

侍倩 编

高层建筑基础工程



Chemical Industry Press



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

高层建筑基础工程

侍 倩 编



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑基础工程/侍倩编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 10

ISBN 7-5025-6196-X

I. 高… II. 侍… III. 高层建筑-地基-基础(工程)
IV. TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 107743 号

高层建筑基础工程

侍 倩 编

责任编辑: 董 琳

文字编辑: 韩庆利 余纪军

责任校对: 顾淑云 战河红

封面设计: 蒋艳君

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印刷

北京兴顺印刷厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 13½ 字数 232 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6196-X/TU·65

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

高层建筑是城市化和工业化的产物。随着社会的进步,世界各大城市高层建筑的数量与日俱增,高度也越来越高。这已成为现代化城市的重要特征之一。所以,从19世纪80年代出现近代高层建筑以来,高层建筑在设计理论、施工水平、建筑艺术、使用功能等方面已日趋成熟。

我国高层建筑的大规模发展是从20世纪70年代开始的,其规模与建设水平不断进步,已具备了一定水准,有的已达国际先进水平。但是在各种复杂地质条件下,如何经济合理且安全地做好基础设计工作,始终未得到很好的解决,由于问题的复杂性,高层建筑地基基础设计问题始终受到工程界与学术界的高度重视。

常规的设计方法对复杂的高层建筑基础设计问题已经难于给出满意的解答,高层建筑地基基础共同作用的事实已被人们所接受。我们针对高层建筑地基基础的特点,结合实例系统地阐述了高层建筑常用基础类型的理论分析方法与设计,总结了高层建筑上部结构、地基、基础共同作用的工作机理,提出了高层建筑基础工程合理设计的建议,并对高层建筑施工中不可回避的一些问题进行了简要介绍,书中不仅有理论分析,也有设计建议和工程实例分析,可直接指导设计。本书可作为广大建筑工程设计、研究人员的参考用书,也可作为结构工程、岩土工程高年级本科生和研究生教材。

本书力求反映学科前沿动态,立足现行规范,介绍成熟的理论和方法,同时又力图使高层建筑地基基础设计理论便于实际应用。但是,鉴于问题本身的复杂性,许多问题还有待于进一步的研究。

限于作者水平,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2004年7月

内 容 提 要

本书针对高层建筑地基基础的特点,结合实例系统地阐述了高层建筑常用基础类型的理论分析与设计,分析了高层建筑地基、基础和上部结构共同作用的工作机理,提出了高层建筑基础工程合理设计的建议,并对高层建筑施工中不可避免的一些问题进行了简要介绍。书中不仅有理论分析,还有设计建议和工程实例分析,可直接指导设计。

本书可作为广大建筑工程设计、研究人员的参考用书,也可作为结构工程、岩土工程高年级本科生和研究生教材。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 高层建筑中基础工程的地位	1
一、高层建筑的定义	1
二、高层建筑的主要特征	2
三、高层建筑的主要岩土工程问题	3
第二节 高层建筑岩土工程勘察	3
一、高层建筑地基勘察的重要性	3
二、地基勘察的主要内容	4
三、高层建筑岩土工程勘察	5
四、岩土工程报告中的工程分析	9
第三节 高层建筑基础工程特点及类型	14
一、高层建筑基础工程的特点	14
二、高层建筑基础工程的类型	15
第四节 高层建筑基础设计方法的进展	19
一、简化计算方法	19
二、弹性地基梁、板理论分析方法	20
三、上部结构与地基基础共同作用的分析法	21
四、高层建筑基础工程设计原则	22
第二章 梁式基础	23
第一节 概述	23
一、适用条件	23
二、研究目的和意义	23
第二节 地基模型	24
一、线性弹性地基模型	24
二、非线性弹性地基模型	26
第三节 梁式基础简化分析方法	28
一、静定分析法	28
二、倒梁法	29

第四节 地基上梁的数值分析	30
一、文克尔地基上的梁	30
二、链杆法	42
三、有限差分法	44
四、有限单元法	47
第五节 柱下条形基础设计	49
一、柱下条形基础的构造	49
二、柱下条形基础的计算	50
三、柱下交叉梁式条形基础	51
第三章 筏板基础	54
第一节 概述	54
一、筏板基础的基本概念	54
二、特点	54
三、应用条件	55
四、筏板基础较常见的类型	55
第二节 筏板基础设计要求	56
一、筏板基础的一般规定	56
二、筏板基础的构造要求	57
第三节 筏板基础计算	61
一、筏板基础底面积和板厚确定原则	61
二、筏板基础的地基反力	62
三、筏板基础的稳定性和沉降问题	62
四、筏板内力计算	63
五、设计筏板基础的一般原理	74
第四节 筏板基础设计实例分析	75
第五节 筏板基础施工	81
一、施工	81
二、施工监测	82
第四章 箱形基础	83
第一节 概述	83
第二节 箱形基础几何尺寸的确定	84
一、箱形基础的平面尺寸	84

二、箱形基础的高度	85
三、箱形基础的内外墙	86
四、箱形基础的顶、底板	86
五、箱形基础的墙体洞口	86
六、配筋	87
七、混凝土	87
八、埋置深度	87
第三节 地基计算	87
一、地基强度验算	88
二、地基稳定性验算	92
三、基坑底部回弹变形	95
四、地基变形计算	96
第四节 箱形基础结构设计	102
一、地基反力的确定	102
二、箱基内力计算	107
第五节 箱基设计实例分析	112
第五章 桩基础	121
第一节 桩基础设计方法	121
一、设计控制的极限状态	121
二、荷载规定	122
第二节 高层建筑适用桩型的选择	122
一、桩型选择	122
二、桩基础的基本结构形式	124
第三节 桩基础计算	126
一、桩顶作用效应	126
二、单桩承载力校核	127
三、单桩竖向承载力的确定	127
四、桩的布置	130
五、群桩效应的考虑	131
六、桩基沉降计算	133
七、桩的水平承载力	136
第四节 桩基施工	141

一、桩基工程施工的准备工作	141
二、人工挖孔灌注桩	141
第六章 上部结构与地基基础的共同作用	144
第一节 概述	144
一、高层建筑与地基基础共同作用概念	144
二、高层建筑与地基基础共同作用的研究内容和影响因素	145
第二节 共同作用分析方法	146
一、刚度矩阵的凝聚	147
二、子结构分析的位移法——线性地基模型	149
三、子结构分析的位移法——非线性地基模型	151
四、多层多跨框架结构与地基基础的共同作用	153
第三节 高层建筑箱(筏)基础与地基共同作用的机理分析和设计建议	155
一、高层建筑箱(筏)基础与地基共同作用机理分析	155
二、设计建议	158
第四节 高层建筑桩箱(筏)基础与地基共同作用分析方法	161
一、筏板分析模式	161
二、桩土共同作用分析模式	164
三、竖向荷载下群桩与土的共同作用分析	165
四、高层建筑桩箱(筏)基与地基的共同作用分析	166
第五节 高层建筑桩箱(筏)基础与地基共同作用机理分析	168
一、高层建筑桩箱(筏)基础与地基共同作用的计算结果分析	168
二、高层建筑桩箱(筏)基础的工作机理和工作性状	171
三、设计建议	173
四、高层建筑桩箱(筏)基础的变形控制设计理论	174
第六节 实测结果与分析	175
一、高层建筑的箱形基础	175
二、高层建筑的桩筏(箱)基础	176
第七节 共同作用计算实例	178
第七章 深基坑开挖与支护	181
第一节 概述	181
一、深基坑工程特点	181
二、深基坑支护工程设计原则	181

第二节 深基坑支护类型	183
一、支护结构的作用	183
二、支护结构类型	184
第三节 支护设计	185
一、作用于支护结构上的侧压力计算	185
二、支护结构的位移和基底稳定性	192
第四节 地下水控制	194
一、一般规定	195
二、井点降水涌水量的设计计算	195
三、降水方法及选用	198
四、轻型井点降水设计	200
第五节 轻型井点降水设计实例	202
参考文献	205

第一章 绪 论

第一节 高层建筑中基础工程的地位

一、高层建筑的定义

近 20 年来,国内外高层建筑发展十分迅速,它的突出优点是可以有效利用空间资源。据有关资料介绍,9~10 层的建筑比 5 层的建筑节约用地 23%~28%,16~17 层的建筑则比 5 层的建筑节约用地 32%~49%。并且,若以 9~10 层的建筑与 5 层建筑相比,小区市政设施费用可降低 32%。

什么样的建筑属于高层建筑,目前还没有统一的标准。美国规定高度 25m 以上或 7 层以上的建筑为高层建筑;英国规定高度 24.3m 以上的建筑为高层建筑;法国规定居住建筑高度 50m 以上、其他建筑高度 28m 以上的建筑为高层建筑;日本则把 8 层以上或建筑高度超过 31m 的建筑称为高层建筑,并把 30 层以上的旅馆、办公楼和 20 层以上的住宅规定为超高层建筑。

根据联合国科教文组织所属的世界高层建筑委员会的建议,一般将高层建筑划分为如下四类:

第一类,9~16 层,高度不超过 50m;

第二类,17~25 层,高度不超过 75m;

第三类,26~40 层,高度不超过 100m;

第四类,40 层以上,或高度超过 100m 以上。

我国《高层民用建筑设计防火规范 (GBJ 45—82)》中规定 10 层及 10 层以上的住宅和建筑高度超过 24m 的其他民用建筑为高层建筑。《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程 (JGJ 3—89)》中规定 8 层和 8 层以上的民用建筑为高层建筑。

此规定仅限于钢筋混凝土结构，其高度不超过 200m。

二、高层建筑的主要特征

1. 高度高，相应地本身刚度也大

目前我国最高的建筑已超过 80 层，420m；国外则已超过 100 层，450m。建筑物的高度大了，对稳定性，特别是对整体倾斜的要求就十分严格。与此同时，还有高层部分与低层的裙房部分之间的沉降差等问题。

2. 质量大，即垂直荷载大

通常一幢高层建筑物的总重可由数万吨至数十万吨。由于建筑物高耸，不仅竖向荷载大而集中，而且风荷载和地震荷载引起的倾覆力矩成倍增长，因此，要求基础和地基提供更高的竖直与水平承载力。同时使沉降和倾斜控制在允许的范围内，并保证建筑物在风荷载与地震荷载下具有足够的稳定性。这就对基础的设计与施工提出了更高、更严的要求。

3. 深度大，常有多层地下部分

为了满足建筑功能和稳定性要求，高层建筑的基础一般具有较大的埋置深度，甚至超过 20m，因而必须开挖较深的基坑和采取相应的降水措施。实践证明，经济合理的基坑支护结构和各种严密的防护措施是高层建筑基础工程不可分割的一部分。

4. 环境效应问题

随着层数和高度的增多，高层建筑的建设难度越来越大，其中有一个非常突出的问题，就是其基础工程施工的环境效应问题，这个问题越来越受到广泛关注。

5. 造价高，工期长

高层建筑工程的造价和施工工期在建设总造价和总工期中所占的比例，与上部结构形式和层数、基础结构形式、桩型以及地质复杂程度和环境条件等因素有关，除了钢结构和直接建造在基岩上的浅基础以及岩层埋藏很浅的桩基础外，就钢筋混凝土结构和一般地质条件而言，采用箱形基础和筏板基础的高层建筑，其基础工程的费用约占建筑总造价的 10%~20%，相应的施工工期约占建筑总工期的 20%~25%，采用桩基的高层建筑，上两项的比例分别为 20%~30%和 30%~40%。

综上所述，可将高层建筑中基础工程的地位概括为：基础工程的设计与施工对高层建筑本身及其周围环境的安全至关重要，其造价与工期对高层建筑总造价和总工期有举足轻重的影响。

三、高层建筑的主要岩土工程问题

与高层建筑的特点相对应，主要的岩土工程问题归纳起来有四类。

1. 地基的选择问题

为了不致出现不允许的整体倾斜（尤其是横向倾斜），建筑物的沉降必须小而且均匀，从而要求对地层及其变化的了解程度更高，理想的地基是均匀且压缩性低的地基，否则就要采用桩基等人工地基措施。

2. 强度和变形问题

由于荷载大，强度和变形问题就不同于一般，即不仅对地基的承载力的要求高，而且由于受压层的深度大得多，在同样的地基土条件下建筑物的沉降要大得多。此外，一幢高层建筑常有低层部分与之配套，还有对相邻已有建筑的影响，因而就有高与低、新与旧之间的沉降差异问题。对水平荷载，特别是地震荷载带来副地基稳定性问题也要研究解决。这就是为什么高层建筑的基础带是筏基、箱基、桩筏基础、桩箱基础等。

3. 基坑开挖与支护问题

由于常有多达3~4层，甚至5层的地下部分，高层建筑的基坑一般较深。伴随而来的就有施工降水、坑壁维护难度加大、坑底隆起破坏，坑底与四邻地面间都有因支护设计施工不当或因降水引起的坑外地面的水平与垂直位移等问题，在建筑密集区，这些问题对已有建筑物的影响不容忽视。

4. 地基、基础、上部结构共同作用问题

这是结构设计和岩土工程设计的一个重要课题，也可视为联系二者的一个重要的、有代表性的环节。解决好这个问题，一方面能使结构设计，特别是基础部分结构设计更加合理有据，节省投资；另一方面将有力推动结构与岩土工程设计的结合和岩土工程的发展提高。这些问题还有待于进一步探索。

第二节 高层建筑岩土工程勘察

一、高层建筑地基勘察的重要性

高层建筑具有高度高、质量大和基础埋置深度深等主要特点，因此对基础的稳定性、地基承载能力有十分严格的要求，对地基变形量和由于地基不均匀

变形造成建筑物的整体倾斜有十分严格的限制。同时,由于基础埋置深度深,对深基坑施工的支护和降水产生的对邻近已有建筑和重要地下设施的影响也要进行细致的分析。

因此,通过地基勘察探明建筑场地的地质条件、地下水情况和地基岩土的性质对保证建筑物的安全、工程质量以及节约建设投资是非常必要的。

二、地基勘察的主要内容

(1) 查明建筑场地及其邻近地段有无影响工程稳定性的不良地质现象以及有无古河道和人工地下设施等存在。

不良地质现象主要如下。

① 断裂。大的断裂构造的位置、规模、类型以及断裂的活动性。

② 地震液化。分布有饱和砂土或饱和粉土时,应判别其地震液化的可能性和程度。

③ 岩溶与土洞。地基岩土内岩溶作用的程度及其对地基可靠性的影响。

④ 滑坡。滑坡及不稳定斜坡的存在和可能的危害程度。

⑤ 泥石流。泥石流是山区特有的一种自然现象,暴发突然,来势凶猛,对工程具有极大的破坏力。

⑥ 崩塌。大型崩塌会摧毁建筑物并造成人员伤亡和巨大的物质损失。

⑦ 采空区。采空区上大的覆盖岩层会失去支撑,使平衡条件破坏造成地表塌陷或变形,以致使建筑物产生不允许的变形或破坏。

⑧ 地裂缝。地裂缝会造成工程建筑的破坏,有相当大的危害作用。

(2) 查明建筑场地的地层结构,均匀性以及各岩土层的工程性质。

① 地层结构。指岩层或土层的成因、形成年代、名称、岩性、颜色、主要矿物成分、结构和构造、地层的厚度及其变化、沉积顺序等。

② 岩土层的工程性质。主要指各个地层的物理性质,包括重度、天然含水量、密度、液限、塑限等指标,以及土的透水性、压缩性、抗剪强度等。

(3) 查明地下水类型、埋藏情况、季节性变化幅度和对建筑材料的腐蚀性。

① 地下水的基本类型。按地下水的埋藏条件可分为上层滞水、潜水和承压水三类。

② 地下水的水位变化。这种变化对地基的稳定性、地下室的防水防潮和抗浮以及基础的施工都有很大的影响,因此,应查明地下水的变化幅度。

③ 地下水中化学成分。查明地下水的化学成分可以确定其对建筑材料有无腐蚀性。

(4) 在抗震设防区应划分对建筑抗震有利、不利和危险的地段, 判明场地土类型和建筑场地类别, 查明场地内有无可液化土层。

(5) 利用上述资料, 提供岩土工程评价和设计、施工需要的岩土强度, 压缩性等技术参数(指标)。

(6) 确定地基承载力, 对建筑物的沉降与整体倾斜进行必要的分析预测; 在工程分析的基础上, 提出地基基础设计方案比较和建议, 包括对重要的地基基础施工的建议。

在建筑物与构筑物的岩土工程问题中, 地基土的承载力和沉降变形是岩土工程评价中的主要问题, 二者实质上又是同一问题的两个方面, 而规范中建筑物的地基变形允许值, 可作为岩土工程分析评价的依据。

(7) 必要时, 按共同作用分析, 使地基基础和结构设计更协调和经济合理。

岩土工程勘察一般按阶段进行, 可分为: 可行性研究勘察(选地勘察)、初步勘察、详细勘察、施工勘察。不同勘察阶段, 目的不同, 工作内容也不同。

三、高层建筑岩土工程勘察

除了上述要求和各阶段具体要求外, 高层建筑岩土工程勘察按其工程特点作了一些专门要求。这些要求可归纳为: 对勘探点的平面布置、深度与取样等的要求; 对发挥原位测试技术的要求; 对室内试验的要求; 岩土工程分析上的一些特殊要求等。

(一) 对勘探深度的要求

高层建筑的结构与地基基础设计要求更详细准确地了解地层结构, 掌握其变化。这不仅是计算沉降、预防倾斜的要求, 也是基础类型选择与设计的需要。这是深基坑开挖设计与施工的需要。因此勘探工作既要满足平面控制上的要求, 又有足够的深部控制的要求, 还有对水文地质上的要求。

1. 勘探点间距要小, 以满足掌握地层结构在纵横两个方面的变化和分析横向倾斜可能性的需要

间距一般 15~35m; 若预期采用一般桩基, 则间距为 10~30m; 若采用大直径桩, 一桩一孔或一桩多孔, 则每孔都要勘察。

2. 勘探点深度要深

由于压缩层的下限要比一般建筑物的基础深得多, 为了沉降计算的需要, 一般应有不少于勘探孔总数 1/2 的控制孔深度达到和超过预计的压缩层深度。

《高层建筑岩土工程勘察规程》对勘探点的深度作了如下规定。

(1) 控制性勘探点深度 d_c

$$d_c = d + \alpha_c b \quad (1-1)$$

式中 d ——箱基或筏基的埋深;

α_c ——与土的压缩性有关的系数;

b ——箱基或筏基宽度。

(2) 一般性勘探点深度 d_g

$$d_g = d + \alpha_g b \quad (1-2)$$

式中 α_g ——与基础宽度有关的参数。

不过, 有时压缩层深度不是决定勘探点深度的惟一依据。如采用桩基或桩岩有高压缩性土层等情况, 勘探点深度要加深。

3. 水文地质条件要查明

由于基坑的深度往往较深, 因而不但有施工降水和开挖方法问题, 而且有支护结构类型的选择与设计, 防止坑底发生隆起破坏、坑外土体的过量变形等问题。为此, 基坑底面以上的土层也要仔细观察、描述与分层取样, 进行必要的试验, 尤其要划分好潜水层和各承压水层, 确定其位置、厚度、颗粒成分, 准确量测其水位, 分析不同含水层之间的水力联系, 并通过试验提出各透土层, 特别是包括潜水层在内的上部各含水层的水文地质参数。

(二) 充分发挥原位测试的长处

原位测试在很多方面有取样试验不具有的优点, 而且每种方法各有所长, 选用、组配好了可以发挥极大作用。

1. 标准贯入试验 (SPT)

这一方法在国内外使用非常普遍。虽然关于它的“标准性”、可靠性等的讨论一直不停, 却愈来愈被采用, 它的已被公认的用途有:

- (1) 鉴别砂土的相对密度和黏性土的状态;
- (2) 估算砂土的某些岩土技术性质指标 (如变形模量 E_0 、内摩擦角 ϕ 等);
- (3) 确定砂土和黏性土的承载力;
- (4) 选择适宜的桩尖持力层, 计算单桩承载力;

(5) 评价饱和砂土的地震液化势。

对高层建筑岩土工程勘察来说,适宜的做法是选择一部分代表性的控制性钻孔从上到下按一定间距(如1.0m)“连续地”作标准贯入试验。试验提供的以深度与锤击数 $N_{63.5}$ 关系表示的地层力学性质柱状剖面在选择桩尖持力层和桩长,计算单桩承载力上起了重要作用。

2. 静力触探试验 (CPT)

静力触探试验最大的优点是所测指标相对准确并能取得完全连续记载的剖面数据,在国内外,其公认的用途有:

- (1) 提供以桩尖阻力 g_c 和侧阻力 f_c 与深度关系表示的测试孔力学剖面;
- (2) 确定地基承载力;
- (3) 选择适宜的桩尖持力层,计算单桩承载力;
- (4) 评价饱和砂土的地震液化势;
- (5) 估测土层的不排水剪强度 C_u 、压缩模量 E_s 等;
- (6) 当使用测压探头时,还可同时测得沿深度各点贯入时的超孔隙水压力,其消散速度与稳定孔隙水压力。

CPT 法的一个相对弱点是在砂层或砂浆层中的贯入深度受限制。

3. 旁(横)压试验 (PMT)

通过旁压试验可获得多种测试数据,其中最主要的是两组结果:一组是初始压力 p_0 、塑流压力 p_l 和极限压力 p_u ;另一组是旁压模量 E_m 。这两组数据对高层建筑的地基基础设计甚为重要。其主要理由是:

- (1) 在深钻孔中采取相对不扰动的、质量好的试样困难大;
- (2) 土(岩)样的应力释放的影响不可避免;
- (3) 在室内试验中模拟地基深部的实际应力状态不易;
- (4) 对粗粒土、破碎的岩石一般无法取样进行室内试验。

正因为出于这方面的实际考虑,国外不少岩土工程师常以旁压试验测试数据取代试样的室内试验数据。旁压仪测腔的工作压力可达20MPa,因而试验可达很大的深度或可对砂砾土、碎石类土、软岩、碎岩等进行强度和变形参数测定,用旁压试验参数可进行承载力和地基变形计算。

4. 十字板剪切试验 (FVT)

进行十字板剪切试验的主要目的是在钻孔内直接测得黏性土的原位不排水剪强度 τ_u (或 C_u)。由于试验是在预定的深度进行,因此试验条件在一定程度上接近三轴试验的有效覆盖压力下固结的不排水剪强度。因此,所测的值要大于土粒的不固结不排水剪强度,后者一般偏低。