

# 复合地基复合模量的分析和应用

荆和平<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西冶金岩土工程勘察总公司, 山西 太原 030002)

**摘要:** 讨论了多桩型复合地基复合模量的基本概念, 通过对具体工程的沉降计算和实测结果对比分析, 对复合模量的正确分析和应用提出了一些建议。

**关键词:** 复合地基; 复合模量; 沉降计算

**中图分类号:** TU473.1<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2006)11-0009-04

**Analysis and Application of Composite Modulus of Composite Subgrade/JING He-ping<sup>1,2</sup>** (1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China; 2. Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Exploring General Company, Taiyuan Shanxi 030002, China)

**Abstract:** This paper discusses the basic conception about composite modulus of multi-type-pile composite subgrade. Through engineering examples, the result of analysis of subsidence and subsidence observation are contrasted and some suggestion given for the analysis and application of composite modulus.

**Key words:** composite subgrade; composite modulus; analysis of subsided

复合地基是由地基土和纵向增强体(桩)、褥垫层共同组成的。复合地基在进行变形计算时, 复合模量是表征复合土体抵抗变形的能力, 复合模量与地基和增强体(桩)的模量密切相关。地基模量是指土的压缩模量, 桩的模量是反映桩抵抗变形能力的指标。本文通过理论分析和工程实际, 分析复合地基的复合模量与地基和桩的模量的形成关系。

复合地基的变形计算同样按照现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002) 有关规定执行, 采用单向分层总和法计算, 而由桩和土组成的复合地基的复合模量在使用上, 可以理解为复合土体的压缩模量。

## 1 复合模量的计算表达方式

现行的《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002) 根据地基处理方法, 关于复合模量有以下几种表达方式。

(1) 水泥土搅拌法采用:

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

(2) 振冲法、砂石桩法、石灰桩法、柱锤冲扩桩法采用:

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

(3) 水泥粉煤灰碎石桩法、夯实水泥土桩法采

用:

$$E_{sp} = \xi E_s \quad (3)$$

(4) 灰土挤密桩和土挤密桩, 采用载荷试验的变形模量代替。

## 2 复合模量的理论意义

### 2.1 表达式(1)成立的特定条件

- (1) 复合地基上的基础无限大, 且绝对刚性;
- (2) 桩端落在坚硬土层上, 桩没有向下的刺入变形;
- (3) 桩长是有限的。

在这种理想状态下, 桩、土受力如图 1 所示, 桩和桩间土只发生压缩变形。

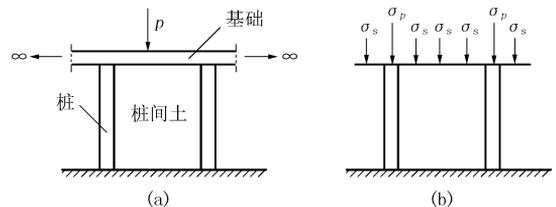


图 1 理想状态下的桩、土受力示意图

如果  $\varepsilon$  代表复合地基应变,  $\varepsilon_p$  代表桩体应变,  $\varepsilon_s$  代表桩间土应变,  $\sigma$  代表复合地基应力,  $\sigma_p$  代表桩顶应力,  $\sigma_s$  代表桩间土表面应力, 并且假设  $\varepsilon = \varepsilon_p = \varepsilon_s$ 。

收稿日期: 2006-05-26

作者简介: 荆和平(1965-), 男(汉族), 山西平陆人, 山西冶金岩土工程勘察总公司副总工程师、高级工程师, 探矿工程专业, 太原理工大学建筑与土木工程学院工程硕士, 研究方向为岩土工程设计与施工管理, 山西省太原市上三桥街 39 号山西冶金岩土工程勘察总公司, (0351) 3533252、13834166610, jingheping8@163.com。

则:  $\varepsilon_s = \sigma_s / E_s, \varepsilon_p = \sigma_p / E_p$

得到:  $\sigma_s / E_s = \sigma_p / E_p$

则:  $\sigma_p / \sigma_s = E_p / E_s$

即:桩土应力比等于桩土的压缩模量比,说明在理想条件下,桩土荷载分担是按桩土压缩模量分配的。

根据材料力学原理:

$$E_{sp} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{[m\sigma_p + (1-m)\sigma_s]}{\varepsilon} = mE_p + (1-m)E_s$$

式中: $E_p$ ——桩体材料的压缩模量; $E_s$ ——加固后桩间土的压缩模量。

但是,式(1)所代表的理想状态是不多见的,利用其确定的复合模量计算的地基变形结果,与实际结果差别较大。

式(1)所表达的复合模量在概念上还有许多不足:

(1)不能对桩长有所反映。对于水泥土搅拌桩、CFG桩等有一定粘结强度桩型的复合地基,桩越长,桩受的侧摩阻力越大,单桩承载力和复合地基承载力越高,复合模量越大,桩长效应越明显;而如果按式(1)计算,虽然桩长不同,但由于桩体材料压缩模量相同,计算的复合模量是相同的,无法反映桩长效应。

(2)不能对桩的端阻有所反映。对于水泥土搅拌桩、CFG桩等有一定粘结强度的桩,桩体材料相同、桩径、桩长范围内土的性质、面积置换率相同的两个复合地基,一个桩端落在坚硬土层上,一个桩端落在软土层上。试验表明,桩端落在坚硬土层上的单桩承载力、复合地基承载力和复合模量比桩端落在软土层上要高,而用式(1)计算的复合模量是相同的。所以,式(1)不能正确反映桩的端阻效应。

## 2.2 式(2)的推导需符合的条件

(1)假定当荷载接近或达到复合地基承载力

时,桩土应力比等于桩土模量比,即:

$$n = E_p / E_s'$$

式中: $E_s'$ ——加固后桩间土模量; $n$ ——桩土应力比; $E_p$ ——现场单桩载荷试验的桩的变形模量。

(2)加固后桩间土模量是加固前天然地基模量的 $\alpha$ 倍,即:

$$E_s' = \alpha E_s$$

式中: $\alpha$ ——桩间土承载力提高系数, $E_p = nE_s' = n\alpha E_s$ 。

复合模量按下式组合:

$$\begin{aligned} E_{sp} &= mE_p + (1-m)E_s' = mn\alpha E_s + (1-m)\alpha E_s \\ &= (nm + 1 - m)\alpha E_s \\ &= [1 + m(n-1)]\alpha E_s \end{aligned}$$

令: $\xi = [1 + m(n-1)]\alpha$

上式为: $E_{sp} = \xi E_s$

复合地基承载力表达式为:

$$f_{sp,k} = [1 + m(n-1)]\alpha f_{ak}$$

则: $\xi = f_{sp,k} / f_{ak}$

$\xi$ 即是承载力提高系数,也是模量提高系数,即式(2)与式(3)是一致的,只是表达方法不同。

## 2.3 规范的另一表达方法

规范的另一表达方法是采用载荷试验的变形模量代替复合模量,这只有通过工程实践,来比较其与实际观测结果的误差程度。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

山西省总工会高层住宅楼,地上17层,地下2层,剪力墙结构,筏片基础,基础埋深-7.40 m,基底压力标准值360 kN/m<sup>2</sup>。建筑物基础长63.0 m,宽20.16 m。地基土物理力学指标见表1。

表1 地基土物理力学指标

层号	土层名称	厚度 /m	含水量 w/%	天然重度 / (kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	液性指数 I <sub>L</sub>	压缩模量/MPa				地基承载力 /kPa
							E <sub>0.2-0.2</sub>	E <sub>0.2-0.3</sub>	E <sub>0.3-0.4</sub>	E <sub>0.4-0.6</sub>	
①	填土	1.80		18.0							70
②	砾砂	4.20		19.0							140
③ <sub>1</sub>	粉质粘土	7.92	27.7	19.5	0.795	0.71	5.55	8.11	9.57	12.66	125
③ <sub>2</sub>	粉质粘土	4.43	24.8	20.0	0.697	0.53	7.65	10.60	13.17	19.26	240
④	粉土	7.87	23.1	20.4	0.637	0.71	15.60	22.70	27.90	34.79	200
⑤	细粉砂	7.28		20.2						41.00	220
⑥	粉质粘土	5.30	23.9	20.1	0.637	0.57	7.15	9.12			240
⑦	砾砂	4.38								37.00	240

本工程采用CFG桩复合地基。桩径400 mm,桩长12.0 m,桩间距1.26 m,正方形布置,面积置换

率 $m$ 为0.079。桩顶标高-7.40 m,基底位于③<sub>1</sub>层,桩端位于③<sub>2</sub>层粉质粘土,复合地基单桩静载试

验承载力特征值 280 kPa。

### 3.2 复合地基复合模量采用 3 种方法取值

(1) 经理论计算的复合地基承载力提高系数, 即为复合地基模量提高系数。

理论计算的复合地基承载力提高系数:

$$\xi = [1 + m(n - 1)] = 1.158$$

则③<sub>1</sub>层模量取  $E_{sp1} = \xi E_{s1} = 1.158 \times 9.57 = 11.1 \text{ MPa}$ ;

③<sub>2</sub>层模量取  $E_{sp2} = \xi E_{s2} = 1.158 \times 19.2 = 22.3 \text{ MPa}$ ;

CFG 桩端以下各层土仍采用原状土的模量。

(2) 经复合地基单桩静载试验的复合地基承载力提高系数, 即为复合地基模量提高系数。

复合地基单桩静载试验的复合地基承载力提高系数:

$$\xi = f_{sp,k} / f_{ak} = 280 / 125 = 2.24$$

则③<sub>1</sub>层模量取  $E_{sp1} = \xi E_{s1} = 2.24 \times 9.57 = 21 \text{ MPa}$ ;

③<sub>2</sub>层模量取  $E_{sp2} = \xi E_{s2} = 2.24 \times 19.2 = 43 \text{ MPa}$ ;

CFG 桩端以下各层土仍采用原状土的模量。

(3) 采用载荷试验的变形模量代替复合地基的复合模量。

本工程共做了 5 组单桩复合地基载荷试验, 试验结果见表 2。利用浅层平板载荷试验变形模量计算公式, 计算复合地基变形模量。

$$E_0 = I_0(1 - \mu_0)pd/s \quad (4)$$

式中:  $I_0$ ——方形承压板, 取 0.886;  $\mu_0$ ——土的泊松比, 0.28;  $d$ ——承压板边长, 1.26 m;  $p$ —— $p-s$  曲线线性段压力, kPa;  $s$ ——与  $p$  对应的沉降, mm。

即③<sub>1</sub>层模量取  $E_{sp1} = 42 \text{ MPa}$ , ③<sub>2</sub>层模量同样取

表 2 复合地基载荷试验变形模量试验结果

载荷试验序号	压力 $p$ /kPa	沉降 $s$ /mm	变形模量 $E_0$ /MPa	变形模量平均值 /MPa
1	567	14.1	41.4	
2	567	16.9	34.6	
3	567	13.6	43.0	42
4	567	14.1	41.4	
5	567	11.8	49.5	

③<sub>1</sub>层模量提高倍数,  $E_{sp2} = \xi E_{s2} = (42/9.57) \times 19.2 = 83 \text{ MPa}$ , CFG 桩端以下各层土仍采用原状土的模量。

## 4 沉降计算结果

### 4.1 沉降计算简图(见图 2)

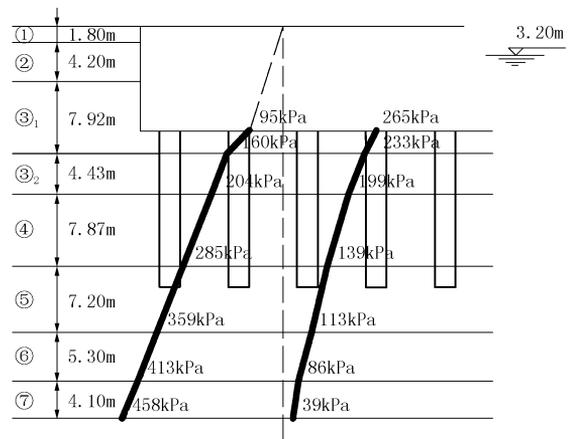


图 2 沉降计算简图

建筑物基底土的自重应力:  $\sigma_{cz} = 94.6 \text{ kPa}$ ;

建筑物基底总压力:  $p = 360 \text{ kPa}$ ;

建筑物基底附加应力:  $p_0 = p - \sigma_{cz} = 360 - 94.6 = 265 \text{ kPa}$ 。

### 4.2 采用第一种复合模量的计算结果(见表 3)

表 3 第一种复合模量的计算结果

土层序号	$z/m$	$L/b$	$z/r$	$\bar{\alpha}$	$z \bar{\alpha}$	$z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$	$E_{si}/\text{MPa}$	$E_{spi}/\text{MPa}$	$\Delta S_i/\text{mm}$	$\sum \Delta S_i/\text{mm}$
③ <sub>1</sub>	0	3.2	0	1	0					
③ <sub>1</sub>	6.82	3.2	0.68	0.98	6.7	6.7	9.57	11.1	160	160
③ <sub>2</sub>	12	3.2	1.2	0.92	11.0	4.3	19.2	22.3	51	211
④	19.8	3.2	2	0.8	15.8	4.8	34.8	34.8	36.6	248
⑤	27	3.2	2.7	0.71	19.2	3.4	41	41	22	270
⑥	32.3	3.2	3.2	0.65	21.3	1.7	18	18	25	295
⑦	33.3	3.2	3.3	0.67	22.3	1	37	37	7	302

确定沉降计算深度  $z_n$ : 表 3 中  $z = 33.3 \text{ m}$  深度范围内的计算沉降量为 302 mm, 相应于 32.3 ~ 33.3 m 深度范围〔按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002) 表 5.3.6 往上取  $\Delta z = 1.0 \text{ m}$ ] 土层计

算沉降量为  $7 \text{ mm} \leq 0.025 \times 302 \text{ mm}$ , 满足要求, 所以, 确定沉降计算深度  $z_n = 33.3 \text{ m}$ 。

确定  $\psi_s$ :

$$\begin{aligned} \bar{E}_s &= \left( \sum_{i=1}^n A_i / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{E_{si}} \right) \\ &= \frac{p_0 (z_n \bar{\alpha}_n - 0 \times \bar{\alpha}_0)}{p_0 \left( \frac{z_1 \bar{\alpha}_1 - 0 \times \bar{\alpha}_0}{E_{s1}} + \frac{z_2 \bar{\alpha}_2 - z_1 \bar{\alpha}_1}{E_{s2}} + \frac{z_3 \bar{\alpha}_3 - z_2 \bar{\alpha}_2}{E_{s3}} \right)} \\ &= 20.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

由《建筑地基基础设计规范》(GB 50007 - 2002)表 5.3.5 得  $\psi_s = 0.2$ 。

计算基础中点的最终沉降量:

$$s = \psi_s \sum \Delta S_i = 0.2 \times 308 = 62 \text{ mm}$$

4.3 采用第二种复合模量的计算结果(见表 4)

表 4 第二种复合模量的计算结果

土层序号	$z/m$	$L/b$	$z/r$	$\bar{\alpha}$	$z\bar{\alpha}$	$z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$	$E_{si}/\text{MPa}$	$E_{spi}/\text{MPa}$	$\Delta S_i/\text{mm}$	$\sum \Delta S_i/\text{mm}$
③ <sub>1</sub>	0	3.2	0	1	0					
③ <sub>1</sub>	6.82	3.2	0.68	0.98	6.7	6.7	9.57	21	84.5	84.5
③ <sub>2</sub>	12	3.2	1.2	0.92	11.0	4.3	19.2	43	26.5	111.0
④	19.8	3.2	2	0.8	15.8	4.8	34.8	34.8	36.6	148
⑤	27	3.2	2.7	0.71	19.2	3.4	41	41	22	170
⑥	32.2	3.2	3.2	0.658	21.3	1.7	18	18	25	195
⑦	33.3	3.2	3.3	0.67	22.3	1	37	37	7	202

同样,求得沉降计算深度  $z_n = 33.3 \text{ m}$ 。 $\psi_s$  取 0.2。

计算基础中点的最终沉降量:

$$s = \psi_s \sum \Delta S_i = 0.2 \times 202 = 40.4 \text{ mm}$$

4.4 采用第三种复合模量的计算结果(见表 5)

表 5 第三种复合模量的计算结果

土层序号	$z/m$	$L/b$	$z/r$	$\bar{\alpha}$	$z\bar{\alpha}$	$z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$	$E_{si}/\text{MPa}$	$E_{spi}/\text{MPa}$	$\Delta S_i/\text{mm}$	$\sum \Delta S_i/\text{mm}$
③ <sub>1</sub>	0	3.2	0	1	0					
③ <sub>1</sub>	6.82	3.2	0.68	0.98	6.7	6.7	9.57	42	42.3	42.3
③ <sub>2</sub>	12	3.2	1.2	0.92	11.0	4.3	19.2	83	13.7	56
④	19.8	3.2	2	0.8	15.8	4.8	34.8	34.8	36.6	93
⑤	27	3.2	2.7	0.71	19.2	3.4	41	41	22	115
⑥	32.2	3.2	3.2	0.658	21.3	1.7	18	18	25	140
⑦	33.3	3.2	3.3	0.67	22.3	1	37	37	7	147

同样,求得沉降计算深度  $z_n = 33.3 \text{ m}$ 。 $\psi_s$  取 0.2。

计算基础中点的最终沉降量:

$$s = \psi_s \sum \Delta S_i = 0.2 \times 147 = 29.4 \text{ mm}$$

## 5 结论

(1) 经过理论计算,采用复合地基模量提高系数为复合地基承载力提高系数,计算的建筑物沉降量最大,为 62 mm;采用经复合地基单桩静载试验的复合地基承载力提高系数,为复合地基模量提高系数,计算的建筑物沉降量为 40.4 mm;采用复合地基载荷试验的变形模量代替复合地基的复合模量,计算的建筑物沉降量最小,为 29.4 mm。

(2) 建筑物沉降观测资料表明,建筑物封顶时建筑物沉降量为 17 mm,根据经验,封顶时沉降量为最终沉降量的 50% ~ 70%,该建筑物最终沉降量为 26 ~ 29 mm;与采用复合地基载荷试验的变形模量,

代替复合地基的复合模量计算的建筑物沉降,最为接近。而采用复合地基模量提高系数为复合地基承载力提高系数,计算的沉降计算结果与实际观测结果相差最大。

(3) 经过几种方法的沉降计算结果与工程实例比较,本文建议采用复合地基载荷试验的变形模量代替复合地基的复合模量计算建筑物的沉降。

(4) 复合地基变形计算中,复合模量的正确选用,除了理论研究,还需要更多的工程实例,积累完整的沉降观测资料,使设计计算更加符合实际。

## 参考文献:

- [1] GB 50007 - 2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [2] JGJ 79 - 2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 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.