复合地基沉降计算的复合模量探讨

闫雪峰　　闫明礼
（冶金部建筑研究总院地基所，100088）　（中国建筑科学研究院地基所，100013）

提　要　本文通过分析不同桩型复合地基的试验结果和工程实例，对《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-91复合模量计算公式 $E_{sp}=mE_p+(1-m)E_s$ 中，E_p 采用桩体压缩模量产生的问题进行了讨论，进一步阐明了 E_p 的物理意义及合理确定方法。

一　前　言

复合地基是当今应用最广泛的地基处理技术之一，其设计包括承载力计算和变形计算，就目前水平而言，沉降计算仍沿用天然地基的单向分层总和法。所不同的是，复合地基采用桩土复合模量。比如：《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91 中规定高压喷射注浆桩(旋喷桩)复合地基的复合模量为：

$$E_{sp}=[A_p E_p+(A_e-A_p) E_s]/A_e=m E_p+(1-m) E_s \qquad (1)$$

式中：E_{sp}——复合模量(MPa)；

A_e——1 根桩承担的处理面积(m^2)；

A_p——桩的平均截面积(m^2)；

m——面积置换率，$m=A_p/A_e$；

E_p——桩体的压缩模量(MPa)，采用砼弹性割线模量方法确定；

E_s——桩间土的压缩模量(MPa)。

用公式(1)计算复合模量时，采用了桩体的压缩模量 E_p 和桩间土的压缩模量 E_s。E_p 能否采用桩体压缩模量并按弹性割线模量方法确定，这是一个值得探讨的问题。本文将对此做一简要分析。

二　复合模量分析

所谓复合模量，它表征的是复合土体(桩及桩间土)抵抗变形的能力，数值上等于复合地基应力与复合地基相对变形之比。按(1)式，复合模量为桩抵抗变形能力与土抵抗变形能力的某种叠加。需要着重指出的是，(1)式中 E_p 为桩体压缩模量，是在某些特定理想条件下导出的，如图1所示，其条件为：1.复合地基基础半无限大且完全刚性；2.桩端落在完全刚性土层上；3.桩长 L 是有限的。在这种理想状态下，桩、土受力如图1(b)所示，桩与桩间土只发生压缩变形，令 ε、ε_p、ε_s 分别代表复合地基应变、桩体应变和桩间土应变，

σ、σ_p、σ_s分别代表复合地基应力、桩顶应力和桩间土应力，并有：

$\varepsilon_s=\varepsilon_p=\varepsilon$

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

$$\sigma_p/\sigma_s=E_p/E_s \tag{2}$$

即桩土应力比等于桩土的压缩模量比，这也表明，在理想条件下，桩土荷载分担是按桩土压缩模量分配的。

根据定义：

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

显然，上式中的E_p确为桩体材料的压缩模量。

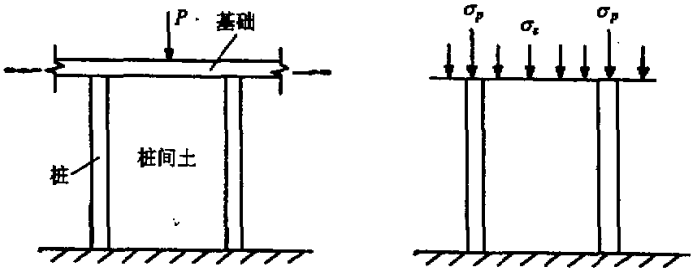


图1 理想条件下复合地基及受力简图

实际工程中图 1 所示的理想状态是不多见的，桩顶的变形，除了桩体本身的压缩变形外，还包括桩克服土的阻力产生的沉降变形。因此，用复合模量计算地基变形时，弄清(1)式中E_p的物理意义和确定方法，对复合地基变形计算是至关重要的。

复合地基按桩体材料不同可大致分为散体材料桩、一般粘结强度桩和高粘结强度桩等三种，不同材料桩型复合地基在受力和变形上有较大差异。下面通过分析不同桩型复合地基试验结果和工程实例，对这一问题做进一步讨论。

1. CFG 桩复合地基

CFG 桩是典型高粘结强度桩。桩体强度很高，弹性模量一般大于 10000MPa，在通常工程遇到的荷载水平下，桩体压缩变形不过几毫米，可完全忽略不计。

图 2 所示是相同桩长、相同桩径、不同桩体强度三组 CFG 桩单桩复合地基静载试验结果。试验用荷载板尺寸为 52.5×52.5cm²，三组荷载试验的参数如表 1。土为均匀粉土，E_s=3MPa。

表1

试验编号	桩径(cm)	桩长(m)	置换率 m	R_m(MPa)	桩体弹性模量(MPa)
试1	15	1.95	0.064	2.5	8750
试2	15	1.95	0.064	6.0	12500
试3	15	1.95	0.064	10.0	17500

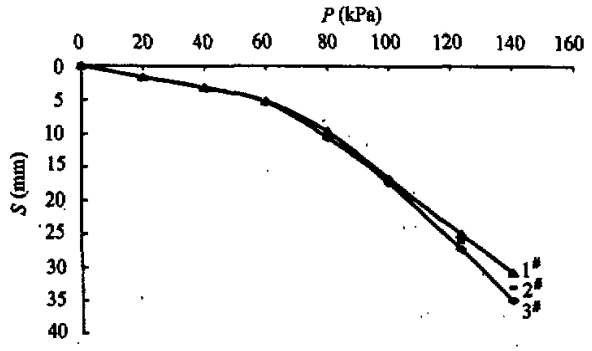


图2　不同桩体强度相同桩长单桩复合地基 P~S 曲线比较

将三组桩体弹性模量和土的压缩模量带入(1)式，则得到如下结果：

试 1：E_{p1}=8750MPa, E_s=3MPa，

$E_{sp1}=mE_p+(1-m)E_s=0.064\times8750+3\times0.936=562.8$MPa

试 2：E_{p2}=12500MPa, E_s=3MPa，

$E_{sp2}=mE_p+(1-m)E_s=0.064\times12500+3\times0.936=802.8$MPa

试 3 ：E_{p3}=17500MPa, E_s=3MPa，

$E_{sp3}=mE_p+(1-m)E_s=0.064\times17500+3\times0.936=1122.8$MPa

由此可知，对三组试验，用桩体材料模量并用测定混凝土弹性割线模量的方法确定 E_p 进行复合模量计算，便会得到三组相差较大的复合模量值，在相同荷载下，应有三组不同的沉降值。而试验结果表明，三种桩体强度和模量相差较大的单桩复合地基的 P-S 曲线基本是重合的，亦即承载力基本相同。同一荷载水平 P 对应的复合地基变形基本相同，复合地基的复合模量基本相同。这与试验结果是矛盾的。此外，按 E_p 为桩体压缩模量计算出的复合模量如此之大，即使按三组中模量最小的 E_{sp1}=526.8MPa，计算出荷载 p=120kPa 时的沉降变形(包括下卧层变形)最大不过 1mm，而实际变形为 25mm，显然用桩体压缩模量按(1)式计算复合模量是不合理的。

2. 旋喷桩复合地基

北京某工程，主楼地下室二层，地上 29 层，檐口标高 99.4m，基础为筏基，埋深 14m，设计荷载 600kPa。地基中夹有较厚粘土层，经计算，天然地基沉降不能满足设计要求，决定采用旋喷桩复合地基加固。旋喷桩设计参数为：面积置换率 m=0.189，桩径 1.4m，桩长 26m，土的加权平均压缩模量 E_s 为 18.75MPa。施工结束后，通过现场单桩静载试验和钻孔取芯，测得桩的变形模量和桩体弹性模量如表 2。

表 2

桩号	桩体弹性模量(MPa)	桩的变形模量(MPa)
130#	8991	175.4
113#	9517	260.2
160#	10991	199.6
平均值	9833	211.7

将 E_s 和桩体平均弹性模量代入(1)式得：

$E_{sp1}=mE_p+(1-m)E_s=0.189\times9833+0.811\times18.75=1873.6$MPa，远远超出了该复合地基复合模量的可能取值范围，显然是不合理的。

将使用荷载下单桩静载试验测得的变形模量平均值和土的压缩模量 E_s 代入(1)式得：

$E_{sp2}=mE_p+(1-m)E_s=0.189\times211.7+0.811\times18.75=55.2$ MPa

实测地基沉降为 54mm，按实测值反算，复合模量取 E_{sp2} 的数值比较符合实际。

3. 碎石桩复合地基

碎石桩是典型散体材料桩，本身没有粘结力，依靠桩间土约束作用形成桩体。碎石桩受力后，在桩顶 2~3 天范围内，发生明显侧胀变形，桩轴力和侧胀力均较大，为高应力区。5~7 天以下，内力和变形已很小，常把 5~7 天称为碎石桩有效桩长。碎石桩桩顶的沉降变形除了碎石桩一部分压缩变形外，主要是有效桩长范围内，侧胀引起的垂直变形和桩克服土的阻力产生的竖向变形。

《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-91 计算碎石桩的复合模量采用下式：

$$E_{sp}=[1+m(n-1)]E_s \tag{3}$$

式中： n 为桩土应力比，$n=\sigma_p/\sigma_s$

(3)式没有出现 E_p，而引入了桩土应力比 n。龙登弟、赵祥认为也可按(1)式计算碎石桩复合模量，但 E_p 不用桩体压缩模量，而采用桩的变形模量，并由现场单桩静载试验求得，他们将这样计算的结果与按(3)式计算的结果作了比较，如表 3 所示：

表 3

m	n	E_{s1}	E_{p1}	E_{sp}(3)式计算	E_{sp}(1)式计算
0.206	2.26	22.93	51.82	28.88	28.64
0.206	3.38	15.43	52.15	22.99	23.00

由表3可知，对碎石桩复合地基，采用桩的变形模量取代桩体压缩模量，按(1)式计算的复合模量，与(3)式非常吻合。

由上面三种桩型复合地基的讨论表明，按(1)式 E_p 采用桩体压缩模量计算复合模量，工程实践中将导致沉降计算产生很大误差；在概念上也反映出许多不妥之处。

(1)不能反映桩长的作用

碎石桩存在有效桩长，其桩土应力比变化不大，增加桩长，对桩土应力比和桩土的荷载分担影响不大，当桩长大于有效桩长时，复合模量与桩长相关性不明显。

对有一定粘结强度桩型的复合地基，特别是 CFG 桩复合地基，桩越长，桩受土的侧摩阻力越大，桩长效应越明显。表4为相同桩体材料、相同桩径、不同桩长的 CFG 桩复合地基荷载试验结果。

当荷载水平一定时，随桩长增加，桩土应力比越大，桩分担的荷载百分比 δ_p(桩承担的荷载占总荷载的百分比)越大，桩抵抗竖直变形的能力越大，相应复合模量也越大。而如果按(1)式，虽然桩长不同，但由于桩体压缩模量相同，计算的复合模量是相同的，无法反映桩长效应。

表 4

试验号	桩长 (m)	项目	荷载 (kPa) 50	100	150	200	250	300
		桩荷载分担比 δ_p(%)	24	33	39	43	45	46
1#	1.2	桩土应力比 n	4.6	7.2	9.4	11	12	12.5
		复合地基沉降 s(mm)	3.7	7.2	14.8	28.2	43.8	57.5
		桩荷载分担比 δ_p(%)	26	38	44	47	49	51
2#	2.0	桩土应力比 n	5.1	9	11.5	13	14.1	15.2
		复合地基沉降 s(mm)	1.9	4.4	7.5	13.6	20.1	33.5
		桩荷载分担比 δ_p(%)	38	47	54	59	62.5	63
3#	3.2	桩土应力比 n	8.96	13	17.2	21	23.7	24.9
		复合地基沉降 s(mm)	1.8	3.6	4.8	7.1	11.8	15.4

(2)不能反映端阻效应

端阻力的发挥，有利于增强土抵抗桩变形的能力。图 4 所示单桩静载试验中，桩的参数相同，加固区土质相同，1#桩端落在承载力较高的粉土透镜体上，2#桩端未达透镜体。

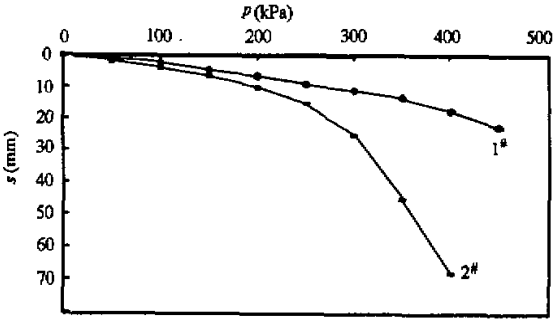


图 3 端阻不同的单桩复合地基 *P-S* 曲线

从 *P-S* 曲线可看到，1#桩的承载力明显高于 2#桩，相同荷载水平下，1#桩的沉降明显小于 2#桩，这表明，桩端土质越好，土对桩产生的端阻力越大，抵抗桩变形的能力越强，相应加固区的复合模量也越高。而如按(1)式计算，则复合模量是相同的，反映不出端阻不同对复合模量的影响。

尚需指出的是，由于桩顶变形包括了桩体的压缩变形和桩在土中的沉降变形，桩体压缩模量越大，压缩变形占总变形的比率越小，按(1)式计算的复合模量与实际的误差越大。

实际工程中，桩的模量直接测定比较困难。另一方面，桩土荷载分担与桩土模量相关，可以用土的模量的某个倍数表征桩的模量，既反映了桩土相互作用的关系，也大大减

少了确定设计参数的误差。

鉴于上述讨论和分析，笔者建议：当荷载接近或达到复合地基承载力时，E_p 近似等于 $\alpha n E_s$（α 为桩间土承载力提高系数)。因而可以用 $E_{sp}=\alpha[1+m(n-1)]E_s$ 计算复合模量。对碎石桩，n 为一变化不大的常值；对一般粘结强度桩和高粘结强度桩复合地基，n 变化较大，且不易直接测定。可令 $\xi=\alpha[1+m(n-1)]=f_{spk}/f_k$（$f_{spk}$ 为复合地基承载力标准值，f_k 为桩间土承载力标准值），$E_{sp}=\xi E_s$。这一方法已在 CFG 桩复合地基中采用，沉降计算值与实测值比较接近。对其他不同桩型的复合地基，计算精度有待进一步与实测值比较。

三 结 语

通过上面分析，可以得到以下认识：

(1)碎石桩计算复合模量的公式为 $E_{sp}=[1+m(n-1)]E_s$，式中采用了桩土应力比 n，n 反映了碎石桩桩土相互作用的关系，由于存在有效桩长，n 变化不大，在 2~4 之间，这样计算复合模量是合理的。

(2)对具有粘结强度桩型的复合地基，桩顶的变形，主要包括桩体压缩变形和桩克服桩间土的阻力产生的沉降变形。桩体压缩模量越高，压缩变形占总变形的比率越小，按(1)式 E_p 采用桩体的压缩模量计算的复合模量误差也越大，因此按(1)计算复合模量，E_p 不宜采用桩体压缩模量并按混凝土弹性割线模量的方法确定。

参考文献

[1]《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-91。

[2] 闫明礼主编：《地基处理技术》，中国环境科学出版社，1996.2。

[3] 龙登弟、赵祥：《振冲碎石桩加固饱和粉细砂地基试验研究》，见《地基处理经验集萃》，中国电力出版社，1996.12。

[4] 闫雪峰：《复合地基设计若干问题和沉降计算》，见《天津大学硕士学位论文》，1999.6。