

# 复合地基技术及应用

化建新

(中兵勘察设计研究院, 北京 100053)

张宝龙

王玉霞

(北京市房屋建筑设计院, 北京 100062) (北台钢铁机船有限责任公司, 辽宁本溪 117017)

**【摘要】** 提出了复合地基的设计原则,对复合地基承载力计算、变形计算、柔性垫层进行了探讨,提出了复合地基技术需研究的问题。

**【关键词】** 复合地基;承载力计算;变形计算;柔性垫层

**【中图分类号】** TU472

## Composite Foundation Technique and It's Application

**【Abstract】** The design principle of composite foundation is given. Calculation of bearing capacity of composite foundation, calculation of deformation and soft cushion is studied. The research problems of composite foundation technique are proposed.

**【Key words】** composite foundation; calculation of bearing capacity; calculation of deformation; soft cushion

### 0 引言

复合地基是指在地基土中采用置换或增强的方式,在土中设置由散体材料(土、砂、碎石等)或胶结材料(石灰、水泥、粉煤灰)构成加固桩(柱)体,与桩间土一起承担建筑荷载,复合地基中桩体(或柱体)通过置换、挤密作用对土体进行加固<sup>[1]</sup>。

复合地基与桩基有明显的区别,黄志仑<sup>[2]</sup>曾把它叫桩地基,突出了地基的概念。韩杰<sup>[3]</sup>认为复合地基属于地基范畴。

复合地基和桩基础在构造上有明显区别,复合地基中桩体与基础通过柔性垫层(碎石或砂)相连接,复合地基设计中充分考虑天然土强度,而桩基础中桩通过承台(刚性)与上部结构直接连接,桩与承台构成一个整体,在设计时仅考虑桩间土体对桩的摩阻力和桩的端承力。在受力方面,对于荷载较小的多层建筑,复合地基主要受力层在加固体内,对于高层建筑,由于基础底面大、荷载大,复合地基主要

受力层除加固体外,还应包括加固体下一定范围内的下卧层。而桩基的受力作用表现为桩侧向抵抗力和桩端阻力,受力层为桩周土层和桩尖以下一定范围的下卧层。

复合地基按材料类型、制桩方式和桩体刚度进行分类<sup>[4,5]</sup>。

按成桩所用材料可分为:散体材料桩类(如碎石桩、砂桩、钢渣桩、矿渣桩等)复合地基;水泥、灰土桩类(如深层搅拌桩、粉喷桩、夯实水泥土桩、灰土桩、二灰桩等)复合地基;砼桩类(如砼桩、CFG桩)复合地基。

按制桩方式可分为挤土桩类(如振冲桩、锤击桩、强夯碎石桩、钻孔夯扩桩)复合地基;非挤土类桩(旋喷桩、搅拌桩、砼灌注桩、粉煤灰灌填桩)复合地基。

按桩体强度和刚度可分为:散体桩复合地基;柔性桩复合地基;半刚性桩复合地基和刚性桩复合地基。

## 1 复合地基的设计

### 1.1 设计原则

根据有关资料<sup>[6,7]</sup>,复合地基的设计应满足以下原则:

a. 满足建筑荷载对复合地基承载力的要求

在进行复合地基设计时,岩土工程师首先应考虑结构工程师根据建筑物上部荷载、基础荷载以及活荷载等荷载情况所提出的复合地基承载力要求,然后根据已有的单桩、复合地基资料,结合建筑场地的岩土工程勘察报告,设计出桩径、桩长、桩土置换率等,同时进行复合地基承载力的计算,以满足建筑荷载对复合地基承载力的要求为原则,并考虑一定的安全度。若存在有软弱下卧层时,按规范进行软弱下卧层验算。

b. 满足 GBJ7—89 规范、地区规范或设计人对建筑物变形和倾斜的有关要求

高层建筑由于其高度高、荷载大,地基的变形及倾斜是基础设计中应考虑的主要问题。岩土工程师进行高层建筑复合地基设计时,在满足建筑荷载对复合地基承载力要求的前提下,应对复合地基和下卧层的变形进行计算,其最大变形量及倾斜值均应满足规范的有关规定或设计人员的要求,以保证建筑物的安全使用。

c. 满足桩、桩间土变形协调的原则

对于半刚性和刚性桩复合地基,桩、桩间土的变形协调是复合地基研究中应特别考虑的问题。柔性垫层是保证桩、桩间土变形协调的有效手段,因此岩土工程师进行复合地基设计时,应根据桩间土的承载力、复合地基的承载力、桩土应力比、桩顶的抗压强度等因素综合考虑柔性垫层的性质和厚度,以满足桩与桩间土的变形协调。

d. 满足环境条件对地基处理的要求

环境条件是地基处理时应考虑的因素之一,尽管有些地基处理方法造价低,质量好,但由于产生振动噪声、影响场地周围居民的生

活,因而该方法在对噪声有一定限制的场地不能使用。

### 1.2 复合地基承载力计算

国内外许多学者对散体桩、柔性桩、半刚性桩、刚性桩承载力计算进行了研究,其主要成果如下:

散体桩:行业标准(JGJ79—91)<sup>[8]</sup>

$$f_{sp,k} = mf_{p,k} + (1-m)f_{s,k} \quad (1)$$

式中:  $f_{sp,k}$ ——复合地基承载力标准值, kPa;

$f_{p,k}$ ——桩体单位截面积承载力标准值, kPa;

$f_{s,k}$ ——桩间土承载力标准值, kPa;

$m$ ——面积置换率。

对于小型工程的粘性土地基如无现场载荷试验资料时,复合地基承载力标准值可按下列式计算:

$$f_{sp,k} = [1 + m(n-1)]f_{s,k} \quad (2)$$

或  $f_{sp,k} = [1 + m(n-1)](3c_{u0}) \quad (3)$

式中:  $n$ ——桩土应力比,无实测资料时可取 2~4,原土强度低取最大值,原土强度高取最小值;

$c_{u0}$ ——桩间土的十字板抗剪强度,也可用处理前地基土的十字板抗剪强度代替, kPa。

散体桩的极限承载力为<sup>[9]</sup>:

$$p_{pf} = \sigma_{ni} \cdot k_p \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{ni}$ ——桩间土侧向极限应力, kPa;

$k_p$ ——桩体材料被动土压力系数。

布朗(Brauns, 1978) 计算式为:

$$p_{pf} = 20.8c_u \quad (5)$$

式中:  $c_u$ ——桩间土不排水抗剪强度, kPa。

休斯(Hughes)和怀特(Withers, 1974)提出:

$$p_{pf} = 6c_u \tan^2(45^\circ + \varphi_p/2) \quad (6)$$

式中:  $\varphi_p$ ——桩体的内摩擦角。

此外还有许多计算公式,具体可详见参考文献[1]。

国内许多学者<sup>[10,11]</sup>对散体桩承载力进行

研究后提出:

$$p_{pf} = 20c_u \quad (7)$$

$$p_{pf} = 20^\circ \alpha^\circ c_u \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  取 1.2 ~ 1.3;

柔性桩(水泥土搅拌桩、粉喷桩、高压旋喷桩)复合地基承载力计算公式如下:

$$f_{sp,k} = mR_k^d / A_p + \beta(1-m)f_{s,k} \quad (9)$$

式中:  $f_{sp,k}$  —— 复合地基承载力标准值, kPa;

$m$  —— 面积置换率;

$A_p$  —— 桩的截面积,  $m^2$ ;

$f_{s,k}$  —— 桩间土承载力标准值, kPa;

$\beta$  —— 桩间土承载力折减系数;

$R_k^d$  —— 单桩竖向承载力标准值, kN。

半刚性桩(夯实水泥土桩)复合地基承载力计算公式如下:

$$f_{sp,k} = k_1 m f_{p,k} + k_2(1-m)f_{s,k} \quad (10)$$

式中:  $f_{sp,k}$  —— 复合地基承载力标准值, kPa;

$f_{p,k}$  —— 桩体单位截面积承载力标准值, kPa;

$f_{s,k}$  —— 桩间土承载力标准值, kPa;

$k_1, k_2$  —— 桩、桩间土承载力发挥系数, 与土层类型、桩的夯实度, 砂垫层厚度等因素有关, 建议<sup>[12]</sup>  $k_1$  取 1.0,  $k_2$  范围为  $0.8 < k_2 \leq 1.0$ 。

刚性桩(CFG 桩、干硬性砼扩桩等)<sup>[13]</sup>

复合地基承载力计算公式为:

$$f_{sp,k} = mR_k^d / A_p + \alpha_1 \beta(1-m)f_k \quad (11)$$

式中:  $f_{sp,k}$  —— 复合地基承载力标准值, kPa;

$m$  —— 面积置换率;

$A_p$  —— 桩的截面积,  $m^2$ ;

$f_k$  —— 地基承载力标准值, kPa;

$\alpha_1$  —— 桩间土承载力提高系数, 一般取 1.0 或根据试验确定;

$\beta$  —— 桩间土承载力折减系数, 取 0.75 ~ 1.00, 对变形要求高的建筑物取低值。

### 1.3 复合地基的变形计算

复合地基的变形计算比承载力计算难, 国家或行业规范没有变形计算公式, 国内许多专家学者在该领域内进行了探讨, 取得了一定的成果。

复合地基的沉降包括三部分: 加固区变形、下卧层变形和柔性垫层变形, 其沉降计算公式为:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (12)$$

式中:  $s_1$  —— 加固区的变形, mm;

$s_2$  —— 下卧层的变形, mm;

$s_3$  —— 柔性垫层的变形, mm。

对加固区的变形, 龚晓南(1992)建议采用复合模量法( $E_c$ 法)、应力修正法( $E_s$ 法), 桩身压缩量( $E_p$ 法)进行计算, 其计算公式如下:

复合模量法( $E_c$ 法)

$$s_1 = \sum \Delta p_i H_i / E_{csi} \quad (13)$$

式中:  $\Delta p_i$  —— 第  $i$  层复合土上的附加应力增量, kPa;

$H_i$  —— 第  $i$  层复合土层的厚度, m。

$$E_{csi} = mE_p + (1-m)E_s \quad (14)$$

式中:  $m$  —— 面积置换率;

$E_p$  —— 桩体变形模量, MPa;

$E_s$  —— 加固区土体压缩模量, MPa。

应力修正法( $E_s$ 法)

$$s_1 = \mu_s s_{1s} \quad (15)$$

式中:  $\mu_s$  —— 应力修正系数  $\mu_s = 1/[1+m(n-1)]$ ;

$s_{1s}$  —— 未加固地基在荷载  $P$  作用下沉降量, mm;

$n$  —— 桩土应力比。

桩身压缩量法( $E_p$ 法)

$$s_p = 0.5(\mu_p p + p_{b0})L/E_p \quad (16)$$

式中:  $\mu_p$  —— 应力集中系数,  $\mu_p = n/[1+$

$m(n-1)]$ ;

$L$  —— 桩身长度, m;

$E_p$  —— 桩体变形模量, MPa;

$p_{b0}$  —— 桩底端承力, kPa;

$s_p$ ——桩身压缩量, mm。

加固区变形:

$$s_1 = s_p + \Delta \quad (17)$$

式中:  $s_p$ ——桩身压缩量, mm;

$\Delta$ ——桩底端刺入下卧层土体中的刺入量, mm。

化建新<sup>[7]</sup>曾建议加固区变形按下式计算:

$$s_1 = \psi_1 p_0 \alpha_2 H_1 / E_{sp} \quad (18)$$

式中:  $s_1$ ——加固区的变形量, mm;

$p_0$ ——基底附加应力, kPa;

$E_{sp}$ ——复合地基变形模量, MPa;

$\alpha_2$ ——附加应力系数;

$H_1$ ——加固区的厚度, m;

$\psi_1$ ——复合地基沉降经验系数。

王盛源<sup>[14]</sup>建议加固区的变形按下式计算:

$$s_1 = 0.5L \Delta \sigma [R \ln(R/r_0) / (R-r_0) - 1] / E_p \quad (19)$$

式中:  $L$ ——加固区范围内的桩长, m;

$E_p$ ——桩体变形模量, MPa;

$R$ ——桩间距或桩的影响半径, m;

$r_0$ ——桩径, m;

$\Delta \sigma$ ——桩侧边界水平应力之差, kPa。

$$\Delta \sigma = p_c k_c - p_s k_s \quad (20)$$

式中:  $p_c$ ——桩顶承载力, kPa;

$p_s$ ——土体承载力, kPa;

$k_c, k_s$ ——分别为土体的主动土压力系数、土体的被动土压力系数。

阎明礼<sup>[15]</sup>提出对 CFG 桩加固区变形按下式计算:

$$s = \psi \sum \Delta p_0 h_i / (\xi E_{s_i}) \quad (21)$$

式中:  $\psi$ ——沉降经验系数, 按 GBJ7-89 规范取值;

$\Delta p_{0i}$ ——荷载  $p_0$  在第  $i$  层产生的附加应力, kPa;

$E_{s_i}$ ——加固区第  $i$  层土的压缩模量,

MPa;

$h_i$ ——加固区第  $i$  层土的厚度, m;

$\xi$ ——模量提高系数,  $\xi = \alpha_1 [1 + m(n-1)]$ , 式中:  $m$  为面积置换率;  $n$  为桩土应力比;  $\alpha_1$  为桩间土承载力提高系数,  $\alpha_1 = f_s^N / f_s$ , 一般取 1.0。

刘焕存<sup>[16]</sup>提出加固区变形按下式计算:

$$s_1 = p_k b \eta (\delta - \delta_0) / E_{sp} \quad (22)$$

$$E_{sp} = m E_p + (1-m) E_0 \quad E_0 = \alpha E_s \quad (23)$$

式中:  $p_k$ ——基础底面处的平均压力, kPa;

$b$ ——基础宽度, m;

$\eta$ ——系数, 查 JGJ72-90 规程表 6.2.6-1;

$\delta$ ——与  $L/b$  有关的无因次系数, 查 JGJ72-90 规程中附录三附表 6;

$E_p$ ——桩体变形模量, MPa;

$E_0$ ——土体变形模量, MPa;

$E_{sp}$ ——复合地基变形模量, MPa;

$\alpha$ ——系数, 查 JGJ72-90 规程中表 6.2.6-4。

对下卧层的变形  $s_2$ , 可按 GBJ7-89 规范进行, 由于柔性垫层厚度较小 (10~30 cm), 且在施工前已压密, 该部分变形  $s_3$  可忽略不计。

#### 1.4 柔性垫层

柔性垫层 (砂、碎石) 具有调整桩土应力比、保证桩土变形协调、为桩体上刺入提供空间的特点, 柔性垫层可以是细砂、中砂、粗砂、砾砂、卵石 (碎石) 等, 据有关研究<sup>[6, 17]</sup>半刚性桩 (夯实水泥土、夯实水泥灰土桩) 柔性垫层, 建议采用细砂~粗砂, 对于刚性桩, 柔性垫层建议采用碎石, 垫层厚度建议采用 10~20 cm。

金宗川<sup>[18]</sup>通过模型试验, 研究了垫层厚度、粒径对石灰桩复合地基性质的影响, 得出如下结论: ①垫层厚度越薄, 桩土应力比越大; ②粗粒径垫层易于发挥桩体强度, 细粒径垫层

易于发挥土体强度,级配良好,垫层易于发挥桩土两者的强度。

化建新<sup>[17]</sup>等人,利用载荷试验研究了CFG桩中粗砂、砾砂、碎石不同厚度垫层对桩土应力比的影响,得出:①在同一荷载,同一垫层情况时,桩土应力比随垫层厚度增加而减少;②随着粒径的变化(中粗砂—砾砂—碎石)桩土应力比增加。

吴兰根<sup>[19]</sup>、介王新<sup>[20]</sup>等人研究了散体桩—柔性桩—刚性桩桩土应力比的变化,得出如下结论:①从散体桩—柔性桩—刚性桩,桩土应力比逐渐变大;②散体桩,桩体应力比值在2.5~3.5,桩土应力比随桩间土强度提高,面积置换率 $m$ 增大、地基加深而减少;③柔性桩,桩土应力比随荷载水平提高而增大,当荷载达到一定值时,桩土应力比达到峰值,然后下降,桩土应力比值随桩间土强度提高、 $m$ 增大而减少;④刚性桩,桩土应力比值随荷载提高而增大,荷载较小时,两者是近线性关系,当荷载增大到一定值后,桩土应力比增长趋于缓慢,桩土应力比随地基土强度提高、地基深度增大而减小。

## 2 复合地基的应用

### 2.1 散体桩

碎石桩是目前常用的一种地基处理方法,在我国已广泛应用于各类工业与民用建筑、道路、桥梁、油灌、水坝、港口、电站等工程<sup>[21,22]</sup>,处理的地基土有填土、软土、盐渍土、一般第四纪土层,处理的建筑物从多层到高层,主要用于提高地基土承载力及消除地基土液化,振冲碎石桩在处理地基液化方面具有其它复合地基不可比拟的特点,据有关资料1987年碎石桩用于烟台经济技术开发区20层工贸大厦深厚软弱地基处理,主体结构建成后7年累计最大沉降量40 mm,最小沉降量39 mm,沉降较小,满足规范的规定。

### 2.2 柔性桩

搅拌桩起源于20世纪50年代的美国,我

国于1977年引进,1980年用于工程实践。搅拌桩最初应用于淤泥、淤泥质土、粉土、粉质粘土等地基承载力标准值不大于120 kPa的地基土,由于大功率搅拌机的研制成功,已应用于承载力大于120 kPa的砂土、残积土,已应用于工业民用建筑(10~12层以下的住宅)地基、高速公路路基、构筑物的地基处理;然而由于种种原因,近年来搅拌桩出了不少工程事故<sup>[23]</sup>,第五届全国岩土工程实录会的3篇实录均涉及到工程质量的问题,已引起人们的高度重视,目前上海市建委、天津市已发文暂停粉喷桩的使用。

### 2.3 半刚性桩

20世纪90年代,在北京地区对灰土桩进行改良,减少石灰比例,增加水泥比例,形成水泥灰土桩或取消石灰加入水泥,形成夯实水泥土桩,国内许多学者<sup>[24~26]</sup>已对夯实水泥土桩的物理力学性质进行了研究,并把它应用于工程实践<sup>[27~28]</sup>,目前已从多层地基土处理应用到高层地基土处理<sup>[29]</sup>,已应用于处理18层的高层建筑地基土<sup>[30]</sup>。根据工程经验,夯实水泥土桩、水泥灰土桩处理的地基土有杂填土、素填土、新近沉积土,也可用于不能满足建筑荷载要求的一般第四纪土地基处理,适用条件是:地下水位(可通过人工降水)埋深在桩尖埋深以下。

### 2.4 刚性桩

CFG桩、素砼桩、夯扩桩(夯填料为干硬性砼)均属于刚性桩范畴,它具有单桩强度高、承载力高、变形小的特点,在北京地区常用于高层建筑的地基处理,目前已用于33层高层建筑地基处理<sup>[31]</sup>,桩长最长可达23.50 m<sup>[32]</sup>,国内许多学者<sup>[33~37]</sup>对CFG桩从设计到施工进行了探讨,已将其应用于工业与民用建筑、构筑物等地基处理;据杨军<sup>[32]</sup>介绍,仅1995年北京地区,采用CFG桩复合地基进行地基处理的高层建筑(18层以上)就近100幢。

夯扩桩具有挤密桩间土的特点,目前也广泛应用于地基处理<sup>[38~41]</sup>,处理地基土有人工

填土、新近沉积土、一般第四纪土,处理的建筑物地基从多层到高层,在北京地区高层建筑地基处理基本上采用刚性桩复合地基,随着我国国民经济的发展,刚性桩复合地基在高层建筑中应用越来越广泛。

### 3 复合地基技术需研究的问题

由于复合地基的理论研究远落后于复合地基的实践,因而应加强复合地基的研究,具体有以下几个方面:

- ①加强对复合地基承载力的研究;
- ②加强对复合地基变形计算的理论研究,发展地方特色的沉降计算方法;
- ③加强复合地基垫层性质的研究;
- ④加强复合地基承受水平荷载的研究;
- ⑤发展复合地基新技术、新方法;
- ⑥加强对施工工艺、施工方法的研究,改进目前施工中不合理的施工设备,研究新的施工机具;
- ⑦加强复合地基的原位测试研究;
- ⑧加强计算机技术在模拟复合地基特性方面的研究。

由于复合地基涉及的面较广,作者能力有限,文中有不妥之处敬请专家批评指正。文中多次引用前人的研究成果,在此向其表示致谢!

### 参 考 文 献

- 1 林宗元主编. 岩土工程治理手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993. 38
- 2 黄志仑等. 桩基础与桩地基. 岩土工程技术, 1996(3): 2~5
- 3 韩杰等. 复合地基概论. 工程勘察, 1992(6): 1~5
- 4 龚晓南. 复合地基理论概要. 见: 龚晓南编. 第三届地基处理学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 37~42
- 5 化建新等. 水泥灰土桩(CISP)复合地基. 中国建筑学会工程勘察学术委员会第五届工程勘察学术交流会议论文集. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 71~81
- 6 化建新等. 高层建筑水泥灰土桩复合地基的设计. 见: 吴玉山主编. 高层建筑基础工程技术. 北京: 科学出版社, 1995. 226~231
- 7 化建新等. 高层建筑 CFG 桩复合地基. 复合地基理论与实践学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. 34~27
- 8 中国建筑科学研究院. JGJ79-91 建筑地基处理技术规范. 北京: 中国计划出版社, 1992
- 9 龚晓南. 复合地基理论与实践在我国的发展. 复合地基理论与实践学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社.
- 10 叶书麟等. 地基处理与换托技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
- 11 毛鹏飞等. 碎石振冲桩在新近沉积饱和黄土中的应用. 第五届全国岩土工程实录集. 北京: 兵器工业出版社, 2000. 425~429
- 12 化建新等. CLSC 复合地基承载力发挥系数值的讨论. 军工勘察, 1996(1): 33~36
- 13 阎明礼. CFG 桩加固技术. 见: 龚晓南编. 第四届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1995. 29~36
- 14 王盛源等. 复合地基的承载力和沉降分析. 见: 龚晓南编. 复合地基理论与实践学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. 29~33
- 15 阎明礼. 地基处理技术. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 244~245
- 16 刘焕存等. 高层建筑复合地基沉降分析研究. 21世纪高层建筑基础工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 335~339
- 17 化建新等. CFG 桩垫层效应研究. 岩土工程技术, 1998(1). 48~50
- 18 金宗川等. 石灰桩复合地基垫层作用下的桩土应力比变化特性. 见: 龚晓南编. 第五届全国地基处理学术讨论会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 387~390
- 19 吴兰根等. 软土中复合地基桩土应力比问题评述. 见: 魏道堃等编. 区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集. 北京: 原子能出版社, 1996. 152~158
- 20 介玉科等. 复合地基桩土应力比的研究. 见: 龚晓南编. 复合地基理论与实践学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. 61~66
- 21 曾昭礼. 我国振冲地基现状与发展. 见: 龚晓南编. 第四届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭

- 州:浙江大学出版社,1995.46~50
- 22 曾昭礼.我国振冲地基应用回顾.见:龚晓南编.复合地基理论与实践学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1996.24~28
- 23 侯伟生.水泥土搅拌桩的工程应用与经验教训.岩土工程青年专家学术论坛文集.北京:中国建筑工业出版社,1998.145~152
- 24 阎明礼等.夯实水泥土桩复合地基试验研究.见:龚晓南编.第五届全国地基处理学术讨论会论文集.北京:中国建筑工业出版社,1997.419~422
- 25 刘焕存.夯实水泥土强度特性试验研究.岩土工程技术,1996(3):16~20
- 26 姜彬生等.夯实水泥土桩的强度和变形特性.岩土工程技术,1998(4):40~44
- 27 王小晋等.北京大兴县枣园小区住宅楼夯实水泥土桩复合地基工程实录.第三届全国岩土工程实录集.北京:兵器工业出版社,1993.396~399
- 28 化建新等.水泥灰土桩(CLSC)在处理多层建筑地基中的应用.见:龚晓南编.复合地基理论与实践.杭州:浙江大学出版社,1996.245~247
- 29 化建新等.北京市石榴庄小区701<sup>#</sup>楼水泥灰土桩复合地基实录.第四届全国岩土工程实录集.北京:兵器工业出版社,1997.371~374
- 30 化建新等.水泥灰土桩复合地基在高层建筑地基处理中的应用.21世纪高层建筑基础工程.北京:中国建筑工业出版社,2000.449~451
- 31 杨军等.CFG桩复合地基在高层建筑地基处理中的应用.岩土工程青年专家学术论坛文集.北京:中国建筑工业出版社,1998.432~448
- 32 化建新等.北京望京东湖南里小区(西区)Ia、Ib、Ic楼降水、基坑支护、地基处理实录.第五届全国岩土工程实录集.北京:兵器工业出版社,2000.488~491
- 33 吴春林等.CFG桩复合地基承载力简易计算方法.岩土工程学报,1993(2):94~102
- 34 阎明礼等.CFG桩加固技术.见:龚晓南编.第四届全国地基处理学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1995.29~38
- 35 吴春林等.CFG桩及其复合地基水平荷载作用下的性状.见:龚晓南编.第四届全国地基处理学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1995.381~386
- 36 阴伟民.CFG桩及其复合地基有关问题探讨.21世纪高层建筑基础.北京:中国建筑工业出版社,2000.433~436
- 37 赵京文等.北京纺织厂高层住宅地基处理方案对比分析.岩土工程技术,1999(2):12~16
- 38 温立新等.北京某塔式住宅楼地基基础方案优选.岩土工程技术,1998(2):20~23
- 39 王丽媛等.望京A4区III-2<sup>#</sup>楼岩土工程实录.第五届全国岩土工程实录集.北京:兵器工业出版社,2000.463~466
- 40 黄昌乾等.钻孔跟管夯扩素砼短桩复合地基工程实录.第五届全国岩土工程实录集.北京:兵器工业出版社,2000.472~475
- 41 庞仁久等.北京延庆南关小区住宅楼地基处理工程实践.第五届全国岩土工程实录集.北京:兵器工业出版社,2000.467~471

收稿日期:2000-12-01