

CFG桩复合地基技术 及工程实践

阎明礼 张东刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

CFG桩复合地基技术 及工程实践

阎明礼 张东刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了复合地基的一些基本概念和典型桩型复合地基的特性,讨论了如何合理选择复合地基桩型。对 CFG 桩桩体材料、复合地基承载和变形特性、CFG 桩复合地基承载力和变形计算、CFG 桩施工工艺和施工中常见的一些问题做了详细的论述,并给出了大量的工程实例和沉降观测资料。

本书可供从事土木工程建筑的设计、施工、科研和教学人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

CFG 桩复合地基技术及工程实践/阎明礼,张东刚编著. —北京:中国水利水电出版社,2001.1

ISBN 7-5084-0499-8

I. CFG… II. ①阎…②张… III. 桩基础-基础工程
IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 57591 号

书 名	CFG 桩复合地基技术及工程实践
作 者	阎明礼 张东刚 编著
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sale@waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部) 全国各地新华书店
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	850×1168 毫米 32 开本 10.25 印张 273 千字
版 次	2001 年 1 月第一版 2001 年 1 月北京第一次印刷
印 数	0001—6000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

CFG 桩复合地基成套技术是中国建筑科学研究院地基所 20 世纪 80 年代末开发的一项新的地基加固技术。1992 年由建设部组织鉴定,专家一致认为该成果具有国际领先水平,推广意义很大。

该技术于 1994 年被列为建设部全国重点推广项目,被国家科委列为国家级全国重点推广项目。1997 年被列为国家级工法,并制定了中国建筑科学研究院企业标准,现已列入国家行业标准《建筑地基处理技术规范》,该规范目前正在编制过程中。

CFG 桩施工最初选用振动沉管打桩机,是基于振动沉管打桩机在我国拥有量很大。该工艺的不足在于存在振动和噪音污染,遇厚砂层和硬土层难以穿透。

为完善 CFG 桩的施工技术,1997 年国家投资立项研制开发长螺旋钻机和配套的施工工艺,并列入“九五”全国重点攻关项目,于 1999 年 12 月通过国家验收。

通过十余年的科研和工程实践,CFG 桩复合地基技术从最初应用于多层建筑发展到广泛应用于高层和超高层建筑地基处理,并成为某些地区应用最普遍的地基处理方法之一。为使广大工程技术人员对 CFG 桩复合地基有一个较全面的了解,作者对该技术以及在工程中的应用进行了回顾和总结,并参阅了国内同行的一些文献资

料,编著了此书。

本书介绍了复合地基的一些基本概念;CFG 桩复合地基的承载和变形特性;CFG 桩复合地基设计计算方法;CFG 桩施工工艺和施工质量控制。书中给出了大量的工程实例,以供设计、施工时参考。

由于作者水平所限,书中不妥甚至错误之处在所难免,请读者批评指正。

作 者

2000.10

目 录

前 言

第一章 总论	1
第一节 土的分类	1
第二节 土的变形和强度特性	2
一、应力应变关系的非线性、非弹性	2
二、球应力和偏应力对变形的交叉影响	2
三、土的模量	3
四、土的强度与外荷的相关性	4
五、土对动荷的敏感性	6
第三节 建筑地基类型及问题	6
一、特殊土地基	6
二、非均匀地基	9
三、山区地基	9
四、可液化地基	9
五、大面积人工填土地基	10
六、均匀地基	10
第四节 地基处理方法	10
一、密实法	12
二、置换法	13
三、复合地基法	13
四、加筋法	16
五、灌浆法	16
第五节 地基处理方案选择	17
一、地基处理方案选择应具备的资料	17
二、方案比较	17
三、地基处理方法联合使用	18

四、地基处理规划的合理性	19
第二章 复合地基的基本概念	21
第一节 复合地基的定义	21
第二节 复合地基的分类	21
第三节 形成复合地基的条件	24
一、中高粘结强度桩（如夯实水泥土桩和 CFG 桩）	24
二、散体桩和低粘结强度桩（如碎石桩和石灰桩）	26
第四节 复合地基置换率、桩土应力比、桩土荷载分担比和 复合模量的概念	27
一、置换率	27
二、桩土应力比	28
三、桩土荷载分担比	28
四、复合模量	29
第五节 复合地基效应	33
一、置换作用（桩体效应）	33
二、挤密、振密作用	34
三、排水作用	34
四、减载作用	34
五、桩对土的约束作用	35
第六节 几种典型桩型复合地基的特性	35
一、碎石桩复合地基	35
二、石灰桩复合地基	37
三、水泥土桩复合地基	39
四、夯实水泥土桩复合地基	40
五、CFG 桩复合地基	45
第七节 复合地基桩型的合理选用	46
一、桩型及工艺简介	46
二、复合地基承载力提高幅值	46
三、方案选择的基本原则	48
第三章 CFG 桩复合地基	49
第一节 概述	49

第二节 桩体材料及其性状	51
一、振动沉管成桩工艺桩体材料的性状	51
二、长螺旋钻管内泵压灌注成桩工艺桩体材料的性状	54
第三节 垂直荷载作用下复合地基的性状	60
一、桩、土受力特性	60
二、复合地基变形特性	65
三、边载对 CFG 桩复合地基承载特性的影响	74
第四节 褥垫层技术	81
一、褥垫层的作用	82
二、褥垫层的合理厚度	85
第五节 CFG 桩复合地基工程特性	87
一、承载力提高幅度大、可调性强	87
二、适应范围广	87
三、刚性桩的性状明显	88
四、桩体的排水作用	89
五、时间效应	89
六、桩体强度和承载力的关系	91
七、复合地基变形小	91
第四章 CFG 桩复合地基设计计算	93
第一节 CFG 桩复合地基设计对勘察的要求	93
一、工程勘察内容	93
二、勘探点间距	93
三、勘探深度	93
四、室内试验	93
五、勘察报告	93
第二节 CFG 桩复合地基承载力计算	94
第三节 CFG 桩复合地基变形计算	96
一、复合地基变形研究现状	96
二、CFG 桩复合地基变形计算	99
三、变形计算应注意的几个问题	101
第四节 CFG 桩复合地基设计	105

一、设计思想	105
二、设计需要具备的资料	107
三、复合地基设计和参数确定	108
四、布桩	111
第五节 CFG 桩复合地基设计中的几个问题	119
一、设计中承载力采用设计值还是标准值	119
二、地基承载力标准值的修正	123
第五章 CFG 桩复合地基施工	129
第一节 CFG 桩施工技术发展简况	129
第二节 振动沉管 CFG 桩施工工艺	132
一、施工设备	132
二、施工程序	136
三、施工中常见的几个问题	137
四、施工工艺研究成果	138
五、施工质量控制措施	142
第三节 长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工工艺	144
一、施工设备及施工程序简介	144
二、施工准备	147
三、CFG 桩施工	150
四、CFG 桩施工中常见的问题及质量控制措施	151
第四节 清土及 CFG 桩桩头处理	156
一、弃土清运	156
二、桩头处理	158
第五节 褥垫层铺设及质量控制	159
一、褥垫层铺设	159
二、电梯井、集水坑褥垫层铺设	159
第六节 CFG 桩复合地基冬期施工措施	161
一、施工前场地要求	161
二、CFG 桩冬期施工要求	161
三、CFG 桩和桩间土成品保护	163
第七节 施工检测及验收	163

一、施工检测	163
二、CFG 桩复合地基施工验收	164
第六章 CFG 桩复合地基工程实例	166
工程实例一 南京造纸厂地基处理工程	168
工程实例二 浦镇车辆厂生活区住宅楼地基处理工程	175
工程实例三 航天部 621 所 35、36 号住宅楼地基处理工程	183
工程实例四 仪征化纤厂涤纶长丝主车间地基处理工程	186
工程实例五 西安某水塔地基处理工程	192
工程实例六 华亭嘉园小区超高层建筑地基处理工程	195
工程实例七 望京高校小区 1~4 号楼地基处理工程	217
工程实例八 嘉和丽园 A、B、C 座楼地基处理工程	225
工程实例九 凤凰城 A、B 座楼地基处理工程	236
工程实例十 望京新城 A4 区 II 组团 6 栋高层建筑地基 处理工程	247
工程实例十一 右安门万博苑 2、3 号楼地基处理工程	258
工程实例十二 东升园 13、14 号楼地基处理工程	264
工程实例十三 方舟苑 7 号楼地基处理工程	272
工程实例十四 芍药居 202 号楼地基处理工程	278
工程实例十五 北京大屯慧忠北里三塔 3~5 号楼地基 处理工程	285
工程实例十六 山西煤炭机械施工公司机修车间、设备库、 综合楼和住宅楼地基处理工程	292
附录一 桩的极限侧阻力标准值和极限端阻力标准值	298
附录二 平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$	300
附录三 国家和一些地方规范对建筑物允许变形值 的规定	304
参考文献	311

第一章 总 论

第一节 土 的 分 类

土是不同岩石受物理化学风化作用的产物。由于岩石矿物成分的不同,土在自然界经历的剥蚀、搬运、分选、堆积的过程也不同,使土的结构、物理力学性质差异很大。

人类生存与土密切相关,除了利用土地耕种之外,更多的是在土上或在土中修建各种类型的建筑物或构筑物。来自建筑物的荷载是通过基础传给土体的。承受来自基础的全部荷载的这一部分土层,称为建筑物的地基。

从工程角度来看,人们更关心的是建筑物下面的地基土。为了更好地认识土,按照其特性,将之分成若干类,以便使工程技术人员大体把握不同类型土的性状。

出于不同的目的,土的分类也不尽相同,建筑工程按GBJ7—89《建筑地基基础设计规范》和GB50021—94《岩土工程勘察规范》对土进行分类,将岩土分为:岩石、碎石土、砂土、粉土、粘性土和人工填土等。

岩石又可分为三个亚类,按风化程度分为微风化、中等风化和强风化。

碎石土也可分为三个亚类:漂石、块石;卵石、碎石;圆砾、角砾。

砂土分为五个亚类:砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。

粘性土分两个亚类:塑性指数 $I_p > 17$ 的为粘土; $10 < I_p \leq 17$ 的为粉质粘土。

粉土是塑性指数不大于 10,其性质介于砂土和粘性土之间。

填土分三个亚类:素填土、杂填土和冲填土。

淤泥是在静水或缓慢的流水环境中沉积,并经生物化学作用

形成的天然含水量大于液限、天然孔隙比大于或等于 1.5 的粘性土。天然孔隙比小于 1.5 但大于 1.0 的土称为淤泥质土。

此外，有些土是在特殊工程地质环境中生成的，具有特殊的物理力学性质，这些土称为特殊土，如软土、膨胀土、湿陷性黄土、多年冻土、红粘土、盐渍土等。山区地基土也有许多与一般土不同的工程性质。

第二节 土的变形和强度特性

一、应力应变关系的非线性、非弹性

土的应力应变关系在应力很小时可近似地认为是具有线性和弹性性状，但实际上从加荷一开始就呈非线性、非弹性性状。

所谓非线性是指土的应力应变关系不是直线变形规律，如图 1-1 中 OA 段。

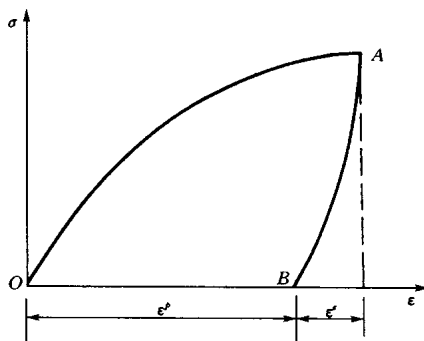


图 1-1 应力应变曲线

非弹性是指卸荷时并非按 AO 路线返回 O 点，而是沿 AB 路线变化，并产生不可恢复的变形 ϵ^p 。而且对大多数土，土的变形主要是不可恢复的变形 ϵ^p ，而可恢复的变形 ϵ^e 只占很小的一部分。

二、球应力和偏应力对变形的交叉影响

对某些金属材料，根据弹性力学，体应变只与球应力有关，剪应变只与偏应力有关，即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_v &= f_1(p) \\ \gamma &= f_2(q) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 p ——球应力；
 q ——偏应力；
 ϵ_v ——体应变；
 γ ——剪应变。

对于土，体应变和剪应变既与球应力有关，也与偏应力有关。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_v &= f_1(p, q) \\ \gamma &= f_2(p, q) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

这就是说，体应变由两部分组成，一是由球应力 p 引起的体应变，二是由偏应力引起的体应变。

对密实砂土或粘性土，剪应力可引起体积膨胀，称为剪胀性；密度不大的粘性土和松散的砂土，剪应力引起的体积减少称为剪缩性。

剪应变也由两部分组成，一部分是由剪应力所引起，剪应变随着剪应力增大而增加；另一部分由球应力所引起，剪应变随球应力的增加而减少，又称为压硬性。

此外，土的应力应变关系还与应力历史、应力路径有着密切的关系，这里不再讨论。

三、土的模量

金属材料可用弹性模量 E 来表示材料抵抗变形的能力。弹性模量对给定的金属材料为一常值。土不是纯弹性材料，模量也不能用一个常值来表示。为和金属材料的弹性模量相区别，土用变形模量 E_0 来表征土抵抗变形的能力。

一般情况下，变形模量对应土单元体的应力应变条件为：

垂直应力增量 $\Delta\sigma_z > 0$ 、侧向应力增量 $\Delta\sigma_r > 0$ ；垂直应变增量 $\Delta\epsilon_z > 0$ 、侧向应变增量 $\Delta\epsilon_r > 0$ 。

由固结仪试验测定的模量为土的压缩模量，并用 E_c 表示。单元体对应的应力应变条件为： $\Delta\sigma_z > 0$ 、 $\Delta\sigma_r > 0$ ； $\Delta\epsilon_z > 0$ 、 $\Delta\epsilon_r = 0$ 。

由三轴压缩试验可知，在给定围压下模量随荷载水平增加而减小，如图 1-2 所示。

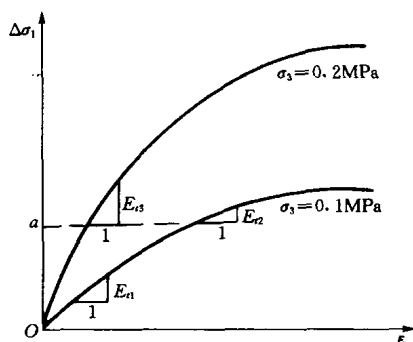


图 1-2 三轴试验结果

对围压 $\sigma_3 = 0.1 \text{ MPa}$ 的试验, 有 $E_{t1} > E_{t2}$ 。对相同应力水平, 如 $\Delta\sigma_1 = a$, 围压 σ_3 越大, 相应的切线模量也越大。有 $E_{t3} > E_{t2}$ 。

在固结仪条件下, 荷载越大, 土的孔隙比越小, 土体抵抗变形的能力也越大, 压缩模量随荷载增大而增加, 有 $E_{s2} > E_{s1}$ 如图1-3所示。

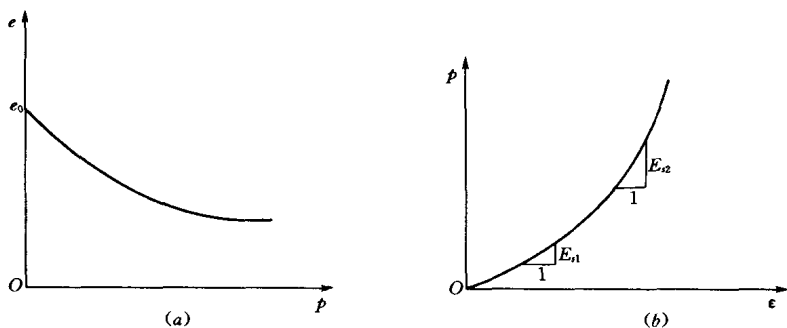


图 1-3 固结试验结果

三轴压缩试验与固结仪试验相比, 主要是侧向约束条件的不同, 三轴试验可以允许土的侧向变形、固结试验不允许侧向变形。可以看出土的承载能力或抵抗变形的能力与侧向约束条件密切相关。侧向约束力越大, 土的承载能力和抵抗变形的能力越强。

四、土的强度与外荷的相关性

通常土的抗剪强度用库仑方程来表示, 即

$$\tau_s = C + \sigma \tan \varphi \quad (1-3)$$

式中 C ——粘聚力；

φ ——内摩擦角。

由材料力学可知，土单元体在荷载 σ_1 、 σ_3 作用下，最大剪应力面与 σ_1 所在平面成 45° 角。在这一面上剪应力最大。但为什么土体不一定是在该面上破坏呢？

当 $\varphi=0$ 时，莫尔包线为一水平线，此时破坏面就发生在 45° 面上。

当 $\varphi \neq 0$ 时，如图 1-4 所示，剪应力在 σ_1 所在平面为零，即 $\tau=0$ ；在与 σ_1 成 45° 平面上 $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ ，剪应力最大；在 σ_3 所在平面， $\tau=0$ 。

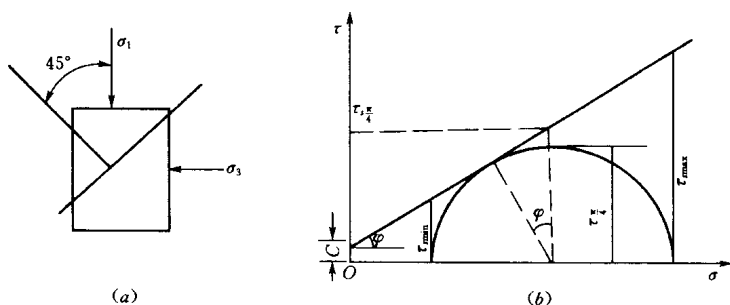


图 1-4 单元体受力和莫尔圆对应关系

抗剪强度在 σ_1 所在平面最大， $\tau_s = \tau_{s\max}$ ；在与 σ_1 成 45° 平面上， $\tau_s = \tau_{s\frac{\pi}{4}}$ ；在 σ_3 所在平面 $\tau_s = \tau_{s\min}$ ，抗剪强度最小。

土体破坏与否取决于剪应力和抗剪强度的比较。在 45° 面上虽然剪应力最大，但仍小于该面上的抗剪强度，有 $\tau_{\frac{\pi}{4}} < \tau_{s\frac{\pi}{4}}$ 。恰恰在 $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ 面上，剪应力和抗剪强度相等，土体此时破坏。

通过上面的讨论，可知土的抗剪强度有如下特点：

(1) 土的抗剪强度不仅与土本身的性质有关，而且与外荷有关。式 (1-3) 的实质是 $\tau_s = f(\sigma)$ 。

(2) 对 $\varphi \neq 0$ 的土体单元，断面不同，其上的正应力也不同，抗

剪强度也不同。土的抗剪强度随断面的不同而异。

五、土对动荷的敏感性

天然沉积的粘性土，除了颗粒间分子引力形成的连接外，长期的物理化学作用，也使颗粒或颗粒集合体之间产生一定的连接强度，这叫做土的结构强度。通常用灵敏度来反映土的结构强度的大小。灵敏度越高，土的结构强度占的比重越大。另一方面，灵敏度越高，扰动使土可能产生的强度降低越严重。

饱和松散的粉细砂和粉土，在地震荷载或其它动荷载作用下，土颗粒具有离开原来平衡位置的趋势。当颗粒间脱离接触并处于悬浮状态时，骨架应力转变为孔隙水应力，土的抗剪强度丧失，产生土体液化。随着时间的推移，液化后的土颗粒重新排列，孔隙水逐渐消散，密度增加，土体又可获得比液化前高的抗剪强度，称之为振密效应。

对密实的砂土和粘性土，地震荷载或其它动荷载可使土的结构强度降低，土的密度减小，导致土的承载能力下降。

第三节 建筑地基类型及问题

一、特殊土地基

1. 软土地基

我国软土主要分布在河流入海处，地质成因极为复杂。上海、广州等地为三角洲沉积，温州、宁波地区为滨海相沉积，闽江口平原为溺湖相沉积。其中最软的是淤泥和淤泥质土。它们是以极细的粘土胶状物质为主，在静水或非常缓慢的流水环境中沉积，并伴有微生物作用的一种结构性土。

软土有如下一些特征：

(1) 天然含水量等于或大于液限：一般大于 40%，最高可达 90%，孔隙比大于 1。由于软土具有一定的结构强度，含水量和孔隙比并不随着深度的增加而减少。

(2) 压缩性高：压缩模量一般在 1~5MPa 之间。

(3) 抗剪强度低：三轴不排水试验内摩擦角接近零，粘聚力一般不大于 25kPa，围压的增加对土的强度没有显著的影响。

(4) 渗透系数一般小于 10^{-6} cm/s。

(5) 具有流变性：除了固结应力引起的固结变形之外，在剪应力作用下，土体处于长期变形过程中。

由于软土承载力低、压缩性高，有时多层建筑也要打桩。由于桩基造价太高，一些单位采用补偿性基础或筏基础，以减少地基中的附加应力和沉降变形。

塘沽地区常利用地表的一层硬壳，在其上铺一定厚度的碎石垫层做片筏基础，荷载比较均匀时，建三、四层楼可不进行地基处理。

软土地基设计主要是变形问题，即使荷载不超过地基容许承载力，如果建筑物形体复杂、荷载不均匀、地基岩性变化较大，以及建筑物之间的距离较近，造成相邻基础应力叠加，也会导致建筑物产生不均匀沉降或整体倾斜或房屋开裂，甚至失稳、倾倒。

由于土的渗透系数较小、固结速率慢，如果施工速率过快，也会造成局部产生较大的塑性开展区，使建筑物产生不均匀下沉。

软土地基一般灵敏度为 2~3，在地震荷载或其它动荷载作用下会发生震陷。

2. 湿陷性黄土地基

黄土是一种含大量硫酸盐类、肉眼能观察到大孔隙的黄色粉状土。黄土分两种，一种是非湿陷性黄土，另一种为湿陷性黄土，湿陷性黄土又分自重湿陷性和非自重湿陷性黄土两种。

我国黄土的分布面积大，总面积达 63 万 km^2 。湿陷性黄土占黄土总面积的 60% 左右，以陕、甘、宁地区最为发育。

湿陷性黄土具有如下特征：

(1) 颗粒组成以粉粒为主，含量约占 60% 以上。

(2) 天然孔隙比较大，一般多在 1.0~1.1 之间。

(3) 天然含水量较低，饱和度在 15%~50% 之间。

(4) 在未受水浸湿的状态下，一般强度较高，结构强度占很大的比例，压缩性较低，属欠固结土。它浸水后可使溶盐溶解，颗