



书名：基础工程

ISBN：978-7-307-10410-5

作者：齐善忠

出版社：武汉大学出版社

定价：39.80元

前 言

改革开放以来,伴随着大规模现代化建设的需要以及国际上科学的发展和技术进步,基础工程领域内取得了许多新的成就,在设计与施工领域涌现出许多新概念、新方法、新技术。本教材力图考虑学科发展的新水平,反映基础工程的新成果与观点。

本教材在编写过程中,注重实用,淡化过于复杂的理论推导,以在实际设计与施工过程中必需、够用为主。本教材的编写主要体现以下特点:

第一,教材的编写全部按照国家现行的最新规范,如《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》(JGJ 6—2011)。

第二,在编写过程中,作者总结了在公司工作时的工程经验、近几年在高校一线的教学经验以及 2009 年注册岩土工程师考试过程中的学习经验。因此,本教材适用于土木工程专业的岩土工程、地下建筑工程及房屋建筑工程等方面的在校本科生、专科生作为教材使用,也适用于从事岩土与基础工程行业的工程技术人员、从事注册岩土工程师考试的考生作为参考资料。

第三,鉴于“岩土工程勘察”和“基坑工程”在教学中已成为两门独立的学科,这两部分在教材的编写中未编写进去。

本教材建议教学时数为 70 学时。在教学安排上,课堂教学结束后宜安排 1~2 周的课程设计,巩固所学理论知识,并且要安排一定的参观实习时间,以增强学生的感性认识。

由于作者水平有限,加工编写时间仓促,本书不足和错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

高等教育教材编审委员会

目 录

CONTENTS

模块 0

绪论

◎ 任务一	地基、基础与基础工程	1
◎ 任务二	基础工程的重要性	2
◎ 任务三	基础工程的现状与发展	3
◎ 任务四	课程特点、内容及学习要求	4
◎ 思考题		5

模块 1

天然地基上的浅基础设计原理

◎ 任务一	概述	6
◎ 任务二	浅基础类型	9
◎ 任务三	基础的埋置深度	13
◎ 任务四	地基承载力的确定	18
◎ 任务五	基础底面尺寸的确定	25
◎ 任务六	减小不均匀沉降危害的措施	32
◎ 任务七	地基、基础与上部结构相互作用的概念	38
◎ 思考题		42
◎ 习题		42

模块 2

浅基础结构设计

◎ 任务一	概述	44
◎ 任务二	无筋扩展基础	45
◎ 任务三	钢筋混凝土扩展基础	48
◎ 任务四	地基模型	58
◎ 任务五	柱下条形基础及十字交叉基础设计简介	60
◎ 任务六	筏形基础	64
◎ 任务七	箱形基础	70
◎ 思考题		72
◎ 习题		73

模块 3

桩基础

- ◎ 任务一 桩的分类与选型 74
- ◎ 任务二 竖向荷载下单桩的承载力 92
- ◎ 任务三 竖向荷载下群桩基础承载力及沉降计算 110
- ◎ 任务四 桩的负摩阻力计算 124
- ◎ 任务五 桩基的水平承载力 127
- ◎ 任务六 桩身承载力验算..... 137
- ◎ 任务七 桩基结构设计..... 140
- ◎ 任务八 桩基础设计计算实例 159
- ◎ 思考题 164
- ◎ 习题 164

模块 4

沉井基础及地下连续墙

- ◎ 任务一 概述 166
- ◎ 任务二 沉井的类型及构造 167
- ◎ 任务三 沉井设计简介..... 171
- ◎ 任务四 沉井的施工工艺..... 174
- ◎ 任务五 地下连续墙..... 180
- ◎ 思考题 189

模块 5

地基处理简介

- ◎ 任务一 概 述 190
- ◎ 任务二 换土垫层法 192
- ◎ 任务三 挤密压实法 195
- ◎ 任务四 排水固结法 202
- ◎ 任务五 深层搅拌法 207
- ◎ 任务六 CFG 桩复合地基 213
- ◎ 任务七 其他地基加固法简介 218
- ◎ 思考题 219
- ◎ 习题 220

模块 6

特殊土地基

- ◎ 任务一 湿陷性黄土 221
- ◎ 任务二 膨胀土地基 230
- ◎ 任务三 红黏土 236
- ◎ 任务四 软土地基 239
- ◎ 任务五 岩溶和土洞地基..... 241

参考文献

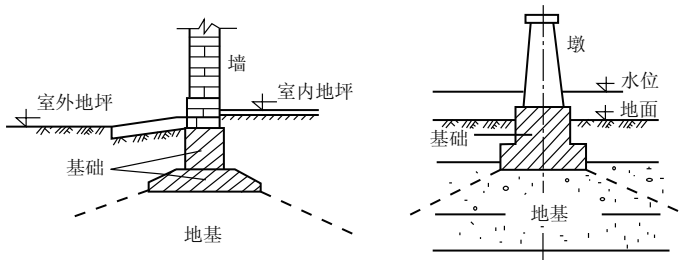
◎ 思考题	245
◎ 习题	246
.....	247

绪 论



任务一 地基、基础与基础工程

所有支承在岩土层上的结构物，包括房屋、桥梁、堤坝等都由上部结构和地基基础组成。承担建筑物荷载的地层称为地基，介于上部结构与地基之间的部分是基础，如图 0-1 所示。



0-1 地基与基础

地基是指支撑上部结构并受上部结构荷载影响的整个地层，因而实际意义上的地基是指有限深度范围内直接承载并相应产生变形的地层。如果场地基岩埋藏较深，地表覆盖土层较厚，建筑物经常建造在由土层所构成的地基上，这种地基被称为土基。如果场地基岩埋藏较浅，甚至显露于地表，建筑物经常建造在由岩层所构成的地基上，这种地基被称为岩基。

当地基为多层土时，与基础底面相接触的土层称为持力层。持力层直接承受基础底面传给它的荷载，故持力层应尽可能是工程性质好的土层；凡在持力层下面的地基土层统称为下卧层。

地基可分为天然地基、人工地基。天然地基指不经过人工处理，直接用来作建筑物地基的天然岩土层；人工地基是经过人工地基处理后满足建筑物地基基础设计要求的岩土层。显然，在条件允许的情况下采用天然地基是最经济的。

基础是指结构物最下部的构件或部分结构，其功能是将上部结构所承担的荷载传递到地基上。基础应有一定的埋置深度，使基础底面置于好的土层上。基础按埋深可分为浅基础和深基础。浅基础是相对于深基础而言的，两者差别主要在施工方法及设计原则上。浅基础的埋深通常不大（一般不超过 5 m），可用一般的施工方法进行施工，施工条件及工艺简单。浅基础有无筋扩展基础（如毛石基础、素混凝土基础等）、钢筋混凝土扩展基础、条形基础、筏形基础和箱形基础等。深基础系指埋深较大的基础，如桩基础、沉井基础、沉箱基础和地下连续墙基础等。由于深基础埋深较大（通常超过 5 m），可利用基础将上部结构的荷载向地基深部土层传递。深基础是采用特殊的结构形式、特殊的施工方法完成的，深基础的施工需要专用设备，且施工技术复杂、造价高、工期长。

基础工程是阐述建筑物设计和施工中有关地基和基础问题的学科。

随着高层建筑的发展以及大跨度、大开间结构的应用,基础工程的重要性和技术上的难度进一步增加。基础工程占工程造价的 20%~30%,工期占总工期的 25%~30%。因此,充分了解场地的地基情况,选择合理的基础形式,进行精心设计,有着重要的技术和经济意义。据统计,世界各地的工程事故中,以地基基础事故为最多,而且一旦此类事故发生,补救非常困难,往往要花费大量的人力、财力,严重者几乎无法修复。因此,要求充分重视地基和基础的设计与施工质量。



任务二 基础工程的重要性

基础工程是土木工程的重要组成部分,它一方面要用岩土工程的基本理论和方法去解决地基基础方面的工程问题;另一方面,由于基础有独特的功能和构造要求,在基础设计中需要大量的结构计算,所以基础工程也与结构设计和计算密切相关。因此,基础工程课程是土木工程类专业的一门重要的专业基础课。

地基基础问题是土木工程领域普遍存在的问题。基础设计和施工是整个结构设计和施工中必不可少的一环。当地基条件复杂或者恶劣时,基础工程经常会成为工程建设中的难点和首先需要解决的问题。而由于岩土条件的复杂性、易变性及勘察工作的局限性等造成岩土工程的不确定性,基础工程问题又往往成为工程师最难把握的问题。

大量工程实践表明危害建筑物事故的发生,多与地基问题有关,主要反映在地基强度破坏、失稳或地基产生过大的变形。常见的地基工程事故分类如下:

(1) 地基承载力不足造成工程事故。地基承载力不足主要表现在地基内形成滑裂面,引起地基滑动,从而使建筑物倒塌而造成灾难性工程事故。

(2) 边坡失稳工程事故。地基土坡产生滑坡及坍塌现象,导致建筑物破坏。

(3) 地基变形过大造成工程事故。地基变形超过规定的允许值时,影响了建筑物的正常使用,严重者使建筑物发生倒塌破坏。

(4) 其他特殊不良地质条件引起地基失效。地下水在地基土中的渗流及水位升降导致地基变形,产生沉降;当建筑物地基为砂土或粉土时,地下水位埋藏浅,可能产生振动液化,使地基土呈液态,失去承载能力,导致工程失事。



经典的地基基础工程案例有举世闻名的意大利比萨斜塔,如图 0-2 所示。该塔始建于公元 1173 年,中间经历过建至 24 m 时,因为塔出现倾斜而停工近百年的情况,后于公元 1370 年竣工。因地基土层强度差,压缩土层分布不均匀,南边压缩变形大于北边。塔基的基础深度不够,再加上采用大理石砌筑,塔身非常重,达 1.42 万 t,从而导致比萨斜塔向南倾斜,塔顶离开垂直线的水平距离曾达 5.27 m。分析倾斜原因,有很多影响因素,主要是因为地基不均匀沉降引起的。从 1902 年起,世界上曾多次发起拯救比萨斜塔的国际运动,如进行原因调查、提出处理方案等。1990 年该塔被封闭,经过 10 多年的拯救维修,2001 年底再次对外开放。比萨斜塔是意大利文化、历史和宗教的

图 0-2 比萨斜塔

象征，它也对土力学地基基础学科的发展作出了不可磨灭的贡献。

另一反例为：在武汉市汉口建设大道的一处 18 层高楼，1995 年 1 月开始兴建，采用夯扩桩基。同年 9 月 15 日 18 层封顶，12 月 2 日深夜至次日凌晨突然发生过量整体倾斜，由西南倾向东北，主要原因是工程桩桩端未进入坚实持力层，加上桩身周围软土对桩侧向约束极小，另外一些断桩接桩质量不能保证，从而导致桩基整体失稳，并无法补救，不得不于 12 月 26 日将整幢危楼控制爆破拆除，损失巨大。

由上述地基基础工程事故造成的危害可知，地基基础工程存在于地下，是隐蔽工程，一旦发生事故，难以补救和挽回。影响基础工程的因素很多，稍有不慎，就可能给工程留下隐患，造成地基基础工程事故。基础工程事故使得上部建筑物发生破坏、倒塌，给国家财产造成巨大的损失，甚至造成重大的人身伤亡事故。大量的工程实践表明，整个建筑工程的成败，在很大程度上取决于基础工程的质量和水平；建筑物事故的发生，有很多与基础工程问题有关。由此可见，基础工程设计与施工质量的优劣，直接关系到建筑物的安危，基础工程的重要性是显而易见的。

随着我国基本建设的发展，城市建设向多层、高层和地下建筑发展是必然趋势。加之人均土地资源有限，因此地基基础工程向着技术复杂、工程量大、工期长方向发展。基础工程造价占土建总造价的比例明显上升。大量地基基础工程事故表明，基础工程需慎重对待，要深入了解地基情况及相关勘测资料，精心设计施工，才能使基础工程既安全又经济合理，以保证工程质量。



任务三 基础工程的现状与发展

基础工程是人类在长期的生产实践中不断发展起来的一门应用科学，在世界各文明古国数千年的建造活动中，人类很早就懂得了广泛利用土体进行工程建设，有很多关于基础工程的技术成就。我国古代劳动人民在基础工程方面，也早就表现出高超的技艺和创造才能，许多宏伟壮丽的中国古代建筑逾千百年仍安然留存至今的事实就充分说明了这一点。例如，1300 多年前隋代工匠李春主持修建的赵州安济石拱桥，不仅建筑结构独特，防洪能力强，而且在地基基础的处理上也非常合理。该桥桥台坐落在两岸较浅的密实粗砂土层上，沉降很小，充分利用了天然地基的承载力。另外在桩基础和地基加固方面，我国古代也已有广泛运用，如秦代所建渭桥、隋代郑州超化寺等都以木桩为基础。国外在 18 世纪产业革命以后，城建、水利、道路等建设规模的扩大促使人们对基础工程的重视与研究，对有关问题开始寻求理论上的解答。此阶段在作为基础工程学科的理论基础土力学方面，有相当多的成就，如 1773 年，法国的库仑根据试验创立了著名的砂土抗剪强度公式，提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论；1875 年，英国的朗肯又从另一途径提出了挡土墙土压力的理论，这对后来土体强度理论的发展起了很大的促进作用。此外，法国的布辛奈斯克（1885 年）求得了在弹性半无限空间表面作用竖向集中力的应力和变形的理论解答；瑞典的费兰纽斯（1922 年）为解决铁路塌方问题提出了土坡稳定分析法。基础工程也随着这些理论和工业技术的发展而得到新的发展。如 19 世纪中叶利用气压沉箱法修建深水基础，20 世纪 20 年代，基础工程领域开始有比较系统、比较完整的专著问世。

从 1936 年到 2005 年，共召开了 15 届国际土力学与基础工程学术会议，许多国家和地

区兴办了多种土力学和基础工程的杂志期刊,这些都对本学科的发展起到了推动作用。现代科学新成就的渗入,使基础工程技术与理论得到更进一步的发展与充实,成为一门较成熟的、独立的现代学科。

近年来,计算机的应用和试验测试技术自动化程度提高,标志着本学科进入了一个新时期。

(1) 基础工程理论研究将不断地深入。基础工程理论向着以地基变形作为控制设计理论的方向发展,同时继续研究地基、基础和上部结构相互作用的理论及计算方法、深基坑支护理论及计算方法,继续发展复合地基理论及计算方法等。由于计算机的广泛应用,许多地基及基础工程计算方法将不断地出现并得到应用,且伴随有相应的试验手段来验证计算方法,成为解决基础工程问题的有利手段。

(2) 现场原位测试技术和基础检测技术将深入发展。为了获得地基的第一手资料,尽量减少取土样以影响试验结果的质量,原位测试技术和方法将有很大的发展,同时,相应的测试数据的采集及资料的整理将不断完善,并向着标准化的方向发展。

(3) 地基基础工程的勘察、试验及地基处理的新设备增多,为地基基础工程的研究及地基加固创造了良好条件。

(4) 基础形式及施工方法将不断地发展。基础的形式和施工方法将不断地创新,特别是高层建筑物数量的增多,使得深基础类型得以发展;基础平面设计也向着复杂的异形平面发展。由于深基础的需要,深基坑的开挖及支护工程将成为基础工程的重要内容。

(5) 地基处理技术将不断发展。地基处理技术和方法将会不断完善,新技术、新方法将会陆续出现。

(6) 其他方面。房屋的增层工程及基础的托换技术将得到发展及应用,对已有建筑物的地基将会进行正确的评价,使得地基加固与托换技术得以提高并广泛地应用。



任务四 课程特点、内容及学习要求

一、基础工程课程特点

(1) 基础工程是重要的专业课程。基础埋置于地下,属于隐蔽工程。基础工程的优劣,直接关系到建筑物的安危,因此,基础工程是十分重要的工程。同样,基础工程课程是土木工程专业的重要专业课。学好这门课程,对于将来从事地基基础工程的设计、施工、检测与维护,是十分重要的。

(2) 基础工程课程内容广泛,综合性强。基础工程课程涉及诸多的土木工程专业基础课及专业课,又由于地基土的复杂多变决定基础工程设计的非标准性。因此,要具有综合应用土木工程各个学科理论知识的能力,同时要全面掌握和正确应用基础工程的基本原理、方法、技术来解决基础工程中的复杂多变的实际问题。

(3) 基础工程涉及的规范多。土木工程中各行业之间没有统一的地基基础设计规范,同时各行业又存在一定的差别,有许多不协调之处,因此学习时要注意区分异同点。

二、学习要求

前面简要介绍了本课程的一些基本内容,可以看出基础工程涉及的学科很广,有岩土

力学、工程地质学、混凝土结构设计原理、工程施工等学科领域，内容广泛，综合性强。在学习过程中，应明确任何一项成功的基础工程都是岩土力学、工程地质学、结构计算等知识的运用和工程实践经验的完美结合。在某些情况下，施工也可能是决定基础工程成败的关键。应了解上部结构、基础和地基是作为一个整体协调工作的，一些常规计算方法不考虑三者共同工作是有条件的，在评价计算结果中应考虑这种影响，并采取相应的构造措施。应清楚了解各种地基处理方法的特点，加固机理和适用范围，根据土的特性和工程特点选用不同的处理方法。地基处理方法很多，而且新方法、新工艺、新材料不断涌现，需下一番工夫。即使是很有经验的工程师，仍需不断学习，不断实践，了解他未曾使用过的方法。哪怕有些方法曾用过，也要了解别人在使用这些方法中的经验和独到之处。

由于地基土的成分、成因和构造不同，其性质是比较复杂的，加之土的性质随含水量及外力的变化而改变，使得不同建筑场地的地基性质相差很大，这就要求设计者以岩土力学基本理论为基础，以工程勘察结果为依据，灵活采用合适的基础形式和选用最佳的处理方案去解决基础工程问题；另外在建筑、道桥、水利、港口等不同行业，基础工程的设计、施工不尽相同，在学习基础工程课程时，既要重点突出，掌握其基本理论和一般原则，又要学会根据不同行业相关规范的不同要求进行基础工程设计与计算。

学习时要注意：基础工程课程具有不同性及经验性。不同性体现在本学科中因为没有完全相同的地基，几乎找不到完全相同的工程实例。在处理基础工程问题时，必须注意不同情况进行不同的分析。经验性体现在解决地基基础问题时，注意有一定程度的经验性。因此，本课程有较多的经验公式，而且有关地基及基础方面的规范就是理论及经验的总结。学习时，除了学习全国性地基基础设计规范外，还要了解地区性的规范及规程，并注意世界各国的规范各有不同。讲究学习方法，要仔细分析各种理论及公式的基本假定及使用条件，对于公式的推导只作了解；要把注意力放在理解、应用公式上，并结合当地的基础工程实践经验加以应用。避免千篇一律地、不分地区地机械套用理论公式、规范。

思考题

1. 基础工程在土木工程建设中的地位如何？
2. 简述地基、基础的定义。
3. 深基础与浅基础是如何划分的？
4. 为什么要学习《基础工程》？

天然地基上的浅基础设计原理

【学习能力要求】

- 1. 了解地基基础的重要性和复杂性，以及浅基础的类型、设计原则和设计步骤；
- 2. 掌握基础埋置深度的影响因素和确定方法；
- 3. 学会运用理论公式、原位测试等方式确定地基的承载力，能够进行地基承载力特征值修正，并且能够根据地基的承载力和结构荷载确定基础底面尺寸，以及进行软弱下卧层验算、地基变形验算和稳定性验算；
- 4. 掌握减小不均匀沉降危害的措施，理解地基、基础与上部结构相互作用的概念。



任务一 概述

建（构）筑物的设计和施工中，地基和基础占有很重要的地位。它对建（构）筑物的安全和正常使用有很大的影响。地基基础设计必须根据建（构）筑物的用途和安全等级、建筑布置和上部结构类型，充分考虑建筑场地和地基的工程地质条件，结合施工条件和环境保护等要求，合理选择地基基础方案，因地制宜，精心设计，力求基础工程安全可靠、经济合理和施工方便，以确保建（构）筑物的安全和正常使用。

一、地基基础的重要性和复杂性

通常把建筑物在地面以上的部分称为上部结构，在地面以下的结构部分称为基础，承受建筑物荷载的地层称为地基，因此建筑物通常是由上部结构、基础和地基三部分组成。

（一）地基基础的重要性

地基基础是建筑物的根基，根基不牢将危及整个建筑物的安全。地基基础的工程量、造价和施工工期，在整个建筑工程中占相当大的比重，如高层建筑的地基基础造价超过主体工程的 1/4~1/3。基础工程是隐蔽工程，稍有不慎就有可能给工程埋下隐患，且工程竣工验收时难以检验。大量工程实践证明，建筑物事故的发生常常由地基基础事故所引起，地基基础事故的征兆不易察觉，一旦失事，往往就已经危及主体结构或使用功能，难以补救。

（二）地基基础的复杂性

基础工程质量问题的复杂性是地基本身组成的复杂性和建设工程的多样性所决定的。由于岩土의 复杂性、勘测工作的有限性等造成岩土工程的不定性和经验性，必然构成地基

基础设计潜在的复杂性。基础工程既要与上部结构可靠连接，承担所有建设工程的荷载，又要将建设工程的全部荷载平稳、牢固地传给地基，必然决定了地基基础工程设计的复杂性。

二、地基基础的设计原则

(一) 地基基础的设计等级

建（构）筑物的安全和正常使用，不仅取决于上部结构的安全储备，还要求地基基础有一定的安全度。因为地基基础是隐蔽工程，所以不论地基或基础哪一方面出现问题或发生破坏，都很难修复，轻则影响使用，重则导致建（构）筑物破坏，甚至酿成灾害。因此，地基基础设计在建（构）筑物设计中举足轻重。根据地基复杂程度、建筑物规模和功能、特征，以及由于地基问题可能造成建筑物破坏或影响正常使用的程度，《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）将地基基础设计分为三个设计等级，设计时应根据具体情况按表 1-1 选用。

表 1-1 地基基础设计等级

设计等级	建筑和地基类型
甲 级	重要的工业与民用建筑
	30 层以上的高层建筑
	体型复杂，层数相差超过 10 层的高低层连成一体建筑物
	大面积的多层地下建筑物（如地下车库、商场、运动场等）
	对地基变形有特殊要求的建筑物
	复杂地质条件下的坡上建筑物（包括高边坡）
	对原有工程影响较大的新建建筑物
	场地和地基条件复杂的一般建筑物
	位于复杂地质条件及软土地区的二层及二层以上地下室的基坑工程
	开挖深度大于 15 m 的基坑工程
乙 级	周边环境条件复杂、环境保护要求高的基坑工程
	除甲级、丙级以外的工业与民用建筑物
丙 级	除甲级、丙级以外的基坑工程
	场地和场基条件简单、荷载分布均匀的七层及七层以下民用建筑及一般工业建筑物；次要的轻型建筑物
	非软土地区且场地地质条件简单、基坑周边环境条件简单、环境保护要求不高且开挖深度小于 5 m 的基坑工程

(二) 地基基础的设计原则

基础工程设计的目的是设计一个安全、经济和可行的地基与基础，保证上部结构物的安全和正常使用。因此，基础工程的基本设计计算原则是：

- (1) 地基设计应具有足够的强度，满足地基承载力的要求；
- (2) 地基与基础的变形满足建筑物正常使用的允许要求；
- (3) 地基与基础的整体稳定性有足够保证；
- (4) 基础本身有足够的强度、刚度和耐久性。

地基与基础方案的确定主要取决于地基土层的工程地质与水文地质条件、上部结构类型与荷载条件、使用要求、材料与施工技术等因素。基础方案应作不同方案的比较，选择较为适宜与合理的设计方案与施工方案。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 规定，地基基础的设计与计算应满足承载力极限状态和正常使用极限状态的要求。根据建筑物地基基础设计等级及长期荷载作用下地基变形对上部结构的影响程度，地基基础设计应符合：

- (1) 所有建筑物的地基计算均应满足承载力计算的有关规定。
- (2) 设计等级为甲级、乙级的建筑物均应按地基变形设计。
- (3) 设计等级为丙级的建筑物有下列情况之一时应进行变形验算（表 1-2）：
 - ①地基承载力特征值小于 130 kPa，且体型复杂的建筑物；
 - ②在基础上及其附近有底面堆载或相邻基础荷载差异较大，可能引起地基产生过大的不均匀沉降时；
 - ③软弱地基上的建筑物存在偏心荷载时；
 - ④相邻建筑距离近，可能发生倾斜时；
 - ⑤地基内有厚度较大或厚薄不均的填土，其自重固结未完成时。
- (4) 对经常受水平荷载作用的高层建筑、高耸结构和挡土墙等，以及建造在斜坡上或边坡附近的建筑物和构筑物，尚应验算其稳定性。
- (5) 基坑工程应进行稳定性验算。
- (6) 建筑地下室或地下构筑物存在上浮问题时，还应进行抗浮验算。

表 1-2 丙级建筑物可不作地基变形验算的范围

地基主要受 力层的情况	地基承载力特征值 f_{ak} /kPa			$80\leq$ $f_{ak}<100$	$100\leq$ $f_{ak}<130$	$130\leq$ $f_{ak}<160$	$160\leq$ $f_{ak}<200$	$200\leq$ $f_{ak}<300$
	各土层坡度（%）			≤ 5	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
建筑类型	砌体承重结构、框架结构 (层数)			≤ 5	≤ 5	≤ 6	≤ 6	≤ 7
	单层排架 结构（6 m 柱距）	单 跨	吊 车 额 定 起重量/t	10~15	15~20	20~30	30~50	50~100
			厂房跨度/m	≤ 18	≤ 24	≤ 30	≤ 30	≤ 30
		多 跨	吊 车 额 定 起重量/t	5~10	10~15	15~20	20~30	30~75
			厂房跨度/m	≤ 18	≤ 24	≤ 30	≤ 30	≤ 30
	烟囱		高度/m	≤ 40	≤ 50	≤ 75		≤ 100
	水塔		高度/m	≤ 20	≤ 30	≤ 30		≤ 30
			容积/m ³	50~100	100~200	200~300	300~500	500~1 000

注：①地基主要受力层系指条形基础底面下深度为 $3b$ (b 为基础底面宽度)，独立基础下为 $1.5b$ ，且厚度均不小于 5 m 的范围（二层以下的民用建筑除外）。

②地基主要受力层中如有承载力特征值小于 130 kPa 的土层时，表中砌体承重结构的设计，应采取地基处理或采取减轻不均匀沉降的一些措施。

③表中砌体承重结构和框架结构均指民用建筑。对于工业建筑可按厂房高度、荷载情况折合成与其相当的民用建筑层数。

④表中额定吊车起重量、烟囱高度和水塔容积的数值系指最大值。

三、天然地基上浅基础设计内容与步骤

如果地基土中有良好的土层,应尽量选该土层作为直接承受基础荷载的持力层,即采用天然地基。一般将天然地基上埋置深度小于 5 m 的基础及埋置深度虽超过 5 m 但小于基础宽度的基础统称为天然地基上的浅基础。

当天然地基土层较软弱或具有特殊工程性质,如软土、湿陷性黄土、膨胀土等,不适于做天然地基时,可对上部地基土进行加固处理,从而形成人工地基。另外,还可采用桩基础等深基础形式,将荷载向深部土层传递。

在选择地基基础方案时,通常优先考虑天然地基上的浅基础,因为这类基础具有施工简便、用料省、工期短等优点。当这类基础难以适应较差的地基条件或上部结构的荷载、构造及使用要求时,才考虑采用人工地基上的浅基础或深基础。

天然地基上浅基础设计内容与步骤:

- (1) 根据上部结构形式,荷载大小选择基础的结构形式、材料并进行平面布置;
- (2) 确定基础的埋置深度;
- (3) 确定地基承载力特征值;
- (4) 根据基础顶面荷载值及持力层地基承载力,初步计算基础底面尺寸;
- (5) 若地基持力层下部存在软弱土层,则需验算软弱下卧层的承载力;
- (6) 甲级、乙级建筑物及部分丙级建筑物应进行地基变形验算;
- (7) 基础剖面及结构设计;
- (8) 绘制施工图。

第六步以前如有不满足要求的情况,可对基础设计进行调整,如改变基础埋深、加大基础底面尺寸或改变基础方案,直至满足要求为止。



任务二 浅基础类型

天然地基上的浅基础,根据基础形状和大小可以分为:独立基础、条形基础(包括十字交叉条形基础)、筏板基础、箱形基础等。根据基础所用材料的性能又可分为无筋扩展基础(刚性基础)和钢筋混凝土基础(柔性扩展基础)。

一、无筋扩展基础

无筋扩展基础(刚性基础)通常是由砖、块石、毛石、素混凝土、三合土和灰土等材料建造的,且不需要配置钢筋的基础,这些材料有较好的抗压性能,但抗拉、抗剪强度不高,设计时要求限定基础的扩展宽度和基础高度的比值,以避免基础内的拉应力和剪应力超过其材料强度。相应而言,基础的相对高度一般都比较大大,几乎不会发生弯曲变形,习惯上称之为“刚性基础”。

刚性基础可用于六层和六层以下(三合土基础不宜超过四层)的民用建筑和砌体承重的厂房,其特点是稳定性好、施工简便、能承受较大的荷载,主要缺点是自重大大,且当基础持力层为软弱土时,由于扩大基础面积有一定限制,需对地基进行处理或加固后才能采用。对于荷载大大或上部结构对沉降差较敏感的情况,当持力层为深厚软土时,以刚性基础作

为浅基础是不适宜的。

砖基础是应用最广泛的一种刚性基础，如图 1-1 所示：砖基础各部分的尺寸应符合砖的模数。砖基础一般做成台阶式，俗称“大放脚”。其砌筑方式有“两皮一收”和“二一间隔收”（又称“等高式”与“间隔式”）两种。“两皮一收”是每砌两皮砖，即 120 mm，收进 1/4 砖长，即 60 mm；“二一间隔收”是从底层开始，先砌两皮砖，收进 1/4 砖长，再砌一皮砖，收进 1/4 砖长，如此反复。

毛石基础是用未经人工加工的石材和砂浆砌筑而成，如图 1-2 所示。其优点是易于就地取材，价格低，但施工劳动强度大。

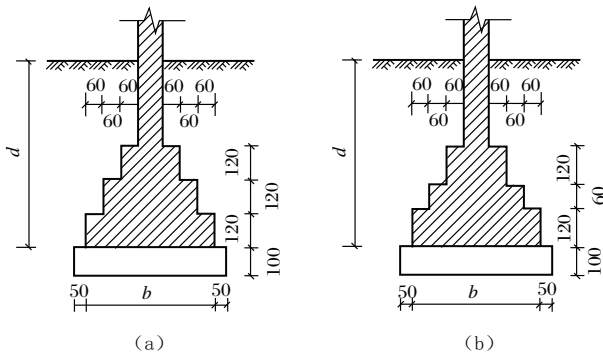


图 1-1 砖基础剖面图

(a) 两皮一收砌法；(b) 二一间隔收砌法

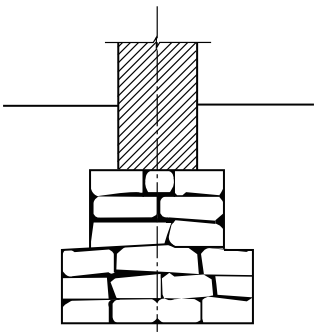


图 1-2 毛石基础

三合土基础是用石灰、砂、骨料（矿渣、碎砖或碎石）三种材料加适量的水分充分搅拌均匀后，铺在基槽内分层夯实而成，如图 1-3 所示。三合土基础常用于我国南方地区，地下水位较低的四层及四层以下的民用建筑工程中。

灰土基础由熟化后的石灰和黏性土按比例拌和并夯实而成，如图 1-4 所示。施工时每层需铺灰土 220~250 mm，夯实至 150 mm，称为“一步灰土”。根据需要可设计成二步灰土或三步灰土。

混凝土和毛石混凝土基础的强度、耐久性与抗冻性都优于砖石基础，因此，当荷载较大或位于地下水位以下时，可考虑选用混凝土基础，如图 1-5 所示。混凝土基础水泥用量大，造价稍高，当基础体积较大时，可设计成毛石混凝土基础。毛石混凝土基础是在浇筑混凝土过程中，掺入 20%~30%（体积比）的毛石，以节约水泥用量。由于其施工质量控制较困难，使用并不广泛。

无筋扩展基础也可由两种材料叠合组成，例如，上层用砖砌体，下层用混凝土。

二、钢筋混凝土基础

当基础承受外荷载较大且存在弯矩和水平荷载作用，同时地基承载力又较低，刚性基础不能满足地基承载力和基础埋深的要求时，可以考虑采用钢筋混凝土基础。钢筋混凝土基础可用扩大基础底面积的方法来满足地基承载力的要求，而不必增加基础的埋深。钢筋混凝土基础常见的有柱下独立基础、条形基础和十字交叉条形基础、筏板与箱形基础，其整体性、抗弯和抗剪性较好。

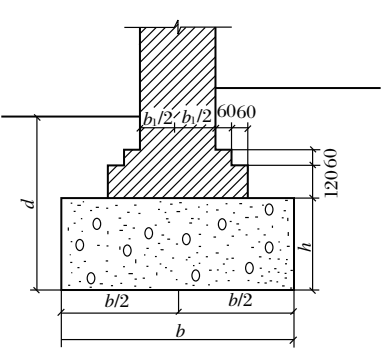


图 1-3 三合土基础

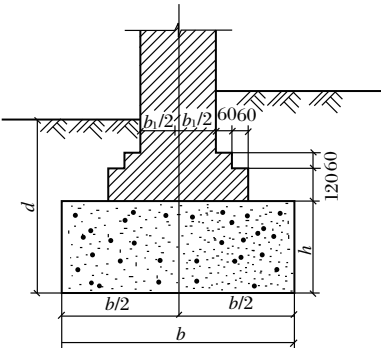


图 1-4 灰土基础

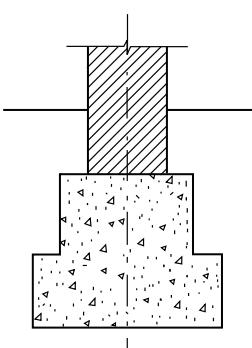


图 1-5 混凝土基础

(一) 柱下独立基础

柱下独立基础又称单独基础，基础截面可设计成台阶形或锥形，预制柱下一般采用杯口形基础，基础形式如图 1-6 所示。轴心受压柱下的基础底面形状一般为方形，偏心受压柱下的基础底面形状一般为矩形。桥梁基础中常把相邻两柱相连，又称作联合基础或双柱联合基础，如图 1-7 所示。在房屋建筑的过程中，当一边柱靠近建筑边线，或二柱间距较小，而出现基底面积不足或偏心过大等情况时，也采用双柱联合基础。

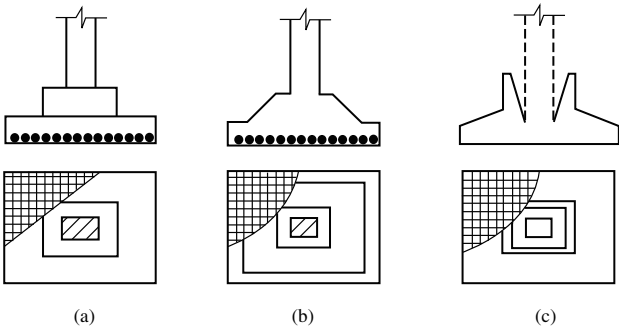


图 1-6 柱下独立基础

(a) 台阶形基础；(b) 锥形基础；(c) 杯口形基础

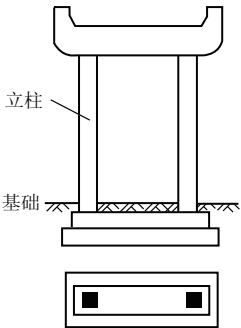


图 1-7 双柱联合基础

(二) 条形基础

条形基础是指单向条状的基础，钢筋混凝土条形基础可分为墙下钢筋混凝土条形基础（图 1-8）、柱下钢筋混凝土条形基础（图 1-9）和十字交叉钢筋混凝土条形基础（图1-10）。

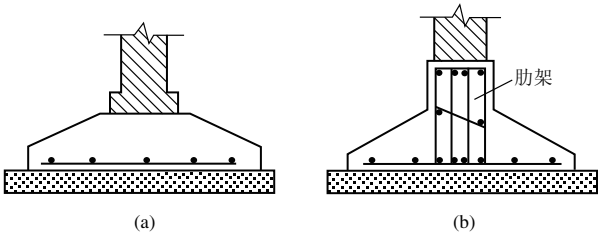


图 1-8 墙下钢筋混凝土条形基础

(a) 不带肋；(b) 带肋

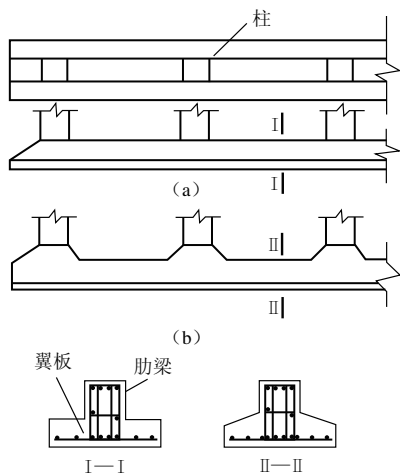


图 1-9 柱下钢筋混凝土条形基础

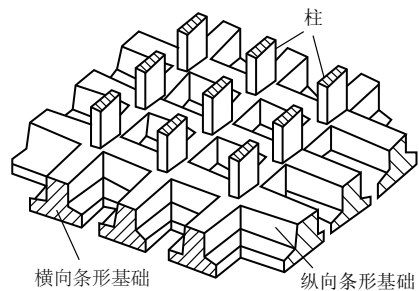


图 1-10 柱下十字交叉钢筋混凝土条形基础

- (1) 墙下钢筋混凝土条形基础，横截面根据受力条件分为不带肋和带肋两种，其设计计算属于平面应变问题，只考虑基础横向受力发生破坏。
- (2) 当地基承载力较低且柱下钢筋混凝土独立基础的底面积不能承受上部结构荷载作用时，常把一个方向柱基础连成一条，形成单向的柱下条形基础。将承受的集中荷载较均匀地分布到条形基础底面积上，以减轻地基反力，利用基础的整体刚度来调整可能产生的不均匀沉降。当单向条形基础底面积仍不能承受上部结构荷载的作用时，将纵横柱基础均连在一起，形成十字交叉条形基础。这种基础在纵横方向均具有一定的刚度，当地基较弱且荷载与土质不均匀时，十字交叉条形基础具有良好的调整不均匀沉降的能力。十字交叉条形基础一般可承担十层以下民用住宅的荷载。

(三) 筏板基础

当荷载很大且地基土较软弱，采用十字交叉条形基础也不能满足要求时，可采用筏板基础。筏板基础又可称作筏形基础、满堂基础，其形状类似一块倒置的楼盖，基底面积大，可减小基底压力，提高地基土的承载力，能更有效地增强基础的整体刚度，有利于调节地基的不均匀沉降，较能适应上部结构荷载分布的变化。特别是对于有地下室的房屋或大型储液结构，如水池、油库等，筏板基础是一种比较理想的基础结构。

按所支承上部结构的类型，可分为砌体结构的墙下筏板基础和框架、剪力墙结构的柱下筏板基础，如图 1-11 所示。墙下筏板基础板厚 200~300 mm，埋深较浅，适用于具有硬持力层（包括人工处理地基）、比较均匀的软弱地基上六层及六层以下承重横墙较密的民用建筑。柱下筏板基础分为平板式和梁板式。平板式筏板基础的厚度一般为 0.5~2.5 m，常根据经验确定，用于柱荷载较小和柱排列均匀、间距较小的情况，如图 1-11 (a) 所示。当柱荷载较大时，可将柱下板厚局部加大或设柱墩以防止筏板发生冲切破坏，如图 1-11 (b) 所示。若柱间距较大，柱荷载相差也较大时，可在柱轴线纵横方向设置肋梁，形成梁板式筏板基础，如图 1-11 (c)、图 1-11 (d) 所示。

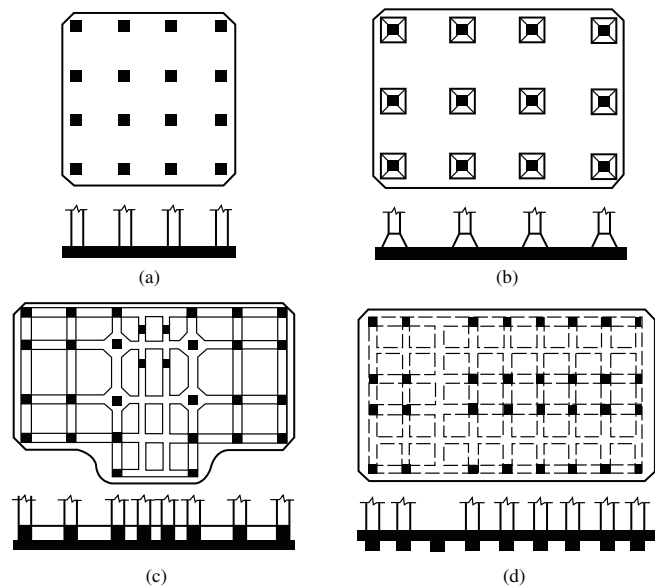


图 1-11 柱下筏板基础

(a) 平板式；(b) 平板式；(c) 梁板式；(d) 梁板式

(四) 箱形基础

箱形基础是由钢筋混凝土底板、顶板和内外纵横隔墙组成的，有一定高度的整体空间结构，如图 1-12 所示。箱形基础比筏板基础具有更大的抗弯刚度，可视作绝对刚性基础。箱形基础埋层较深，基础空腹，开挖卸除基底原有的自重应力，减小了作用于基础底面的附加应力，降低了基础的沉降，箱基的抗震性能较好。

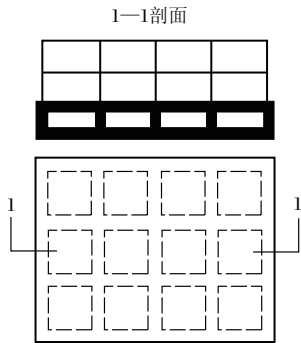


图 1-12 箱形基础



任务三 基础的埋置深度

基础埋置深度一般是指设计地面到基础底面的距离。选择合适的基础埋置深度关系到地基的稳定性、施工的难易、工期的长短以及造价的高低，是地基基础设计中的重要环节。基础埋置深度的合理确定必须考虑建筑物的用途，有无地下室、设备基础和地下设施，以及基础的形式和构造；作用在地基上的荷载大小和性质；相邻建筑物的基础埋深；地基土冻胀和融陷的影响等因素，综合加以确定。确定浅基础埋深的基本原则是，在满足地基稳定和变形要求及有关条件的前提下，当上层地基的承载力大于下层土时，宜利用上层土作持力层。除岩石地基外，基础的最小埋置深度不宜小于 0.5 m。考虑到地表一定深度内，由于气温变化、雨水侵蚀、动植物生长及人为活动的影响，基础顶面应低于设计地面 0.1 m 以上，以避免基础外露，如图 1-13 所示。

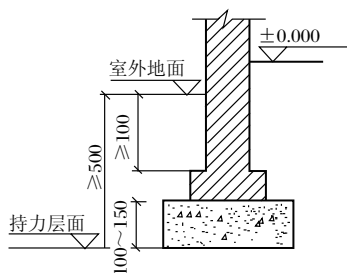


图 1-13 基础的最小埋置深度 (单位: mm)

一、与建筑物有关的一些条件

(一) 建筑功能

建筑物的使用功能和用途，常常成为基础埋深选择的先决条件。当建筑物设有地下室，带有地下设施、半埋式结构物等时，都需要较大的基础埋深。有地下室时，基础埋深要受地下室地面标高的影响，在平面上仅局部有地下室时，基础可按台阶形式变化埋深或整体加深，台阶的高宽比一般为 1 : 2，每级台阶高度不超过 0.5 m，如图 1-14 所示。在确定基础埋深时，需考虑给排水、供热等管道的标高。原则上不允许管道从基础底下通过，一般可以在基础上设洞口，且洞口顶面与管道之间要留有足够的净空高度，以防止基础沉降压裂管道，造成事故。当确定冷藏库或高温炉窑基础埋深时，应考虑热传导引起地基土因低温而冻胀或因高温而干缩的不利影响。

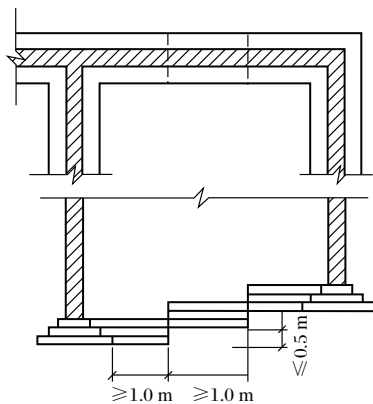


图 1-14 墙基础埋深变化时的台阶做法

(二) 荷载效应

对于竖向荷载大，地震力和风力等水平荷载作用也大的高层建筑，基础埋深应适当增大，以满足稳定性要求。在抗震设防区，除岩石地基外，天然地基上的箱形基础和筏板基础埋置深度不宜小于建筑物高度的 1/15，桩箱或桩筏基础的埋置深度（不计桩长）不宜小于建筑高度的 1/18，位于岩石地基上的高层建筑，其基础埋深应满足抗滑要求。对于受上拔力的结构（如输电塔）基础，应有较大的埋深以满足抗拔要求，对于室内地面荷载较大或有设备基础的厂房、仓库，应考虑对基础内侧的不利作用。

中、小跨度的简支梁桥，对确定基础埋深的影响不大。但对超静定结构，基础即使发生较小的不均匀位移也会使内力产生一定的变化，如拱桥桥台。为减少可能产生的水平位移和沉降差，基础有时需设置在埋藏较深的坚实土层上。

二、工程地质条件

工程地质条件是影响基础埋深的最基本条件之一。直接支承基础的土层称为持力层，其下的各土层称为下卧层。基础埋深的选择实质上就是确定基础的持力层。

当上层土的承载力高于下层土的承载力时宜取上层土作为持力层，特别是对于上层为“硬壳层”时，尽量做“宽基浅埋”。

对于上层土较软的地基土，视土层厚度而考虑是否挖除，或采用人工地基，或选择其他基础形式。

当土层分布明显不均匀，或建筑物各部分荷载差别较大时，同一建筑物可采用不同的埋深来调整不均匀沉降。对于持力层顶面倾斜的墙下条形基础可做成台阶状，如图 1-15 所示。

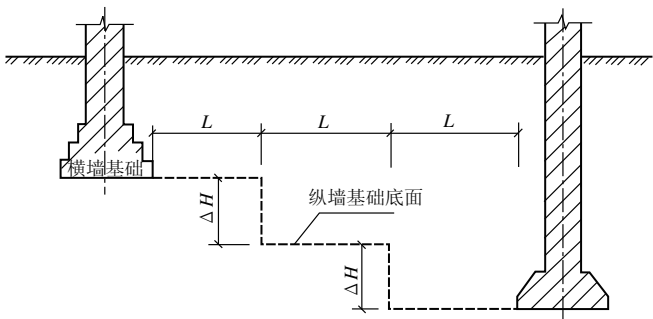


图 1-15 埋置深度不同的基础及墙下台阶条形基础

位于稳定边坡之上的拟建工程，要保证地基有足够的稳定性。如图 1-16 所示，当坡高 $H \leq 8\text{ m}$ ，坡角 $\beta \leq 45^\circ$ ，且 $b \leq 3\text{ m}$ ， $a \geq 2.5\text{ m}$ 时，基础埋深 d 符合下列条件，可以认为已满足稳定性要求——

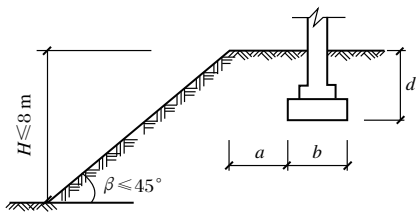


图 1-16 土坡坡顶处基础的最小埋深图

条形基础：

$$d \geq (3.5b - a) \tan \beta \tag{1-1}$$

矩形基础：

$$d \geq (2.5b - a) \tan \beta \tag{1-2}$$

式中 a ——基础底面外边缘线至坡顶的水平距离 (m)；
 b ——垂直于坡顶边缘线的基础底面边长 (m)；
 d ——基础埋置深度 (m)；

β ——边坡坡脚 ($^{\circ}$)。

当边坡坡角大于 45° 、坡高大于 8 m 时，尚应按式 (1-1)、(1-2) 验算坡体稳定性。

当基础埋置在易风化的岩层上时，施工时应在基坑开挖后立即铺筑垫层。

在有冲刷的河流中，为了防止桥梁墩、台基础四周和基底下土层被水流淘空以致坍塌，基础必须埋置在设计洪水最大冲刷线以下一定深度，以保证基础的稳定性。基础在设计洪水冲刷总深度以下的最小埋深与河床地层的抗冲刷能力、计算设计流量的可靠性、选用计算冲刷深度的方法、桥梁的重要性和破坏后修复的难易程度等因素有关。

三、水文地质条件

有潜水存在时，基础底面应尽量埋置在潜水位以上。若基础底面必须埋置在水位以下时，除应考虑施工时的基坑排水，坑壁围护和地基土扰动等问题外，还应考虑地下水对混凝土的腐蚀性，地下水的防渗以及地下水对基础底板的上浮作用。

对埋藏有承压含水层的地基，选择基础埋深时，需防止基底因挖土卸载而隆起开裂，如图 1-17 所示。必须控制基坑开挖深度，使承压含水层顶部的静水压力 u 与总覆盖压力 σ 的比值 $u/\sigma < 1$ ，否则应降低地下承压水水头。静水压力 $u = \gamma_w h$ ， h 为承压含水层顶部压力水头高；总覆盖压力 $\sigma = \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2$ ，式中 γ_1 、 γ_2 分别为各土层的重度，地下水水位以下取饱和重度。

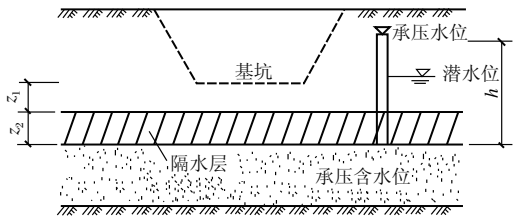


图 1-17 基坑下有承压含水层

四、地基冻融条件

季节性冻土是冬季冻结、天暖解冻的土层。土体中水冻结后发生体积膨胀，而产生冻胀。位于冻胀区的基础在受到大于基底压力的冻胀力作用下会被上抬；而冻土层解冻土体强度降低产生融陷，建筑物随之下沉。冻胀和融陷是不均匀的，往往造成建筑物的开裂损坏。因此为避开冻胀区土层的影响，宜将基础底面设置在冻结线以下。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 规定，基础的最小埋深为：

$$d_{\min} = z_d - h_{\max} \tag{1-3a}$$

$$z_d = z_0 \psi_z \psi_{zw} \psi_{ze} \tag{1-3b}$$

- 式中 z_d ——设计冻深 (m)；
 $h_{\max}$ ——基底允许残留冻土层最大厚度，按表 1-3 确定 (m)；
 z_0 ——地区标准冻深，按《建筑地基基础设计规范》 (GB 50007—2011) 附录 F 采用；
 ψ_z 、 ψ_{zw} 、 ψ_{ze} ——影响系数，分别按表 1-4、表 1-5、表 1-6 确定。

表 1-3 建筑基底允许残留冻土层的最大厚度 $h_{\max}$ 单位：m

冻胀性	基础形式	采暖情况	基底平均压力/kPa 下的残留冻土层厚度					
			110	130	150	170	190	210
弱冻胀土	方形基础	采暖	0.90	0.95	1.00	1.10	1.15	1.20
		不采暖	0.70	0.80	0.95	1.00	1.05	1.10
	条形基础	采暖	>2.50	>2.50	>2.50	>2.50	>2.50	>2.50
		不采暖	2.20	2.50	>2.50	>2.50	>2.50	>2.50
冻胀土	方形基础	采暖	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	—
		不采暖	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	—
	条形基础	采暖	1.55	1.8	2.00	2.2	2.5	—
		不采暖	1.15	1.35	1.55	1.75	1.95	—

注：①本表只计算法向冻胀力，如果基侧存在切向冻胀力，应采取防切向力措施。

②基础宽度小于 0.6 m 时不适用，矩形基础取短边尺寸按方形基础计算。

③表中数据不适用于淤泥、淤泥质土和欠固结土。

④计算基底平均压力时取永久作用的标准组合值乘以 0.9，可以内插。

表 1-4 土的类型对冻深的影响系数

土的类型	黏性土	细砂、粉砂、粉土	中、粗、砾砂	碎石土
影响系数 Ψ_{zs}	1.0	1.2	1.3	1.4

表 1-5 土的冻胀性对冻深的影响系数

土的冻胀性	不冻胀	弱冻胀	冻胀	强冻胀	特强冻胀
影响系数 $\Psi_{z\omega}$	1.00	0.95	0.9	0.85	0.8

表 1-6 环境对冻深的影响系数

周围环境	村、镇、旷野	城市近郊	城市市区
影响系数 Ψ_z	1.00	0.95	0.9

注：环境影响系数一项，当城市市区人口为 20 万～50 万时，按城市近郊取值；当城市市区人口大于 50 万且小于或等于 100 万时，只计入市区影响；当城市市区人口超过 100 万时，除计入市区影响外，尚应考虑 5 km 以内的郊区近郊影响系数。

在冻胀、强冻胀、特强冻胀地基上，应采用下列防冻害措施：

(1) 对在地下水位以上的基础，基础侧面应回填非冻胀性的中砂或粗砂，其厚度不应小于 200 mm。对在地下水位以下的基础，可采用桩基础、自锚式基础（冻土层下有扩大板或扩底短桩）或采取其他有效措施。

(2) 宜选择地势高、地下水位低、地表排水良好的建筑场地。对低洼场地，宜在建筑四周向外不小于一倍冻深距离范围内，使室外地坪至少高出自然地面 300～500 mm。

(3) 防止雨水、地表水、生产废水、生活污水浸入建筑地基，应设置排水设施。在山区应设截水沟或在建筑物下设置暗沟，以排走地表水和潜水流。

(4) 在强冻胀性和特强冻胀性地基上，其基础结构应设置钢筋混凝土圈梁和基础梁，并控制上部建筑的长高比，以增强房屋的整体刚度。

(5) 当独立基础联系梁下或桩基础承台下有冻土时，应在梁或承台下留有相当于该土层冻胀量的空隙，以防止因土的冻胀将梁或承台拱裂。

(6) 外门斗、室外台阶和散水坡等部位宜与主体结构断开，散水坡分段不宜超过 1.5 m，坡度不宜小于 3%，其下宜填入非冻胀性材料。

(7) 对跨年度施工的建筑, 入冬前应对地基采取相应的防护措施; 按采暖设计的建筑物, 当冬季不能正常采暖时, 也应对地基采取保温措施。

五、场地环境条件

气候变化或树木生长导致的地基土胀缩以及其他生物活动有可能危害基础的安全, 因而基础底面应到达一定的深度, 除岩石地基外, 不宜小于 0.5 m。为了保护基础, 一般要求基础顶面低于设计地面至少 0.1 m。

对靠近原有建筑物基础修建的新基础, 其埋深不宜超过原有基础的底面, 否则新、旧基础间应保留一定的净距, 如图 1-18 所示, 其值应根据原有基础荷载大小、基础形式和土质情况确定。不能满足上述要求时, 应采取分段施工, 设临时加固支撑, 打板桩, 地下连续墙等施工措施, 或加固原有建筑物地基, 以保证邻近原有建筑物的安全。

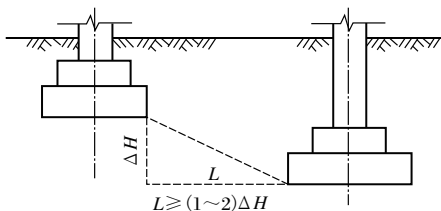


图 1-18 相邻建筑基础的埋深

如果基础邻近有管道或沟、坑等设施时, 基础底面一般应低于这些设施的底面。临水建筑物, 为防流水或波浪的冲刷, 其基础底面应位于冲刷线以下。



任务四 地基承载力的确定

地基基础设计首先应保证在上部结构荷载作用下, 以使地基土不至于发生剪切破坏而失效。因而, 要求基底压力不大于地基承载力特征值, 即基底尺寸应满足地基强度条件。

地基承载力特征值的确定方法可归纳为三类: ①根据土的抗剪强度指标以理论公式计算; ②按现场载荷试验的 $p-s$ 曲线确定; ③其他原位测试。这些方法各有长短, 互为补充, 可结合起来综合确定。

一、按土的抗剪强度指标以理论公式确定

土力学中介绍的地基临塑荷载 p_{cr} , 临界荷载 $p_{\frac{1}{4}}$ 以及极限荷载 p_u 均可用来衡量地基承载力。对于给定的基础, 地基从开始出现塑性区到整体破坏, 相应的基础荷载有一个相当大的变化范围。实践证明, 地基中出现小范围的塑性区对安全并无妨碍, 而且相应的荷载与极限荷载 p_u 相比, 一般仍有足够的安全度。当荷载偏心距 e 小于或等于 0.033 倍基础底面宽度时, 可以采用《建筑地基基础设计规范》推荐的、以地基临界荷载 $p_{\frac{1}{4}}$ 为基础的理论公式来计算地基承载力特征值, 并应满足变形要求。

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (1-4)$$

式中 f_a ——由土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值 (kPa);

M_b 、 M_d 、 M_c ——承载力系数, 按表 1-7 确定;

c_k ——基底下—倍短边宽深度内土的黏聚力标准值（kPa）。

表 1-7 承载力系数 M_b 、 M_d 、 M_c

土的内摩擦角标准值 φ_k /度	M_b	M_d	M_c
0	0.00	1.00	3.14
2	0.03	1.12	3.32
4	0.06	1.25	3.51
6	0.1	1.39	3.71
8	0.14	1.55	3.93
10	0.18	1.73	4.17
12	0.23	1.94	4.42
14	0.29	2.17	4.69
16	0.36	2.43	5.00
18	0.43	2.72	5.31
20	0.51	3.06	5.66
22	0.61	3.44	6.04
24	0.80	3.87	6.45
26	1.10	4.37	6.90
28	1.40	4.93	7.40
30	1.90	5.59	7.95
32	2.60	6.35	8.55
34	3.40	7.21	9.22
36	4.20	8.25	9.97
38	5.00	9.44	10.80
40	5.80	10.84	11.73

注： φ_k ——基底下—倍短边宽深度内土的内摩擦角标准值。

式（1-4）与 $p_{\frac{1}{4}}$ 公式稍有差别。根据砂土地基的荷载试验资料，按 $p_{\frac{1}{4}}$ 公式计算的结果偏小较多，所以对砂土地基，当 b 小于 3 m 时按 3 m 计算，此外，当 $\varphi_k \geq 24^\circ$ 时，采用比 M_b 的理论值大的经验值。对偏心距的限制，主要是避免基底压力分布很不均匀的情况出现。

按土的抗剪强度确定的地基承载力特征值没有考虑建筑物对地基变形的要求，因此在基础底面尺寸确定后，还应进行地基变形验算。按理论公式计算地基承载力时，对计算结果影响最大的是土的抗剪强度指标 φ_k 的取值。

二、按静载荷试验确定地基的承载力

测定地基承载力最可靠的方法是在拟建场地进行载荷试验。载荷试验是工程地质勘察工作中的一项原位测试，分为浅层和深层平板载荷试验。深层平板载荷试验适用于深部土层及大直径桩桩端土层的承载力测定；浅层平板载荷试验可适用于确定浅层地基承压板影响范围内土层承载力。

载荷试验测试的岩土力学性质，包括地基变形模量、地基承载力以及黄土的湿陷性等。试验装置一般由加荷稳压装置、反力装置及观测装置三部分组成。加荷稳压装置包括承压板、立柱、加荷千斤顶及稳压器；反力装置包括地锚系统或堆重系统；观测装置包括位移

计及固定支架等。

现行《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)规定,承压板的面积宜为 $0.25 \sim 0.5 \text{ m}^2$,对软土不应小于 0.5 m^2 (正方形边长 $0.707 \text{ m} \times 0.707 \text{ m}$ 或圆形直径 0.798 m)。为模拟半空间地基表面的局部荷载,试验基坑宽度不应小于承压板宽度或直径的 3 倍;应保持试验土层的原状结构和天然湿度;宜在拟试压表面用粗砂或中砂找平,其厚度不超过 20 mm ;加荷等级不应少于 8 级,最大加载量不应少于荷载设计值的 2 倍。

荷载试验的观测标准:

(1) 每级加荷后,按间隔 10、10、10、15、15 min,以后为每隔半小时读一次沉降,当在连续两小时内,每小时的沉降量小于 0.1 mm 时,则认为已趋稳定,可加下一级荷载。

(2) 当出现下列情况之一时,即可终止加载:①承压板周围的土有明显的侧向挤出(砂土)或发生裂纹(黏性土或粉土);②沉降 s 急骤增大,荷载-沉降($p-s$)曲线出现陡降段;③在某一级荷载下,24 h 内沉降速率不能达到稳定标准;④ $s/b \geq 0.06$ (b 为承压板宽度或直径)。满足终止加载前三种情况之一者,其对应的前一级荷载定为极限荷载。

根据各级荷载及其相应的稳定沉降的观测数值,即可采用适当比例尺绘制荷载 p 与稳定沉降 s 的关系曲线($p-s$ 曲线),必要时还可绘制各级荷载下的沉降与时间($s-t$)的关系曲线,由 $p-s$ 曲线可确定承载力特征值。

对于密实砂土、硬塑黏土等低压缩性土,其 $p-s$ 曲线通常有比较明显的起始直线段和陡降段,如此方可得到极限荷载,如图 1-19 (a) 所示。考虑到低压缩性土的承载力特征值一般由强度安全控制,故《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)规定取图中的 p_1 (比例界限荷载)作为承载力特征值。此时,地基的沉降量很小,但是对于少数呈“脆性”破坏的土, p_1 与极限荷载 p_u 很接近,当 $p_u < 2 p_1$ 时,取 $p_u/2$ 作为承载力特征值。

对于有一定强度的中、高压压缩性土,如松砂、填土、可塑黏土等, $p-s$ 曲线无明显转折点,但是曲线的斜率随荷载的增加而逐渐增大,最后稳定在某个最大值,即呈渐进破坏的“缓变型”,如图 1-19 (b) 所示。此时,极限荷载 p_u 可取曲线斜率开始到达最大值时所对应的压力。不过,要取得 p_u 值,必须把荷载试验进行到有很大的沉降才行。而实践中往往因受加荷设备的限制,或出于安全考虑,不能将试验进行到这种地步,因而无法取得 p_u 值。此外,土的压缩性较大,通过极限荷载确定的地基承载力未必能满足对地基沉降的限制。

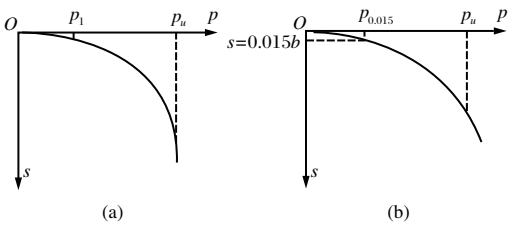


图 1-19 荷载-沉降($p-s$)曲线

事实上,中、高压压缩性土的地基承载力,往往由沉降量控制。由于沉降量与基础(或载荷板)底面尺寸、形状有关,而试验采用的载荷板通常总是小于实际基础的底面尺寸,为此,不能直接以基础的允许沉降值在 $p-s$ 曲线上定出地基承载力。由变形计算原理得知,如果载荷板和基础下的基底压力相同,且地基土是均匀的,则它们的沉降值与各自宽度 b 的比值(s/b)大致相等。规范总结了许多实测资料,当压板面积为 $0.25 \sim 0.5 \text{ m}^2$ 时,

规定取 $s = (0.01 \sim 0.015) b$ 所对应的压力作为承载力特征值，但其值不应大于最大加载量的一半。

对同一土层，试验点数不应少于 3 个，如所得试验值的极差不超过平均值的 30%，则取该平均值作为地基承载力特征值 f_{ak} ，然后再考虑实际基础的宽度 b 和埋深 d ，得到修正后得地基承载力特征值 f_a 。若所得实验值的极差超过平均值的 30%，则需增加实验点数。

载荷板的尺寸一般比实际基础小，影响深度较小，试验只反映这个范围内土层的承载力。如果载荷板影响深度之下存在软弱下卧层，而该层又处于基础的主要受力层内，如图 1-20 所示的情况，此时除非采用大尺寸载荷板做试验，否则载荷试验不能真实地揭示下卧层地基土承载力情况。

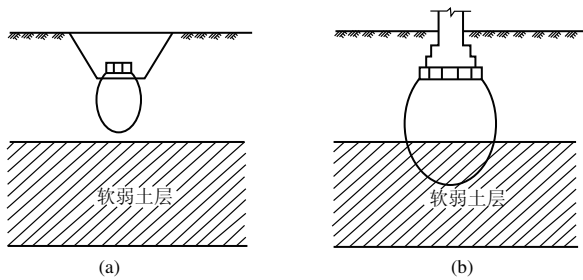


图 1-20 基础宽度对附加应力的影响
(a) 载荷试验；(b) 实际基础

三、按其他原位测试方法确定

(一) 旁压试验

旁压试验又称横压试验，它的原理是通过旁压器，在竖直的孔内使旁压膜膨胀，并由该膜（或护套）将压力传给周围土体，使土体产生变形直至破坏，从而得到压力 p 与钻孔体积增量 V （或径向位移）之间的关系曲线，如图 1-21 所示。该曲线可分为三个阶段，第一阶段为旁压膜膨胀与孔壁接触阶段，最后与孔壁完全贴紧，达到初始压力 p_0 。第二阶段相当于弹性变形阶段，压力 p_f 为开始屈服的压力。第三阶段塑性变形阶段，局部产生塑性流动，最后达到极限压力 p_L 。

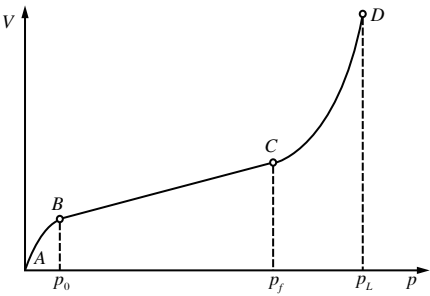


图 1-21 压力 p 与钻孔体积增量 V 关系曲线

地基承载力的特征值可根据旁压曲线结合地区经验采用相应经验公式确定。旁压试验适合于黏性土、粉土、砂土、碎石土、残积土、极软岩和软岩等。

(二) 螺旋压板载荷试验等

螺旋压板载荷试验是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种原位测试技术。它是借助人力或机械力将螺旋板作为承压板旋入地下预定深度，用千斤顶通过传力杆向螺旋板施加压力，反力由螺旋地锚提供。施加的压力由位于螺旋板上端的电测传感器测定，同时量测承压板的沉降。螺旋压板载荷试验装置示意图如图 1-22 所示。

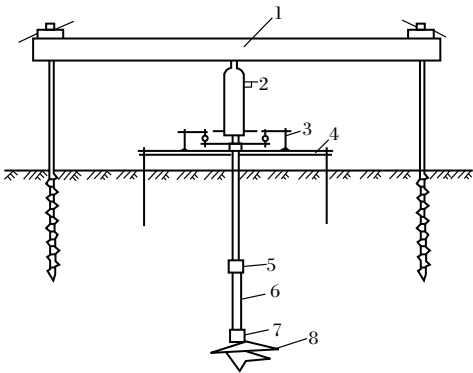


图 1-22 螺旋压板载荷试验装置示意图

1—反力装置；2—油压千斤顶；3—位移计；4—横梁；
5—传力杆接头；6—传力杆；7—测力传感器；8—螺旋承压板

在某一深度的试验完成后，将螺旋板旋钻到下一个预定的试验深度，继续进行试验。螺旋压板载荷试验适用于一定深度处（特别是地下水位以下）的砂土、粉土和黏性土层。它可以在不同深度处的原位应力条件下进行试验，扰动较小，能较好地反映地基土的性状。

由螺旋压板载荷试验资料绘制 $p-s$ 曲线和确定地基土承载力特征值的方法与常规载荷试验基本相同。只不过在螺旋压板载荷试验中比例界限荷载 p_l 和极限荷载 p_u 中均已包含了上覆土自重压力的影响，故采用 p_l 和 p_u 确定地基土的承载力时，不必再进行深度修正。

另外，静力触探试验、标准贯入试验和十字板剪切试验等其他原位测试方法虽不能直接测定地基承载力，但可以采用与载荷试验结果对比分析的方法选择有代表性的土层同时进行载荷试验和原位测试，分别求得地基承载力和原位测试指标，积累一定数量的数据组，用回归分析的方法建立回归方程，间接地确定地基承载力。由于这些方法比较经济、简便、快速，能在较短的时间内获得大量承载力资料，因而在工程建设中得到大力推广。

我国幅员辽阔，土层分布的特点具有很强的地域性，各地区和各部门在使用各种测试仪器的过程中积累了很多地区性或行业性的经验，建立了许多地基承载力和原位测试指标之间的经验公式，因而地基承载力的确定可结合当地或部门经验综合确定。

四、地基承载力特征值的修正

理论分析和工程实践均已证明，基础的埋深、基础底面尺寸影响地基的承载能力。而上述原位测试中，地基承载力测定都是在一定条件下进行的。因此，必须考虑这两个因素的影响。通常采用经验修正的方法来考虑实际基础的埋置深度和基础宽度对地基承载力的有利影响。《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）规定采用如下公式进行计算：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \tag{1-5}$$

式中 f_a ——修正后的地基承载力特征值 (kPa);
 f_{ak} ——地基承载力特征值 (kPa);
 η_b 、 η_d ——基础宽度和埋深的地基承载力修正系数,按基底下土的类别查表 1-8;
 γ ——基础底面以下土的重度,地下水位以下取有效重度 (kN/m³);
 b ——基础底面宽度,当基底宽度小于 3 m 时按 3 m 考虑,大于 6 m 时按 6 m 考虑;
 γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度,地下水位以下取有效重度 (kN/m³);
 d ——基础埋置深度,一般自室外地面标高算起,在填方整平地区,可自填土地面标高算起,但填土在上部结构施工后完成时,应从天然地面标高算起,对于地下室,如采用箱形基础或筏基时,基础埋置深度自室外地面标高算起,当采用独立基础或条形基础时,应从室内地面标高算起 (m)。

表 1-8 地基承载力修正系数

土的类别		η_b	η_d
淤泥和淤泥质土		0	1.0
人工填土, e 或 I_L 大于等于 0.85 的黏性土		0	1.0
红黏土	含水比 $a_w > 0.8$	0	1.2
	含水比 $a_w \leq 0.8$	0.15	1.4
大面积压实填土	压实系数大于 0.95、黏粒含量 $\rho_c \geq 10\%$ 的粉土	0	1.5
	最大干密度大于 2.1 t/m ³ 的级配砂石	0	2.0
粉土	黏粒含量 $\rho_c \geq 10\%$ 的粉土	0.3	1.5
	黏粒含量 $\rho_c < 10\%$ 的粉土	0.5	2.0
e 及 I_L 均小于 0.85 的黏性土		0.3	1.6
粉砂、细砂 (不包括很湿与饱和时的稍密状态)		2.0	3.0
中砂、粗砂、砾砂和碎石土		3.0	4.4

注: ①强风化和全风化的岩石,可参照所风化成的相应土类取值,其他状态下的岩石不修正;
②地基承载力特征值按深层平板荷载试验确定时 η_b 取 0;
③含水比是指土的天然含水量与液限的比值;
④大面积压实填土是指填土范围大于 2 倍基础宽度的填土。

对于主楼和群楼一体的结构,主体结构地基承载力深度修正时,宜将基础底面以上范围内的荷载,按基础两侧的超载考虑;当超载宽度大于基础宽度两倍时,可将超载折算成土层厚度作为基础埋深,基础两侧超载不等时,取小值。

【例 1-1】

某柱下扩展基础 (2.2 m×3 m),承受中心荷载作用,场地土为粉土,水位在地表以下 2.0 m,基础埋深 2.5 m,水位以上土的重度为 17.6 kN/m³,水位以下饱和重度为 19 kN/m³。土的内聚力 $c_k=14$ kPa,内摩擦角 $\varphi_k=21^\circ$,试按规范推荐的理论公式确定地基承载力特征值。

解 由 $\varphi_k=21^\circ$,查表 1-7 并内插值,可得 $M_b=0.56$ 、 $M_d=3.25$ 、 $M_c=5.85$ 。
基底以上土的加权平均重度:

$$\gamma_m = \frac{17.6 \times 2.0 + (19 - 10) \times 0.5}{2.5} = 15.9 \text{ kN/m}^3$$

由式 1-4 得:

$$\begin{aligned} f_a &= M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \\ &= 0.56 \times (19 - 10) \times 2.2 + 3.25 \times 15.9 \times 2.5 + 5.85 \times 14 \end{aligned}$$

$$=222.1 \text{ kPa}$$

【例 1-2】

某场地土层分布及各项物理力学指标如图 1-23 所示,若在该场地拟建下列基础:
①柱下扩展基础,底面尺寸为 $2.6 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$,基础底面设置于粉质黏土层顶面;②高层箱形基础,底面尺寸 $12 \text{ m} \times 45 \text{ m}$,基础埋深为 4.2 m 。试确定这两种情况下持力层承载力修正特征值。

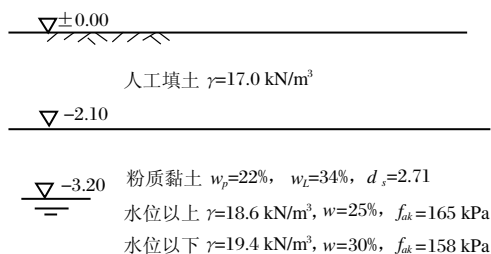


图 1-23

解 (1) 柱下扩展基础

$b = 2.6 \text{ m} < 3 \text{ m}$, 按 3 m 考虑, $d = 2.1 \text{ m}$ 。

$$\text{粉质黏土层水位以上 } I_L = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} = \frac{25 - 22}{34 - 22} = 0.25$$

$$e = \frac{d_s (1 + \omega) \gamma_m}{\gamma} - 1 = \frac{2.71 \times (1 + 0.25) \times 10}{18.6} - 1 = 0.82$$

查表 1-8 得 $\eta_b = 0.3$, $\eta_d = 1.6$

将各项指标代入式 1-5 中得:

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 165 + 0 + 1.6 \times 17 \times (2.1 - 0.5) \\ &= 208.5 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(2) 箱形基础

$b = 12 \text{ m} > 6 \text{ m}$, 按 6 m 考虑, $d = 4.2 \text{ m}$ 。

$$\text{基础位于水位以下 } I_L = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} = \frac{30 - 22}{34 - 22} = 0.67$$

$$e = \frac{d_s (1 + \omega) \gamma_w}{\gamma} - 1 = \frac{2.71 \times (1 + 0.30) \times 10}{19.4} - 1 = 0.82$$

查表 1-8 得 $\eta_b = 0.3$, $\eta_d = 1.6$

基底以上土的加权平均重度为:

$$\gamma_m = \frac{17 \times 2.1 + 18.6 \times 1.1 + (19.4 - 10) \times 1}{4.2}$$

$$= 15.6 \text{ kN/m}^3$$

将各项指标代入式 (1-5) 中得:

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 158 + 0.3 \times 9.4 \times (6 - 3) + 1.6 \times 15.6 \times (4.2 - 0.5) \\ &= 258.81 \text{ kPa} \end{aligned}$$



任务五 基础底面尺寸的确定

一、按持力层承载力初步确定基础底面尺寸

在设计浅基础时,一般先确定基础的埋置深度,选定地基持力层并求出地基承载力特征 f_a ,然后根据上部荷载,或根据构造要求确定基础底面尺寸,要求基底压力满足下列条件:

$$p_k \leq f_a \quad (1-6)$$

当有偏心荷载作用时,除应满足式(1-6)要求外,还需满足下式:

$$p_{k\max} \leq 1.2f_a \quad (1-7)$$

式中 p_k ——相应于荷载效应标准组合时的基底平均压力(kPa);

$p_{k\max}$ ——相应于荷载效应标准组合时的基底边缘最大压力(kPa);

f_a ——修正后的地基持力层承载力特征值(kPa)。

(一) 中心荷载作用下基础底面尺寸确定

当基础承受轴心荷载作用时,地基反力为均匀分布,按地基持力层承载力计算基底尺寸时,要求基底压力满足下式要求:

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} = \frac{F_k}{A} + \gamma_G \bar{d} \leq f_a \quad (1-8)$$

式中 A ——基础底面面积(m^2);

F_k ——相应于荷载效应标准组合时,上部结构传至基础顶面的竖向力值(kN);

G_k ——基础自重和基础上的土重(kN);

γ_G ——基础和基础上覆土的平均重度,通常取 20 kN/m^3 ;

$\bar{d}$ ——基础埋深,取基础底面距离基础两侧设计地面的平均值(m)。

根据式(1-8)确定基础底面尺寸时,基础底面积应满足:

$$A \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_G \bar{d}} \quad (1-9)$$

对条形基础,沿基础长度方向取1 m作为计算单元,式(1-9)可变为:

$$b \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_G \bar{d}} \quad (1-10)$$

式中 b ——条形基础基底宽度(m)。

需要说明的是,按式(1-9)和式(1-10)计算时,承载力特征值 f_a 只能先按基础埋深 d 确定。待基底尺寸算出之后,再看基底宽度 b 是否超过3.0 m,若 $b > 3.0 \text{ m}$,需重新修正承载力特征值,再验算基底尺寸是否满足地基承载力要求。

(二) 偏心荷载作用下的基础底面尺寸确定

对于偏心荷载作用下的基础底面尺寸常采用试算法确定。计算方法如下:

(1) 先按中心荷载作用条件,利用式(1-9)和式(1-10)初步估算基础底面尺寸。

(2) 根据偏心程度,将基础底面积扩大10%~40%,并以适当的比例确定矩形基础的

长 l 和宽 b ，一般取 $l/b=1\sim 2$ 。

(3) 计算基底最大压力，计算基底平均压力，并使其满足式 (1-6) 和式 (1-7)。

这一计算过程可能要经过几次试算方能确定合适的基础底面尺寸。另外，为了保证基础不致过分倾斜，一般要求偏心距 e 应满足 $e \leq b/6$ 。 b 为偏心受压基础力矩作用方向的边长，即要求 $P_{kmin} > 0$ ，以控制基底压力呈梯形分布，防止基础过分倾斜。

若持力层下有相对软弱的下卧土层，还须对软弱下卧层进行强度验算。如果建筑物有变形验算要求，应进行变形验算。对承受水平力较大的高层建筑和不利于稳定的地基上的结构还须进行稳定性验算。

【例 1-3】

试确定如图 1-24 所示的某框架柱下独立基础底面尺寸。

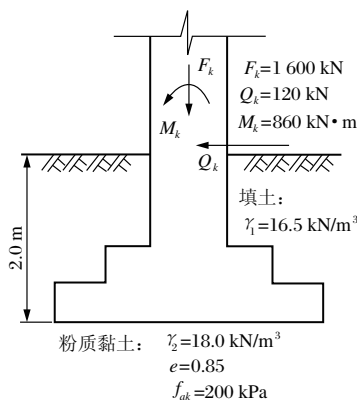


图 1-24 某框架柱基础

解 (1) 试估基础底面积。

深度修正后的持力层承载力特征值：

$$f_a = f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) = 200 + 1.0 \times 16.5 \times (2 - 0.5) = 224.8 \text{ kPa}$$

基底面积：

$$A = (1.1 \sim 1.4) \frac{F_k}{f_a - \gamma_G \bar{d}} = (1.1 \sim 1.4) \times 1600 / (224.75 - 20 \times 2.0) = (9.5 \sim 12) \text{ m}^2$$

由于力矩较大，底面积可取大些，取 $b=3.0 \text{ m}$ ， $l=4.0 \text{ m}$ 。

(2) 计算基底压力。

$$p_k = \frac{F_k}{bl} + \gamma_G \bar{d} = \frac{1600}{3 \times 4} + 20 \times 2 = 173.3 \text{ kPa}$$

$$p_{kmax} = p_k \pm \frac{M_k}{W} = 173.3 \pm \frac{860 + 120 \times 2}{3 \times 4^2 / 6} \text{ kPa} = \begin{matrix} 310.8 \\ 35.8 \end{matrix} \text{ kPa}$$

(3) 验算持力层承载力。

$$p_k = 173.3 \text{ kPa} < f_a = 224.8 \text{ kPa}$$

$$p_{kmax} = 310.8 \text{ kPa} > 1.2 f_a = 269.8 \text{ kPa}, \text{ 不满足要求。}$$

(4) 重新调整基底尺寸，再验算，取 $l=4.5 \text{ m}$ 则

$$p_k = \frac{1600}{3 \times 4.5} + 20 \times 2 = 158.5 \text{ kPa}$$

$$p_{kmax}=158.5+\frac{860+120\times2}{3\times4.5^2/6}\text{kPa}=267.1\text{ kPa}<1.2f_a=269.8\text{ kPa}$$

取 $b=3.0\text{ m}$, $l=4.5\text{ m}$, 满足要求。

二、软弱下卧层承载力验算

当地基受力层范围内存在软弱下卧层（承载力显著低于持力层的高压缩性土层）时，除按持力层承载力确定基底尺寸外，还必须对软弱下卧层进行验算，要求作用在软弱下卧层顶面处的附加应力与自重应力之和不超过它的承载力特征值，即：

$$\sigma_z + \sigma_{cz} \leq f_{az} \tag{1-11}$$

式中 σ_z ——相应于荷载效应标准组合时，软弱下卧层顶面处的附加应力值（kPa）；

σ_{cz} ——软弱下卧层顶面处土的自重应力值（kPa）；

f_{az} ——软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值（kPa）。

计算附加应力 σ_z 时，一般采用简化方法，即参照双层地基中附加应力分布的理论解答，按压力扩散角的概念计算，如图 1-25 所示。假设基底处的附加压力 $p_0 = p_k - \sigma_{cd}$ 按压力扩散角 θ 往下，向外扩散至软弱下卧层顶面，根据基底与扩散面积上的总附加压力相等的条件，可得附加应力 σ_z 的计算公式如下：

条形基础：
$$\sigma_z = \frac{b(p_k - \sigma_{cd})}{b + 2z \tan \theta} \tag{1-12}$$

矩形基础：
$$\sigma_z = \frac{lb(p_k - \sigma_{cd})}{(l + 2z \tan \theta)(b + 2z \tan \theta)} \tag{1-13}$$

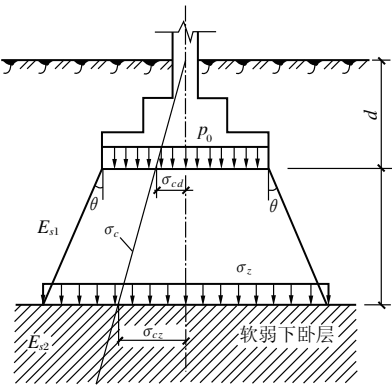


图 1-25 软弱下卧层承载力验算

- 式中 b ——条形基础的底面宽度或矩形基础荷载偏心方向的边长（m）；
 l ——矩形基础的底面长度（m）；
 p_k ——相应于荷载效应标准组合时的基底平均压力值（kPa）；
 σ_{cd} ——基底处土的自重应力值（kPa）；
 z ——基底至软弱下卧层顶面的距离（m）；
 θ ——地基压力扩散角，可按表 1-9 采用。

表 1-9 地基压力扩散角 θ 值

E_{s1}/E_{s2}	z/b	
	0.25	0.5
3	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°

注：① E_{s1} 为上层土压缩模量； E_{s2} 为下层土压缩模量；
② $z/b<0.25$ 时取 $\theta=0^\circ$ ，必要时，宜由试验确定； $z/b>0.5$ 时 θ 值不变；
③ z/b 在0.25与0.5之间可插值使用。

由式（1-13）可知，如要减小作用于软弱下卧层表面的附加应力 σ_z ，可以采取加大基底面积或减小基础埋深的措施。前一措施虽然可以有效地减小 σ_z ，但却可能使基础的沉降量增加。因为附加应力的影响深度会随着基底面积的增加而加大，从而可能使软弱下卧层的沉降量明显增加。反之，减小基础埋深可以增加基底到软弱下卧层的距离，使附加应力在软弱下卧层中的影响减小，因而基础沉降随之减小。因此，当存在软弱下卧层时，基础宜浅埋，这样不仅可使“硬壳层”充分发挥应力扩散作用，同时也减小了基础沉降。

【例 1-4】

某框架柱截面尺寸为 400 mm×300 mm，传至室内外平均标高位置处竖向力标准值 $F_k=700$ kN，力矩标准值 $M_k=80$ kN·m，水平剪力标准值 $V_k=13$ kN，基础底面距室外地坪为 $d=1.0$ m，基底以上填土重度 $\gamma=17.5$ kN/m³，持力层为黏性土，重度 $\gamma=18.5$ kN/m³，空隙比 $e=0.7$ ，液性指数 $I_L=0.78$ ，地基承载力特征值 $f_{ak}=226$ kPa，持力层下为淤泥土，如图 1-26 所示，试确定柱基础的底面尺寸。

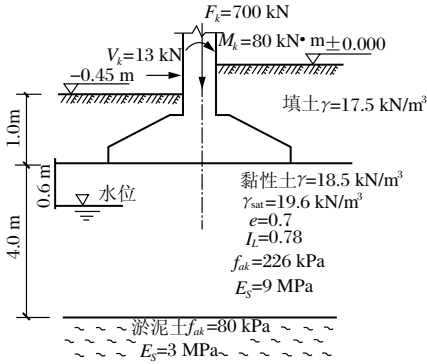


图 1-26 某框架截面示意

解 1. 确定地基持力层承载力特征值

先不考虑承载力宽度修正项，由 $e=0.7$ ， $I_L=0.78$ 查表得承载力修正系数 $\eta_b=0.3$ ， $\eta_d=1.6$ ，则

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 226 + 1.6 \times 17.5 \times (1.0 - 0.5) \\ &= 240 \text{ kPa} \end{aligned}$$

2. 试算法确定基底尺寸

(1) 先不考虑偏心荷载，按中心荷载作用计算

$$A_0 \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_c d} = \frac{700}{240 - 20 \times 1.225} = 3.25 \text{ m}^2$$

(2) 考虑偏心荷载时, 面积扩大为 $A=1.2A_0=1.2\times 3.25=3.9\text{ m}^2$

取基础长度 l 和基础宽度 b 之比为 $l/b=1.5$, 取 $b=1.6\text{ m}$, $l=2.4\text{ m}$, $l\times b=3.84\text{ m}^2$ 。

这里偏心荷载作用于长边方向。

(3) 验算持力层承载力

因 $b=1.6\text{ m}<3\text{ m}$, 不考虑宽度修正, f_a 值不变。

基底压力平均值:

$$p_k = \frac{F_k}{lb} + \gamma_G \bar{d} = \frac{700}{1.6 \times 2.4} + 20 \times 1.225 = 206.8\text{ kPa}$$

基底最大压力值为:

$$p_{k\max} = p_k + \frac{M_k}{W} = 206.8 + \frac{(80 + 13 \times 1.255) \times 6}{1.6 \times 2.4^2} = 206.8 + 62.5 = 269.3\text{ kPa}$$

由结果可知 $p_k < f_a$, $p_{k\max} < 1.2f_a$, 满足要求。

3. 软弱下卧层承载力验算:

由 $E_{s1}/E_{s2}=3$, $z/b=\frac{4}{1.6}=2.5>0.5$, 查表 1-9 得 $\theta=23^\circ$; 由表 1-8 可知, 淤泥地基

承载力修正系数 $\eta_b=0$, $\eta_d=1.0$ 。

软弱下卧层顶面处的附加压力:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{lb(p_k - \sigma_{cd})}{(l + 2z \tan \theta)(b + 2z \tan \theta)} \\ &= \frac{2.4 \times 1.6(206.8 - 17.5 \times 1.0)}{(1.6 + 2 \times 4 \times \tan 23^\circ)(2.4 + 2 \times 4 \times \tan 23^\circ)} \\ &= 25.1\text{ kPa}\end{aligned}$$

软弱下卧层顶面处的自重应力:

$$\begin{aligned}\sigma_{cz} &= \gamma_1 d + \gamma_2 h_1 + \gamma' h_2 \\ &= 17.5 \times 1 + 18.5 \times 0.6 + (19.6 - 10) \times 3.4 \\ &= 61.2\text{ kPa}\end{aligned}$$

软弱下卧层顶面处地基承载力修正特征值为:

$$\begin{aligned}f_{az} &= f_{akz} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 80 + 1.0 \times \frac{17.5 \times 1 + 18.5 \times 0.6 + 9.6 \times 3.4}{5} \times (5 - 0.5) \\ &= 135.1\text{ kPa}\end{aligned}$$

由计算结果可得 $\sigma_{cz} + \sigma_z = 86.3\text{ kPa} < f_{az}$, 满足要求。

三、地基变形验算

1. 地基特征变形

由于不同建筑物的结构类型、整体刚度、使用要求的差异, 对地基变形的敏感程度、危害、变形要求也不同。因此, 对于各类建筑物, 如何控制对其不利的沉降形式——“地基特征变形”, 使之不会影响建筑物的正常使用甚至破坏建筑物, 也是地基基础设计中必须予以考虑的基本问题。

地基特征变形一般分为: 沉降量、沉降差、倾斜和局部倾斜。

沉降量——独立基础中心点的沉降值或整幢建筑物基础的平均沉降值。沉降量若过大,

将影响建筑物的正常使用，如造成室内外上下水管、煤气管道的断裂等。

沉降差——相邻柱基中点的沉降量之差。相邻柱基沉降差过大，就会导致上部结构产生附加应力，严重时，建筑物将发生裂缝、倾斜甚至破坏。对于框架结构和排架结构，设计时应由相邻柱基的沉降差控制。

倾斜——基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值。对于高耸结构及长高比很小的高层建筑，其地基的主要特征变形是建筑物的整体倾斜。

局部倾斜——砌体承重结构沿纵墙 6~10 m 内基础两点的沉降差与其距离的比值。墙体局部倾斜大时，将会使其挠曲变形、开裂，影响正常使用。

2. 地基特征变形验算

地基特征变形应符合下式：

$$s < [s] \tag{1-14}$$

式中 s ——地基特征变形计算值；

$[s]$ ——地基特征变形允许值，查表 1-10 可获得。

式（1-14）中的地基特征变形计算值 s ，可按《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）中建议的应力面积分层总和法计算，也可按土力学教材中建议的其他方法计算。验算地基特征变形时，传到基础顶面的荷载按正常使用极限状态下荷载效应的准永久组合值计算。对不同的建筑结构类型应控制不同的地基特征变形值，使其不超过变形允许值。《建筑地基基础设计规范》通过对各类建筑物的实际沉降观测资料的分析和综合，提出了地基变形允许值，见表 1-10。

一般来说，如果建筑物均匀下沉，那么即使沉降量较大，也不会对结构本身造成损坏，但可能会影响到建筑物的正常使用，或使邻近建筑物倾斜，或导致与建筑物有联系的其他设施的损坏。例如，单层排架结构的沉降量过大会造成桥式吊车净空不够而影响使用，高耸结构（如烟卤、水塔等）沉降量过大会将烟道（或管道）拉裂。

表 1-10 建筑物地基特征变形允许值

变形特征	地基土类别	
	中、低压缩性土	高压缩性土
砌体承重结构基础的局部倾斜	0.002	0.003
工业与民用建筑相邻柱基的沉降差		
（1）框架结构	0.002 <i>l</i>	0.003 <i>l</i>
（2）砌体墙填充的边排柱	0.0007 <i>l</i>	0.001 <i>l</i>
（3）当基础不均匀沉降时不产生附加应力的结构	0.005 <i>l</i>	0.005 <i>l</i>
单层排架结构（柱距为 6 m）柱基的沉降量/mm	（120）	200
桥式吊车轨面的倾斜（按不调整轨道考虑）		
纵向	0.004	
横向	0.003	
多层和高层建筑的整体倾斜 $H_g \leq 24$	0.004	
$24 < H_g \leq 60$	0.003	
$60 < H_g \leq 100$	0.0025	
$H_g > 100$	0.002	
体型简单的高层建筑基础的平均沉降量/mm	200	

续表

变形特征	地基土类别	
	中、低压缩性土	高压缩性土
高耸结构基础的倾斜 $H_g \leq 20$	0.008	
$20 < H_g \leq 50$	0.006	
$50 < H_g \leq 100$	0.005	
$100 < H_g \leq 150$	0.004	
$150 < H_g \leq 200$	0.003	
$200 < H_g \leq 250$	0.002	
高耸结构基础的沉降量/mm $H_g \leq 100$	400	
$100 < H_g \leq 200$	300	
$200 < H_g \leq 250$	200	

注：①本表数值为建筑物地基实际最终变形允许值；
②有括号者仅适用于中压缩性土；
③ l 为相邻柱基的中心距离（mm）， H_g 为自室外地面起算的建筑物高度（m）；
④倾斜指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值；
⑤局部倾斜指砌体承重结构沿纵向6~10 m内基础两点的沉降差与其距离的比值。

砌体承重结构对地基的不均匀沉降是很敏感的，其损坏主要是由于墙体挠曲引起局部出现斜裂缝，砖墙可见裂缝的临界拉应变约0.05%，墙体极易产生呈45°左右的斜裂缝。如果中部沉降大，墙体正向挠曲，裂缝呈正八字形开展；若两端沉降大，墙体反向挠曲，裂缝呈倒八字形开展（砌体结构裂缝特征如图1-27所示）。墙体在门窗洞口处刚度削弱，角隅应力集中，裂缝首先在此出现，故砌体承重结构的地基变形由局部倾斜控制。

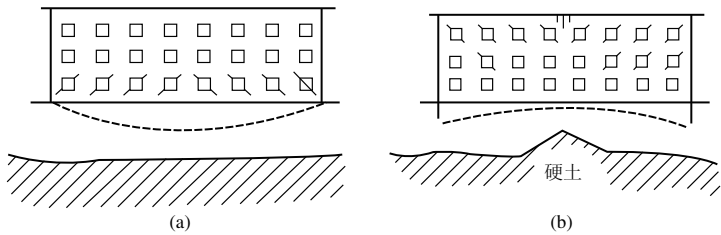


图 1-27 砌体结构裂缝特征
(a) 正八字形裂缝；(b) 倒八字形裂缝

框架结构和砌体墙填充的边排柱，主要因相邻柱基的沉降差使构件受剪扭曲而损坏，一般填充墙框架结构的相邻柱基沉降差超过0.002 l （ l 为柱间距）时将使结构处于不安全，因此其地基变形由沉降差控制。

高耸结构和高层建筑的整体刚度很大，可视为刚性结构，其地基变形应由建筑物的整体倾斜控制，必要时应控制平均沉降量。

地基土层的不均匀分布以及邻近建筑物的影响是耸结构和高层建筑产生倾斜的重要原因。这类结构物的重心高，基础倾斜使重心侧向移动引起的偏心矩荷载，不仅使基底边缘压力增加而影响倾覆稳定性，还会产生附加弯矩。高层建筑横向整体倾斜允许值主要取决于人们视觉的敏感程度，倾斜值到达明显可见的程度时大致为1/250（0.004），而结构损坏则大致当倾斜达到1/150时开始。倾斜允许值应随结构高度的增加而递减，规范根据基础倾斜引起建筑物重心偏移使基底边缘压力增量不超过平均压力的1/40，制定允许倾斜值。

当地基特征变形验算不满足允许值要求时，通常先考虑能否适当调整基础底面尺寸（如增大基底面积或调整基底形心位置）或埋深予以解决。如仍未满足要求，再考虑是否可从建筑、结构、施工等方面采取有效措施以防止不均匀沉降对建筑物的损害，或改用其他地基基础设计方案。

四、地基稳定性验算

以下为可能发生地基稳定性破坏的情况：

（1）承受很大的水平力或倾覆力矩的建（构）筑物，如受风力或地震力作用的高层建筑或高耸构筑物；承受拉力的高压线塔架基础等。承受水压力或土压力的挡土墙、水坝、堤坝和桥台等。

（2）位于斜坡顶上的建（构）筑物，由于在荷载作用和环境因素的影响下，造成部分或整个边坡失稳。

（3）地基中存在软弱土（或夹）层；土层下面有倾斜的岩层面；隐伏的破碎或断裂带；地下水渗流的影响等。

地基失稳的形式一般有两种：一种是沿基底产生表层滑动；另一种是地基深层整体滑动破坏，如图 1-28 所示。

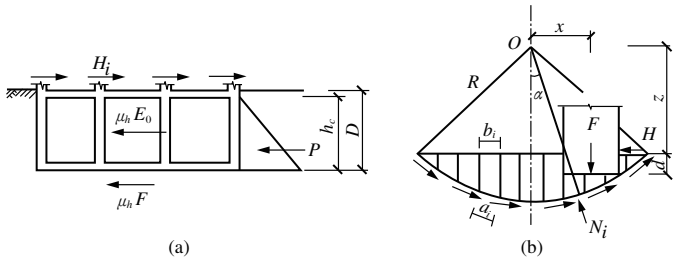


图 1-28 地基失稳的形式

表层滑动稳定安全系数 K_s 用基础底面与土之间的摩擦阻力的合力与作用于基底的水平力的合力之比来表示，其值不小于 1.2~1.4。

地基深层整体滑动稳定问题可用圆弧滑动法进行验算。稳定安全系数指作用于最危险的滑动面上诸力对滑动中心所产生的抗滑力矩与滑动力矩的比值，其值不小于 1.2。当滑动面为平面时，稳定安全系数应提高到 1.3。

除此之外，当建筑物基础存在浮力作用时还应进行抗浮稳定性验算，抗浮稳定安全系数为建筑物的自重及压重之和与浮力作用值之比，一般情况下可取 1.05。

任务六 减小不均匀沉降危害的措施

在实际工程中，由于地基软弱，土层薄厚变化大，或在水平方向软硬不一，或建筑物荷载相差悬殊等原因，使地基产生过量的不均匀沉降，使建筑物倾斜，墙体、楼地面开裂的事故屡见不鲜。因此，如何采取有效措施，防止或减轻不均匀沉降造成的危害，是设计中必须认真考虑的问题。

解决这一问题的具体的措施：①采用柱下条形基础、筏板基础和箱形基础等刚度大的

基础，以减少地基的不均匀沉降；②采用桩基等深基础，以减少建筑物沉降量，不均匀沉降相应减少；③对地基进行人工处理；④从地基、基础、上部结构共同作用的观点出发，在建筑、结构和施工方面采取措施以增强上部结构对不均匀沉降的适应能力。对于一般的中小型建筑物，应首先考虑在建筑、结构和施工方面采取减轻不均匀沉降危害的措施，必要时才采用其他地基基础方案。

一、建筑措施

(一) 建筑物的体型应力求简单

建筑物体型包括其平面与立面形状及尺度。体型简单的建筑物，其整体刚度大，抵抗变形的能力强。因此，在满足使用要求的前提下，软弱地基上的建筑物应尽量采用简单的体型，如等高的“一”字形。

平面形状复杂的建筑物（如“L”、“T”、“H”形等），在纵横单元交接处的基础密集，地基中附加应力相互重叠，导致建筑物转折处的沉降往往大于其他部位。尤其当一些枝生的“翼缘”尺度大时，建筑物的整体性差，各部分的刚度不对称，很容易因地基不均匀沉降而引起建筑物墙体开裂。图 1-29 所示的是软土地基上一幢“L”形平面的建筑物墙身开裂的实例。

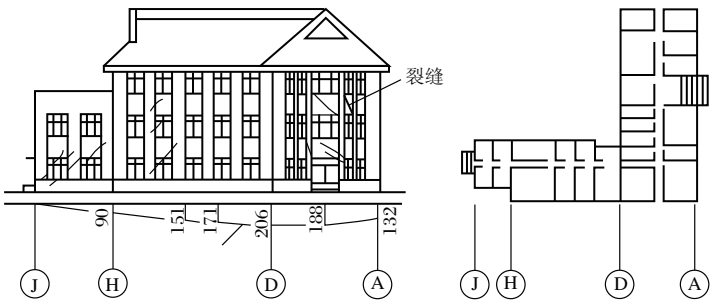


图 1-29 某“L”形建筑物墙身开裂

建筑物高低（或轻重）变化太大，在高度突变的部位，常由于荷载轻重不一而产生过量的不均匀沉降。据调查，软土地基上紧接高差超过一层的砌体承重结构房屋，低者很容易开裂，如图 1-30 所示。因此，地基软弱时，建筑物的紧接高差以不超过一层为宜。

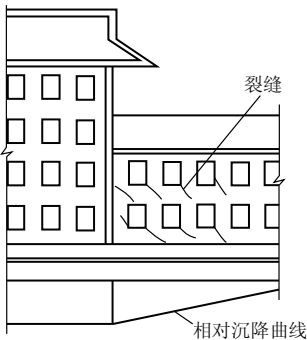


图 1-30 建筑物因高差太大而开裂

(二) 控制建筑物的长高比及合理布置墙体

建筑物在平面上的长度和从基础底面起算的高度之比，称为建筑物的长高比。长高比大的砌体房屋，其整体刚度差，纵墙更容易因挠曲过度而开裂，如图 1-31 所示。对三层和三层以上的房屋，当预估的最大沉降量超过 120 mm 时，长高比不宜大于 2.5。对于平面简单，内、外墙贯通，横墙间隔较小的房屋，长高比一般不大于 3.0，否则应设置沉降缝。

合理布置纵、横墙，是增强砌体结构房屋整体刚度的重要措施之一，当地基不良时，应尽量使内、外纵墙不转折或少转折，内横墙间距不宜过大，且与纵墙之间的连接应牢靠，必要时还应增强基础的刚度和强度。

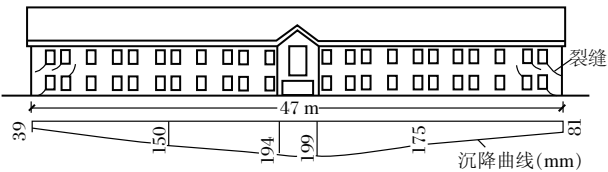


图 1-31 建筑物因长高比过大而开裂

(三) 设置沉降缝

当建筑物的体型复杂或长高比过大时，可以从基础开始设置沉降缝将建筑物分割为独立的沉降单元。每个单元一般应体型简单、长高比小、结构类型相同，且地基比较均匀，使得每一个沉降单元具有较大的整体刚度，沉降比较均匀，一般不会再开裂。

一般宜在建筑物的下列部位设置沉降缝：

- (1) 建筑物平面的转折处；
- (2) 建筑物高度或荷载有很大差别处；
- (3) 长高比不合要求的砌体结构以及钢筋混凝土框架结构的适当部位；
- (4) 地基土的压缩性有显著变化处；
- (5) 建筑结构或基础类型不同处；
- (6) 分期建造房屋的交界处；
- (7) 拟设置伸缩缝处，伸缩缝可兼作沉降缝。

沉降缝的构造如图 1-32 所示，沉降缝两侧的地基基础设计和处理是一个难点。缝两侧基础常通过改变基础类型、交错布置或采取基础后退悬挑作法进行处理。为避免缝两侧的结构相向倾斜而相互挤压，沉降缝应有足够的宽度，沉降缝的宽度可参照表 1-11 确定，缝内一般不得填塞材料（寒冷地区需填松软材料）。若在地基土的压缩性明显不同或土层变化处，单纯设缝难以达到预期效果，往往结合地基处理进行设缝。

表 1-11 建筑物沉降缝宽度

房屋层数	沉降缝宽度/mm
二~三	50~80
四~五	80~120
五层以上	不小于 120

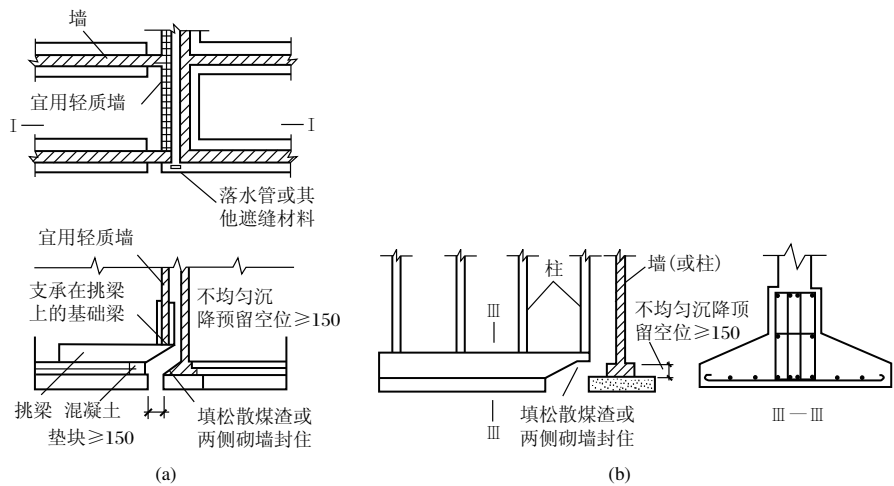


图 1-32 沉降缝构造示意图

(a) 使用于砌体结构房屋；(b) 使用于框架结构房屋

沉降缝的造价颇高，且要增加建筑及结构处理上的困难，所以不宜轻率多用。

有防渗要求的地下室一般不宜设置沉降缝。因此，对于具有地下室和裙房的高层建筑，为减少高层部分与裙房的不均匀沉降，常在施工时采用后浇带将两者断开，待两者间的后期沉降差能满足设计要求时再连接成整体。

(四) 控制相邻建筑物基础间的净距

由于地基附加应力的扩散和叠加，在软弱地基上，距离过近的相邻基础会使基础的沉降相互影响，产生的附加不均匀沉降可能造成建筑物的开裂或互倾，这种相邻影响主要表现为：

- (1) 同期建造的两相邻建筑物之间会彼此影响，特别是当两建筑物轻（低）重（高）差别较大时，轻（低）者受重（高）者的影响较大。
- (2) 原有建筑物受邻近新建重型或高层建筑物的影响。相邻建筑物基础之间所需的净距，可按表 1-12 选用。从该表中可见，决定基础间净距的主要指标是受影响建筑（被影响者）的刚度（用长高比来衡量）和影响建筑（施加影响者）的预估平均沉降量，后者综合反映了地基的压缩性、影响建筑的规模和重量等因素的影响。

表 1-12 相邻建筑物基础间的净距

被影响建筑的长高比 影响建筑的预估平均沉降量 s/mm		
	$2.0 \leq L/H_f < 3.0$	$3.0 \leq L/H_f < 5.0$
70~150	2~3	3~6
160~250	3~6	6~9
260~400	6~9	9~12
>400	9~12	≥ 12

注：①表中 L 为建筑物长度或沉降缝分隔的单元长度（m）； H_f 为自基础底面标高算起的建筑物高度（m）；
②当被影响建筑的长高比为 $1.5 < L/H_f < 2.0$ 时，其间净距可适当缩小。

相邻高耸结构（或对倾斜要求严格的构筑物）的外墙间隔距离，可根据倾斜允许值计算确定。

(五) 调整建筑物设计标高

建筑物的沉降过大时,改变了建筑物原有的标高,将可能引起管道破损、雨水倒漏、设备运行受阻等情况,影响建筑物的正常使用,这时可采取下列措施进行调整:

- (1) 根据预估的沉降量,适当提高室内地坪或地下设施的标高;
- (2) 建筑物各部分(或设备之间)有联系时,可将沉降较大者的标高适当提高;
- (3) 在建筑物与设备之间,应留有足够的净空;
- (4) 有管道穿过建筑物时,应预留足够尺寸的孔洞,或采用柔性管道接头等。

二、结构措施

(一) 减轻建筑物的自重

建筑物的自重(包括基础及上覆土重)在基底压力中所占的比例很大,据估计工业建筑为 $1/2$ 左右,民用建筑可达 $3/5$ 以上。因此,减轻建筑物自重可以有效地减少地基沉降量。具体的措施有:

- (1) 减少墙体的重量。如采用空心砌块、多孔砖或其他轻质墙体材料。
- (2) 选用轻型结构。如采用预应力混凝土结构、轻钢结构及各种轻型空间结构。
- (3) 减少基础及其上回填土的重量。可以选用覆土少、自重轻的基础形式,如采用补偿性基础、可浅埋的配筋扩展基础。如果室内地坪较高,可以采用架空地板减少室内回填土厚度。

(二) 设置圈梁

圈梁的作用在于提高砌体结构抵抗弯曲的能力,即增强建筑物的抗弯刚度。它是防止砖墙出现裂缝和阻止裂缝开展的一项有效措施。当建筑物产生碟形沉降时,墙体产生正向挠曲,下层的圈梁将起作用;反之,墙体产生反向挠曲时,上层的圈梁则起作用。通常在房屋的上、下方都设置圈梁。

圈梁截面、配筋以及平面布置等,可结合建筑抗震设计规范要求要求进行。多层房屋宜在基础面附近和顶层门窗顶处各设置一道,其他各层可隔层设置;当地基软弱,或建筑体型较复杂,荷载差异较大时,可层层设置。对于单层工业厂房及仓库可结合基础梁、联系梁、过梁等酌情设置。

圈梁必须与砌体结合成整体,每道圈梁应尽量贯通全部外墙、承重内纵墙及主要内横墙,在平面上形成封闭系统。如果墙体因开洞过大而受到严重削弱,且地基又很软弱时,还可考虑在削弱部位适当配筋,或利用钢筋混凝土边框加强。

圈梁有两种,一种是钢筋混凝土圈梁,如图 1-33(a) 所示。梁宽一般同墙厚,梁高不应小于 120 mm,混凝土强度等级宜采用 C20,纵向钢筋不宜少于 $4\phi 8$,绑扎接头的搭接长度按受力钢筋考虑,箍筋间距不宜大于 300 mm。兼作跨度较大的门窗过梁时,按过梁计算另加钢筋。另一种是钢筋砖圈梁,如图 1-33(b) 所示,即在水平灰缝内夹筋形成钢筋砖带,高度为 4~6 皮砖。用 M5 砂浆砌筑,水平通长钢筋不宜少于 $6\phi 6$,水平间距不宜大于 120 mm,分上、下两层设置。

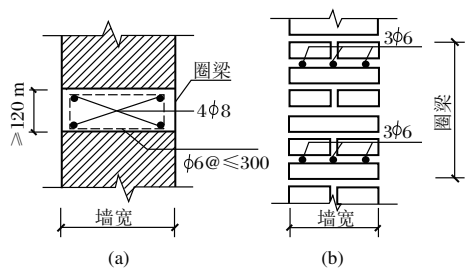


图 1-33 圈梁截面示意图

(三) 设置基础梁（地梁）

钢筋混凝土框架结构对不均匀沉降很敏感，对于采用单独柱基的框架结构，在基础间设置基础梁是加大结构刚度、减少不均匀沉降的有效措施之一。基础梁的底面一般置于基础表面（或略高些），截面高度可取柱距的 $1/14 \sim 1/18$ ，上下均匀通长配筋，每侧配筋率为 $0.4\% \sim 1.0\%$ 。

(四) 减小或调整基底附加压力

- (1) 设置地下室（或半地下室）。采用补偿性基础设计方法，以挖除的土重抵消部分甚至全部的建筑物重量，达到减小基底附加压力和沉降的目的。地下室（或半地下室）还可只设置于建筑物荷载特别大的部位，通过这种方法可以使建筑物各部分的沉降趋于均匀。
- (2) 调整基底尺寸。按地基承载力确定出基础底面尺寸之后，应用沉降理论和必要的计算，并结合设计经验，调整基底尺寸，加大基础的底面积可以减小沉降量。

(五) 采用对不均匀沉降欠敏感的结构型式

砌体承重结构、钢筋混凝土框架结构对不均匀沉降很敏感，而排架、三铰拱（架）等铰接结构则对不均匀沉降有很大的自适应性，支座发生相对位移时不会引起很大的附加应力，可以避免不均匀沉降的危害。但铰接结构型式通常只适用于单层的工业厂房、仓库和某些公共建筑。油罐、水池等的基础底板常采用柔性底板，以便更好地适应不均匀沉降。

三、施工措施

在软弱地基上进行工程建设时，采用合理的施工顺序和施工方法至关重要，这是减小或调整不均匀沉降的有效措施之一。

(一) 合理安排施工顺序

当拟建的相邻建筑物之间轻重、高低悬殊时，一般应按照“先重后轻、先高后低、先主后次”的原则进行施工，必要时还应在高重建筑物竣工后间歇一段时间，再建造轻的邻近建筑物。如果重的主体建筑物与轻的附属部分相连时，也应按上述原则处理。

(二) 注意施工方法

在已建成的建筑物周围，不宜堆放大量的建筑材料或土方等重物，以免地面荷载引起建筑物产生附加沉降。

拟建的密集建筑群内如有采用桩基础的建筑物，桩的施工应首先进行，并应注意采用合理的沉桩顺序。

在降低地下水位及开挖深基坑时，应密切注意对邻近建筑物可能产生的不利影响，必要时可以采用设置截水帷幕、控制基坑变形量等措施。

在高灵敏度的淤泥及淤泥质软土地基上开挖基槽时，需确保持力层不被扰动，通常在坑底保留大约 200 mm 厚的原土层，待施工混凝土垫层时才用人工临时挖除。若发现坑底软土被扰动，可挖去扰动部分，用砂、碎石（砖）等回填处理。在雨期施工时，要避免坑底土体受雨水浸泡。另外，需注意控制加荷速率。



任务七 地基、基础与上部结构相互作用的概念

一、基本概念

地基、基础和上部结构组成了一个完整的受力体系，三者的变形相互制约、相互协调，也就是共同工作的，其中任一部分的内力和变形都是三者共同工作的结果。但常规的简化设计方法未能充分考虑这一点。如图 1-34 所示的条形基础上多层平面框架结构的分析，常规设计的步骤是：

- (1) 上部结构计算简图为固接（或铰接）在不动支座上的平面框架，如图 1-34（b）所示，求得框架内力进行框架截面设计，支座反力则作为条形基础的荷载。
- (2) 按直线分布假设计算在上述荷载下条形基础的基底反力，然后按如图 1-34（c）所示倒置的梁板或静定分析方法计算基础内力，进行基础截面设计。
- (3) 将基底反力反向作用在地基上计算地基变形，验算建筑物是否符合变形要求。

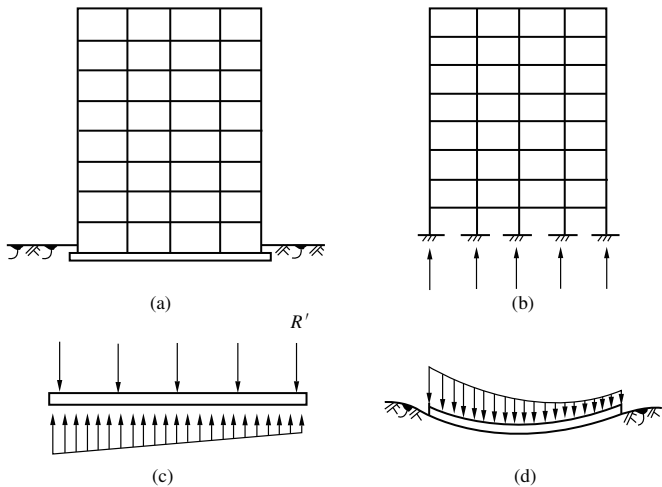


图 1-34 条形基础上平面框架结构的分析

(a) 框架建筑物；(b) 框架计算简图；(c) 基础计算简图；(d) 地基变形计算简图

可以看出，上述方法虽满足了上部结构、基础与地基三者之间的静力平衡条件，但三者的变形是不连续、不协调的。在基础和地基各自的变形下，基础底面和地基表面不再紧密接触，框架底部为不动支座的假设也不复存在，从而按前述假定计算得到的框架、条形基础的内力和变形与实际情况差别很大。

二、地基和基础的相互作用

(一) 基底反力的分布规律

在常规设计方法中，通常假设基底反力呈线性分布。但事实上基底反力的分布是非常复杂的，除了与地基因素有关外，还受基础及上部结构的制约。为了便于分析，下面仅考虑基础本身刚度的作用而忽略上部结构的影响。

1. 柔性基础

抗弯刚度很小的基础可视为柔性基础。它就像一块放在地基上的柔软薄膜，可以随着地基的变形而任意弯曲。柔性基础不能扩散应力，因此基底反力分布与作用于基础上的荷载分布完全一致，如图 1-35 所示。

按弹性半空间理论所得的计算结果以及工程实践经验都表明，均布荷载下柔性基础的沉降呈碟形、即中部大、边缘小，如图 1-35 (a) 所示。显然，若要使柔性基础的沉降趋于均匀，就必须增大基础边缘的荷载，并使中部的荷载相应减少，这样，荷载和反力就变成了如图 1-35 (b) 所示的非均匀的形状了。

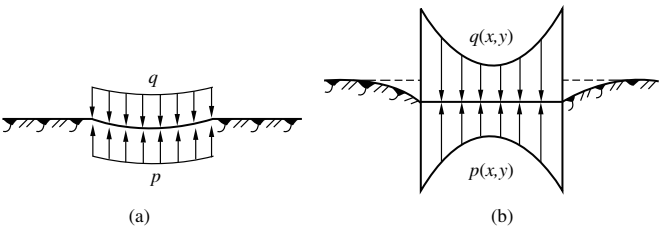


图 1-35 柔性基础的基底反力和沉降

(a) 荷载均匀时， $p(x,y) = \text{常数}$ ；(b) 沉降均匀时， $p(x,y) \neq \text{常数}$

2. 刚性基础

刚性基础的抗弯刚度极大，在中心荷载作用下，基础将均匀下沉。根据上述柔性基础沉降均匀时基底反力不均匀的论述，可以推断，中心荷载下的刚性基础基底反力分布也应该是边缘大、中部小。如图 1-36 (a) 所示的实线反力图为按弹性半空间理论求得的刚性基础基底反力图，在基底边缘处，其值趋于无穷大。事实上，由于地基土的抗剪强度有限，基底边缘处的土体将进入塑性状态，出现反力的重新分布，此处的反力将被限制在一定的数值范围内，最终的反力图可能呈现出如图 1-36 (b) 所示中虚线所示的马鞍形。由此可见，刚性基础能跨越基底中部，将所承担的荷载相对集中地传至基底边缘，这种现象被称为基础的“架越作用”。

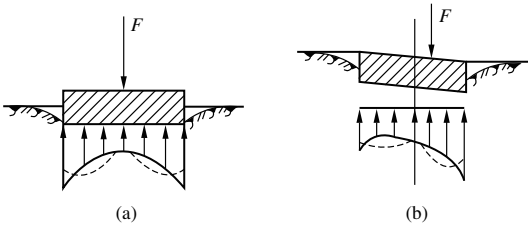


图 1-36 刚性基础

(a) 中心荷载；(b) 偏心荷载

一般来说，无论黏性土或无黏性土地基，只要刚性基础埋深和基底面积足够大，而荷载又不太大时，基底反力均呈马鞍形分布。

3. 基础相对刚度的影响

如图 1-37 (a) 所示为黏性土地基上相对刚度很大的基础。当荷载不太大时，地基中的塑性区很小，基础的架越作用很明显；随着荷载的增加，塑性区不断扩大，基底反力将逐渐趋于均匀。在接近液态的软土中，反力近乎呈直线分布。

如图 1-37 (c) 所示为岩石地基上相对刚度很小的基础，其扩散能力很低，基底出现反力集中的现象，此时基础的内力很小。

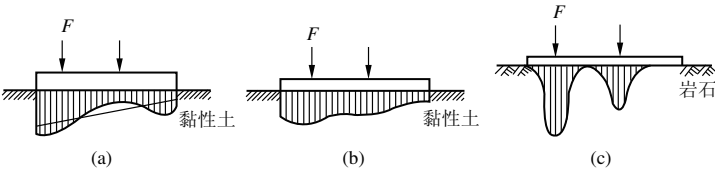


图 1-37 基础相对刚度与架越作用

(a) 基础刚度大；(b) 基础刚度适中；(c) 基础刚度小

对于一般黏性土地基上相对刚度中等的基础，如图 1-37 (b) 所示，其情况介乎于上述两者之间。

基础的架越作用取决于基础的相对刚度、土的压缩性以及基底下塑性区的大小。一般来说，基础的相对刚度越强，沉降就越均匀，但基础的内力将相应增大。当地基局部软硬变化较大时（如石芽型地基），可以采用整体刚度较大的连续基础；而当地基为岩石或压缩性较低的土层时，宜优先考虑采用扩展基础。

(二) 地基非均质性的影响

当地基压缩性显著不均匀时，按常规设计法求得的基础内力可能与实际情况相差很大。如图 1-38 所示地基压缩性不均匀的两种相反情况，两基础的柱荷载相同，但其挠曲情况和弯矩图则截然不同。

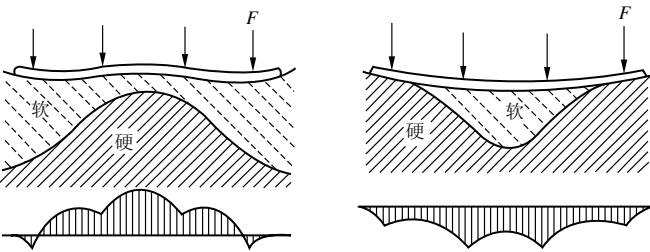


图 1-38 地基压缩性不均匀时的情况

三、地基变形对上部结构的影响

整个上部结构对基础不均匀沉降或挠曲的抵抗能力，称为上部结构刚度。根据整体刚度的大小，可将上部结构分为柔性结构、敏感性结构和刚性结构三类。

以屋架-柱-基础为承重体系的木结构和排架结构是典型的柔性结构。由于屋架铰接于柱顶，这类结构对基础的不均匀沉陷有很大的自适应性，故基础间的沉降差不会在主体结

构中引起多少附加应力。

不均匀沉降会引起较大附加应力的结构，这被称为敏感性结构，例如砌体结构和钢筋混凝土框架结构。敏感性结构对基础间的不均匀沉降较敏感，很小的沉降差异就足以引起可观的附加应力。因此，若结构本身的强度储备不足，就很容易发生开裂现象。

坐落在均质地基上的多层多跨框架结构、其沉降规律通常是中部大、端部小。这种不均匀沉降不仅会在框架中产生可观的附加弯矩，还会引起柱荷载重分配现象，这种现象随着上部结构刚度增大而加剧。对一幢 8 跨 15 层框架结构的相互作用分析表明，边柱荷载增加了 40%，而内柱则普遍卸载，中柱卸载可达 40%。由此可见，对于高压缩性地基上的框架结构，按不考虑相互作用的常规方法设计，结果常使上部结构偏于不安全。

基础刚度越大，其挠曲越小，则上部结构的次应力也愈小。因此，对高压缩性地基上的框架结构，基础刚度一般宜刚而不宜柔；而对柔性结构，在满足允许沉降值的前提下，基础刚度宜小不宜大，而且不一定需要采用连续基础。

刚性结构指的是烟囱、水塔、高炉、筒仓这类刚度很大的高耸结构物，其下常为整体配置的独立基础。当地基不均匀或在邻近建筑物荷载或地面大面积堆载的影响下，有可能出现基础转动倾斜，但几乎不会发生相对挠曲。

四、上部结构刚度的影响

当上部结构具有较大的相对刚度（与基础刚度之比）时，对基础受力状况的影响是不小的。以条形基础讨论，为了便于说明概念，以绝对刚性和完全柔性的两种上部结构对条形基础的影响进行对比。

如图 1-39（a）所示，图中的上部结构假定是绝对刚性的，在地基变形时，各个柱子只能同时下沉；对条形基础的变形来说，相当于在柱位处提供了不动支座，在地基反力作用下，犹如倒置的连续梁。如图 1-39（b）所示中的上部结构假想为完全柔性的，因此，它除了传递荷载外，对条形基础的变形毫无制约作用。由图 1-39（a）、1-39（b）的对比可知，在上部结构为绝对刚性和完全柔性这两种极端情况下，条形基础的挠曲形式及相应的内力图形差别很大。当然，绝大多数建筑物的实际刚度介于绝对刚度和完全柔性之间，实践中可以定性地判断其比较接近哪一种极端情况。例如剪力墙体系和筒体结构的高层建筑是接近绝对刚性的；单层排架和静定结构是接近完全柔性的。这些判断将有助于进行地基基础的设计工作。

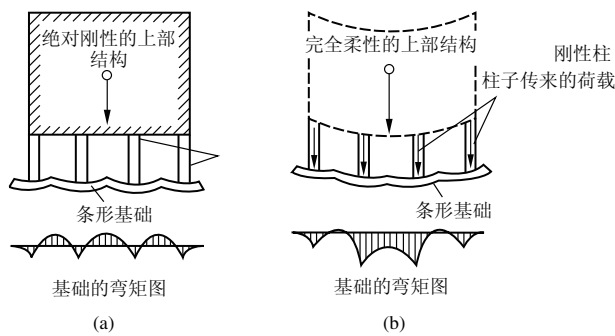


图 1-39 上部结构刚度对基础受力状况的影响
(a) 上部结构为绝对刚性时；(b) 上部结构为完全柔性时

增大上部结构刚度,将减小基础挠曲和内力。研究表明,框架结构的刚度随层数增加而增加,但增加的速度逐渐减缓,到达一定层数后便趋于稳定。例如,上部结构抵抗不均匀沉降的竖向刚度在层数超过5层后就基本上保持不变了。由此可见,在框架结构中下部一定数量的楼层结构明显起着调整不均匀沉降、削减基础整体弯曲的作用,但自身也将出现较大的次应力,且楼层位置越低,其调整作用也越大。

如果地基土的压缩性很低,基础的不均匀沉降很小,则考虑地基-基础-上部结构三者相互作用的意义就不大。因此,在相互作用中起主导作用的是地基,其次是基础,而上部结构则是在压缩性地基上基础整体刚度有限时起重要作用的因素。

思考题

1. 简述地基基础的设计基本原则和一般步骤。
2. 天然地基上的浅基础设计内容及步骤是什么?
3. 浅基础有哪几种分类方法,各自的特点是什么?
4. 影响基础埋深的因素有哪些?
5. 地基承载力的影响因素有哪些?
6. 对于偏心荷载作用时,如何确定基础底面的尺寸?
7. 什么情况下要进行软弱下卧层验算,该如何验算?
8. 建筑物产生不均匀沉降有什么危害,应采用何种措施减小不均匀沉降?
9. 简述地基基础和上部结构相互作用的概念。你认为还有哪些问题有待研究解决?



习题

1. 已知某条形基础底面宽度为 $b=2.5\text{ m}$, 埋深 $d=1.5\text{ m}$, 荷载偏心距 $e=0.04\text{ m}$; 地基为粉质黏土, 内聚力 $c_k=12\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi_k=30^\circ$; 地下水距地表 1.1 m , 地下水位以上土的重度 $\gamma=18.2\text{ kN/m}^3$, 地下水位以下土的重度 $\gamma_{\text{sat}}=19\text{ kN/m}^3$, 用《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 推荐的理论公式, 确定地基的承载力特征值。

2. 某筏型基础底面宽度 $b=15\text{ m}$, 长度 $l=38\text{ m}$, 埋深 $d=2.5\text{ m}$, 地下水位距地表 5.0 m , 场地土为均质粉土, 黏粒含量 $\rho_c=14\%$, 荷载试验得到的地基承载力特征值 $f_{ak}=160\text{ kPa}$, 地下水位以上土的重度 $\gamma=18.5\text{ kN/m}^3$, 地下水位以下土的重度 $\gamma_{\text{sat}}=19\text{ kN/m}^3$, 按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 地基承载力修正特征值公式, 计算地基承载力特征修正特征值。

3. 已知某承重墙, 墙体传至室内外设计地坪平均标高处的荷载 $F_k=160\text{ kN/m}$, 力矩标准值 $M_k=16\text{ kN}\cdot\text{m}$, 基础埋置深度 $d=1.0\text{ m}$, 基础宽度为 $b=1.3\text{ m}$, 地基土层情况如图 1-40 所示, 试验算基础宽度是否满足承载力要求。

4. 某框架柱截面尺寸为 $600\text{ mm}\times 400\text{ mm}$, 传至地面的竖向力标准值 $F_k=1\,200\text{ kN}$, 力矩标准值 $M_k=40\text{ kN}\cdot\text{m}$, 基础底面距室外地坪 $d=1.5\text{ m}$, 基底以上的填土重度 $\gamma=17.5\text{ kN/m}^3$, 持力层为黏性土, 重度 $\gamma=18.5\text{ kN/m}^3$, 孔隙比 $e=0.67$, 液性指数 $I_L=0.78$, 地基承载力特征值 $f_{ak}=240\text{ kPa}$, 如图 1-41 所示, 试确定柱基础的底面尺寸。

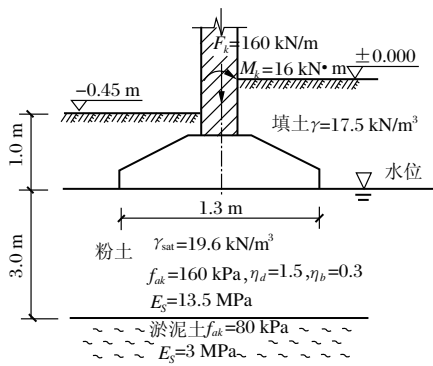


图 1-40 习题 3

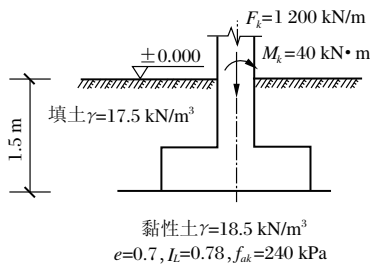


图 1-41 习题 4