多种地基处理方法组合加固不均匀地基

袁　勋　张东刚　阎明礼
（中国建筑科学研究院地基基础研究所，北京，100013）

提　要　本文介绍了 CFG 长桩与夯实水泥土短桩复合地基组合运用于处理某高层住宅不均匀地基的实例，阐述了组合运用两种方法处理不均匀地基的设计思路、施工要点及地基处理效果。

一　概　述

地基处理技术是一门应用性很强的技术，地基处理方法是随着生产的发展而发展，只有针对具体的土质情况和施工条件、加固要求，选用合适的地基处理方法，才能取得较好的经济和社会效益。不同的地基处理方法有其各自的特点，在一定条件下，将不同的地基处理方法进行组合应用，发挥各自的特点，往往能起到节省工程投资，加快工程进度的效果，修订中的《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）也大力提倡组合应用不同地基处理方法。

CFG 桩复合地基技术是应用较多的一种地基处理方法，做为一种高粘结强度桩，CFG 桩对有地基加固效果好，承载力提高幅度大，施工效率高，处理的深度可达 20m，应用于高层建筑地基处理中有很大的优势。夯实水泥土桩复合地基技术是加固浅层软弱土的一种有效方法，该法施工速度快，造价低。本文在一高层建筑不均匀地基的处理工程中，将上述二法结合应用，充分发挥各自的效果，收到了良好的技术和经济效果，对不同地基处理方法的综合应用进行了探索。

二　工程概况

该工程为一高层住宅，位于北京市望京地区，建筑物地下二层，地上 24 层，结构型式为剪力墙结构，箱形基础。基础埋深为 5.43m，基底绝对标高为 30.02m，根据岩土工程勘察报告，基础座落在粉质粘土、粘质粉土②层及粉砂③层上，基底以下各层土的物理、力学性质见表 1，曲型的剖面图见图 1，②层粉质粘土与③层粉砂的力学性质差别较大，基础持力层为不均匀地基。场地地下水位较浅，初见水位埋深在 2.30m～9.60m，标高为 28.59m～35.22m，稳定水位埋深在 2.00m～7.80m，标高为 31.63m～35.82m，地下水的类型属潜水型。

□

三　地基处理方案选择及设计

该建筑为高层住宅，结构设计要求处理后复合地基承载力标准值达到 430kPa 以上，沉降量控制在 10cm 以内，建筑物地基变形倾斜不大于 2‰。根据计算，天然地基承载力变形均不能满足设计要求，需对地基进行处理。

表 1　土的物理力学性质统计表(平均值

土层编号 \ 土的物理力学指标	含水量 (%)	湿密度 ρ (g/cm³)	孔隙比 e	液性指数	压缩模量 E_S (MPa) E_S100	E_S200	E_S300	标准贯入试验锤击数 $N_{63.5}$
②粉质粘土	25.3	1.94	0.746	0.758	4.890	5.988	6.838	-
③粉砂	-	-	-	-		(15~20)		22
③$_1$ 粘质粉土	22.8	2.03	0.647	0.585	11.415	11.707	12.932	-
④细中砂	-	-	-	-		(25~30)		28
⑤粉质粘土、粘质粉土	23.3	2.01	0.669	0.40	12.441	13.644	14.534	-
⑥中砂	-	-	-	-		(35~40)		46
⑦粉质粘土	24.5	2.00	0.667	0.346	13.479	14.341	14.971	-
⑧卵石	-	-	-	-		(50~60)		56
⑨粉质粘土	27.9	1.95	0.814	0.455	16.788	16.999	17.566	-

勘察报告提出采用钻孔夯扩挤密复合桩或换土法进行处理。采用换土法进行处理，处理深度有限，对粉质粘土②层较厚的地方还需采用钻孔夯扩挤密复合桩进行处理，同时，大面积进行换土垫层施工，控制施工质量也较困难。采用钻孔夯扩挤密复合桩进行处理，粉砂③层处于地下水位以下，钻孔提钻进行夯扩成桩时该部位桩孔易发生坍塌现象，因此需要进行基坑深层降水。场地附近已有高层建筑物，考虑到深层降水可能造成邻近建筑物发生附加沉降，因此需考虑采用其它地基处理方案。

CFG 桩复合地基处理是应用时间较长、使用较广的一种地基处理方法，在北京地区目前已用于 30 层以上建筑物的地基处理。采用 CFG 桩复合地基技术，承载力提高幅度大，施工周期短、造价低廉，特别是当 CFG 桩施工采用长螺旋钻孔管内泵压 CFG 桩混合料施工工艺时，

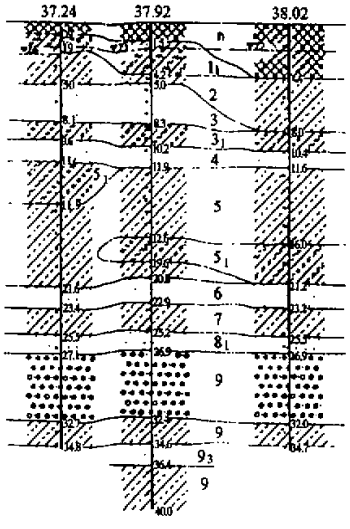


图 1　典型地质剖面图

更具有无泥浆和噪音污染的优点，不需要进行深层降水。比较多种地基处理方法，确定采用 CFG 桩复合地基技术进行地基处理。

CFG 桩复合地基属刚性桩复合地基类型，进行复合地基设计时要求 CFG 桩桩端落在强度较高、压缩性较小的土层上。设计时根据勘察报告，首先试确定 CFG 桩桩长，然后根据天然地基承载力和设计要求的复合地基承载力确定桩间距。本场地⑤层粉质粘土土层较均匀，压缩性较低，承载力较高，是较好的持力层，桩长确定为 15m，桩长确定后，根据复合地基承载力要求，按式(1)计算确定桩间距。桩长和桩间距是控制 CFG 桩复合地基承载力的两个主要参数，也是调整复合地基加固区沉降量和下卧层沉降量的重要因素。

$$f_{sp,k}=\frac{1}{A}\left[\alpha\ \beta f_k(A-A_p)+R_k\right] \tag{1}$$

式中 $f_{sp,k}$——复合地基承载力标准值(kPa)；

f_k——天然地基承载力标准值(kPa)；

R_k——CFG 单桩承载力标准值(kN)；

A——每根 CFG 桩分担的面积(m^2)；

A_p——CFG 单桩截面面积(m^2)；

α——桩间土强度提高系数，对于非挤土工艺成桩 α 取 1.0；

β——桩间土强度发挥度，β=0.9～1.0。

本建筑物基底持力层有部分区域为粉质粘土②层，该层土与③与粉砂的承载力差别较大，当按公式(1)计算复合地基承载力时，对天然地基承载力 f_k 的不同取值，将对建筑物安全、地基处理费用产生较大影响。当取用粉砂③层承载力 f_k=200kPa 时，计算在基础底板范围内约需布桩 555 根，当取用粉质粘土②层承载力 f_k=140kPa 时，计算在基础底板范围内约需布桩 740 根，增加施工费用 20 多万元，工期相应增长，同时也未能完全消除地基不均匀问题。

勘察报告钻孔揭露②层粉质粘土深度为 3m，如能采用简单方法对该层进行处理，将大大节省工程处理费用和工期。经分析研究，确定在 CFG 桩施工结束后，对局部②层粉质粘土进行单独处理，处理后使该部分土的承载力与变形达到与③层粉砂相近的程度。对该部分的处理采用夯实水泥土桩施工工艺，即人工用洛阳铲成孔、回填夯实水泥土混合料成桩，夯实水泥土桩将来与 CFG 桩共同构成复合地基发挥作用。

计算夯实水泥土桩复合地基承载力也采用公式(1)，夯实水泥土桩复合地基加固的目的是使②层粉质粘土的承载力提高到与③层粉砂承载力相同的水平上，该部分计算时 $f_{sp,k}$ 取用③层粉砂承载力 200kPa。取③层粉砂承载力为天然地基承载力 f_k 代入公式(1)进行 CFG 桩设计。

夯实水泥土桩径为 350mm，按承载力计算桩长为 3m，桩间距为 1.2m；CFG 桩桩径为 415mm，桩长为 15m，桩间距为 1.5m，CFG 桩布桩 555 根。

复合地基的沉降计算包括加固区的变形和下卧层的变形，考虑到褥垫层的变形有限，计算时不予考虑。CFG 桩复合地基沉降计算按式(2)进行。

$$S_c=\psi\left[\sum_{i=1}^{n1}\frac{\rho_0}{\zeta E_{si}}\left(Z_i\bar{\alpha}_i-Z_{i-1}\bar{\alpha}_{i-1}\right)+\sum_{i=n1+1}^{n2}\frac{\rho_0}{\zeta E_{si}}\left(Z_i\bar{\alpha}_i-Z_{i-1}\bar{\alpha}_{i-1}\right)+\right] \tag{2}$$

式中 $n1$ ——加固区范围土层分层数；

$n2$ ——沉降计算深度范围内土层总的分层数；

p_0 ——对应于荷载标准值时的基础底面处的附加压力(kPa)；

E_{si} ——基础底面下的第 i 层土的压缩模量(MPa)；

z_i，z_{i-1} ——基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离(m)；

a_i，a_{i-1} ——基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数；

ζ ——加固区土的模量提高系数，

Ψ ——沉降计算修正系数。

CFG 桩复合地基沉降计算中③层粉砂 E_{si} 采用其经验值，局部②层粉质粘土区域 E_{si} 应该取用夯实水泥土桩加固区的模量，即考虑夯实水泥土桩对②层粉质粘土的模量 E_{si} 的提高作用，考虑到该加固区的模量应与③层粉砂的压缩模量匹配，在按承载力计算夯实水泥土桩布桩的基础上，修改夯实水泥土桩桩间距为 0.8m。根据式(2)计算经复合地基处理后该建筑物沉降量为 72mm，满足设计要求。

四 CFG 桩及夯实水泥土桩复合地基施工

CFG 桩施工采用长螺旋钻孔管内泵压 CFG 混合料施工工艺，桩身强度等级控制不小于 C20，施工配合比为：水泥：砂：石：粉煤灰：外加剂=320∶738∶1106∶48∶1.9(kg)，其中水灰比为 0.64，砂率为 40%。材料采用 425＃普通硅酸盐水泥，细砂，粒径 0.3～0.8cm 卵石，II 级粉煤灰和泵送剂。混合料塌落度为 16～20cm。CFG 桩施工前基础底面留有 50cm 厚保护土层，保证桩头质量及施工过程中不扰动桩间土，CFG 桩施工完后，人工清除保护土层，剔除保护桩头。

CFG 桩施工结束后，进行软弱粉质粘土②层的处理。为确定粉质粘土②层的范围及深度，采用轻型动力触探对基坑进行测试，在粉质粘土②层范围实测动力触探击数平均为 7 击 / 30cm。夯实水泥土桩施工采用人工洛阳铲成孔，水泥与土料的配合按 1∶6(体积比)配制，施工时控制混合料的含水量为 15%～20%。为避免扰动桩间土，采用人工夯实，每层虚铺厚度小于 30cm，每层重夯不少于 8 击，落距大于 60cm，以确保水泥土桩夯击后的密实度，这也是控制水土桩成桩质量的关键。

CFG 桩及夯实水泥土桩施工完后铺设褥垫层，褥垫层技术是复合地基的核心技术，CFG 桩及夯实水泥土桩只有通过褥垫层才能构成复合地基。褥垫层保证桩、土共同承担荷载的作用，减少基础底面应力集中的作用，同时调整竖向和水平向桩、土荷载分担比的作用。本工程设计褥垫层厚度设计为 15cm，褥垫层材料采用粒径为 3～8mm 的碎石。

CFG 桩及夯实水泥土桩施工完后，由国家建筑工程质量监督检验中心进行了 2 根 CFG 桩单桩静载试验，1 台 CFG 桩单桩复合地基静载试验和 1 台夯实水泥土桩单桩复合地基静载荷试验，静载试验 Q～S 曲线见图 2～图 5，静载试验检测结果表明，修正后复合地基承载力标准值为 430kPa，满足设计要求。静载试验同时，还对桩身完整性进行低应变动测检验检验结果表明，完整桩占 97%，轻微缺陷桩(不影响正常使用)占 3%。

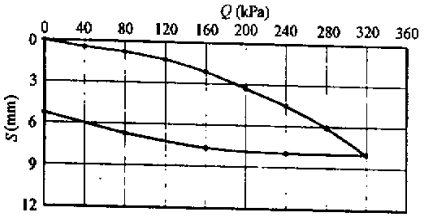


图2 水泥土桩单桩复合地基 Q~S曲线

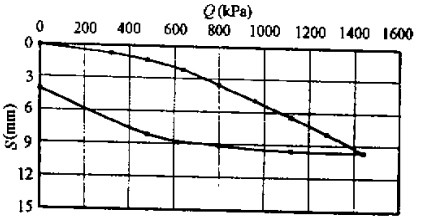


图3 CFG桩单桩复合地基 Q~S曲线

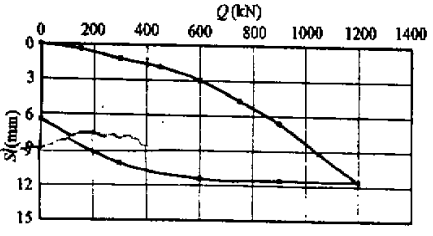


图4 CFG桩单桩 Q~S曲线

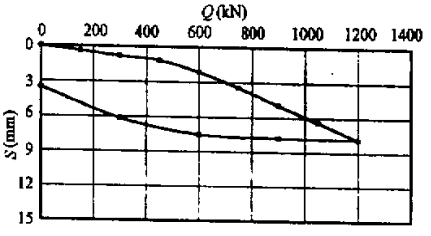


图5 CFG桩单桩 Q~S曲线

五 结 语

(1)任何一个设计方案取决于设计对承载力、变形的要求，取决于地质、环境条件。将 CFG 桩与夯实水泥土桩结合运用，发挥长、短桩各自的优势，在处理不均匀地基时能够取得较好的技术、经济效果。

(2)CFG 桩复合地基能够很好地解决高层建筑承载力及沉降变形变量，承载力提高幅度大，施工费用低，工效高；采用长螺旋钻孔管内泵压 CFG 桩混合料施工工艺，在城市高层建筑地基处理中具有很大优势。

(3)采用夯实水泥土桩能够处理浅层不良地基土，施工简便，施工工效高，处理费用低廉，与其他地基处理方法结合有关更广阔的应用前景。

参考文献

[1] 张东刚，阎明礼，马骥：《CFG 桩复合地基在北京望京高校小区高层建筑中的应用》，见《建筑科学》，2000 年 1 月。

[2] 张东刚：《CFG 桩复合地基变形计算及程序》，中国建筑科学研究院青年基金课题，1996。

[3] 阎明礼主编：《地基处理技术》，中国计划出版社，1997。