

# 长短桩复合地基有限元分析及设计计算方法探讨

葛忻声<sup>1,2</sup> 龚晓南<sup>2</sup> 张先明<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学 建筑与环境工程学院, 山西太原 030024 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江杭州 310027 ;  
3. 杭州当代建筑设计院, 浙江杭州 310012 )

摘要 : 本文对软土中由钢筋混凝土桩与水泥搅拌桩组合而成的长短桩复合地基具体工程进行了研究。利用有限元方法 , 对同地质条件下的长短桩、全长桩、全短桩和天然地基的情况进行了应力、变形的对比分析。从中看出 , 长短桩复合地基在有效减小建筑物沉降量的同时 , 可降低基础沉降差 , 使基础受力更均匀 ; 另外 , 由于长桩的存在 , 可使浅层土应力减少、较深层土的沉降值降低。提出了这种新型复合地基承载力计算、沉降计算的设计计算方法 , 并用实测数据与理论计算值对比 , 验证了这种设计计算的可行性。

关键词 : 长短桩复合地基 ; 有限元法 ; 承载力 ; 沉降

中图分类号 : TU473.1 文献标识码 : A

## FEM analysis and design of long-short-pile composite foundation

GE Xinsheng<sup>1,2</sup>, GONG Xiaonan<sup>2</sup>, ZHANG Xianming<sup>3</sup>

(1. Taiyuan University of Technology, Shanxi 030024, China ;

2. The Geotechnical Institute of Zhejiang University, Zhejiang 310027, China ;

3. Hangzhou Dangdai Architectural Institute, Zhejiang 310012, China )

**Abstract:** A practical case of the long-short-pile composite foundation is presented , in which the long and short piles are made of reinforced concrete and cement-soil respectively. The stress distribution and displacement of the long-short-pile composite foundation、whole-long-pile composite foundation、whole-short-pile composite foundation and nature foundation under the same geological condition have been calculated and compared by FEM. The results show that by use of the long-short-pile composite foundation, the whole settlement is reduced effectively and the settlement difference of foundation slab is cut down. Long-pile makes shallow soil stress reducing and deeper soil displacement falling. A design method of the long-short-pile composite foundation is introduced. After comparing the calculated value of the settlement with the actual measurement , it is proved that the design method is available.

**Keywords:** long-short-pile composite foundation ; FEM ; bearing capacity; settlement

## 1 引言

长短桩复合地基是一种新型的地基处理形式 , 它是利用刚性长桩与刚性、半刚性或柔性短桩相结合对地基进行的综合处理 , 这样可分别发挥其各自特点 , 在

保证处理效果的前提下 , 达到方案合理、节约资金、缩短工期的目的。本文通过具体工程实例 , 对这种复合桩型在外荷作用下的情况进行有限元分析 , 并探讨了这种复合地基的设计计算方法 , 为在实际工程的进一步推广与应用作一个基础。

## 2 工程概况

本工程为位于杭州软土地基之上的塔形商住楼 , 两侧塔楼高 12 层 , 中间为两层连接附房 , 平面布置如

作者简介 : 葛忻声 (1966 - ) 男 , 山西宁武人 , 工学博士 , 一级注册结构工程师。

收稿日期 : 2002 年 7 月

图 1。上部为框架结构 ,商场与住宅之间设置转换层结构。基础为筏板。典型工程地质物理力学指标如表 1。

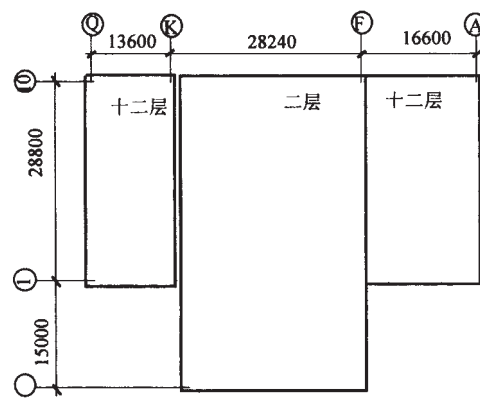


图 1 塔楼平面布置

Fig. 1 Plan of buildings

表 1 典型工程地质物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

层数	土层名称	平均层厚/m	含水量 w/%	天然密度 $\rho/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$E_s/\text{MPa}$	地基承载力特征值 $f_{sk}/\text{kPa}$	桩侧阻力特征值 $q_{sa}/\text{kPa}$
1	杂填塘泥	2					
2	粉质粘土	1.5	30.4	19.2	4.43	120	16
3-1	淤泥质粘土	4.2	42.1	18.4	2.48	70	8
3-2	淤泥粉质粘土	5.1	37.1	18.6	3.11	70	8
3-3	淤泥粉质粘土	11.5	42.5	17.8	2.65	70	10
3-4	淤泥粉质粘土	11	38.3	18	2.79	80	12
3-5	贝壳土	2.2	44.8		2.81	80	15
4	粘土 (圆砾)	3			20	90(300)	18(50)
5	强、中风化岩石						50

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

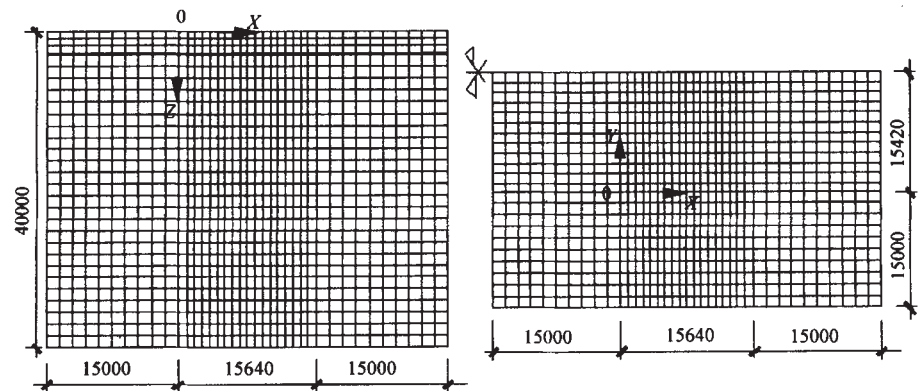


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Model of finite element analysis

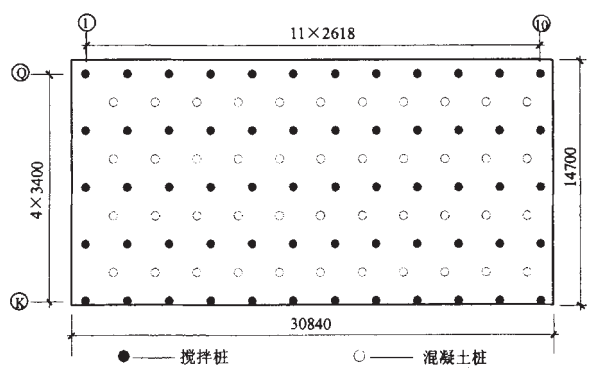


图 2 左侧塔桩位平面布置

Fig. 2 Plan of pile groups

用有限元软件 ANSYS 对上述具体工程的左侧塔楼进行分析, 桩位平面布置如图 2 ,具体设计计算方法见后面的内容。分析时 ,采用三维线弹性模型。严格来讲 ,土的工程性状是具有非线性的 ,但在常规荷载作用下 ,其塑性范围小、非线性表现并不明显 ,土体基本处于弹性状态 ;另一方面 ,即使土体存在非线性 ,用线弹性分析也不能改变其内在规律性的东西。

为了减少计算机时 ,沿长向取左侧塔楼的一半进行对称分析 ,有限元模型见图 3。钢筋混凝土长桩共 24  $\Phi$  500、有限元计算桩长 37m , 水泥搅拌桩共 30  $\Phi$  600、桩长 9m ;基础板厚 1m ,位于其下的碎石垫层厚 0.15m ;基础底面处的附加压力为 163.6kPa ;土层简化为三层 ,计算深度底部为岩石 ,各土层的有限元计算指标可根据实测沉降资料及勘察报告中的压缩指标试算得到。各类数值具体见表 2。

另外 ,也分析了同等土质条件下 ,无桩、全长桩、全短桩的情况 ,如表 3 所示 ,其中  $n_p$  表示长桩在总桩数中的比例。

表 2 有限元计算参数

Table 2 Parameters of finite element analysis

	土层 1	土层 2	土层 3	碎石垫层	混凝土桩	搅拌桩
$E_0/\text{MPa}$	8.4	8.13	60	105	30000	360
$\mu$	0.35	0.35	0.35	0.35	0.2	0.25
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1850	1780	2000	2000	2500	1750
土性描述	包含 1、2、3-1、3-2 层	包含 3-3、3-4、3-5 层	包含 4 层	厚 150mm	有限元计算长 37m	桩长 9m

表 3 有限元计算方案

Table 3 Calculation projects of finite element analysis

	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
桩型	长短桩	全长桩	全短桩	无桩
$n_p/\%$	42.3	100	0	

### 3.2 有限元结果分析

#### 3.2.1 总沉降量在不同方案中的变化情况

表 4 列出不同方案中的计算总沉降量。

图 4 为总沉降量随长桩数量增长的变化曲线。

图 5 为不同方案基底处总沉降量等值线图，图中单位为  $\text{mm}$ 。

从图 4 可看出，随着复合地基中的长桩数量增加，总沉降量减少；而且在一定范围内是迅速减少，超出此范围后则减少的幅度降低。故在实际应用中，有一个优化设计的问题。

从图 5 可看出，全短桩沉降等值线与无桩沉降等值线是相似的，仅是数值差异，均符合常规的中部大、边缘小的规律；其基底沉降差较大。全短桩为 30mm，无桩为 40mm。而长短桩沉降等值线与全长桩沉降等值线相似，其沉降分布规律为中部小、边缘大的性质；其基底沉降差小：长短桩为 3.6mm，全长桩为 0.4mm。可见，由于长桩的存在，不仅影响土总的沉降值，也影响基底土的沉降分布规律，使基础受力更趋于均匀。

#### 3.2.2 基底应力在不同方案中的变化情况

表 4 不同方案的平均总沉降量

Table 4 Total calculated settlements of different projects

	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
$S/\text{mm}$	7.31	3.65	169.5	200.3

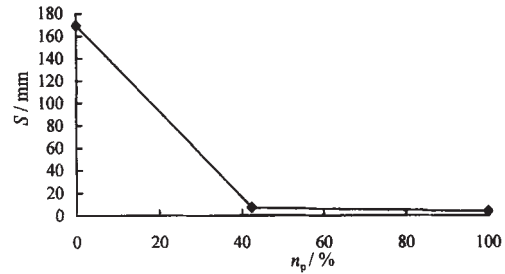


图 4 总沉降量随长桩数量增长的变化曲线

Fig. 4  $n_p$ - $S$  curve

图 6 为不同方案基底处土应力等值线立体图。图 7 为不同方案情况下基础范围内土应力平均值随深度的变化。

从图 6、图 7 可看出如下一些特点：从基底土应力分布来看，天然地基应力分布与全短桩地基的应力分布相近，仍然是马鞍形——边缘大、中间小，仅是量值

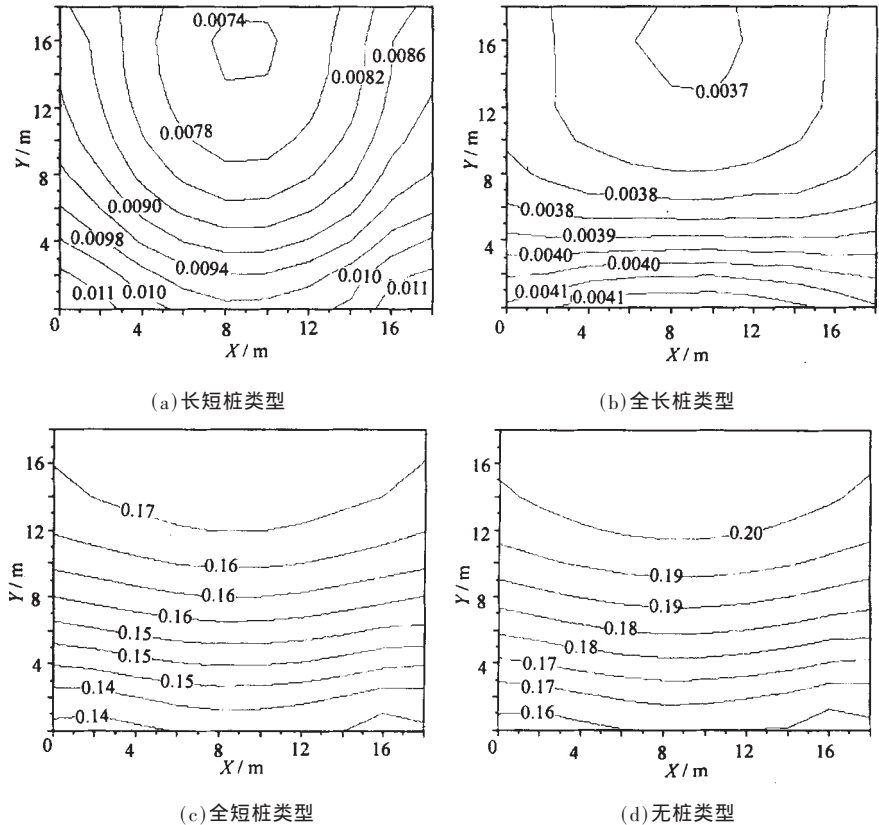


图 5 不同方案基底处总沉降量等值线图

Fig. 5 Isolines diagrams of total settlements at foundation bases for different projects

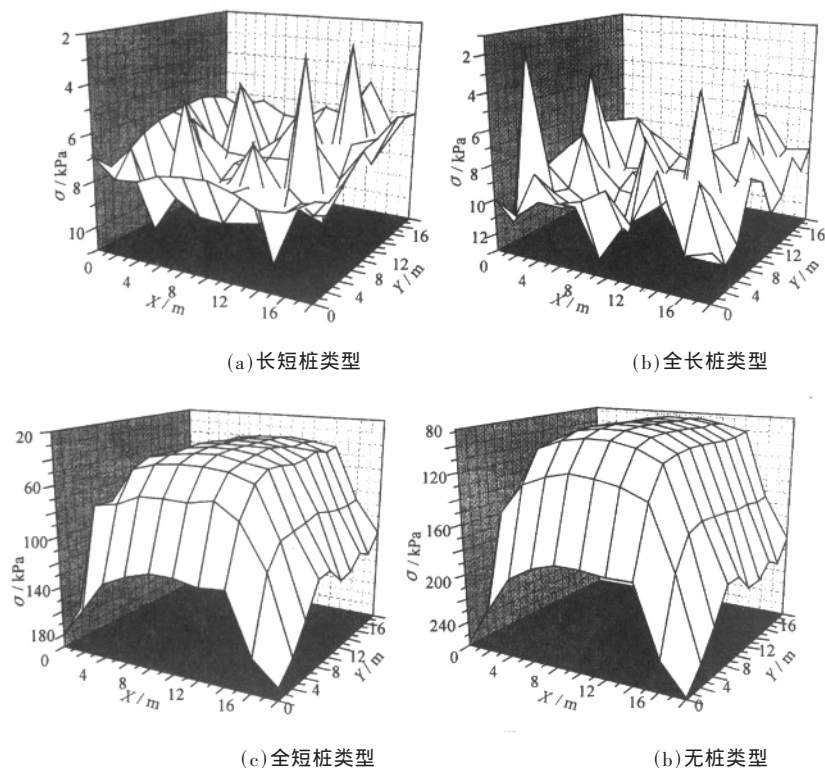


图6 不同方案基底处土应力等值线立体图

Fig. 6 Soil stress space diagram under foundation base for different projects

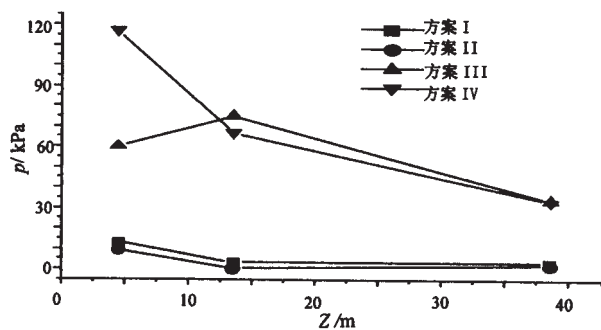


图7 不同方案桩间土应力平均值随深度的变化

Fig. 7 Curves of soil stress vs. depth for different projects

上比天然地基的小；全长桩与长短桩方案的应力分布相近，但后者变化幅度小，更均衡一些。从基底土应力沿深度变化来看，在浅层有桩的方案比无桩方案可大大减少土中的应力，特别是有长桩存在时，减少的幅度更大；在深层，有长桩的方案由于长桩传递荷载，使得土中的应力比无桩或短桩的方案中的应力减少很多。

### 3.2.3 不同部位的沉降量在不同方案中的变化情况

我们将整个复合地基的沉降分为如下几部分，

$S = S_1 + S_2 + S_3$ ，其中， $S_1$  为短桩范围内土的压缩量； $S_2$  为短桩桩端至长桩桩端范围内土的压缩量； $S_3$  为长桩桩端下面的土的压缩量。在本文中，由于长桩是支持在岩石上的， $S_3 = 0$ ，故仅考虑  $S_1$ 、 $S_2$  的变化情况。表 5 列出不同方案中沉降量的变化情况。

表 5 不同方案中沉降量的变化

Table 5 Variations of settlements in different projects

	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
$S/\text{mm}$	7.31	3.65	169.5	200.3
$S_1/\text{mm}$	4.37	2.5	33.9	68.6
$S_2/\text{mm}$	2.94	1.15	135.6	131.7
$m_p/\%$	40.2	31.5	80	65.7

况，其中  $m_p = S_2/S_0$ 。

图 8 为  $m_p$  随长桩数量  $n_p$  的变化曲线。

从表 5、图 8 可看出：无桩或全短桩方案中， $S_2$  所占的比例是很大的，均超过 50%；但对长短桩或全长桩， $S_2$  所占的比例均小于 50%。可见，长桩的加入可以减少土体深层的沉降值；同时图 8 中显示  $n_p \leq 40\%$  时，可大幅地减少  $S_2$  的值。

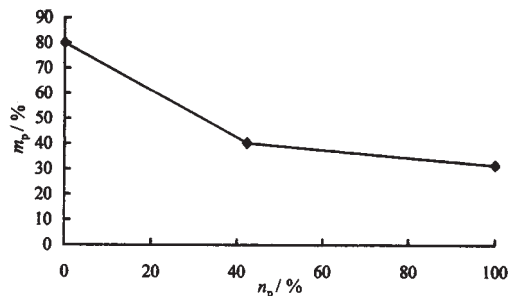


图8  $m_p$  随长桩数量  $n_p$  的变化曲线

Fig. 8  $n_p$ - $m_p$  curve

## 4 长短桩复合地基的设计计算

### 4.1 复合地基承载力设计计算

复合地基承载力计算公式为

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + \beta_1 m_2 \frac{R_{a2}}{A_{p2}} + \beta_2 (1 - m_1 - m_2) f_{sk} \quad (1)$$

式中， $m_1$ 、 $m_2$  分别为长桩、短桩的置换率； $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$  分别为长桩、短桩单桩竖向承载力特征值； $A_{p1}$ 、 $A_{p2}$  分别为

长桩、短桩横截面面积;  $f_{\text{spk}}$ 、 $f_{\text{sk}}$  分别为复合地基、桩间土的承载力特征值;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为短桩、桩间土强度发挥系数。

短桩单桩竖向承载力特征值, 可由载荷试验确定或由下两式计算的较小值确定

$$R_{a2} = \eta f_{cu} A_{p2} \tag{2}$$

$$R_{a2} = u_p \sum_i q_{sai} l_i + \zeta A_{p2} q_{pa} \tag{3}$$

式中,  $f_{cu}$  为与搅拌桩水泥土配方相同的立方体试块 (边长为 70.7mm 或 50mm) 在标准养护条件下 28d 龄期立方体抗压强度平均值;  $l_i$ 、 $u_p$  分别为桩在不同土层中的长度、桩周长;  $q_{sai}$ 、 $q_{pa}$  分别为不同土层桩周土的摩阻力特征值、桩端土地基承载力特征值;  $\eta$ 、 $\zeta$  为折减系数。

应用式 (1), 可以通过调整长桩桩数 (反映为  $m_1$  值) 短桩桩数 (反映为  $m_2$  值) 桩长来进行优化设计。

本工程中, 经过优化设计, 整个左侧塔楼基础桩位平面布置如图 2, 桩距均为 2618×3400, 长桩、短桩的置换率分别为  $m_1 = 0.0191$ 、 $m_2 = 0.037$ 。

单桩竖向承载力特征值计算如下

$$R_{a1} = u_p \sum_i q_{sai} l_i + \zeta A_{p1} q_{pa} = 1587.8 \text{ kN}$$

$$R_{a2} = u_p \sum_i q_{sai} l_i = 135 \text{ kN}$$

长短桩复合地基的承载力为

$$f_{\text{spk}} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + \beta_1 m_2 \frac{R_{a2}}{A_{p2}} + \beta_2 (1 - m_1 - m_2) f_{\text{sk}} = 221.4 \text{ kPa}$$

而实际基础底面压力为 212kPa, 小于复合地基的承载力 221.4kPa, 故设计的承载力满足要求。

#### 4.2 复合地基沉降计算

##### 4.2.1 计算简图

沉降计算选取如图 2 的平面布置, 剖面情况如图 9。沿竖直方向的计算沉降区域分为三部分: 长短桩区域  $H_1$ 、长桩区域  $H_2$ 、下卧层区域  $H_3$ 。

基础底面处的附加压力为  $p_0 = 163.6 \text{ kPa}$ 。由于长桩底为强风化、中分化岩层, 故下卧层区域  $H_3$  的压缩量可忽略不计。这样, 沉降计算公式就不包括长桩以下土层的沉降计算。

##### 4.2.2 沉降计算

沉降计算中的每一区域段均采用《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002) [1] 中的方法, 计算公式为

$$S_c = \Psi (S_{H1} + S_{H2}) = \Psi \left[ \sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{E_{\text{spi}}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \right.$$

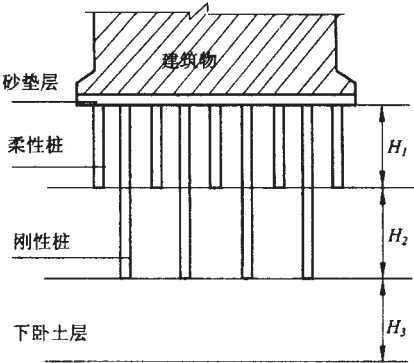


图 9 长短桩复合地基剖面示意图

Fig. 9 Profile of composite foundation

$$\sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{E_{\text{spi}}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})] \tag{4}$$

式中,  $S_c$  为计算沉降量;  $S_{H1}$  为  $H_1$  区域的计算沉降量;  $S_{H2}$  为  $H_2$  区域的计算沉降量;  $\Psi$  为沉降计算修正系数;  $p_0$  为基础底面处的附加压力;  $E_{\text{spi}}$  为天然土层与桩形成的复合模量, 砂垫层的模量按文献 [2] 取;  $Z_i$ 、 $Z_{i-1}$  为基础底面至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面的距离;  $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$  为基础底面计算点至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面范围内平均附加应力系数;  $n_1$ 、 $n_2$  为区域  $H_1$ 、区域  $H_2$  内土层数。

$H_1$  区域、 $H_2$  区域内的复合模量公式 [3] 如下

$$E_{\text{sp1}} = m_1 E_{p1} + m_2 E_{p2} + (1 - m_1 - m_2) E_s \tag{5}$$

$$E_{\text{sp2}} = m_1 E_{p1} + (1 - m_1) E_s \tag{6}$$

式中,  $E_{\text{sp1}}$ 、 $E_{\text{sp2}}$  分别为  $H_1$  区域、 $H_2$  区域复合模量;  $E_{p1}$ 、 $E_{p2}$ 、 $E_s$  分别为长桩、短桩、天然土的压缩模量, 其中柔性桩的取值是结合本工程的设计、施工情况并参照文献 [3] 而定的;  $m_1$ 、 $m_2$  分别为长桩、短桩的置换率。

复合模量计算见表 6, 沉降计算汇总见表 7。

表 6 复合模量的计算

Table 6 Calculation of composite modulus					
土层	$E_{p1}/\text{MPa}$	$E_{p2}/\text{MPa}$	$E_s/\text{MPa}$	$E_{\text{sp1}}/\text{MPa}$	$E_{\text{sp2}}/\text{MPa}$
3-1 层	30000	360	2.48	577.6	
3-2 层	30000	360	3.11	578.2	
3-3 层	30000		2.65		575.6
3-4 层	30000		2.79		575.7
3-5 层	30000		2.81		575.8
4 层	30000		20		592.6



表 7 沉降计算汇总

Table 7 Settlement calculation

土层编号	$Z_i/\text{m}$	$L/B$	$Z_i/B$	$\overline{4\alpha_i}$	$E_{sp,i}/\text{MPa}$	$\Delta S_i/\text{mm}$	$\Sigma \Delta S_i/\text{mm}$
	0	2.098	0	1		0	
垫层	0.15	2.098	0.02	0.9999	35	0.7	0.7
3-1	4.2	2.098	0.57	0.9824	577.6	1.126	1.826
3-2	9.3	2.098	1.265	0.8995	578.2	1.199	3.025
3-3	20.8	2.098	2.829	0.6679	575.6	1.57	4.595
3-4	31.8	2.098	4.326	0.5169	575.7	0.721	5.316
3-5	34	2.098	4.625	0.494	575.8	0.104	5.42
4	37	2.098	5.034	0.4676	592.6	0.139	5.559

5 实测沉降值与理论计算值的比较

沿整个塔型商住楼的外墙均匀布置 12 个沉降观测点，除中间连接附房突出部分的 2 个观测点值略小

表 8 实测沉降观测结果

Table 8 Measured settlements of whole building

观测次数	工程情况	$S_{\min}/\text{mm}$	$S_{\max}/\text{mm}$	$S/\text{mm}$
1	地下室结构	0	0	0
2	一层结构	0	1	0.5
3	二层结构	1	2	1.5
4	三层结构	1	3	1.8
5	四层结构	2	4	3.5
6	五层结构	3	5	4.4
7	六层结构	4	6	5.0
8	七层结构	5	7	6.0
9	八层结构	5	7	6.1
10	九层结构	5	7	6.7
11	十层结构	5	8	7.2
12	十一层结构	6	8	7.4
13	十二层结构	7	8	8.0
14	屋面结构	7	9	8.6
15	装饰初期	7	9	8.8

之外，其余测点的值基本均匀。实测沉降观测结果见表 8，其中  $S_{\min}$  为最小累计沉降、 $S_{\max}$  为最大累计沉降、 $S$  为平均沉降。

由表 8 的实测沉降值可看出，至整体结构完工实测沉降值平均为 8.8mm，计算值比实测值稍。这主要是与计算中未考虑周围建筑物对它的影响所致，但同时也说明这种复合模量的沉降计算方法在软土区域是可用于长短桩复合地基的沉降计算的。但是沉降经验系数的取得还需在大量实际工程的验证基础上才能得到较合适的值。

6 结论

通过长短桩复合地基有限元的计算分析及设计计算方法的探讨，可得出如下结论：

① 长短桩复合地基可大幅度减少总沉降量、基底

的沉降差，使基础受力更均匀。  
② 长短桩复合地基可使浅层土的应力减少，通过长桩将力传递到深处，长短桩复合地基中，由于长桩的存在使  $H_z$  范围的沉降值减少。

③ 用现有规范提倡的方法来计算长短桩复合地基的沉降，通过上述例子可看出是简便可行的，但其中某些参数的选取还需大量工程实例的验证。

参 考 文 献

[1] GBJ50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].  
[2] 张季容，朱向荣．简明建筑基础计算与设计手册[M]．北京：中国建筑工业出版社，1997：15—18.  
[3] 龚晓南．复合地基[M]．浙江：浙江大学出版社，1992：78—139.

(上接第 90 页)

参 考 文 献

[1] 王余庆，孙建生，韩仲卿，邹敏．挤密桩法在加固可液化地基中的应用[J]．岩土工程学报，1989，11(2)：18—24.  
[2] 盛崇文．振冲桩、挤密桩和石灰桩[J]．岩土工程学报，1988，10(6)：94—103.  
[3] 李宏秀．采用碎石桩加固龙口电厂地基[J]．岩土工程学报，1985，7(4)：12—23.  
[4] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S].  
[5] 李月健，陈云敏，凌道盛．土体内空穴球形扩张问题的一

般解及应用[J]．土木工程学报，2002，35(1)：93—98.  
[6] 李月健．土体内空穴球形扩张及挤土桩沉桩机理研究[D]．浙江大学，2001.  
[7] 华东水利学院土力学教研室主编．土工原理与计算(上册)[M]．北京：水利电力出版社，1982.  
[8] 孟高头编著．土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]．北京：地质出版社，1997.  
[9] 常士骠主编．工程地质手册[M]．北京：中国建筑工业出版社，1992.