

半刚性桩复合地基性状分析

张雁 黄强

(中国建筑科学研究院地基所, 北京, 100013)

一、绪言

复合地基作为一种行之有效的手段已在地基处理工程中得到广泛应用。目前复合地基种类繁多, 根据成桩材料大致分为散体柔性桩复合地基、掺有固化材料的半刚性桩复合地基、刚性桩复合地基三大类。中国建筑学会地基基础学术委员会1990年在承德专门召开了复合地基学术会议。表明国内在复合地基研究及应用方面已积累了一定的经验, 特别对柔性桩复合地基的研究有了比较成熟的设计计算及理论分析方法, 对加固机理有了比较透彻的了解。但是, 对于近年出现的半刚性桩复合地基承载机理及基本性状的研究还处于初级阶段, 还没有比较成熟的理论分析及设计计算方法。本文根据室内外试验及理论分析结果, 对半刚性桩复合地基基本性状作一初步探讨, 并与柔性桩复合地基及桩基础的基本性状进行比较。提出的定性概念可供半刚性桩复合地基设计参考。

二、半刚性桩复合地基概念的提出

(一) 柔性桩复合地基存在的问题

经过国内外大量研究及工程应用, 设计人员越来越认识到柔性桩加固软弱地基, 其承载力提高幅度不大。例如采用碎石桩处理软弱粘性土, 地基承载力提高幅度一般为20%~60%^[3]。同时, 加固后沉降仍然得不到有效的控制。研究成果表明^[3,6], 碎石桩的主要受力区集中在桩顶附近4倍桩径范围内(图1)。桩受荷后, 在桩顶附近(一般2~3倍桩径)桩体发生侧向膨胀变形, 它是导致碎石桩复合地基变形的主要原因。碎石桩本身是由散体材料组成的, 没有粘结强度, 主要靠周围土的约束来承受上部荷载。而一般被加固的都为软弱土, 它所能提供的约束作用很小, 因此导致桩体侧向膨胀而产生较大沉降。对于灰土桩, 荷载传递深度也有限, 一般不超过6~10倍桩径(图2)。一般在容许荷载作用下, 灰土桩桩顶附近1~1.5倍桩径范围即被压裂(石灰桩也有类似现象)。地基沉降主要是桩身的压缩量, 约占总沉降量的2/3。同时可看到, 柔性桩复合地基均呈现承载力与桩长无关的特征。

(二) 半刚性桩复合地基的工程效果

以上分析不难发现, 要有效地提高复合地基承载力, 减少沉降, 重点应放在提高桩体材

料、强度(刚度)上,使得上部荷载能传到更深广的土层中去。从水泥搅拌桩复合地基的室内模型试验发现^[2],当水泥掺入量 $a_w \leq 10\%$ 时,复合地基承载力与桩长无关,呈柔性桩特征;而当 $a_w \geq 20\%$ 后,复合地基承载力随桩长的增加而提高。当 $a_w = 10\% \sim 30\%$, $L/D = 10 \sim 15$ 时,水泥掺入量对承载力的影响显著。这充分说明,只要桩体材料强度(刚度)提高,荷载传递深度及范围就扩大,承载力就能得到明显提高。文献[14]指出,为了减少碎石桩因侧向膨胀而产生的沉降,可对发生侧向膨胀这一部分采用混凝土桩、水泥砂浆或灌浆处理。中国建筑科学研究院地基所近年相继开发了粉煤灰及赤泥与碎石、水泥组成的具有一定强度的CFG(Cement Flyash Gravel)复合地基及赤泥混凝土桩复合地基^[3,4]。现场试验证明,这类地基承载力提高显著,沉降改善明显。根据在黄土状粉质粘土地基上进行的现场试验结果^[1],承载力提高了77.7%~240%,变形模量提高了50%~325%。文献[3]报道了采用CFG桩处理淤泥质粘土地基的工程实例。经测试承载力提高140%,压缩模量提高4%~132%,与其它处理方法比较,经济效益提高显著。基础工程总造价比预制桩方案节省1/3~1/2,比灌注桩方案节省1/4~1/3,比碎石桩方案节省1/6~1/5。因此,开展对半刚性桩复合地基基本性状的研究,推广应用这一方法具有重要现实意义。

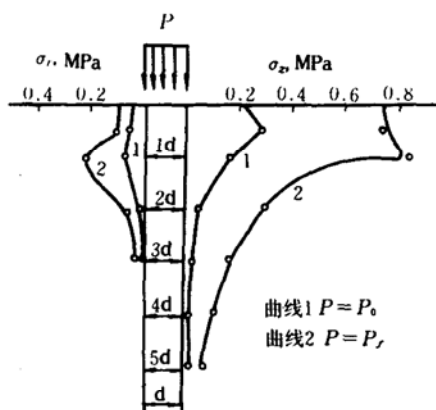
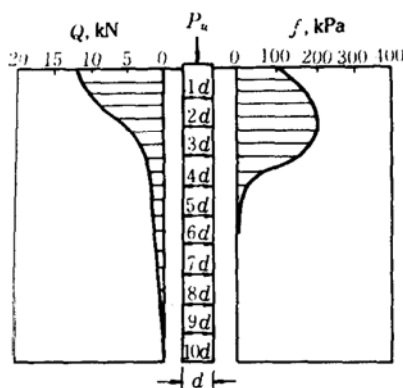
图1 碎石桩 σ_z , σ_r 随深度变化曲线

图2 灰土桩荷载传递(Q)及桩侧摩阻力(f)分布

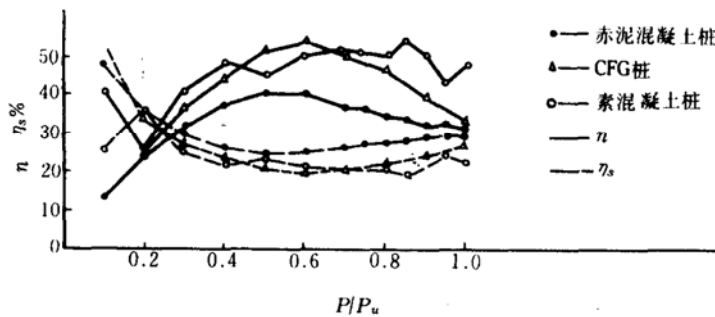
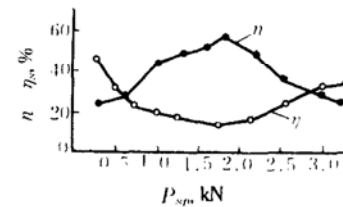
三、半刚性桩复合地基基本性状

(一) 桩土应力比及地基土分担荷载特征

为使桩土共同工作、变形协调,基础下面设置一定厚度的垫层,使地基土能够有效分担上部荷载。同时,通过垫层材料的流动补偿,使桩间土与基础始终保持接触。文献[15]介绍一个建于高压缩性地基上的大型油罐,在地基处理中,利用混凝土桩、碎石垫层与土体组成复合地基。在承受上部荷载时,桩间碎石土中将产生拱效应,从而起到“承台”(Pile Cap)作用,使桩土共同工作,其沉降量大大低于原天然地基的沉降量。

图3、图4分别为实测得到的CFG桩、赤泥混凝土桩、素混凝土桩及树根桩(混凝土强度 $C_8 \sim C_{10}$)桩土应力比 n 、地基土分担荷载比 η_s 随荷载变化的关系曲线^[1,13]。该曲线反映了半刚性桩复合地基承载过程。荷载初期,由于垫层作用,桩土共同承受上部荷载,此时 n 值较小、 η_s 值较大。随着荷载进一步增加,桩顶逐渐向垫层刺入,桩的作用逐渐显示出来,荷载向桩上集中,此时 n 值逐渐增大、 η_s 值逐渐减小。当荷载继续增加到一定值时($P/P_u = 0.5 \sim 0.6$),

n 值与 η_s 值分别出现峰值及低谷。说明此时桩的应力集中现象最显著。与单桩极限承载力相比,此时桩已发挥极限承载力的70%左右。它标志着桩对垫层的刺入量已基本稳定。随着荷载进一步增加,桩的刺入量增加很少。 n 值有所降低、 η_s 值有所增加。说明此时桩土变形已趋一致,桩间土分担的荷载增量比桩分担的荷载增量大,桩承载力已发挥至极限。图5给出了半刚性桩复合地基中桩间土与桩的 $P \sim S$ 曲线。至于半刚性桩复合地基中,承载力是桩先发挥还是桩间土先发挥很难确定,它受置换率、桩土性质、垫层厚度及施工工艺等因素影响。合理的设计应使桩与土都得到有效发挥。图3、图4还可看到,半刚性桩复合地基中地基土分担荷载特征与桩基础不同。半刚性复合地基, η_s 值一开始很高,随着荷载的增加而降低。但对于正常固结土,在短期荷载下的低承台群桩基础, η_s 值一般是随荷载的增加而增加,直至荷载增到一定数值后保持稳定^[7]。根据文献[1]试验结果,桩土应力比 $n=30 \sim 50$,地基土分担荷载比 $\eta_s=22\% \sim 38\%$ 。文献[8]测得CFG桩复合地基 $\bar{n}=31 \sim 36$ (材料强度为 C_8)。对于桩体材料强度较低、水泥掺入量 $a_w=10\% \sim 30\%$ 的水泥搅拌桩, $\bar{n}=4 \sim 12$ ^[2,9]。文献[13]测得树根桩的 $\bar{n}=20 \sim 60$, $\eta_s=16\% \sim 27\%$ 。而对于低承台群桩基础, n 值一般很大,可高至70或更大^[7]。对于柔性桩复合地基,如振冲碎石桩,一般 $n=1.27 \sim 6.0$,石灰桩 $n=1.69 \sim 4.44$ ^[5]。由此可见,半刚性桩复合地基承载机理与柔性桩复合地基及低承台群桩基础之间存在着明显的区别。与低承台群桩基础相比,前者存在一个垫层,使得地基土一开始就分担荷载, n 值比低承台群桩基础低。同时,由于半刚性桩桩体材料具有一定强度,桩承受的荷载有效地沿桩长传递到深处,使桩的承载能力提高。因此,半刚性桩复合地基的 n 值又比柔性桩复合地基高。图6为实测得到的水泥搅拌桩、碎石桩及石灰桩的桩土应力比 n 随荷载的曲线^[11]。可以看出,其变化规律与图3、图4类似。

图3 $n(\eta_s)-P/P_u$ 关系曲线图4 $n(\eta_s)-P_{s/p}$ 关系曲线

(二)半刚性桩复合地基内力分布特征

图7为采用三维有限元分析文献[1]实测资料得到的天然地基、石灰桩、碎石桩及CFG桩复合地基的垂直应力 σ_z 等值线分布图^[12]。由图可见,从无桩到有桩、从较低的桩体强度到较高的桩体强度,地基中土的垂直应力扩散范围、扩散深度逐渐递增。众所周知,天然地基中的高应力区主要分布在浅层;桩基础的高应力区主要分布在桩周小范围和桩端以下土体。而对于CFG半刚性桩复合地基,浅层应力将向桩体集中,并通过桩向深层扩散,从而降低了地基中沿深度的应力不均匀程度,使得半刚性桩复合地基中高应力区比天然地基及桩基础的高应力区范围更大。说明半刚性桩复合地基中的桩具有应力集中与扩散双重作用。这就是半刚性桩加固效果明显的原因。

半刚性桩复合地基中,作用于桩间土上的垂直应力增加了地基土体的有效应力,使土的

强度得到提高,从而使桩的侧摩阻力有所提高^[1]。文献[1]指出,对具有一定置换率的半刚性桩复合地基($m=0.074$),桩承受的荷载主要由桩侧摩阻力分担,仅有不足10%的上部荷载传至桩端。

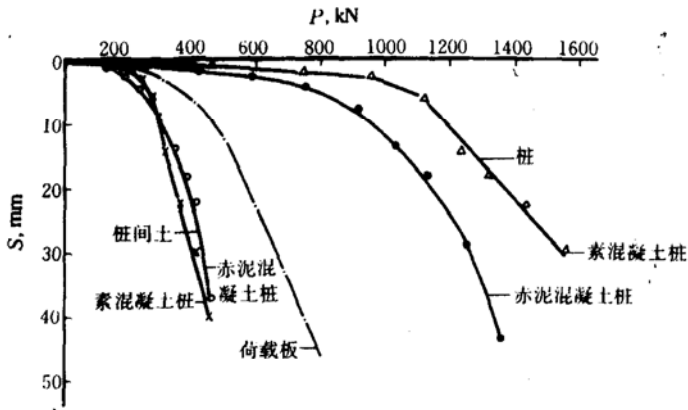


图5 半刚性桩复合地基桩、桩间土P-S曲线

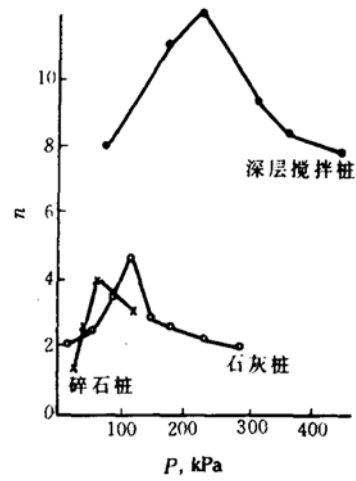
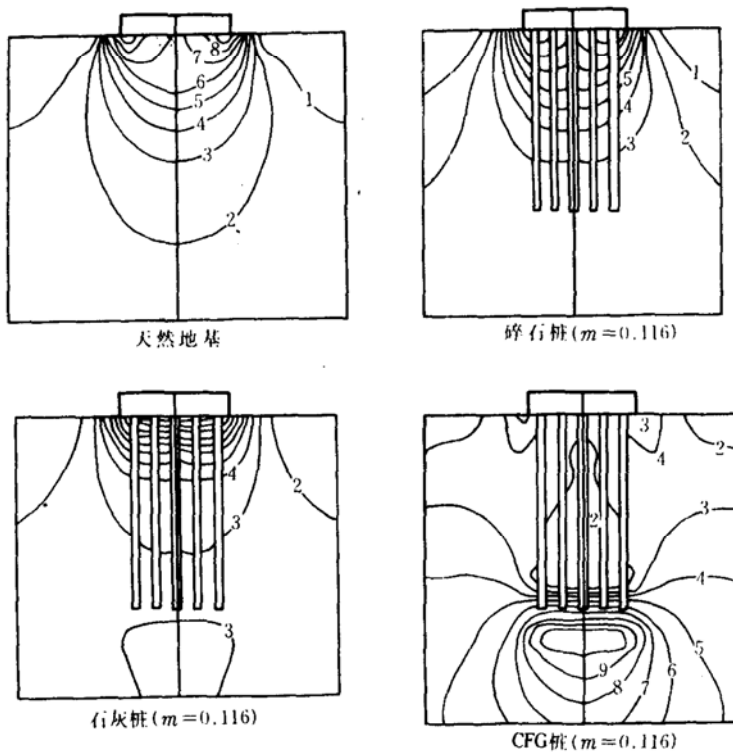


图6 n-P关系曲线



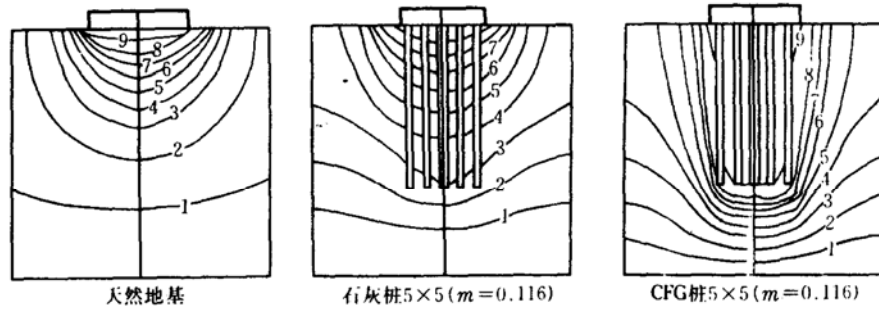
图中1, 2, ..., 9等值线表示0.1, 0.2, ..., 0.9倍最大桩间土应力

图7 σ_z 等值线图

(三)半刚性桩复合地基变形特征

由图8天然地基、石灰桩及CFG桩复合地基垂直位移等值线图可见^[12],随着桩材强度的提高,复合地基浅层沉降量与总沉降量的百分比逐渐递减。同时,随着半刚性桩复合地基置

换率的提高, 桩间土的压缩量占总压缩量的比例逐渐减小, 而桩端土的压缩量占总压缩量的比例增加。对于置换率分别为0.074及0.116的赤泥混凝土桩复合地基, 实测得到破坏时桩间土压缩量占总压缩量的比例分别为80%及40%^[1]。



图中1, 2, … 9表示0.1, 0.2, … 0.9倍地基表面沉降

图8 垂直位移等值线图

(四) 半刚性桩复合地基抵抗水平荷载能力

由于半刚性桩复合地基设有一定厚度的垫层, 使得基底与土不脱空。当基础承受竖向及水平荷载时, 基底与垫层间将产生较大的水平摩阻力, 从而提高了基础抵抗水平荷载的能力。文献[10]作者通过CFG桩复合地基与桩基的水平承载力试验认为, 半刚性桩复合地基具有比相应群桩基础更强的抵抗水平荷载能力, 而且桩身不同配筋、节约钢材。根据试验结果, 在沉降值相同的情况下, 水平承载力与垂直承载力的比值: 群桩基础为0.056~0.103, 而半刚性桩复合地基为0.318。说明半刚性桩复合地基抵抗水平荷载能力得到提高^[10]。

四、影响半刚性桩复合地基基本性状的主要因素

(一) 垫层厚度及材料

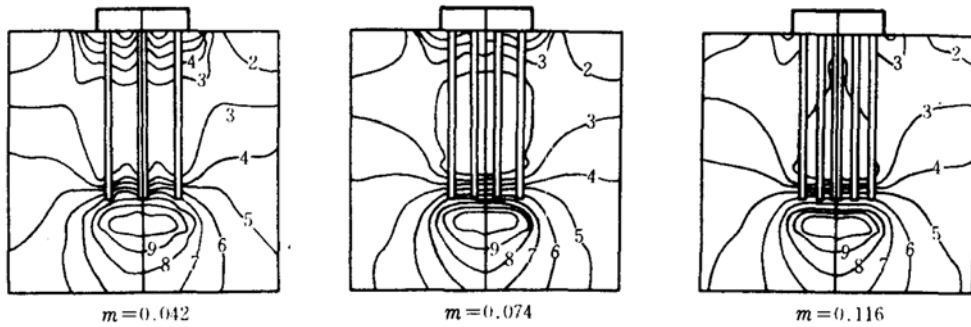
垫层的厚度对半刚性桩复合地基工作性状影响很大。由于桩向垫层的刺入及垫层向桩间土范围内的流动补偿作用, 能够减少桩与桩间土之间的相对变形量, 延缓塑性区的开展。垫层越薄, 桩的应力集中现象越明显, 桩土应力比越大, 桩间土承载力发挥程度越低, 复合地基中桩的作用明显。因此, 对于象水泥搅拌桩等桩体强度较低、不设垫层的复合地基, 特别要重视桩体上段的质量。反之, 垫层太厚, 尽管对桩间土的承载力发挥有利, 但桩的承载力得不到有效发挥, 影响加固效果。因此, 垫层设计中应根据地基土的承载力及桩的刚度等综合考虑确定其厚度。垫层厚度一般取100~300mm。垫层材料可采用密实的级配砂石料。

(二) 桩体材料强度及刚度

由图3、图4可见, 随着桩体材料强度刚度的提高, n 值提高, η_s 值降低, 桩的应力集中现象越明显, 桩与土之间的相对变形量越大, 桩间土承载力发挥程度越低, 从而导致桩侧土体中塑性区出现较早, 其破坏机理接近于桩基础。文献[1]指出, 当桩体材料强度大到一定程度后, 桩体材料强度对复合地基承载力的影响不大。在相同桩长及截面下, 桩体材料强度越高、沉降就越小。因此, 在设计中, 要选择与地基承载力相适应的桩体材料强度, 一般控制在10MPa左右比较合适。

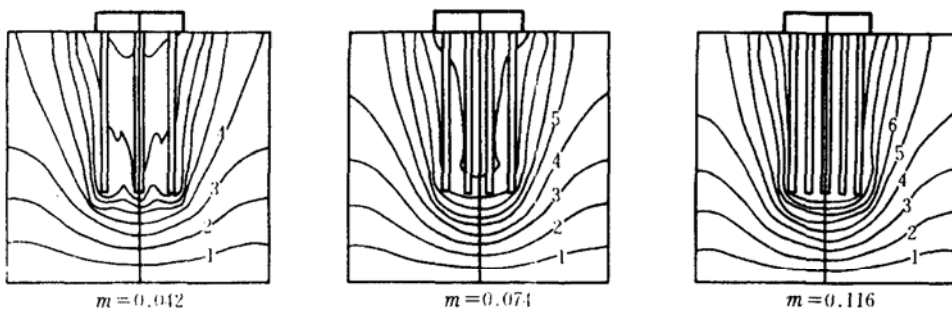
(三) 置换率

当置换率较低时,增加置换率将使复合地基承载力得到明显提高,沉降也得到明显减少。但当置换率增至一定值后,继续增加置换率对于地基承载力提高效果不大^[1]。图9、图10分别为在不同置换率($m=0.042, 0.074, 0.116$)下的CFG桩复合地基中土的垂直应力等值线和垂直位移等值线图^[12]。可以看出,半刚性桩复合地基的置换率越低,越有利于充分发挥桩和桩间土的潜力。置换率越大,桩间土的压缩变形量占沉降的比例越小。



图中1, 2, ..., 9等值线表示0.1, 0.2, ..., 0.9倍最大桩间土应力

图9 不同置换率的CFG桩复合地基 σ_z 等值线



图中1, 2, ..., 9表示 0.1, 0.2, ..., 0.9倍地基表面沉降

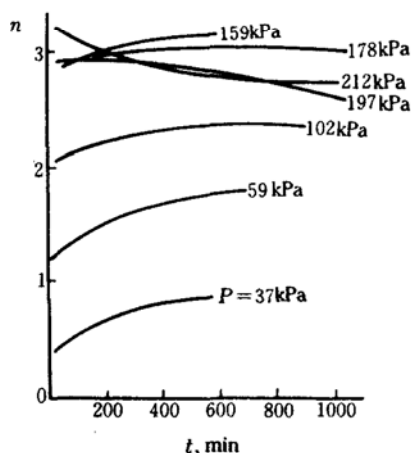
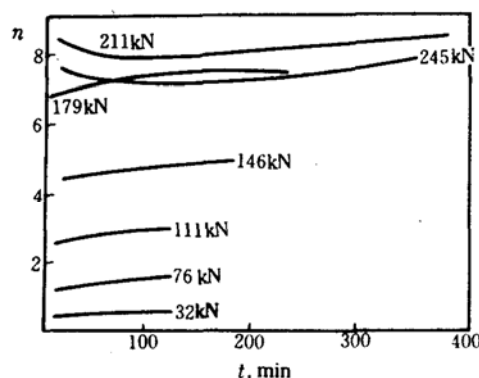
图10 不同置换率CFG桩复合地基直径位移等值线

(四) 桩长

对具有一定强度的桩来说,单桩承载力是随桩长的增加而提高的。因此,在其它条件不变的情况下,桩越长,桩的应力集中现象越明显,桩间土承载力发挥程度就越低。在实际工程中,桩长应由土质情况、垫层厚度、桩体材料强度及刚度、置换率等因素综合确定。

(五) 时效

上述研究均没有考虑时间因素。实际上,桩土共同工作是一个与时间有关的过程。即使作用荷载不变,由于垫层向桩间土流动,桩间土及桩端土的固结,桩土应力与变形在不断变化调整。图11、图12分别为实测得到的碎石桩、水泥搅拌桩桩土应力比与时间的关系曲线。由图可见,当荷载小于某一级荷载时, n 值随时间的增加而增加;当荷载超过该级荷载后, n 值随时间的增加而有所降低,说明此时桩已发生破坏。该级荷载即为复合地基破坏荷载。因此,也可根据复合地基实测的 $n-T$ 关系曲线来确定复合地基极限承载力。

图11 碎石桩 n - T 关系曲线图12 水泥搅拌桩 n - T 关系曲线

五、设计计算方法探讨

(一) 承载力计算方法

根据对半刚性桩复合地基基本性状的研究, 建议其承载力由下式确定:

$$R_{SP} = \alpha_1 R_P m + \alpha_2 (1 - m) R_S \quad (1)$$

式中 R_{SP} , R_P , R_S 分别为半刚性桩复合地基、单桩及桩间土的容许承载力; m 为置换率; α_1 , α_2 分别为单桩承载力及桩间土承载力发挥系数, 一般均小于或等于 1.0。

对于垫层厚度不大的复合地基, 建议 α_1 取为 1.0。

根据文献[1]资料, 对 CFG 桩复合地基经反算得, 当置换率分别为 0.116, 0.074 及 0.042 时, α_2 值分别为 0.723, 0.988 和 1.0。因此, 对具有一定桩材强度和刚度的半刚性桩复合地基, 在常规设计置换率下, 建议 α_2 值取为 $0.5 \leq \alpha_2 \leq 1.0$ 。随着置换率、桩的刚度及桩端端阻发挥程度的提高而取较小值。当桩端端阻发挥较大, 已明显地表现出端阻效应时, α_2 可取小于 0.5 的值。

(二) 沉降计算方法

由于半刚性桩复合地基沉降包括桩顶向垫层的刺入量、桩间土的变形量及桩端土的变形量三大部分, 问题比较复杂, 建议按分层总和法进行沉降估算。其中桩长范围内土的压缩模量增强因子 β 按式(2)计算, 压缩层深度按地基基础设计规范求取。当桩长大于基础宽时, 压缩层深度取桩端下一倍桩长即可。若该深度仍为软弱土层时, 压缩层深度可计至该软弱土层底部。表1是根据上述方法计算得到的素混凝土桩、CFG桩及赤泥混凝土桩复合地基沉降计算值与实测值的比较, 两者比较接近。

$$\beta = (1 - m + m \cdot n) \quad (2)$$

式中 β 为桩长范围内土压缩模量增强因子; m , n 符号意义同前。

表1

类型 沉降(mm)	素混凝土桩	CFG桩	赤泥混凝土桩	天然地基
$S_{\text{实测}}$	29.38	44.50	53.03	34.40
$S_{\text{计算}}$	31.12	36.80	40.00	33.73

六、结 语

根据室内模型试验、现场试验及理论计算结果的分析,对半刚性桩复合地基基本性状及其影响因素,以及设计计算方法进行了初浅的探讨,并与柔性桩复合地基及桩基的一些特性进行了比较。文中所揭示的半刚性桩复合地基的一些基本特征及设计计算方法可供设计人员参考。

参 考 文 献

- [1] 张雁,黄强等.非砾石类复合地基试验研究.第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集.上海:同济大学出版社,1991:581~584.
- [2] 林琼等.水泥搅拌桩复合地基工程特性初探.第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集.上海:同济大学出版社,1991:673~678.
- [3] 闫明礼等.CFG桩复合地基在工程中的应用.建筑学会地基基础学术委员会学术会议论文集.承德,1990:219~223.
- [4] 张雁等.赤泥在地基处理中的应用.建筑学会地基基础学术委员会学术会议论文集.承德,1990:360~367.
- [5] 钱征.复合地基应力分担比的测定与述评.建筑学会地基基础学术会议论文集.承德,1990:1~7.
- [6] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册.北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [7] 刘金砺等.钻孔群桩工作机理与承载力的研究.建筑科学研究报告,1988.
- [8] 吴春林.CFG桩及其复合地基特性的研究[硕士论文].中国建筑科学研究院地基所,1990.
- [9] 杨军.水泥土桩复合地基强度及变形的有限元分析.建筑科学研究报告,1988.
- [10] 杨军等.褥垫层在复合地基中的作用.建筑科学.1991(2):45~49.
- [11] 韩杰等.复合地基的基本特性分析.同济大学科学技术情报站.1990.
- [12] 杨军等.复合地基的沉降计算探讨及有效桩长.中国建筑科学研究院地基所.1990.
- [13] 周洪涛等.小直径钻孔灌注桩与基底之间的相互作用.地基处理,1991,2(1):25~30.
- [14] Engethardt, et al. Soil Improvement by Deep Vibratory Technique. Proc. 5th SEACSE Thailand, 1977:377~387.
- [15] Abbs A F. A Pile Reinforced Earth Foundation for an Oil Storage Tank. Proceedings of the International Conference, Paris, 1984:13~18.