地基载荷试验 P-S 曲线
Fig.6 P-S curves of soil between piles

3.2 CFG 桩复合地基应力状态试验

3.2.1 试验方案

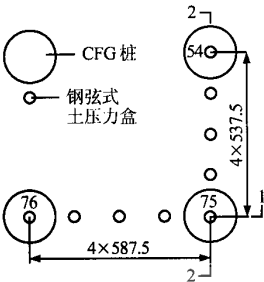
在铺设褥垫层前,在桩顶及桩间土与褥垫层底界面处埋置 9 支 JXY-4 型钢弦式压力盒;在基础封闭层即混凝土垫层与褥垫层界面处埋置 9 支 JXY-4 型钢弦式压力盒。平面布置及剖面布置见图 7,图中 P1~P18 为土压力盒编号。

3.2.2 试验结果及分析

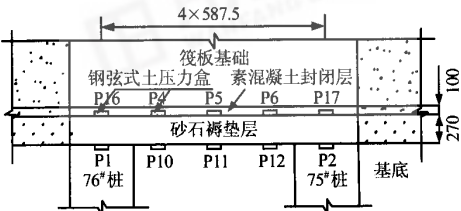
现场采用 SS-2 型便携式频率接收器采集数据,利用下式计算基底压应力:

$$\sigma_y = (f^2 - F^2 - A)K \tag{2}$$

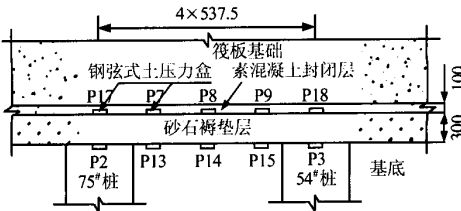
式中: σ_y 为压应力值 (MPa); f 为现场采集的荷载频率; F 为压力盒初始频率; A 为压力盒标定参数。



(a) 土压力盒平面布置示意图



(b) 1-1 剖面布置示意图



(c) 2-2 剖面布置示意图

图 7 土压力盒平面布置示意图及
剖面布置示意图(单位: mm)

Fig.7 Layout of earth pressure cells in plan
and in cross-section(unit: mm)

经过数据处理后,得到各测点随基底应力的变化曲线,见图 8。图中 σ_y 为压力盒应力测值; σ_j 为由上部结构修建过程中结构计算的基底应力。

根据图 8(a)、图 8(b)两图,压力盒应力测值随基底应力呈加速增加的特征。开始压力盒测值增加表明,桩顶压应力随上部结构工程荷载增加而呈加速增加;桩间土压力随上部结构工程荷载增加则呈减速增加。对比图 8(a)和图 8(b)及图 8(c)和图 8(d),其变化趋势都符合上述趋势,但褥垫层顶面压应力值比其底面压应力值大,桩顶相差约 50 %,桩间土相差约 1 倍,这说明褥垫层内应力的扩散作用。当外部荷载为 0 时桩间土不受力,当外部荷载增加时,因桩的模量远大于土的模量,桩间土变形比桩顶变形容易。构成褥垫层的碎石或砂不断迁移补充到桩间土表面上,迁移量与桩间土和桩特性的差异性有关^[13-15]。

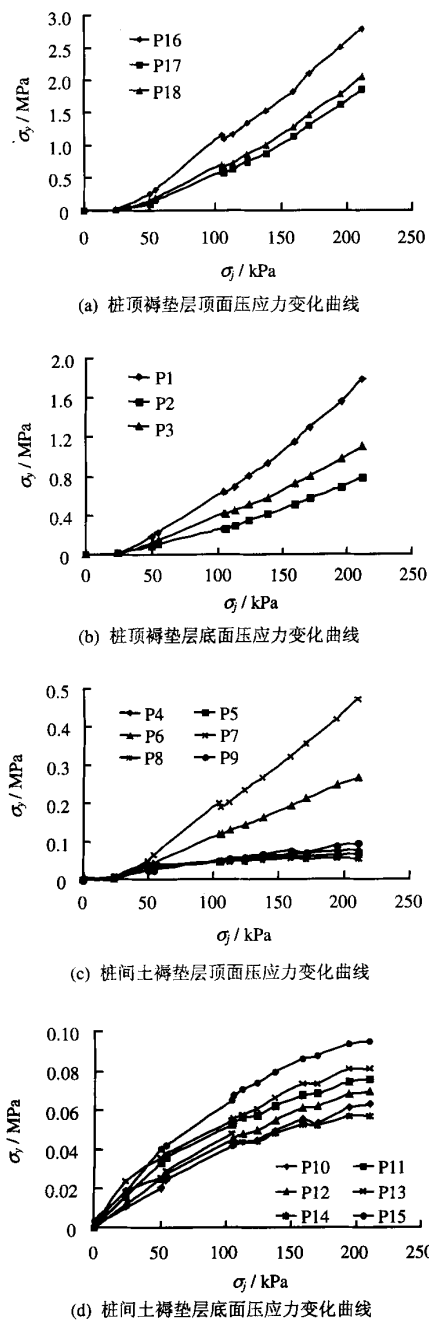


图 8 桩顶及桩间土压应力分布曲线图

Fig.8 Compressive stress distribution curves for pile head and soil between piles

75#桩桩头处压应力较其他两根桩桩头处压应力都小。这与 CFG 桩复合地基中群桩受力的特点一致，即桩所处的位置不同，受力的大小不同，中心桩受力最小。这是由于 75#桩周的土压应力承担了部分桩顶压应力，使得 75#桩顶压应力比其他两根桩的桩顶压应力小。

根据图 8(c)、图 8(d)，褥垫层上桩间土 75#桩周万方数据

的压应力较大，76#桩与 54#桩周的压应力次之，桩间中心的压应力最小。垫层下，76#桩与 75#桩附近桩间土压应力较小，而桩间中心的压应力较大；75#桩与 54#桩附近压应力较大，而桩间中心的压应力较小。由于 75#~54#桩间距比 76#~75#桩间距小，压力盒应力测值有： $\sigma_{p7}>\sigma_{p6}$ ， $\sigma_{p9}>\sigma_{p4}$ ， $\sigma_{p15}>\sigma_{p10}$ ， $\sigma_{p13}>\sigma_{p12}$ ， $\sigma_{p8}<\sigma_{p5}$ ， $\sigma_{p14}<\sigma_{p11}$ ，这表明桩间距小更能提高桩间土的承载力。

将 76#~75#桩间土压应力平均值与 75#~54#桩间土压应力取平均值，得出褥垫层上 76#~75#桩间土压应力平均值与 75#~54#桩间土压应力平均值不相等，有：

1/3 * (sigma_p4 + sigma_p5 + sigma_p6) < 1/3 * (sigma_p7 + sigma_p8 + sigma_p9) (3)

褥垫层下 76#~75#桩间土压应力平均值与 75#~54#桩间土压应力平均值近似相等。这说明通过褥垫层的作用使得桩间土的受力均匀。

将图 8(a)和图 8(b)及图 8(c)和图 8(d)进行对比，将图 8 中的 sigma_y 平均，并与 sigma_j 回归分析，如表 4 所列。

sigma_y = A sigma_j^2 + B sigma_j + C (4)

式中：A，B，C 均为回归系数。

根据表 4 可知，上部结构施工初期桩间土压应力增长速率比桩头处压应力增长速率快，上部结构施工中、后期桩间土压应力增长速率比桩头处压应力增长速率慢。这表明施工开始时，复合地基主要由桩间土承担结构荷载；施工中、后期，复合地基主要由桩承担结构荷载。另外，桩顶及桩间土应力随上部结构荷载增加分别呈明显的加速增加及减速增加，说明褥垫层使桩间土发挥承载作用。

Table 4 Compressive stress correction coefficients				
压力盒编号	回归系数 A / MPa ⁻¹	回归系数 B	回归系数 C / MPa	相关系数 R ²
(P ₁ +P ₂ +P ₃)/3	30	3.7	-0.023 5	0.996 5
(P ₄ +P ₅ +P ₆ +P ₇ +P ₈ +P ₉)/6	3	0.8	-0.001 7	0.996 6
(P ₁₀ +P ₁₁ +P ₁₂ +P ₁₃ +P ₁₄ +P ₁₅)/6	-1	0.6	0.000 8	0.998 1
(P ₁₆ +P ₁₇ +P ₁₈)/3	20	2.4	-0.007 3	0.998 6

图 9 和图 10 说明复合地基上荷载 P 增大的过程中，桩顶平均接触应力 sigma_p 和桩间土平均接触应力 sigma_s 不断协调变化。sigma_p 上升后趋于稳定，sigma_s 也上升然后趋于稳定，但桩的应力增长要快一些，相应的桩-土应力比 n 值也呈现递增趋势而趋于稳定。桩体

所分担的荷载逐渐增大, 桩间土所分担的荷载逐渐减小。桩-土荷载比 n 值也呈现递增趋势而趋于稳定。

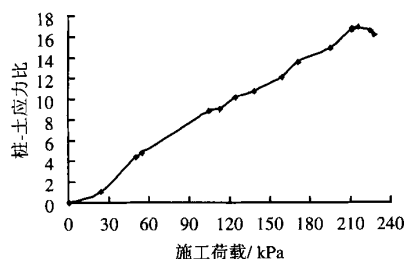


图9 桩-土应力比随荷载变化曲线

Fig.9 Curve for stress ratio of pile and soil and working load

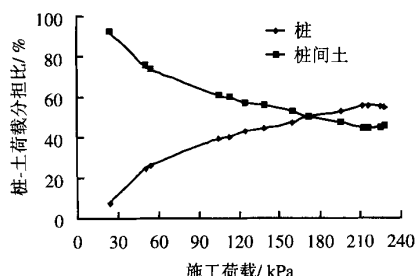


图10 桩-土荷载分担比随荷载变化曲线

Fig.10 Curve for load ratio of pile and soil and working load

这说明 CFG 桩复合地基在上部垂直荷载作用下, 桩间土被压缩, 增加了桩周土对桩体的约束力和抵抗力, 从而增加了桩体的侧摩擦阻力和端承力使荷载逐渐向桩体转移。随着桩-土相对位移的增加, 桩侧摩阻力全部发挥, 桩底端旁扩载体的端阻力开始发挥, 桩体承担的荷载逐渐增大, 最后由桩承担大部分荷载。但相比较于普通混凝土桩, 桩间土仍然发挥了较大的承载能力。

根据大量测试结果表明, 荷载稳定后, 由于褥垫层的调整作用, 桩顶应力和桩间土表面应力始终保持常量, 即桩-土应力比 $n = \sigma_p / \sigma_s$ 为常量, 不再随时间的变化而变化, 而桩体分担的荷载与桩间土体所承担的荷载比也保持在常量。

4 结论

通过试验研究, 确定了褥垫层上下的各测点压应力与基底应力之间的关系, 并得到关系式。试验研究结果还表明, 当施工荷载为 210 kPa 时, 桩-土应力比可达 16。随着施工荷载的增加, 桩体所分担的荷载有所增加、且增加较快, 桩间土体分担荷载有所降低且荷载增加较慢。

万方数据

此外, 还得出桩间距的大小影响到桩间土承载力的发挥, 通过褥垫层的调节使得不同间距的桩间土受力趋于平均。

参考文献

- [1] 邓跃光, 黄荣. CFG 桩复合地基的原理和设计[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 69—73.
- [2] 林晖. CFG 桩复合地基桩土分担荷载比研究[J]. 土工基础, 2004, 18(14): 50—53.
- [3] NAGATAKIS, GOMI H. Expansive admixtures[J]. *Vermont and Concrete Composites*, 1998, 20(3): 163—170.
- [4] EI-ICHI TAZAWA, SHIN GO MIYAZAWA. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(2): 282—287.
- [5] ZHANG FENG, CHANG HUIYOU. Research and development in web usage mining system-key issues and proposed solutions: a survey[C]//In Proceedings of the First IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Beijing: [s. n.], 2002, 12: 986—990.
- [6] SANKAR K PAL, VARUN TALWARM, PABITRA MITRA. Web mining in soft computing framework; relevance, state of the art and future directions[J]. *IEEE Transaction on Neural Network*, 2002, 13(5): 1 163—1 177.
- [7] WANG JICHENG, HUANG YUAN, WU GANGSHAN, et al. Web Mining: Knowledge Discovery on the Web[C]// Systems, Man and Cybernetics, IEEE SMC 99 Conference Proceedings. Japan: IEEE, 1999, 2: 137—141.
- [8] COOLEY R, MOBASHER B, SRIVASTAVA J. Web Mining: Information and Pattern Discovery on the World Wide Web[C]//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. [s. l.]: Newport Beach, 1997: 558—567.
- [9] 中国建筑科学研究院. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] 中国建筑科学研究院. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [11] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [13] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 168—211.
- [14] 潘纪顺, 刘志伟, 姬计法, 等. CFG 桩复合地基承载性状的试验研究[J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 92—94.
- [15] 乔来军, 姬深堂. CFG 桩复合地基的讨论[J]. 岩土工程技术, 1999, (4): 18—21.