

土木工程系列教材

基础工程

JICHU GONGCHENG

(第二版)

— 主 编 杨小平



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

土木工程系列教材

基础工程

(第二版)

主编 杨小平

参编 刘叔灼 潘 健 潘 泓 宿文姬



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书内容包括绪论、天然地基上浅基础设计、连续基础、桩基础、挡土墙、地基处理、基坑工程、特殊土地基等八章,反映了近年来作者在华南理工大学土木工程系讲授本课程及相关选修课程的主要内容和教学经验,以及与建筑行业地基基础有关的最新国家标准和推荐性行业标准的主要规定。

本书理论联系实际,深入浅出,重点突出,便于学习,利于应用,可作为高等学校土木工程专业的教材,也可供相关的工程设计、施工等技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基础工程/杨小平主编.—2版.—广州:华南理工大学出版社,2014.1
ISBN 978-7-5623-4123-9

I. ①基… II. ①杨… III. ①基础(工程)—高等学校—教材 IV. ①TU47

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第319488号

基础工程

主编 杨小平

出版人:韩中伟

出版发行:华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学17号楼,邮编510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scutc13@scut.edu.cn

营销部电话:020-87113487 87111048(传真)

策划编辑:赖淑华

责任编辑:侯珺 黄丽宜

印刷者:湛江日报社印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.75 字数:506千

版次:2014年1月第2版 2014年1月第4次印刷

印数:6001~9000册

定价:38.00元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

第二版前言

本次修订重点是参照新颁布的规范和标准，对第一版的相关内容进行修改和补充，适当补充成熟内容，反映最新成果。主要修订内容有：第2章，对地基基础设计等级划分作了补充；增加了钢筋混凝土扩展基础最小配筋率要求；对柱下钢筋混凝土独立基础的受冲切和受剪切承载力验算规定作了修改；补充了独立柱基的配筋内容。第3章，修改了砂土基床系数按载荷试验确定的计算公式；删除了筏形和箱形基础横向整体倾斜计算值要求；修改了筏基和箱基的配筋规定；修改了箱基整体弯曲计算方法。第4章，修改了桩身结构设计的有关规定；修改了桩基设计例题。第5章，按相关规范要求对例题作了修改；改写了“加筋土挡土墙”一节。第6章，对复合地基沉降计算方法作了修改。第7章，删除了极限平衡法中的规范方法及相关例题。

本教材自第一版发行以来，许多专家学者和师生提供了宝贵的修订意见，在此一并表示感谢。

修订分工如下：杨小平负责第1、2、3章和附录，刘叔灼负责第4章，潘健负责第5章，潘泓负责第6、7章，缩文姬负责第8章。由杨小平负责全书的统稿。

限于编者的水平，书中如有疏漏或不当之处，敬请指正。

编者

2013年10月

第一版前言

本教材是根据土木工程专业的基础工程课程教学基本要求，结合最新颁布的行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)编写的，反映了近年来作者在华南理工大学土木工程系讲授本课程及基坑支护、地基处理和特种基础工程等选修课程的主要内容和教学经验。本书在系统地介绍地基基础设计基本原理的基础上，力求与工程实践紧密结合，并体现学科发展的新水平，强调了按变形控制设计基础的概念，并将此观点贯穿于全书之中。

本书内容全面，在写法上充分考虑了教学的要求，尽可能讲清基本概念，力求深入浅出，重点突出，便于学习和应用。各章均附有适量的习题及习题答案。本书可作为高等学校土木工程专业的教材，也可供相关的工程设计、施工等技术人员参考使用。

编写分工如下：杨小平编写第1、2、3章和附录，刘叔灼编写第4章，潘健编写第5章，潘泓编写第6、7章，宿文姬编写第8章。由杨小平任主编并负责全书的统稿。

限于编者的水平，书中如有疏漏或不当之处，敬请指正。

编者

2010年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 基础工程的研究对象	1
1.2 本课程的特点和学习要求	2
1.3 解决基础工程问题的途径	3
第2章 天然地基上浅基础设计	5
2.1 概述	5
2.1.1 浅基础设计内容	5
2.1.2 浅基础设计方法	6
2.1.3 地基基础设计原则	7
2.2 浅基础的类型	9
2.2.1 扩展基础	9
2.2.2 联合基础	10
2.2.3 柱下条形基础	11
2.2.4 柱下交叉条形基础	11
2.2.5 筏形基础	12
2.2.6 箱形基础	13
2.2.7 壳体基础	13
2.3 基础埋置深度的选择	14
2.3.1 与建筑物有关的条件	14
2.3.2 工程地质条件	14
2.3.3 水文地质条件	15
2.3.4 地基冻融条件	16
2.3.5 场地环境条件	16
2.4 浅基础的地基承载力	17
2.4.1 地基承载力概念	17
2.4.2 地基承载力特征值的确定	17
2.4.3 地基变形验算	23
2.5 基础底面尺寸的确定	25
2.5.1 按地基持力层承载力计算基底尺寸	25
2.5.2 地基软弱下卧层承载力验算	30
2.5.3 按允许沉降差调整基础底面尺寸	32
2.5.4 地基稳定性验算	36

2.6 扩展基础设计	37
2.6.1 无筋扩展基础设计	37
2.6.2 墙下钢筋混凝土条形基础设计	39
2.6.3 柱下钢筋混凝土独立基础设计	42
2.7 联合基础设计	48
2.7.1 矩形联合基础	49
2.7.2 梯形联合基础	51
2.7.3 连梁式联合基础	53
2.8 减轻不均匀沉降危害的措施	55
2.8.1 建筑措施	56
2.8.2 结构措施	60
2.8.3 施工措施	62
习题	62
第3章 连续基础	64
3.1 概述	64
3.2 地基、基础与上部结构相互作用的概念	64
3.2.1 地基与基础的相互作用	64
3.2.2 地基变形对上部结构的影响	67
3.2.3 上部结构刚度对基础受力状况的影响	68
3.3 地基计算模型	69
3.3.1 文克勒地基模型	69
3.3.2 弹性半空间地基模型	70
3.3.3 有限压缩层地基模型	71
3.3.4 相互作用分析的基本条件和常用方法	71
3.4 文克勒地基上梁的计算	72
3.4.1 无限长梁的解答	72
3.4.2 有限长梁的计算	76
3.4.3 地基上梁的柔度指数	81
3.4.4 基床系数的确定	81
3.5 地基上梁的数值分析	85
3.5.1 基本概念	85
3.5.2 有限单元法	85
3.5.3 迭代计算步骤	87
3.5.4 地基柔度矩阵	88
3.6 柱下条形基础	88
3.6.1 构造要求	88
3.6.2 内力计算	89
3.7 柱下交叉条形基础	95
3.8 筏形基础与箱形基础	101

3.8.1	筏形基础	102
3.8.2	箱形基础	103
3.8.3	地下室设计时应考虑的几个问题	106
3.9	刚性基础基底反力、沉降和倾斜计算的数值分析法	108
	习题	110
第4章	桩基础	111
4.1	概述	111
4.1.1	桩基础的适用性	111
4.1.2	桩基础设计的内容	112
4.1.3	桩基础的设计原则	112
4.2	桩的分类与质量检验	113
4.2.1	桩的分类	113
4.2.2	桩的质量检验	119
4.3	桩基竖向荷载的传递	119
4.3.1	单桩轴向荷载的传递机理	119
4.3.2	桩侧负摩阻力	124
4.3.3	竖向荷载下的群桩效应	126
4.3.4	桩基变刚度调平设计概念	129
4.4	单桩竖向承载力的确定	129
4.4.1	单桩竖向极限承载力的确定	130
4.4.2	单桩竖向承载力特征值	136
4.4.3	基桩竖向承载力特征值	137
4.5	桩基承载力验算	138
4.5.1	桩基中基桩的桩顶荷载计算	138
4.5.2	基桩承载力验算	140
4.5.3	桩基软弱下卧层承载力验算	140
4.5.4	考虑桩侧负摩阻力的桩基承载力验算	141
4.6	桩基沉降计算	143
4.6.1	桩距不大于6倍桩径的桩基	143
4.6.2	单桩、单排桩、疏桩基础	146
4.7	软土地基减沉复合疏桩基础	148
4.7.1	承台面积和桩数确定	148
4.7.2	沉降计算	148
4.8	桩的水平承载力与位移	149
4.8.1	水平荷载下桩的工作性状	150
4.8.2	水平荷载作用下弹性桩的计算	151
4.8.3	单桩水平静载荷试验	154
4.8.4	基桩水平承载力特征值	156
4.9	桩基础设计	158

4.9.1	基本设计资料	158
4.9.2	桩的类型和桩长选择	159
4.9.3	桩的根数和布置	161
4.9.4	桩身结构设计	162
4.9.5	承台设计	163
	习题	175
第5章	挡土墙	177
5.1	概述	177
5.2	挡土墙的类型及其选择	177
5.2.1	重力式挡土墙	178
5.2.2	悬臂式挡土墙	178
5.2.3	扶壁式挡土墙	179
5.2.4	加筋土挡土墙	179
5.3	重力式挡土墙	179
5.3.1	重力式挡土墙的体型和构造要求	179
5.3.2	重力式挡土墙的计算	181
5.3.3	重力式挡土墙设计示例	183
5.4	悬臂式挡土墙	186
5.4.1	悬臂式挡土墙的构造	186
5.4.2	悬臂式挡土墙的计算	186
5.4.3	悬臂式挡土墙设计示例	189
5.5	扶壁式挡土墙	193
5.5.1	扶壁式挡土墙的构造	193
5.5.2	扶壁式挡土墙的计算	193
5.6	加筋土挡土墙	194
5.6.1	概述	194
5.6.2	加筋土挡土墙的设计与计算	195
	习题	198
第6章	地基处理	200
6.1	概述	200
6.1.1	地基处理的目的是意义	200
6.1.2	软弱土的工程特性	200
6.1.3	地基处理方法分类	202
6.1.4	复合地基设计概念	203
6.2	换填垫层法	205
6.2.1	换填垫层的作用	205
6.2.2	砂石垫层的设计要点	206
6.2.3	砂石垫层的施工要点	207
6.2.4	其他垫层	208

6.3 排水固结法	209
6.3.1 原理与应用	209
6.3.2 排水系统	210
6.3.3 加载系统	211
6.3.4 砂井地基固结度计算	213
6.3.5 地基强度增长计算	216
6.3.6 现场监测	216
6.4 深层搅拌法	217
6.4.1 概述	217
6.4.2 水泥土形成的机理	218
6.4.3 水泥土的力学性质	219
6.4.4 设计与计算	220
6.5 高压喷射注浆法	223
6.5.1 概述	223
6.5.2 应用与设计	224
6.5.3 其他灌浆法	225
6.6 碾压与夯实法	227
6.6.1 机械碾压法	227
6.6.2 振动压实法	227
6.6.3 重锤夯实法	227
6.6.4 强夯法	228
6.7 挤密法和振冲法	230
6.7.1 挤密法和振冲法的加固原理	230
6.7.2 土或灰土挤密桩法	231
6.7.3 砂石桩法	232
6.7.4 振冲法	233
6.8 加筋法	236
6.8.1 土工合成材料	236
6.8.2 加筋土	237
习题	237
第7章 基坑工程	239
7.1 概述	239
7.1.1 基坑工程的特点	239
7.1.2 勘察要求	240
7.2 基坑开挖支护形式的分类和特点	240
7.2.1 放坡开挖	240
7.2.2 挡土支护开挖	241
7.2.3 支护结构型式的综合应用	245
7.3 支撑与锚杆	246

7.3.1	支撑	246
7.3.2	锚杆	247
7.4	支护结构上的荷载	251
7.4.1	土压力	251
7.4.2	水土压力的计算	253
7.5	基坑稳定性分析	254
7.5.1	基坑底抗隆起稳定性验算	254
7.5.2	基坑底抗渗流稳定性验算	259
7.6	支护结构内力分析	259
7.6.1	分析方法分类	259
7.6.2	极限平衡法	260
7.6.3	竖向弹性地基梁法	263
	习题	265
第8章	特殊土地基	266
8.1	概述	266
8.1.1	软土	266
8.1.2	湿陷性土	266
8.1.3	膨胀土	266
8.1.4	红黏土	267
8.1.5	风化岩和残积土	267
8.1.6	盐渍土	267
8.1.7	多年冻土	267
8.1.8	人工填土	267
8.1.9	混合土	268
8.2	软土地基	268
8.2.1	软土的特性与评价	268
8.2.2	软土地基的工程措施	269
8.3	湿陷性黄土地基	269
8.3.1	黄土的特征与分布	269
8.3.2	湿陷发生的原因和影响因素	270
8.3.3	湿陷性黄土地基的评价	271
8.3.4	湿陷性黄土地基的工程措施	274
8.4	膨胀土地基	275
8.4.1	膨胀土的特性	275
8.4.2	膨胀土地基的评价	277
8.4.3	膨胀土地基的工程措施	279
8.5	红黏土地基	280
8.5.1	红黏土的形成和分布	280
8.5.2	红黏土的工程特性	280

目 录

8.5.3 红黏土地区的溶洞和土洞	281
8.5.4 红黏土地基的评价	281
8.5.5 红黏土地基的工程措施	282
8.6 花岗岩残积土地基	283
8.6.1 花岗岩残积土的特性	283
8.6.2 花岗岩残积土地基的评价和工程措施	284
8.7 其他特殊土地基	285
8.7.1 盐渍土地基	285
8.7.2 多年冻土地基	289
习题	291
附录 基础工程专业名词汉英对照	292
参考文献	304

第1章 绪论

1.1 基础工程的研究对象

任何土木工程建筑,包括房屋、水电站、堤坝、桥梁、公路、隧道等,都修建在地表之上,或埋置于地层之中。承受建筑物荷载的那一部分地层称为地基;建筑物在地面以下并将上部荷载传递至地基的构件或结构,就是建筑物的基础。基础工程的任务就是研究和解决岩土地基上与土有关的工程技术问题。

基础可分为两类。通常把埋置深度不大、只需经过挖槽、排水等普通施工程序就可以建造起来的基础统称为浅基础,例如柱下独立基础、墙下或柱下条形基础、柱下交叉条形基础、筏板基础和箱形基础等。对于浅层土质不良,需要利用深处良好地层的承载能力而采用专门的施工方法和机具建造的基础,称为深基础,例如桩基础、墩基础、沉井和地下连续墙等。开挖基坑后可以直接修筑基础的地基称为天然地基。那些不能满足要求而需事先进行人工处理的地基称为人工地基。人工处理地基的方法有多种,如换填垫层法、排水固结法、强夯法、振冲法、深层搅拌法、高压喷射注浆法等。

地基和基础是建筑物的根本,又属于地下隐蔽工程,它的勘察、设计和施工质量直接关系到建筑物的安危。在建筑工程重大事故中,以地基基础方面的事故为最多。而且地基基础事故一旦发生,补救异常困难。从造价或施工工期上看,基础工程在建筑物中所占的比例很大,有的工程可高达30%以上。因此,地基和基础在建筑工程中的重要性是显而易见的。

为了保证建筑物的安全和正常使用,地基基础的设计和计算应满足下列三项基本要求:

①作用在地基上的荷载不应超过地基的承载能力,保证地基在防止整体破坏方面有足够的安全储备;

②应控制地基变形值,使之不超过地基的变形允许值,保证建筑物不因地基变形而损坏或者影响其外观和正常使用;

③基础的型式、构造和尺寸除应能适应上部结构、符合使用需要、满足地基承载力(稳定性)和变形要求外,还应满足对基础结构的强度、刚度和耐久性的要求。

工程实践中,地基基础事故的发生虽然屡见不鲜,然而只要严格遵循基本建设原则,按照勘察—设计—施工的先后顺序,切实抓好这三个环节,那么地基基础事故一般是可以避免的。下面举两个可以借鉴的工程实例。

建于1941年的加拿大特朗斯康谷仓,是土体强度破坏、地基发生整体滑动而丧失稳定性的典型实例(图1-1)。该谷仓由65个圆柱形筒仓组成,高31m,宽23.5m,长

59.4 m，采用钢筋混凝土筏形基础。基础厚度 2 m，埋置深度 3.6 m。谷仓自身质量为 2 万吨。当谷仓建成并装谷物 2.7 万吨后，西侧突然陷入土中 8.8 m，东侧则抬高 1.5 m，仓身倾斜 27°。据事后勘察了解，基础下面埋藏有厚约 15 m 的高塑性软黏土。谷仓装载使基础底面的平均压力达到 323 kPa，超过了地基的极限承载力，造成地基强度破坏。好在该谷仓的整体刚度大，地基破坏后谷仓仍完好无损。事后在基础下面做了 70 多个支承于基岩上的混凝土墩，使用 388 只 50 t 的千斤顶以及支撑系统，才把筒仓纠正过来，但修复后的位置比原来降低了 4 m。

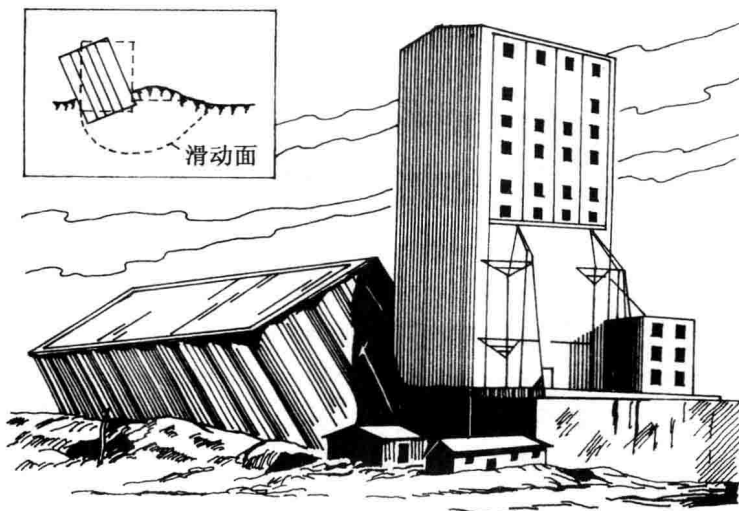


图 1-1 加拿大特朗斯康谷仓的地基事故

上海工业展览馆中央大厅为框架结构，采用箱形基础，两翼采用条形基础，基础埋深 7.27 m，箱基顶面至中央大厅顶部塔尖 96.63 m，地基为高压缩性淤泥质黏土。展览馆于 1954 年 5 月开工，当年年底基础平均沉降即达 600 mm。至 1957 年 6 月，大厅四角最大沉降量达 1465.5 mm，最小沉降量为 1228.0 mm。1979 年 9 月平均沉降量达到 1600 mm。由于地基变形过大，导致室内外连接的水、暖、电管道断裂，房屋严重开裂。

1.2 本课程的特点和学习要求

本教材共分八章，主要内容包括天然地基上浅基础设计、连续基础、桩基础、挡土墙、地基处理、基坑工程、特殊土地基等。

基础工程学科是土木工程的一个重要分支，其内容涉及工程地质学、土力学、弹性力学、结构设计和施工等学科领域，内容广泛、综合性强，学习时应该突出重点，兼顾全面。在学习本课程时，应该重视工程地质的基本知识，培养阅读和使用工程地质勘察资料的能力。土力学是本课程的理论基础，必须牢固掌握土的应力、变形、强度和地基计算等土力学基本原理，从而能够应用这些基本概念和原理，结合有关建筑结构理论和施工知识，分析和解决地基基础问题。

由于自然地理环境的不同，我国分布着多种多样的土类，某些土类（如湿陷性黄土、

软土、膨胀土、红黏土和多年冻土等)还具有不同于一般土类的特殊性质。因此,地基基础技术带有明显的地区性特征。建议在教学中根据所在地区和具体要求的不同,对本教材的有关内容适当取舍和增减。

基础工程既是一门应用科学,又是一项工程技术,其设计与施工都必须执行法定的规范标准。规范总结了地基基础工程实践中的成功经验与失败教训,对设计内容、施工方法和质量检验标准作出了各种规定,作为设计和施工必须遵循的准则。但不同的行业有不同的专门规范,同时,随着工程技术的进步,规范也在不断修订完善,各种具体的规定也随之而变化。因此,在本课程学习中涉及规范有关内容时,要着重理解规范的基本精神,学会使用规范的方法。

1.3 解决基础工程问题的途径

科学技术发展到今天,人们已经能够比较好地解决各种复杂的基础工程问题。但是,由于研究对象和问题的复杂性,工程实践中提出的不少问题,还有待人们去研究、探讨和接受实践的进一步检验。而在有的地区,甚至一般的中小型基础工程问题,还需要当地技术人员去妥善解决。

工程实践中提出的基础工程问题,需要通过理论—试验—经验三方面的结合来解决;对大型的、复杂的工程,还常常需要辅以原体观测(对工程实体进行短期或长期观测)。

理论: 主要指土力学的基本理论和概念、各类地基基础的计算原理和有关的结构设计理论。由于问题的复杂性,进行理论研究时,常需要作出某些假设和忽略某些因素。虽然现有的土力学理论还难以模拟、概括地基土的各种力学性状的全貌,但基础工程问题的解决仍有赖于土力学理论的指导。对基坑工程这类实践性很强的工程问题,更是迫切需要理论来指导、充实和完善。

试验: 只有通过试验,才能了解土的物理力学性质和特性,为现有理论的应用提供计算参数。复杂的基础工程问题常需要进行更多的试验。试验还用于验证现有理论、发现规律和建立新的理论。试验应有代表性,应尽可能反映实际问题的具体条件。常规的室内试验较简便,但有时不完全符合现场实际情况,而且试件易受到扰动,所以常需要进行现场原位测试。现场测试比较理想,但有的比较费时费钱。必要时应分别进行现场和室内的各种试验,有时还需进行物理模拟(定性的模型试验、以离心机中的模型进行定量测试和其他物理模拟试验)。此外,还存在对试验成果的分析以及对计算参数的合理取值问题。

经验: 没有土力学的基本理论不行,但是只靠这些理论也难以解决问题。试验资料是需要的,但试验成果可能与实际条件还有差别。这些都需要根据实践经验加以判别和修正(工程类比法)。因此,经验也是重要的,工程技术人员在完成一项工程设计或解决一个工程问题之后,应从现场实测、成果评价与理论计算的比较中取得认识(这才称得上有了经验),并从这些比较中改进自己的经验积累。应当说,离开具体条件的对比而照搬其他个别工程的做法,往往是不可靠的。

当然,在解决基础工程问题时,还应当考虑经济这一重要因素,尽量做到少花钱办好事。

一些工程事故的发生，往往是当地人员在所谓有“经验”的情况下发生的。因此，应当重视工程地质勘察、土工试验和土力学原理的运用，并加强建设项目具体条件异同的比较和分析，以便作出正确的工程判断。总之，理论、试验和经验三者的结合才是分析和解决基础工程问题的正确途径。

第2章 天然地基上浅基础设计

2.1 概述

进行地基基础设计时，必须根据建筑物的用途和设计等级、建筑布置和上部结构类型，充分考虑建筑场地和地基岩土条件，结合施工条件以及工期、造价等各方面的要求，合理选择地基基础方案。常见的地基基础方案有天然地基或人工地基上的浅基础、深基础、深浅结合的基础（如桩-筏基础、桩-箱基础等）。上述每种方案中各有多种基础类型和做法，可以根据实际情况加以选择。一般而言，天然地基上的浅基础便于施工，工期短，造价低，如能满足地基的强度和变形要求，宜优先选用。

本章主要讨论天然地基上浅基础的设计原理和计算方法，这些原理和方法也基本适用于人工地基上的浅基础。

2.1.1 浅基础设计内容

天然地基上浅基础的设计包括下述各项内容：

- ①选择基础的材料、类型，进行基础平面布置；
- ②确定地基持力层和基础埋置深度；
- ③确定地基承载力；
- ④确定基础的底面尺寸，必要时进行地基变形与稳定性验算；
- ⑤进行基础结构设计（对基础进行内力分析、截面计算并满足构造要求）；
- ⑥绘制基础施工图，提出施工说明。

设计浅基础时要充分掌握拟建场地的工程地质条件和地基勘察资料，例如不良地质现象和发震断层的存在及其危害性、地基土层分布的均匀性和软弱下卧层情况、各层土的类别及其工程特性指标。地基勘察的详细程度应与地基基础设计等级（表2-1）和场地的工程地质条件相适应。

在仔细研究地基勘察资料的基础上，结合考虑上部结构的类型、荷载的性质及大小和分布、建筑布置和使用要求以及拟建基础对周围环境的影响，即可选择基础类型和进行基础平面布置，并确定地基持力层和基础埋置深度。

上述浅基础设计的各项内容是互相关联的。设计时可按上述顺序逐项进行设计与计算，如发现前面的选择不妥，则须修改设计，直至各项计算均符合要求且各数据前后一致为止。对规模较大的基础工程，还宜对若干可能的方案作出技术经济比较，然后择优采用。

如果地基软弱，为了减轻不均匀沉降的危害，在进行基础设计的同时，尚需从整体上