基础工程

类目：建筑类
书名：基础工程
主编：于淮 吕洪峰 高周立
出版社：湖南大学出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5667-4106-6
使用层次：通用
出版时间：2025 年 7 月
定价：49.80 元
印刷方式：双色
是否有资源：有

责任编辑：黄　旺
封面设计：旗语书装

建筑类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革新理念教材

基础工程

主编◎于　淮　吕洪峰　高周立

湖南大学出版社

建筑类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革新理念教材
基础工程
主编◎于　淮　吕洪峰　高周立
湖南大学出版社

ISBN 978-7-5667-1106-6
定价：49.80元

基础工程

建筑类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革新理念教材

基础工程

主　编◎于　淮　吕洪峰　高周立
副主编◎饶才金　邓岱丹　于淑桂
刘占兵

湖南大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

基础工程 / 于淮,吕洪峰,高周立主编. -- 长沙:湖南大学出版社,2025.7.--ISBN 978-7-5667-4106-6

Ⅰ.TU47

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20252NQ758 号

基础工程

JICHU GONGCHENG

主　　编: 于　淮　吕洪峰　高周立
责任编辑: 黄　旺
印　　装: 唐山唐文印刷有限公司
开　　本: 889 mm×1194 mm　1/16　**印　　张:** 15.25　**字　　数:** 391 千字
版　　次: 2025 年 7 月第 1 版　**印　　次:** 2025 年 7 月第 1 次印刷
书　　号: ISBN 978-7-5667-4106-6
定　　价: 49.80 元

出 版 人: 李文邦
出版发行: 湖南大学出版社
社　　址: 湖南·长沙·岳麓山　**邮　　编:** 410082
电　　话: 0731-88822559(营销部),88821174(编辑室),88821006(出版部)
传　　真: 0731-88822264(总编室)
网　　址: http://press.hnu.edu.cn
电子邮箱: xiaoshulianwenhua@163.com

前言 Preface

“基础工程”是土木类专业的一门重要的专业核心课，是土木类专业学生和工程技术人员必须掌握的一门现代科学。

“基础工程”以建筑物的地基、基础为对象，应用土力学的基本原理和方法来研究建筑物地基和基础的承载力和变形等问题，以保证建筑物的安全和正常使用。随着我国现代化建筑事业的突飞猛进，基础工程领域新理论、新技术、新设备、新材料、新工艺等持续发展。

我国地域辽阔，土类众多，重大基础设施建设总量居世界之首。近年来开展的重大土木工程建设项目规模大、投资大、发展迅速，极大地推动了土木类专业的发展及技术的进步。基础工程的各项相关技术发展日新月异，已不局限于传统基础工程领域，地下、海洋和交通岩土工程等也逐渐成为国家土木工程建设的大方向。

本教材选择最基本、必要的内容，注重与工程实际紧密结合，以满足土木类专业学生的教学需求。通过本课程的学习，学生应该掌握地基基础设计的基本原则，能够对一般土木工程基础进行选型、设计和评价，具备从事基础工程管理的能力，能对常见的基础工程事故做出科学的分析，并提出有效可行的处理方案。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请各位读者批评指正。

编　者

目录 Contents

第1章 绪 论

学习目标

本章主要介绍地基、基础的基本概念及重要性，基础工程的发展概况及学科特点。

通过本章的学习，学生应了解基础工程的重要性及发展概况，掌握基础工程课程特点及学习要求。

1.1 概 述

基础工程的研究对象是地基与基础。地基是支承建筑物的土体或岩体，基础则是将结构所承受的各种作用传递到地基上的结构组成部分。

1.1.1 地基

任何建筑物(构筑物)，如房屋、桥梁、码头、堤坝、地铁站等，都建造在地面以下一定深度的地层上(土层或岩层)，通常把支承建筑物的土层称为地基(subgrade)，其主要功能是承担建筑物的全部荷载；将建筑物最底端的构件或部分结构称为基础(foundation)，其主要功能是将上部结构所承载的荷载传递到地基，如图 1-1 所示。基础工程的设计与施工需要确保地基满足强度、变形和稳定性要求，基础满足强度、刚度和耐久性要求。

根据地基的地质条件，地基可分为土基(soil subgrade)和岩基(rock subgrade)；按照地基处置方式，地基可分为天然地基(natural subgrade)和人工地基(artificial subgrade)。当基础直接建造在未经加固的天然土层上时，这种由天然状态岩土体构成的地基称为天然地基。当天然地基软弱，不能满足地基强度、变形或稳定性等要求时，则要进行地基处理(例如采用排水固结、换土垫层、深层密实、化学加固、加筋等处理方式)，这种经过处理的地基称为人工

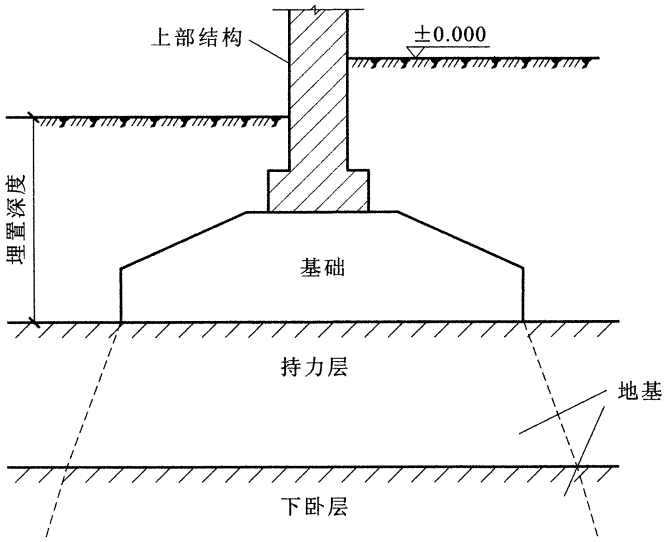

图 1-1　地基与基础示意图

地基。显然，采用天然地基是较为经济的优选方案。

天然地基通常由土和岩石组成。《岩土工程勘察规范(2009 年版)》(GB 50021—2001)将土按照地质年代划分为老沉积土(主要是第四纪晚更新世及以前沉积的土)、一般黏性土(主要是第四纪全新世早期沉积的土)和新沉积土(第四纪全新世中近期沉积的土)。按照地质成因，将土划分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土、淤积土、冰碛土和风积土。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)将建筑地基的岩土分为六类，包括岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土。岩石是由一种或几种矿物和天然玻璃组成的，具有稳定外形的固态集合体。按照饱和单轴抗压强度，岩石可分为坚硬岩、软硬岩、较软岩、软岩和极软岩。岩土是不同地质作用的产物，其物质成分、土体结构、工程特性及空间分布会因不同的地质作用而产生明显的不均匀性和差异性。

地基的承载能力与岩土的工程特性有着密不可分的关系。通常采用地质勘查的手段评估岩土的工程特性，可采用强度指标、压缩性指标、固结参数、静力触探探头阻力、动力触探锤击数、标准贯入试验锤击数、荷载试验承载力等特性指标表达。当上部结构荷载通过基础传递到地基时，在地基中的附加应力随深度呈非线性减少，至一定深度范围后，上部荷载对地基的附加应力影响微小。一般情况下，其影响深度范围为基础宽度的 1.5～5 倍，宽度范围为基础宽度的 1.5～3 倍，视基础的形状与荷载形式而异。

1.1.2　基础

建筑物在地面以下的结构部分通常被称为基础。基础的作用是支承上部结构荷载，并将上部荷载传递至地基。一般情况下，基础应有一定的埋置深度，使基础底面直接作用在工程特性较好的土层中。根据埋置深度(从室外地面到基底的距离，如图 1-1 所示)的不同，基础可分为浅基础和深基础。对于埋置深度不大(小于或相当于基础底面的宽度)，只需进行挖槽、排水等普通施工工序就可建造起来的基础通常称为浅基础；埋置深度较深、采用专门的施工方法和机具建造的基础通常称为深基础。浅基础一般包括无筋扩展基础、扩展基础以及连续基础等。深基础一般包括桩基础、沉井基础、地下连续墙基础等。浅基础和深基础的划分是

相对的。在实际工程中，需要综合考虑上部结构、地基承载力、地基变形以及对周围建筑物的影响等因素，选取建筑物的基础形式。

1.2　基础工程的重要性

扫一扫

基础工程的重要性

地基与基础是建筑物的根基，地基的勘察和基础的设计、施工及监测直接关系到建筑物的安全性、耐久性及经济性。随着高层建筑以及大跨度、大空间结构在工程建设的应用，基础工程的重要性及技术难度逐步提高。通常，基础工程占建筑物工程总造价的 20%～30%，工期占总工期的 25%～30%。另外，基础工程属于隐蔽工程，一旦地基基础发生事故，补救就非常困难，往往需要花费大量的财力，有些甚至无法补救。因此，基础工程的重要性是显而易见的，准确地了解地基情况，选择合理的基础形式，进行可靠的设计，有着重要的工程价值和经济意义。

1.2.1　地基基础事故

国内外建筑工程事故调查表明，多数工程事故源于地基基础问题，特别是在软弱地基或不良地基地区，地基基础问题尤为突出。地基基础属于地下隐蔽工程，建筑工程竣工后难以检查，使用期间出现缺陷事故苗头也不易察觉。一旦发生事故，就难以补救，甚至造成灾难性的后果。因此，建设工程中的地基基础工程的缺陷和事故，具有普遍性、地方性、隐蔽性和严重性的特点。一般主要反映在地基的强度破坏或地基产生过大的变形。常见的地基基础工程事故分类如下：

(1)地基强度造成工程事故

结构物作用在地基上的荷载超过地基承载力，地基将产生剪切破坏，包括整体剪切破坏、局部剪切破坏和冲切剪切破坏三种形式。地基产生剪切破坏使建筑物倒塌或破坏，这是重大的工程事故，后果是灾难性的。

(2)地基变形造成工程事故

地基在建筑物荷载作用下产生沉降，一般包括瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降三部分。当总沉降量或不均匀沉降超过建筑物允许沉降值时，影响建筑物正常使用造成工程事故。特别是不均匀沉降，可能会导致建筑物上部结构产生裂缝，整体倾斜，严重的造成结构破坏。

(3)地基渗流造成工程事故

地基中渗流可能造成两类问题：一类是因渗流而引起地下水流失，另一类是在渗透力作用下产生流土、管涌。地下水位下降引起地基中有效应力改变，导致地基沉降，严重的可造成工程事故。

(4)边坡滑动造成工程事故

建在边坡上或边坡坡顶和边坡坡脚附近的建(构)筑物会因边坡滑动产生破坏。造成边坡滑动的原因很多，包括坡上加载、坡脚取土等人为因素，土中渗流改变土的物理力学性能，以及土体因蠕变产生较大变形等。

(5)地震造成工程事故

地震对建筑物的影响不仅与地震烈度有关，还与建筑场地效应、地基土的动力特性有关。

调查发现，普遍存在同一烈度区内建筑物破坏程度有显著差异。对同一类土，因地形不同，可以出现不同的场地效应，房屋的震害也就不同。在同样的场地条件下，黏土地基和砂土地基、饱和土地基和非饱和土地基上房屋的震害差别也很大。地震对建筑物的破坏还与基础形式、上部结构、体型、结构形式及刚度有关。

(6)特殊土地基工程事故

特殊土地基主要指湿陷性黄土地基、膨胀土地基、冻土地基以及盐渍土地基等。特殊土的工程性质与一般土不同，特殊土地基工程事故也有其特殊性。

湿陷性黄土在天然状态上具有较高强度和较低的压缩性，但受水浸湿后，结构迅速破坏，强度降低，产生显著附加下沉。在湿陷性黄土地基上建造建筑物前，如果没有采取措施消除地基的湿陷性，则地基受水浸湿后往往易发生事故，影响建筑物正常使用和安全，严重时甚至导致建筑物破坏。

土中水冻结时产生冻胀，在融化时产生收缩。土体冻结后，抗压强度提高，压缩性显著减小。土体融化时具有较大的流变性。冻土地基因环境条件改变，地基土体产生冻胀和融化，导致建筑物开裂甚至破坏，影响其正常使用和安全。

盐渍土含盐量高，固相中有结晶盐，液相中有盐溶液。盐渍土地基浸水后，因盐溶解而产生地基溶陷。另外，盐渍土中盐溶液会腐蚀建筑物材料。地基溶陷和建筑物材料被腐蚀都可能影响建筑物的正常使用和安全，严重时可导致建筑物破坏。

(7)其他地基工程事故

除了上述原因外，地下工程(地下铁道、地下商场、地下车库、人防工程等)的兴建，地下采矿造成的采空区，均可能导致影响范围内地面下沉造成地基工程事故。

1.2.2 典型事故

作为地下隐蔽工程，地基和基础的设计与施工，不可预见因素较多，完工后施工质量不易检查，使用期工程隐患不易察觉。基础相关的工程问题如果处理不好，轻则导致墙体和楼板等开裂并影响构件的鲁棒性和耐久性，重则造成建筑物倾斜甚至倒塌。下面是几个典型的地基和基础工程事故实例。

意大利的比萨斜塔，位于意大利托斯卡纳省比萨城北面的奇迹广场。比萨斜塔于1173年动工，1178年建至第4层中部，高度约29m，因塔身出现明显倾斜而停工。1272年复工，经6年时间，建至第7层(高48m)，再停工中断82年，1360年复工，于1370年竣工。全塔共8层，高度约60m。全塔总荷载约142MN，基础底面平均压力约500kPa。地基持力层为粉砂，下卧层为粉土和黏土层。因地基压缩层不均匀，排水缓慢，北侧下沉1m多，而南侧下沉近3m。南北两端沉降差1.80m，塔顶偏离中心线已达5.27m，倾斜5.5°。1932年灌注1000t水

泥也未纠偏奏效。1990年1月停止对游客开放。1992年7月，加固塔身，用取土法进行地基处理，对斜塔进行纠偏加固。2001年12月再次向游客开放。

建于1913年的加拿大特朗斯康谷仓(Transcona Grain Elevator)，长59.4m，宽23.5m，高31.0m，共由65个圆筒仓组成。谷仓基础采用钢筋混凝土筏板基础，厚61cm，埋深3.66m。谷仓自重200MN。建成后装载318.22MN谷物时，1小时竖向沉降达30.5cm，24h倾斜26°53′，西端下沉8.8m，东端上抬1.5m，上部钢筋混凝土筒仓完好无损。事故调查发现：谷仓施工地段未开展地质勘查，设计师根据相邻结构物基槽开挖的取土试验结果，计算谷仓地基的承载力。1952年对该地段开展地质勘查，发现地基实际承载力远小于谷仓破坏时基底压应力。因此，谷仓地基因超载发生强度破坏而滑动。事后在基础下面做了70多个着力于基岩的混凝土墩，使用388个500kN千斤顶以及支撑系统，才把仓体逐渐纠偏过来，但谷仓基础标高比原来降低了4m。

上海展览中心馆原称上海工业展览馆，位于上海市区延安中路北侧。展览馆中央大厅为框架结构，箱形基础，展览馆两翼采用条形基础。箱形基础为两层，埋深7.27m。箱基顶面至中央大厅顶部塔尖，总高96.63m。地基为高压缩性淤泥质软土。展览馆于1954年5月开工，当年底实测地基平均沉降量为60cm。1957年6月，中央大厅四周的沉降量最大达146.55cm，最小为122.8cm。到1979年，累计平均沉降量为160cm，从1957年至1979年共22年的沉降量仅20cm左右，不及1954年下半年沉降量的一半，说明沉降已趋于稳定。但由于地基严重下沉，不仅使散水倒坡，而且使建筑物内外连接的水、暖、电管道断裂，付出相当大的代价才完成修复工作。

日本为缓解大阪国际机场(又称伊丹机场)的拥挤和噪声问题，决定于1987年开始建设关西国际机场。由于大阪周边没有足够的土地来建设新机场，日本政府决定填海造岛，然后在岛上建造机场。这个人工岛占地约1067.7hm^2，相当于150个足球场。机场有两个航站楼和两条跑道，最长的跑道有4000m。机场总建设费用高达1.45兆日元，约合1300亿元人民币。关西国际机场一经开通就受到了世界各地的赞誉和关注，被誉为“新世纪的奇迹”和“工程学的杰作”，甚至获得了美国ACSE学会颁布的世界十大里程碑工程奖项。然而，据统计，在机场开始运营的首年内，人工岛就下沉了50cm。为防止海水淹没人工岛，日本政府和机场管理方采取了一系列措施，比如在地下室内建造一堵水泥墙以防止海水渗入，加高防潮堤坝；强化排水功能，增加填海量和加固地基等。这些措施虽然在一定程度上减缓了下沉的速度，但是也增加了机场的维护成本和债务负担。

2009年6月27日，上海闵行区莲花南路、罗阳路口西侧“莲花河畔景苑”小区，一栋在建的13层住宅楼全部倒塌，管桩折断。莲花河畔小区共有5幢住宅楼，其中倒塌楼房距防汛墙最近。调查结果显示倾覆的主要原因是，楼房北侧在短期内堆土高达10m，南侧正在开挖4.6m深的地下车库基坑，两侧压力差导致土体产生水平位移，过大的水平力超过了桩基的抗侧能力，导致房屋倾倒。同时，10m高的堆土是快速堆上的，这部分堆土是松散的，在雨水的作用下，堆土自身会滑动，滑动的动力水平作用在房屋的基础上，不但使该楼水平位移，更严重的是这个力与深层的土体滑移力引成一对力偶，加速桩基倾斜。高层建筑上部结构的重力对基础底面积形心的力矩随着倾斜的不断扩大而增加，最后使得高层建筑上部结构向南迅速倒塌。

以上所举的工程事故，特别是地基基础方面的原因分析，不但使人们充分认识到基础工

程的重要性，还给人们带来许多有益的思考，并使人从中吸取经验和教训。只有深入地了解地基情况，掌握勘察资料，经过精心设计与施工，才能保证基础工程经济合理、安全可靠。随着我国工程建设的发展，相信会碰到更多的基础工程问题，也会不断出现新的热点和难点亟须解决，而土力学和基础工程将在克服这些难点的基础上得到新的发展。

1.3 基础工程的发展概况

1.3.1 基础工程学科

基础工程学科研究的是各类建(构)筑物(房屋建筑、桥梁建筑、水工建筑、隧道工程等)的地基基础和挡土结构物的设计和施工，以及为满足基础工程要求进行的各种地基处理方法。基础工程是岩土工程的一个重要组成部分，即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。因为基础是建筑物结构的一部分，在基础设计中需要进行大量的结构计算，所以基础工程学也与结构计算理论及计算技术密切相关。

基础工程是土木工程学科的一个重要分支，是人类在长期的生产实践中发展起来的一门应用学科，是一门古老的工程技术和年轻的应用科学。追本溯源，世界文化古国的先民，早在史前的建筑活动中就创造了自己的基础工程工艺。早在 50 万年前，北京周口店“北京猿人”洞穴建成；4200 年前，大禹治水工程完工；4000 年前，黄帝古都的古城建成，采用 10m 深填土夯实后作为墙基。2000 多年来在世界各地建造的宫殿楼宇、寺院教堂、长城运河、码头堤岸等工程，如我国都江堰水利工程、举世闻名的万里长城、隋朝南北大运河、黄河大堤、赵州石拱桥等，都因奠基牢固，虽然经历了无数次强风、强震，仍安然无恙。但是，古代劳动人民的大量基础工程实践经验主要体现在能工巧匠的高超技艺上，由于受当时生产力水平的限制，还未能形成系统的科学理论。

18 世纪欧洲工业革命开始以后，随着资本主义工业化的发展，城建、水利、道路等建筑规模也在不断扩大，人们对基础工程更加重视并开展了研究，当时体现在作为基础工程学科理论基础的土力学方面的工作。1773 年，法国 coulomb 提出了砂土抗剪强度公式，1776 年提出了挡土墙土压力理论，1857 年 Rankine 从另一途径提出了挡土墙的土压力理论，有力地促进了基础工程的发展。19 世纪末，美国采用人工挖孔桩；1899 年，俄国提出了混凝土灌注桩技术；1901 年，美国提出了沉管灌注桩技术；1925 年，太沙基归纳了以往在土力学方面的主要成就，发表了《土力学》专著；1936 年，国际土力学与基础工程学会成立，举行了第一届国际土力学及基础工程会议，从而带动了各国学者对基础工程进行研究和探索，推进了本学科的发展。20 世纪 50 年代后，随着现代科学新成就的渗入，基础工程理论与技术得到了进一步发展，成为较成熟的独立的现代科学。

1.3.2 基础工程现状

对场地条件较好、上部结构简单的建筑物和构筑物，一般采用基础工程的常规分析方法，即不考虑地基土、基础及上部结构的相互作用。从20世纪50年代开始，上部结构、基础与地基共同作用的研究课题引起了国内外学者的重视。研究内容从最初的弹性地基上的梁板分析发展到非线性地基模型上的子结构分析。

大量工程涉及各类软弱地基与不良地基的处理问题。在土质较为软弱的地区，复合地基处理越来越成为地基处理的主要形式，广泛用于房屋建筑、铁路与公路、码头与堆场、油罐等的地基处理。在软土地区路堤柱体式加固方法中常用的竖向加固体有碎石桩、挤密砂桩、石灰桩、深层搅拌桩、旋喷桩、混凝土桩、预制桩、PCC(大直径薄壁筒桩)、Y形灌注桩及其他复合加固体。土工合成材料在地基处理中的应用越来越广泛，对地基特别是铁路、公路路基的承载力、沉降的研究已取得深入成果。近几年来，地基处理发展的一个典型趋势就是在既有的地基处理方法基础上，不断发展新的地基处理方法，特别是将多种地基处理方法进行综合使用，形成了极富特色的复合加固技术。这些复合加固技术发展特点主要体现在如下5个方面：

①由单一加固技术向复合加固技术发展。

②复合地基的加固体由单一材料向复合加固体发展。

③复合地基加固技术与非复合地基加固技术相结合。

④静力加固与动力加固技术相结合。

⑤机械加固与非机械加固相结合。

自1962年以来，我国召开了多次全国土力学与基础工程会议，并建立了许多地基基础研究机构、施工队伍和试验室，培养了大批地基基础专业人才。不少学者对基础工程的理论和实践做出了重大贡献，受到了国际岩土界的重视。进入21世纪，大型公共建筑项目、大跨桥梁工程、住宅产业项目、海上风电、地下空间开发利用、城市地下交通建设等规划设计、施工综合研究的需求，为基础工程科学的发展提供了广阔的空间。在建筑基础领域，2016年完工的中国第一高楼上海中心大厦采用桩基础，基础埋深30m，桩长达到86m，混凝土底板厚6m，共消耗6万立方米混凝土；在桥梁基础领域，五峰山长江大桥沉井长度超过了100m，宽度超过了70m，高度达50余米，平面尺寸比标准足球场更大；在海上风电领域，大直径超长钢管桩应用尤为广泛，目前得到应用的钢管桩桩长已经突破130m，单桩直径突破了6m。

这些年陆续编制的规范、规程有《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)、《岩土工程勘察规范(2009年版)》(GB 50021—2001)、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)、《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》(JGJ 6—2011)、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)、《既有建筑地基基础加固技术规范》(JGJ 123—2012)、《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)等。这些规范、规程都是基础工程各个领域中取得的科研成果和工程经验的高度概括，反映了这些年来基础工程的发展水平，为我国基础工程设计与施工做到技术先进、经济合理、安全适用、保护环境、确保质量提供了充分的理论与实践依据。

1.3.3 基础工程发展方向

(1)基础工程理论

基础工程理论向着以地基变形为控制设计理论的方向发展，同时在地基、基础、复合地基理论及计算方法等研究方向取得新进展。

(2)现场原位测试技术和基础检测技术

为了获得地基的第一手资料，尽量减少取土样以及提高试验结果的质量，原位测试技术和方法将有很大发展。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。

(3)基础形式和施工方法

基础的形式和施工方法将不断创新，特别是高层建筑及深水深海建(构)筑物的增多，使得深基础出现一些新的类型；基础平面设计也向着复杂的异形平面发展。由于深基础的要求，深基坑的开挖及支护工程将成为基础工程的重要内容。

(4)地基处理技术和方法

地基处理技术和方法将会不断完善，新技术及方法将会陆续出现。在实际的工程中，宜结合基础工程要求及现场地基的特点，准确选择最适宜该工程的地基处理方法。

(5)其他方面

既有地基基础的检测、鉴定和加固技术将得到发展及应用，对已有建筑物的地基基础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应用。

1.4 本课程的特点和学习要求

1.4.1 基础工程课程特点

(1)基础工程是重要的专业课程

“万丈高楼平地起。”基础工程的优劣直接关系到建筑物的安危，既要谨慎对待，又不能过分保守，关键是要对地基基础原理和规范能正确理解和运用。因此，基础工程是十分重要的工程。本课程是土木工程专业的一门主干课程。学好这门课程，对于将来从事地基基础工程的设计、施工、检测与加固是十分重要的。

(2)基础工程课程内容广泛

基础工程是一门理论性和实践性都很强的学科，许多内容涉及工程地质学、土力学、结构设计和施工等几个学科领域，因此必须很好地掌握上述先修课程的基本内容和基本原理，为本课程的学习打好基础。本课程内容广泛、综合性强，学习时应该突出重点，兼顾全面。

此外，基础工程几乎找不到完全相同的实例，在处理基础工程问题时，必须运用本课程的基本原理，综合土木工程各个学科理论知识，深入调查研究，针对不同情况进行具体分析。

(3)基础工程涉及的规范、规程多

基础工程的设计和施工必须遵循相关的规范、规程。土木工程专业涉及的规范、规程比较多，且这些规范、规程有许多不协调之处。因此，在理论学习阶段，应以学科基本知识体系为主，弄清基础工程设计和施工中的主要内容和基本方法；在课程设计中，可根据不同专业方向，使用各自的行业规范、规程，进行具体工程的设计实践训练。

1.4.2 学习要求

学习基础工程课程时，要求应用学习过的基本知识，结合有关结构及施工技术知识合理分析和解决地基基础问题。要仔细分析各种理论及公式的基本假定及使用条件，不仅要了解公式推导，而且要理解和应用公式并结合当地的基础工程实践经验加以应用。

不同的自然地理环境，分布着各种各样的土类。某些土类作为地基具有其特殊性质，因而必须针对其特殊性质采取相应的工程措施。因此，地基基础问题具有明显的区域性特征。此外，地层的性质和分布也因地而异，且在较小范围内可能变化很大。基础工程的设计，除需要丰富的理论知识外，还需要较多的工程实践知识，并通过勘察和测试取得可靠的有关土层的分布情况及其物理力学性质指标。因此，学习时应注意理论联系实际，通过各个教学环节，紧密结合工程实践，提高理论认识和增强处理地基基础问题的能力。

思考练习

1. 什么是地基？什么是基础？地基与基础之间有何区别和联系？

2. 从可靠性设计角度来看，地基和基础设计需满足哪些要求？

3. 地基基础事故的原因有哪些？搜集一些典型事故，从土力学的基本理论分析其事故原因。

4. 根据基础工程的发展现状，说明基础工程发展的趋势，并针对其中一项进行重点阐述。

第2章 地基勘察

学习目标

本章针对地基勘察进行详细讲解，该部分内容与工程地质学、岩土工程勘察、工程岩土学关系密切。通过各种勘察手段和方法对地基进行勘察，可调查研究和分析评价建筑场地和地基的工程地质条件，为设计和施工提供所需的工程地质资料。

通过本章学习，学生应了解工程地质勘察的目的和内容、勘察方法、勘察报告的内容，学会阅读、使用工程地质勘察报告。

2.1 概 述

地基勘察属于岩土工程勘察的范畴，是把工程地质学知识应用于实际的过程。地基勘察的目的在于以各种勘察手段和方法，调查研究和分析评价建筑场地和地基的工程地质条件，为设计和施工提供所需的工程地质资料。地基勘察和评价的任务是，认识场地的地质条件，分析它与建筑物之间的相互影响，因此，地基勘察工作应该遵循基本建设程序，走在设计和施工前面，采取必要的勘察手段和方法，提供准确无误的地基勘察报告。地基勘察必须遵守国家标准《岩土工程勘察规范(2009 年版)》(GB 50021—2001)(以下简称《勘察规范》)的有关规定。

建筑场地的工程地质条件一般包括：岩土的类型及其工程性质、地质构造、地形地貌、水文地质条件、不良地质现象和可资利用的天然建筑材料等。

对于不同地区，场地的工程地质条件可能有很大差别。以山区和平原区为例，从岩土类型及其工程性质看，山区以基岩为主，岩性坚硬，力学性质较强，平原区则以土层为主，力学性质较弱；从地质构造看，山区基岩常有褶皱、断层和节理，而平原区则以各类土层相互组合成各种形态的层理构造为主。由于两类地区的岩土类型、性质及地质构造的差异，其工

程地质条件的其他因素也随之不同。由于不同地区工程地质条件在性质上、主次关系配合上的不同，其勘察任务、勘察手段和评价内容也随之而异。针对工业与民用建筑的需要，本章着重系统介绍建筑物地基勘察的任务和内容、方法以及地基勘察报告。

2.2　地基勘察的任务和内容

2.2.1　地基勘察与岩土工程等级的关系

地基勘察任务和内容的确定和勘察的详细程度与工作方法的选择、建筑场地、地基岩土性质及建筑物条件有关。场地工程地质条件和地基岩土性质因地而异，建筑物的类型和重要性也各不相同，因而，地基勘察的任务和内容也因地、因建筑物而异。在地质条件复杂地区，对场地的地质构造、不良地质现象、地震烈度、特殊土类等必须查明其分布及危害程度，因为这些是评价场地稳定性、地基承载力和地基变形的主要因素。在不良地质发育或极软弱土层分布区，如果勘察不详或分析结论有误，对建筑物危害较大，因而勘察必须慎重、详尽。此外，勘察还与建筑物条件有关，《工程结构可靠性设计统一标准》按结构破坏可能产生的后果的严重性，将建筑物分为三个安全等级(表 2-1)。不同安全等级的建筑物对勘察工作的要求不同。

表 2-1　建筑物安全等级

安全等级	破坏后果	示例
一级	很严重：对人的生命、经济、社会或环境影响很大	大型的公共建筑等
二级	严重：对人的生命、经济、社会或环境影响较大	普通的住宅和办公楼等
三级	不严重：对人的生命、经济、社会或环境影响较小	小型的或临时性储存建筑等

《勘察规范》结合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)的建筑物安全等级划分，按照下列三方面条件，将岩土工程划分为一、二、三级三个等级。其中以一级岩土工程的自然条件最为复杂，技术要求的难度最大，工作环境最不利。现将划分的条件简要介绍如下：

①场地条件。包括抗震设防烈度和可能发生的震害异常、不良地质作用的存在和人类对场地地质环境的破坏、地貌特征以及获得当地已有建筑经验和资料的可能性。

②地基土质条件。指是否存在极软弱的或非均质的需要采取特别处理措施的地层，极不稳定的地基或需要进行专门分析和研究的特殊土类，对可借鉴的成功建筑经验是否仍需进行地基土的补充性验证工作。

③工程条件。包括建筑物的安全等级、建筑类型(超高层建筑、公共建筑、工业厂房等)、建筑物的重要性(具有重大意义和影响的或属于纪念性、艺术性、附属性、补充性的建筑物)、基础工程的特殊性(进行深基坑开挖、超长桩基、精密设备或有特殊工艺要求的基础、高填斜坡、高挡墙、基础托换或补强工程)。

岩土工程的等级划分，有利于对岩土工程各个工作环节按等级区别对待，确保工程质量和安全。因此它也是确定各个勘察阶段中的工作内容、方法以及详细程度所应遵循的规则。

工业与民用建筑工程的设计分为场址选择、初步设计和施工图三个阶段。为了提供各设计阶段所需的工程地质资料，勘察工作也相应分为选址勘察、初步勘察和详细勘察三个阶段。对于地质条件复杂或有特殊施工要求的重大建筑物地基，尚应进行施工勘察；反之，对地质条件简单、面积不大的场地，其勘察阶段可适当简化。

2.2.2 选址勘察基本要求

选址勘察的目的是取得几个场址方案的主要工程地质资料，对拟选场地的稳定性和适宜性做出工程地质评价和方案比较。

选择场址时，应进行技术经济分析，一般情况下宜避开下列工程地质条件恶劣的地区或地段：

①不良地质现象发育且对建筑物构成直接危害或潜在威胁的场地。

②设计地震烈度为 8 度或 9 度的发震断裂带。

③严重受洪水威胁或地下水的不利影响的场地。

④在可开采的地下矿床或矿区的未稳定采空区上的场地。

选址阶段的勘察工作，主要侧重于搜集和分析区域地质、地形地貌、地震、矿产和附近地区的工程地质资料及当地的建筑经验，并在搜集和分析已有资料的基础上，抓住主要问题，通过踏勘，了解场地的地层岩性、地质构造、岩石和土的性质、地下水情况以及不良地质现象等工程地质条件。搜集的资料不满足要求或工程地质条件复杂时，也可以进行工程地质测绘并辅以必要的勘探工作。

2.2.3 初步勘察基本要求

经过选址勘察对场地稳定性做出全局评价以后，还存在建筑地段局部稳定性(包括地震效应在内)的评价问题。初步勘察(简称初勘)的任务之一就在于查明建筑场地不良地质现象的成因、分布范围、危害程度及其发展趋势，以便使场地内主要建筑物(如工业主厂房)的布置避开不良地质现象发育的地段，确定建筑总平面布置。

初勘的任务还在于初步查明地层及其构造、岩石和土的物理力学性质、地下水埋藏条件以及土的冻结深度，为主要建筑物的地基基础方案以及对不良地质现象的防治方案提供工程地质资料。

初勘时勘探线的布置应垂直于地貌单元边界线、地质构造线和地层界线，对一级建筑物应按建筑物的体型纵横两个方向布置勘探线。勘探点应该布置在这些界线上，并在变化最大的地段予以加密。在地形平坦土层简单的地区，可按方格网布置勘探点。

对每个地貌单元都应设有控制性勘探孔(勘探孔是指钻孔、探井、触探孔等)到达预定深度，其他一般性勘探孔只需达到适当深度即可。前者一般占勘探孔总数的 1/5～1/3。勘探线和勘探点的间距、勘探孔深度可根据岩土工程等级按《勘察规范》选定。在井、孔中取试样或进行原位测试的竖向间距应按地层的特点和土的均匀性确定，各土层一般均需采取试样或取得测试数据，详见《勘察规范》的规定。

2.2.4　详细勘察

经过选址和初步勘察之后，场地工程地质条件已基本查明，详细勘察(简称详勘)的任务在于针对具体建筑物地基或具体的地质问题，为进行施工图设计和施工提供可靠的依据或设计计算参数。因此必须查明建筑物范围内的地层结构、岩石和土的物理力学性质，对地基的稳定性及承载能力做出评价，并提供不良地质现象防治工作所需的计算指标及资料，此外，还要查明有关地下水的埋藏条件和腐蚀性、地层的透水性和水位变化规律等情况。

详勘的手段主要以勘探、原位测试和室内土工试验为主，必要时可以补充一些物探和工程地质测绘和调查工作。详勘勘探点的布置应按岩土工程等级确定：对一、二级建筑物，宜按主要柱列线或建筑物的周边线布置勘探点；对三级建筑物可按建筑物或建筑群的范围布置勘探点；对重大设备基础，应单独布置勘探点。勘探点间距视建筑物和岩土工程等级而定。

详勘勘探孔深度以能控制地基主要受力层为原则。当基础短边不大于 5m，且在地基沉降计算深度内又无软弱下卧层存在时，勘探孔深度对条形基础一般为 $3b$(b 为基础宽度)，对单独基础为 $1.5b$，但不应小于 5m。对须进行变形验算的地基，控制性勘探孔应达到地基沉降计算深度。在一般情况下，控制性勘探孔深度应考虑建筑物基础宽度、地基土的性质和相邻基础影响，按《勘察规范》选定。

取试样和进行原位测试的井、孔数量，应按地基土层的均匀性、代表性和设计要求确定，一般占勘探孔总数的 1/2～2/3，且每个场地不少于 3 个。取试样或进行原位测试部位的竖向间距，一般在地基主要受力层内每隔 1～2m 采取试样，但对每个场地或每幢独立的重要建筑物，每一主要土层的试样一般不少于 6 个，原位测试数据一般不少于 6 组。对位于地基主要受力层内厚度大于 0.5m 的夹层或透镜体，一般均需采取试样或进行原位测试。

2.2.5　勘察任务书

在勘察工作开始之前，设计和兴建单位应按工程要求把“地基勘察任务书”提交受委托的勘察单位，以便制订勘察工作计划。

任务书应说明工程的意图、设计阶段、要求提交勘察成果(即勘察报告书)的内容和目的，提出勘探技术要求等，并提供勘察工作所必需的各种图表资料，这些资料视设计阶段的不同而有所差别。

为配合初步设计阶段进行的勘察，在任务书中应说明工程类别、规模、建筑面积及建筑物的特殊要求，主要建筑物的名称、最大荷载、最大高度、基础最大埋深，最大设备尺寸等有关资料，并向勘察单位提供附有坐标的、比例为 1∶2000～1∶1000 的地形图，图上应划出勘察范围。

对详细设计阶段，在勘察任务书中应说明需要勘察的各建筑物的具体情况，如建筑物的上部结构特点、层数、高度、跨度及地下设施情况，地面整平标高，采取的基础形式、尺寸和埋深，单位荷载或总荷载以及有特殊要求的地基基础设计和施工方案等，并附有经上级部门批准的附有坐标及地形的建筑总平面布置图(1∶2000～1∶500)。如有挡土墙时还应在图中注明挡土墙位置、设计标高以及建筑物周围边坡开挖线等。

2.3 地基勘察的方法

扫一扫

地基勘察的方法

2.3.1 工程地质测绘与调查

工程地质测绘与调查的目的是通过对场地的地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水与地表水、不良地质现象进行调查研究与必要的测绘工作，为评价场地工程地质条件及合理确定勘探工作提供依据。对建筑场地的稳定性进行研究是工程地质调查和测绘的重点工作。

进行工程地质测绘与调查时，在选址阶段，应搜集研究已有的地质资料，进行现场踏勘；在初勘阶段，当地质条件较复杂时，应继续进行工程地质测绘；详勘阶段，仅在初勘测绘基础上，对某些专门地质问题做必要的补充。

测绘与调查的范围，应包括场地及其附近与研究内容有关的地段。

常用的测绘方法是在地形图上布置一定数量的观察点或观察线，以便按点或沿线观察地质现象。观察点一般选择在不同地貌单元、不同地层的交接处以及对工程有意义的地质构造和可能出现不良地质现象的地段。观察线通常与岩层走向、构造线方向以及地貌单元轴线相垂直(例如横穿河谷阶地)，以便能观察到较多的地质现象。有时为了追索地层界线或断层等构造线，观察线也可以顺着走向布置。观察到的地质现象应标示于地形图上。

2.3.2 勘探工作

勘探是地基勘察过程中查明地下地质情况的一种必要手段，它是在地面的工程地质测绘和调查所取得的各项定性资料基础上，进一步对场地的工程地质条件进行定量的评价。

一般勘探工作包括坑探、钻探、触探和地球物理勘探等。

(1)坑探

坑探是在建筑场地挖探井(槽)以取得直观资料和原状土样，这是不必使用专门机具的一种常用的勘探方法。当场地地质条件比较复杂时，利用坑探能直接观察地层的结构和变化，但坑探可达的深度较浅。

探井的平面形状一般采用 1.5m×1.0m 的矩形或直径为 0.8～1.0m 的圆形，其深度视地层的土质和地下水埋藏深度等条件而定，一般为 2～3m。较深的探坑须进行坑壁加固。

(2)钻探

钻探是用钻机在地层中钻孔，以鉴别和划分地层，并可沿孔深取样，用以测定岩石和土层的物理力学性质。此外，土的某些性质也可直接在孔内进行原位测试。

场地内布置的钻孔，一般分为技术孔和鉴别孔两类。在技术孔中按不同的土层和深度采取原状土样。原状土样的采取常用取土器。

钻探时，按不同土质条件，常分别采用击入或压入取土器两种方式在钻孔中取得原状土样。击入法一般以重锤少击效果较好，压入法则以快速压入为宜，这样可以减少取土过程中土样的扰动。

(3)触探

触探是通过探杆用静力或动力将金属探头贯入土层，并量测各层土对触探头的贯入阻力，从而间接地判断土层及其性质的一类勘探方法和原位测试技术。作为勘探手段，触探可用于划分土层，了解地层的均匀性；作为测试技术，则可估计地基承载力和土的变形指标等。

①静力触探。静力触探是借静压力将触探头压入土层，利用电测技术测得贯入阻力来判定土的力学性质。与常规的勘探手段比较，静力触探有其独特的优越性。它能快速、连续地探测土层及其性质的变化，常在拟定桩基方案时采用。

地基土的承载力取决于土本身力学性质，而静力触探所得的贯入阻力等指标在一定程度上也反映了土的某些力学性质。根据静力触探资料可间接地按地区性的经验关系估算土的承载力、压缩性指标和单桩承载力等。

②动力触探。动力触探一般是将一定质量的穿心锤，以一定的高度(落距)自由下落，将探头贯入土中，然后记录贯入一定深度所需的锤击次数，并以此判断土的性质。主要有标准贯入试验和轻便触探试验两种动力触探方法。

(4)地球物理勘探

地球物理勘探(简称物探)也是一种兼有勘探和测试双重功能的技术。物探之所以能够被用来研究和解决各种地质问题，主要是因为不同的岩石、土层和地质构造往往具有不同的物理性质，利用其导电性、磁性、弹性、湿度、密度、天然放射性等的差异，通过专门的物探仪器的量测，就可区别和推断有关地质问题。对地基勘探的下列方面宜应用物探：

①作为钻探的先行手段，了解隐蔽的地质界线、界面或异常点、异常带，为经济合理确定钻探方案提供依据。

②作为钻探的辅助手段，在钻孔之间增加地球物理勘探点，为钻探成果的内插、外推提供依据。

③测定岩土体某些特殊参数，如波速、动弹性模量、土对金属的腐蚀等。

常用的物探方法主要有电阻率法、电位法、地震法、声波法、电视测井法等。

2.4　地基勘察报告书

2.4.1　勘察报告书的编制

(1)勘察报告书的基本内容

地基勘察的最终成果是以报告书的形式提出的。勘察工作结束后，把取得的野外工作和

室内试验的记录和数据以及搜集到的各种直接和间接资料分析整理，检查校核，归纳总结后做出建筑场地的工程地质评价。这些内容，最后以简要明确的文字和图表编成报告书。

勘察报告书的编制必须配合相应的勘察阶段，针对场地的地质条件和建筑物的性质、规模以及设计和施工的要求，提出选择地基基础方案的依据和设计计算数据，指出存在的问题以及解决问题的途径和办法。一个单项工程的勘察报告书一般包括下列内容：

①任务要求及勘察工作概况。

②场地位置、地形地貌、地质构造、不良地质现象及地震设计烈度。

③场地的地层分布，岩石和土的均匀性、物理力学性质，地基承载力和其他设计计算指标。

④地下水的埋藏条件和腐蚀性以及土层的冻结深度。

⑤对建筑场地及地基进行综合的工程地质评价，对场地的稳定性和适宜性做出结论，指出存在的问题和提出有关地基基础方案的建议。

所附的图表可以是下列几种：勘探点平面布置图，工程地质剖面图，地质柱状图或综合地质柱状图，土工试验成果表，其他测试成果图表(如现场荷载试验、标准贯入试验、静力触探试验、旁压试验等)。

上述内容并不是每个勘察报告必须全部具备的，而应视具体要求和实际情况有所侧重并以充分说明问题为准。对于地质条件简单和勘察工作量小且无特殊设计及施工要求的工程，勘察报告可以酌情简化。

(2)常用图表的编制方法

①勘探点平面布置图。勘探点平面布置图是在建筑场地地形图上，把建筑物的位置，各类勘探、测试点的编号、位置用不同的图例表示出来，并注明各勘探、测试点的标高和深度、剖面线及其编号等。

②钻孔柱状图。钻孔柱状图是根据钻孔的现场记录整理出来的。记录中除了注明钻进的工具、方法和具体事项外，其主要内容是关于地层的分布(层面的深度、层厚)和地层的名称和特征的描述。绘制柱状图之前，应根据土工试验成果及保存于钻孔岩心箱中的土样对分层情况和野外鉴别记录进行认真的校核，并做好分层和并层工作。当测试成果与野外鉴别不一致时，一般应以测试成果为主，只是当试样太少且缺乏代表性时才以野外鉴别为准。绘制柱状图时，应自上而下对地层进行编号和描述，并用一定的比例尺、图例和符号绘图。在柱状图中还应同时标出取土深度、地下水位等资料。

③工程地质剖面图。柱状图只反映场地某一勘探点处地层的竖向分布情况，剖面图则反映某一勘探线上地层沿竖向和水平向的分布情况。由于勘探线的布置常与主要地貌单元或地质构造轴线相垂直，或与建筑物的轴线相一致，故工程地质剖面图是勘察报告最基本的图件。

剖面图的垂直距离和水平距离可采用不同的比例尺。绘图时，首先将勘探线的地形剖面线画出，标出勘探线上各钻孔中的地层层面，然后在钻孔的两侧分别标出层面的高程和深度，再将相邻钻孔中相同的土层分界点以直线相连。当某地层在邻近钻孔中缺失时，该层可假定于相邻两孔中间尖灭。剖面图中应标出原状土样的取样位置和地下水位深度。各土层应用一定的图例表示，可以只绘出某一地段的图例，该层未绘出图例部分可由地层编号识别，这样可使图面更为清晰。

在柱状图和剖面图上也可同时附上土的主要物理力学性质指标及某些试验曲线(如触探和

标准贯入试验曲线等)。

④综合地质柱状图。为了简明扼要地表示所勘察的地层的层次及其主要特征和性质，可将该区地层按新老次序自上而下以 1∶200～1∶50 的比例绘成柱状图。图上注明层厚、地质年代，并对岩石或土的特征和性质进行概括描述。这种图件称为综合地质柱状图。

⑤土工试验成果总表。土的物理力学性质指标是地基基础设计的重要依据，应将土的试验和原位测试所得的成果汇总列表表示。

2.4.2　场地稳定性的评价

地质条件复杂的地区，综合分析的首要任务是评价场地的稳定性，然后才是地基土(岩)的承载力和变形问题。

场地的地质构造(断层、褶皱等)、不良地质现象(泥石流、滑坡、崩塌、岩溶、塌陷等)、地层成层条件和地震等都会影响场地的稳定性，在勘察中必须查明其分布规律、具体条件、危害程度。

在断层、向斜、背斜等构造地带和地震区修建建筑物，必须慎重对待，对于选址勘察中指明宜避开的危险场地，则不宜进行建筑。但对于已经判明为相对稳定的构造断裂地带，还是可以选作建筑场地的。

在不良地质现象发育且对场地稳定性有直接危害或潜在威胁的地区，如不得不在其中较为稳定的地段进行建筑，也应事先采取有力措施，防患于未然，以免中途改变场地或产生极高的处理费用。

思考练习

1. 阐述地基勘察的目的。
2. 什么是勘探？勘探手段包括哪些？
3. 地基勘察报告书一般包括哪些内容？

第3章 浅基础

学习目标

本章主要介绍天然地基上浅基础的设计原则和计算方法，重点介绍地基承载力复核计算与各类浅基础设计计算。

通过本章的学习，学生能够了解浅基础的类型；掌握基础埋置深度需考虑的各种因素；熟悉浅基础地基承载力复核计算流程并能进行简单的基础设计。

3.1 概 述

进行地基基础设计时，需根据建筑物的用途和设计等级、建筑布局和上部结构类型，充分考虑建筑场地工程地质及水文地质条件，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。一般而言，天然地基便于施工、工期短、造价低，如能满足强度及变形要求，宜优先选用。

浅基础主要包括无筋扩展基础、扩展基础、联合基础、柱下条形基础、筏形基础、箱形基础等。

对于无筋扩展基础及扩展基础，因支承建筑物的规模较小，结构相对简单，设计此类基础时，通常将上部结构、基础和地基分割成彼此独立的三个组成部分，分别进行稳定性、强度及变形的复核验算，并对这三部分各自开展设计。这种常规设计方法，其设计误差一般不至于影响结构安全或增加工程造价。因常规设计方法计算分析流程相对简单，该设计方法被工程界广泛采纳。

常规设计方法通常适用于以下两种工况：

(1)地基沉降较小或较均匀

当地基沉降较小，或者较为均匀时，地基变形对上部结构影响较小。若地基不均匀沉降

较大，会在上部结构中引起很大的附加内力，采用常规设计方法容易造成结构设计偏向不安全。

(2)基础刚度较大

基底反力一般呈非线性分布，其分布规律与土的类别、物理力学性能、基础尺寸、基础刚度、荷载类型及荷载大小等因素有关。一般而言，当基础刚度较大时，通常认为基底反力近似呈直线分布。

对于条形、筏形和箱形等规模较大、承受荷载类型较多和上部结构较复杂的基础，上述常规设计方法未考虑三部分的相互作用，一般会引起较大的误差。通常浅基础在地基平面水平方向尺寸比竖直方向尺寸大得多，一般可看成受弯构件，即梁或板。其基底反力、截面内力分布和挠曲特征都与地基、基础以及上部结构的相对刚度有关。科学合理的设计方法应从三者相互作用的角度出发，考虑三者的耦合作用，进行应力分析和复核设计。

通常，上部结构、基础和地基三者的共同作用机理较为复杂，涉及的因素较多，地基的物理力学参数往往带有较大的不确定性，现有地基模型尚不能够完美模拟三者的耦合作用。对比现有模型考虑三者耦合作用的分析结果和现场监测数据，发现模型模拟结果与实测数据往往存在一定的差异，有时误差还较大，说明耦合理论分析方法有待进一步完善。目前，对于复杂基础形式的设计，通常采用“构造为主，计算为辅”的原则。

3.2 基础埋置深度设计

基础埋置深度一般是指基础底面到室外设计地面的距离，简称基础埋深。通常应根据建筑物和地层的整体状况做技术、经济对比后确定。基础埋置深度的设计是地基基础设计中的重要环节，它涉及建筑物的安全、稳定及正常使用等问题。基础埋置越深，基底两侧的超载越大，地基承载力越高，稳定性越好；相反，基础埋置浅，基底两侧超载和地基承载力就越小，但工程造价会降低，施工周期会缩短。在基础埋深设计环节，应该优先考虑将基础设置在压缩性小、强度高的持力层上，以确保地基承载力满足设计要求，且不致产生过大的沉降量和不均匀沉降。此外，基础埋置深度仍需满足基础稳定性和耐久性的要求，以保证基础在服役期的安全可靠。

基础埋深的设计原则：在保证安全可靠的前提下，尽量浅埋。土层一般不宜浅于0.5m，因为地表土一般较松软，受雨水及外界环境的影响较为敏感，不宜作为地基的持力层。另外，基础顶面到设计地面的距离宜大于100mm，尽量避免基础外露，使基础遭受外界的侵蚀及破坏。对于岩石地基的基础埋深设计，应根据场地实际工况作必要的评估再确定。

基础埋深设计，需综合考虑建筑结构特征、工程地质和水文地质条件、地基冻融特性及场地环境等多方面的因素。一般情况下，对于具体工程而言，往往只是其中一两种因素起决定作用。

3.2.1 建筑结构特征

建筑结构特征通常包含建筑物用途、类型、规模与性质等。某些建筑物需要具备一定的使用功能，宜设计适用的基础形式，这通常成为基础埋深设计的先决条件。例如，当建筑物必须设置地下室或设备层及人防时，基础埋深应首先考虑满足建筑物使用功能(地下空间)的要求。

当建筑物同时采用不同类型的基础(例如：单层工业厂房排架柱基础与邻近的设备基础)，两基础间的净距与其底面的标高差不满足图 3-1 的要求时，基础埋深设计则应按埋深大的基础统一考虑。

高层建筑物通常会设置电梯，电梯位置一般会设置电梯井，电梯井自底板向下一般需要不少于 1.4m 的缓冲坑，该处基础埋深需局部放大。

建筑物外墙常有供水、污水、煤气等管道穿行，受城市管网的控制这些管道的标高往往不易调整，这些管道一般不宜设置在基础底面以下。因此，该处基础埋深需要局部放大。另外，当建筑物各部分的使用要求不同或地基地质条件变化较大，同一建筑物各部分基础埋深不同时，应将基础做成台阶形逐步过渡，台阶的宽高比为 1∶2，每阶高度不超过 500mm，如图 3-2 所示。

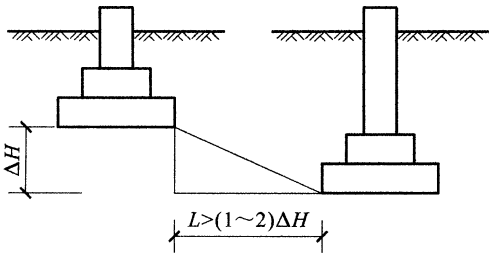

图 3-1　相邻基础的埋深

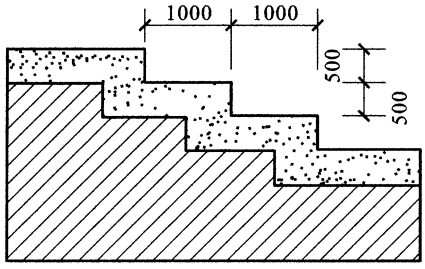

图 3-2　阶形过渡基础

由于高层建筑荷载大，承受较大的水平风力和地震作用，在抗震设防区，除岩石地基外，天然地基上的箱形和筏形基础埋置深度不宜小于建筑物高度的 1/15；桩箱或桩筏基础埋置深度(不计桩长)不宜小于建筑物高度的 1/20。位于岩石地基上的高层建筑，其基础埋深应满足抗滑设计要求。

3.2.2 工程地质条件

地基通常由多土层组成，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。在满足建筑物对地基承载力和变形要求的前提下，基础应尽量浅埋。在选择持力层和基础埋深时，需查阅工程地质勘察报告，详细了解拟建场地的地层分布、各土层的物理力学性质和地基承载性能等资料。

当上层土的承载力低于下层土时，若取下层土作为持力层，设计的基础基底面积较小，但埋深较大；而取上层土为持力层，则情况恰好相反，此时应进行方案对比，综合耐久性、经济性及施工难易程度确定基础埋深及尺寸。

当基础埋置在易风化的软质岩层上时，在基坑开挖完工后应立即铺设垫层，以免岩层表面因暴露时间过长而被风化。

基础在风化岩石层中的埋置深度应根据岩石层的风化程度及相应的承载力来确定。如当岩层表面倾斜时，应尽可能避免将基础部分置于基岩上，部分置于土层上，以防因不均匀沉降而造成基础倾斜甚至断裂。在陡峭山坡上修建桥台时，还应注意岩体边坡的稳定性。

3.2.3 水文地质条件

选择基础埋深时应注意地下水的埋藏条件、动态变化规律，以及地表水的情况。若基础底面必须埋置在地下水位以下，则除应考虑基坑排水、坑壁围护以及保护地基土不受扰动等措施外，还应考虑可能出现的其他施工与设计问题，例如出现涌土、流砂现象的可能性，上浮力引起基础底板的内力变化等，并采取相应的措施。

对埋藏有承压含水层的地基，选择基础埋深时必须考虑承压水的作用，以免在开挖基坑时坑底土被承压水冲破，引起突涌流砂现象。因此，必须控制基坑开挖的深度，如图3-3所示，使承压含水层顶部的静水压力小于该处由坑底土产生的总覆盖压力，否则应设法降低承压水头。

$$\sum y_i z_i > y_w h_w \tag{3-1}$$

式中：y_i——土的重度，对潜水位以下的土取饱和重度；

y_w——水的重度；

z_i——基坑底面至承压含水层顶面的各覆盖层厚度；

h_w——承压水位。

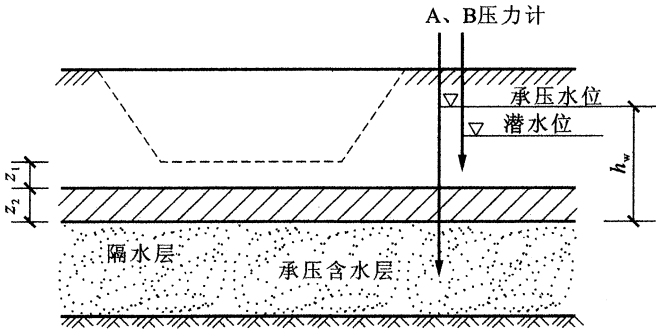

图3-3 基坑下埋藏有承压含水层的情况

3.2.4 地基冻融条件

在0℃以下，含有冰的各种岩石和土壤统称为冻土。冻土又分为多年冻土和季节性冻土。

季节性冻土地区，地基通常会出现冻胀和融沉等问题。土体发生冻胀，主要是在冻结期，冻土土层周围未冻区土中的水分向冻结区土层迁移、积聚并产生相变(水结成冰)，导致土体体积增大所致。当土层解冻时，土层中积聚的冻晶体融化，土体中大孔隙坍塌，土体随之下陷，即出现融沉现象。在冻胀区，当基础受到的冻胀力大于上部建筑物传递的竖向荷载时，地基隆起，基础可能被抬起，造成上部建筑门窗不能开启，严重时可能会引起墙体的开裂。

当温度升高时，土体内冻晶体开始融化。在土体冻结过程，水分的相变(水结成冰)导致孔隙增大，在土体解冻过程，水分的相变(冰融化成水)使得大孔隙内部缺乏填充，使土体变得比较松软从而引起融沉。这种融沉导致的建筑物沉降是不均匀的，严重的不均匀沉降可引起建筑物的倾斜、开裂，甚至倒塌。

影响冻土地基冻胀的因素主要有土的组成、水的含量及温度的高低。对于粗颗粒土，土体中孔隙较大，孔隙水的自由能相对较高，当温度低于0℃时，孔隙中的水分容易结冰，造成低温条件下水分在粗颗粒土中的迁移相对比较困难，故粗颗粒土的冻胀现象不明显。对于细颗粒土，土体中孔隙较小，孔隙水的自由能相对较低，当温度低于0℃时，孔隙水不易结冰。在温度场的驱使下，水分会从自由能高的向自由能低的方向迁移(或者水分往往会从吸力小的土体中向吸力大的土体中迁移)。在迁移过程中，水分会在温度低的土体中聚集并产生相变，撑大土体中的孔隙，产生冻胀现象。故在相同条件下，黏性土的冻胀性比粉土、砂土严重得多。同时，黏性土颗粒较细，表面能大，土粒矿物成分亲水性强，可以在土颗粒表层吸附较厚的水膜，水分可以通过吸附水膜在土体中迁移并积聚。

针对上述情况，《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)将地基土的冻胀性划分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀和特强冻胀五类。

季节性冻土地基的设计冻深可按下式计算：

$$z_d = z_0 \cdot \psi_{zs} \cdot \psi_{zw} \cdot \psi_{ze} \tag{3-2}$$

式中：z_d——设计冻深，m。

z_0——标准冻深，m。采用在地表平坦、裸露、城市之外的空旷场地中不少于10年实测最大冻深的平均值。

ψ_{zs}——土的类别对冻深的影响系数。

ψ_{zw}——土的冻胀性对冻深的影响系数。

ψ_{ze}——环境对冻深的影响系数。

对于埋置于可冻胀土中的基础，其最小埋深可按 $d_{min} = z_d - h_{max}$ 确定，其中 h_{max} 为基础底面下允许残留冻土层的最大厚度。

式(3-2)中的 z_0、ψ_{zs}、ψ_{zw}、ψ_{ze} 及 h_{max} 可按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中规定取值。对于冻胀性地基的建筑物，规范还指明了所宜采取的防冻害措施。

3.2.5 场地环境条件

在靠近原有建筑物修建新基础时，为了保证在施工期间原有建筑物的安全稳定和正常使用，减小对原有建筑物的负面影响，新建建筑物的基础埋深不宜大于原有建筑基础，否则两基础间应保持一定净距。其数值应根据原有建筑物荷载大小、基础形式、土质情况及结构刚度大小而定，且不宜小于该相邻两基础底面高差的1倍，如图3-4所示。如果不能满足这一要求，应采取如分期施工、设临时加固支撑或板桩支撑、设置地下连续墙等措施。

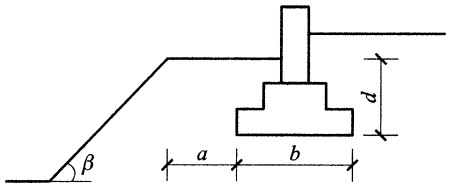

图 3-4 基础底面外边缘线至坡顶的水平距离

位于稳定土坡坡顶上的建筑，靠近土坡边缘的基础与土坡边缘应具有一定距离。当垂直于坡顶边缘线的基础底面边长小于或等于 3m 时，其基础底面边缘线至坡顶的水平距离(图 3-4)应符合下式要求，但不得小于 2.5m。

条形基础：

$$a \geqslant 3.5b - \frac{d}{\tan\beta} \tag{3-3}$$

矩形基础：

$$a \geqslant 2.5b - \frac{d}{\tan\beta} \tag{3-4}$$

当不满足式(3-3)和式(3-4)的要求时，应进行地基稳定性验算。

3.3 地基承载力

扫一扫

地基承载力的概念

3.3.1 地基承载力的概念

地基承载力是指地基土单位面积上承受荷载的能力。地基承载力并非单纯的土体工程特性指标，它不仅与土质、土层埋藏顺序有关，而且与基础的形状、大小、埋深、上部结构对变形的适应程度以及地下水位的升降等因素有关。当荷载增加时，随着地基变形的增大，地基承载力也在随之逐渐增大。理论上，很难界定真正的地基承载力极限值。因此，国内外许多学者提出了表达形式各异或者流程不一的方法确定地基极限承载力。在保证地基稳定的条件下，使建筑物的沉降量不超过允许值的地基承载力称为地基承载力特征值，以 f_a 表示。

3.3.2 地基承载力特征值的确定

确定地基承载力特征值的方法主要有四类：

①根据土的抗剪强度指标以理论公式计算；

②由地基荷载试验确定；

③按动力、静力触探等方法确定；

④经验法确定，可用于次要的小型建筑物或作为参考性数据。

在具体工程中，应根据地基基础的设计等级、地基岩土条件并结合当地工程经验选择确定地基承载力的适当方法，必要时可以按多种方法综合确定。

3.3.2.1 按土的抗剪强度指标确定

(1)地基极限承载力理论公式

按地基极限承载力理论值确定地基承载力特征值：

$$f_a=\frac{p_u}{K} \tag{3-5}$$

式中：p_u——地基土极限承载力，kPa；

K——安全系数。

国内外有很多学者致力于地基极限承载力 p_u 的研究工作，例如迈耶霍夫(Meyerhof)、汉森(Hansen)、魏锡克(Vesic)、太沙基(Terzaghi)、斯肯普顿(Skempton)等，取得了很多有价值的成果。其计算公式有解析解和半经验公式。美国、欧洲等国家规范采用解析解引入分项系数和半经验公式引入安全系数的方法确定地基承载力特征值。德国规范采用太沙基、魏锡克、汉森等公式，引入地基承载力极限状态表达式。此类公式比较全面地反映了影响地基承载力的各种因素，在国外应用很广。

安全系数 K 的取值与建筑物的安全等级、荷载的性质、土的抗剪强度指标的可靠程度，以及地基条件等因素有关，对长期承载力一般取 $K=2\sim3$。

(2)规范推荐的理论公式

当荷载偏心距 $e\leqslant0.033b$(b 为偏心方向基础边长)时，可采用《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)推荐的以浅基础地基的临界荷载为基础的理论公式计算地基承载力特征值，计算公式如下：

$$f_a=M_b\gamma b+M_d\gamma_m d+M_c c \tag{3-6}$$

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，由规范中根据 φ 查取，见表 3-1；

b——基础底面宽度，m，大于 6m 时按 6m 取值，对于砂土，小于 3m 时按 3m 考虑；

d——基础埋置深度，m；

c——相当于基底下一倍基础宽度的深度范围内土的黏聚力标准值，kPa；

φ——相当于基底下一倍基础宽度的深度范围内土的内摩擦角标准值，(°)；

γ——基础底面以下土的重度，地下水位以下取浮重度，kN/m^3；

γ_m——基础埋深范围内各层土的加权平均重度，kN/m^3。

表 3-1 承载力系数 M_b、M_d、M_c

土的内摩擦角标准值 φ/(°)	M_b	M_d	M_c
0	0	1.00	3.14
2	0.03	1.12	3.32
4	0.06	1.25	3.51
6	0.10	1.39	3.71

续表

土的内摩擦角标准值 φ/(°)	M_b	M_d	M_c
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——基底下一倍短边宽度的深度范围内土的内摩擦角标准值(°)。

规范理论是基于弹塑性理论，假定基础底部塑性开展区深度等于1/4基础宽度推导而得，得到 M_b、M_d 和 M_c 的计算公式如下：

$$M_b=\frac{\pi}{4\left(\cot\varphi+\varphi-\frac{\pi}{2}\right)} \tag{3-7}$$

$$M_d=1+\frac{\pi}{\cot\varphi+\varphi-\frac{\pi}{2}} \tag{3-8}$$

$$M_c=\frac{\pi}{1+\tan\varphi+\left(\varphi-\frac{\pi}{2}\right)} \tag{3-9}$$

在工程应用中人们发现，当内摩擦角大于22°时，砂土的实际承载力远高于式(3-7)的计算结果。因此，《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)根据22组砂土荷载实验数据(图3-5)，对 M_b 作了适当修正，见表3-2。

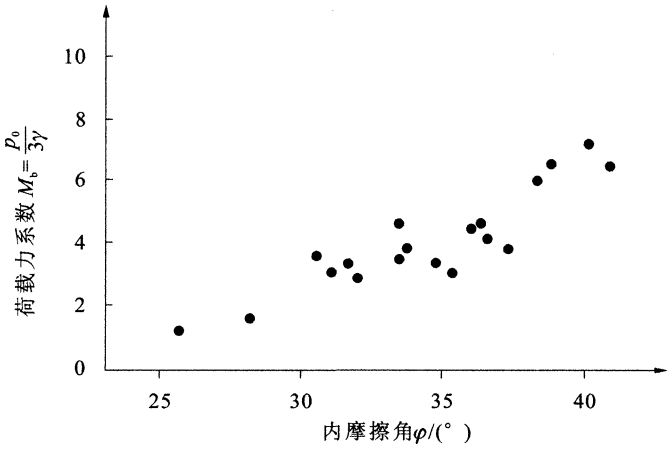

图 3-5　砂土承载力系数 M_b 和内摩擦角的关系

表 3-2　承载力系数 M_b 的修正值

φ/(°)	24	26	28	30	32	34	36	38	40
修正前	0.72	0.84	0.98	1.15	1.34	1.55	1.81	2.11	2.46
修正后	0.80	1.10	1.40	1.90	2.60	3.40	4.20	5.00	5.80

3.3.2.2　按地基荷载试验确定

地基土荷载试验是工程地质勘察工作中的一项原位测试。荷载试验主要有浅层平板荷载试验和深层平板荷载试验。浅层平板荷载试验的承压板面积不应小于 0.25m²，对于软土不应小于 0.5m²，可测定浅部地基土层在承压板下应力主要影响范围内的承载力。深层荷载试验的承压板一般采用直径为 0.8m 的刚性板，紧靠承压板周围外侧的土层高度应不少于 80cm，可测定深部地基土层在承压板下应力主要影响范围内的承载力。

对于密实砂土、较硬的黏性土等低压缩性土，其 p-s 曲线通常有较明显的起始直线段和极限值，即是急进破坏的“陡降型”，如图 3-6(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，故可取图中的 p_{cr}(比例界限荷载)作为承载力特征值。此时，地基的沉降量很小，能为一般建筑物所允许，强度安全储备也足够，因为从 p_{cr} 发展到破坏还有很长的过程。但是，对于少数呈“脆性”破坏的土，从 p_{cr} 发展到破坏(极限荷载)过程较短，从安全角度出发，当 $p_u<2p_{cr}$ 时，取 $p_u/2$ 作为承载力特征值。

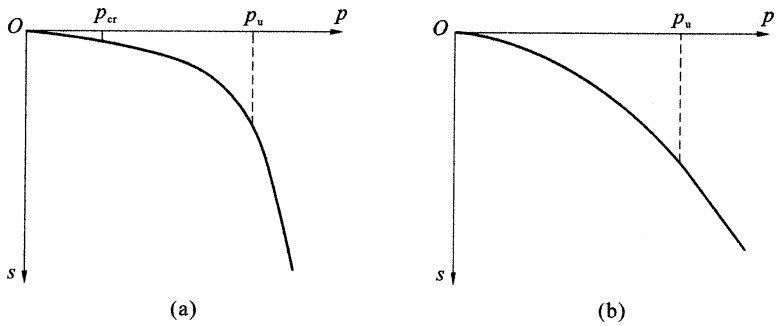

图 3-6　按荷载试验成果确定地基承载力

(a)低压缩性土；(b)高压缩性土

对于松砂、较软的黏性土，其 p-s 曲线并无明显转折点，但曲线的斜率随荷载的增大而逐渐增大，最后稳定在某个最大值，即呈渐进性破坏的“缓变型”，如图 3-6(b)所示，此时，极限荷载可取曲线斜率开始到达最大值时所对应的荷载。但此时要取得 p_u 值，必须把荷载试验进行到荷载板有很大的沉降，而实践中往往因为加荷设备的限制，或出于对试验安全的考虑，不便使沉降过大，因而无法取得 p_u 值；此外，对中、高压缩性土，地基承载力往往受建筑物基础沉降量的控制，故应从允许沉降的角度出发来确定承载力。相关规范总结了许多实测资料，当承压板面积为 0.25～0.15m^2 时，可取 s/b=0.01～0.015(b 为承压板的宽度)所对应的荷载为承载力特征值，但其值不应大于最大加载量的一半。

对同一层土，宜选取三个以上的试验点，当各试验点所得的承载力特征值的极差不超过其平均值的 30%时，则取此平均值作为该土层的地基承载力特征值 f_{ak}。

现场荷载试验所测得的结果一般能反映相当于 1～2 倍荷载板宽度的深度以内土体的平均性质，《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)列入的深层平板荷载试验，可测定较深下卧层土的力学性质。另外，对于成分或结构很不均匀的土层，无法取得原状土样，荷载试验方法显示出难以替代的作用。荷载试验比较可靠，但该方法费时，耗资相对较大。

3.3.2.3 按动力、静力触探等方法确定

原位测试方法除荷载试验外，还有动力触探、静力触探、十字板剪切试验和旁压试验等方法。动力触探有轻型(N10)、重型(N63.5)和超重型(N120)之分，静力触探有单桥探头和双桥探头之分。各地应以荷载试验数据为基础，积累和建立相应的测试数据与土承载力的相关关系。这种相关关系具有地区性、经验性，对于大量建设的丙级地基基础是非常适用、经济和迅速的，而对于设计等级为甲、乙级的地基基础应按确定承载力特征值的多种方法综合确定。

按照荷载试验或触探等原位测试、经验值等方法确定的承载力特征值，在地基基础设计中，应考虑基础埋深(超载)和基底尺寸的效应，《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)规定在基础宽度大于 3m 或埋置深度大于 0.5m 时，尚应按下式进行修正：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (h-0.5) \tag{3-10}$$

式中：f_a——修正后的地基承载力特征值，kPa。

f_{ak}——由荷载试验或其他原位测试、经验等方法确定的地基承载力特征值，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 3-3。

γ——基础底面以下土的重度，地下水位以下取浮重度，kN/m^3。

b——基础底面宽度，m，当基础底面宽度小于 3m 时按 3m 取值，大于 6m 时按 6m 取值。

γ_m——基础底面以上土的加权平均重度，地下水位以下取浮重度，kN/m^3。

h——基础埋置深度，m，宜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形基础时，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。

表 3-3　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 大于或等于 0.85 的黏性土		0	1.0
红黏土	含水比 $\alpha_w>0.8$	0	1.2
	含水比 $\alpha_w\leqslant0.8$	0.15	1.4
大面积 压实填土	压实系数大于 0.95、黏粒含量 $\rho_c\geqslant10\%$的粉土	0	1.5
	最大干密度大于 2100kg/m^3 的级配砂石	0	2.0
粉土	黏粒含量 $\rho_c\geqslant10\%$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《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)附录深层平板荷载试验确定时，η_d 取 0；

3. 含水比是指土的天然含水量与液限的比值($a_w=w/w_L$)；

4. 大面积压实填土是指填土范围大于两倍基础宽度的填土。

表 3-2 中基础宽度和埋深的地基承载力修正系数是根据多个不同宽度和不同埋深的荷载试验资料整理分析结果，并与理论公式的承载力系数相对照，考虑了不利因素并结合建筑经验综合确定。η_b、η_d 使用时根据基底下持力层的土质类别查取。

建筑物的正常使用应满足其功能要求，常常是承载力还有潜力可挖，而变形已达到或超过正常使用的限值，也就是由变形控制承载力，因此对承载力的宽度修正采取了慎重态度，当 b 大于 6m 时按 6m 取值。

目前建筑工程大量存在着主裙楼一体的结构，对于主体结构地基承载力的深度修正，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。

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)规定当基础宽度大于 2m 或埋置深度大于 3m 时，尚应按下式进行修正：

$$f_a=f_{a0}+k_1\gamma_1(b-2)+k_2\gamma_2(h-3) \tag{3-11}$$

式中：f_a——修正后的地基承载力特征值，kPa。

f_{a0}——地基承载力特征值，kPa。

b——基础底面的最小边宽，当 $b<2$m 时，取 $b=2$m，当 $b>10$m 时，取 $b=10$m。

h——基底埋置深度，m，从自然地面起算，有水流冲刷时自一般冲刷线起算；当 $h<3$m 时，取 $h=3$m，当 $h/b>4$ 时，取 $h=4b$。

k_1，k_2——基底宽度、深度修正系数，根据基底持力层土的类别按表 3-4 确定。

γ_1——基底持力层土的天然重度，kN/m^3，若持力层在水面以下且为透水者，应取浮重度。

γ_2——基底以上土层的加权平均重度，kN/m^3，换算时若持力层在水面以下，且不透水

时，不论基底以上土的透水性质如何，均取饱和重度，当透水时，水中部分土层取浮重度。

表 3-4 地基土承载力宽度、深度修正系数 k_1、k_2

系数	黏性土				粉土	砂土								碎石土			
	老黏性土	一般黏性土		新近沉积黏性土	—	粉砂		细砂		中砂		砾砂、粗砂		碎石、圆砾角砾		卵石	
		$I_L \geq 0.5$	$I_L < 0.5$		—	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实
k_1	0	0	0	0	0	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	
k_2	2.5	1.5	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	4.0	5.5	5.0	6.0	5.0	6.0	6.0	10.0

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)明确当基础位于水中不透水地层上时，平均常水位至一般冲刷线的水深为 h，则 f_a 提高 $10h$，而每一米加 10kPa。

3.3.2.4 按经验法确定

在拟建场地附近，常有不同时期建造的各类建筑物。调查这些建筑物的结构类型、基础形式、地基条件和使用现状，对于确定拟建场地的地基承载力具有一定的参考价值。

在按建筑经验确定承载力时，需要了解拟建场地是否存在人工填土、暗浜或暗沟、土洞软弱夹层等不利情况。对于地基持力层，可以通过现场开挖，根据土的类型和所处的状态估计地基承载力。这些工作还需在基坑开挖验槽时进行验证。

应该指出，上述确定地基承载力的方法各有长短、互为补充。采用不同方法确定的地基承载力，得到的数值必然有所出入，必要时可以按多种方法综合确定，不过，确定的精确程度宜按建筑物安全等级、地基基础设计等级以及地基岩土条件，结合当地经验适当选择，以免出现不必要的过分严格或无区别的随意简化这两种极端倾向。在软弱地基上更要考虑不均匀沉降存在的可能性及其对建筑物造成负面影响的程度，适当控制地基承载力取值。例如，调查了解拟建筑场地附近原有建筑物的情况、基础形式和大小、上部结构的类型和构造、是否存在墙体开裂及其他损伤现象等，对于新建筑物地基承载力的确定具有很大的参考价值。

3.3.2.5 岩石地基承载力

对于完整、较完整、较破碎的岩石地基承载力特征值可按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)附录 H 岩基荷载试验方法确定。对破碎、极破碎的岩石地基承载力特征值，可根据前述平板荷载试验确定。

对完整、较完整和较破碎的岩石地基承载力特征值，也可根据室内饱和单轴抗压强度按下式进行计算：

$$f_a = \psi_r \cdot f_{rk} \tag{3-12}$$

式中：f_a——岩石地基承载力特征值，kPa。

f_{rk}——岩石饱和单轴抗压强度标准值，kPa，可参考《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)附录 J 确定。

ψ_r——折减系数。根据岩体完整程度以及结构面的间距、宽度、产状和组合，由地方经验确定。无经验时，对完整岩体可取 0.5；对较完整岩体可取 0.2～0.5；对较破碎岩体可取 0.1～0.2。

3.4 浅基础设计计算

3.4.1 地基持力层承载力验算

如前所述，直接支承基础的地基土层称为持力层，在持力层下面的各土层称为下卧层，若某下卧层承载力较持力层承载力低，则称为软弱下卧层。地基承载力计算的内容包括地基持力层承载力计算、软弱下卧层承载力验算和稳定性验算等。

3.4.1.1 中心受荷基础

各级各类建筑物浅基础的地基承载力验算均应满足式(3-13)的要求，即基础底面的平均压力不得大于修正后的地基承载力特征值。

当轴心荷载作用时：

$$p_k \leqslant f_a \tag{3-13}$$

式中：p_k——相应于荷载的标准组合时基础底面处的平均压力值，kPa；

f_a——修正后的地基承载力特征值，kPa。

如图 3-7 所示，一中心受荷的独立基础，其埋深为 d，承受作用于基础顶面且通过基础底面中心的竖向荷载 F_k，基础底面积为 A，基底平均压力表示为

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} \tag{3-14}$$

式中：p_k——相应于荷载效应标准组合时基础底面处的平均压力，kPa；

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，对一般实体基础，可近似地取 $G_k = \gamma_G A d$（γ_G 为基础及回填土的平均重度，可取 $\gamma_G = 20\text{kN/m}^3$），但在地下水位以下部分应扣除浮托力。

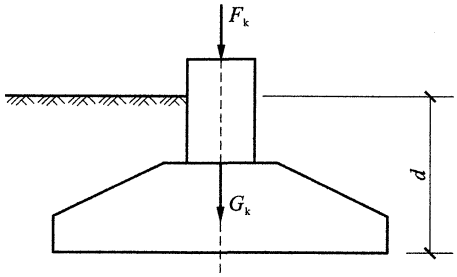

图 3-7 中心受荷的独立基础

将 G_k 表达式代入式(3-14)，并满足 $p_k \leqslant f_a$，可得

$$A \geqslant \frac{F_k}{f_a - \gamma_G d} \tag{3-15}$$

对墙下条形基础，通常沿墙长度方向取1m进行计算，此时可得基础宽度为

$$b \geqslant \frac{F_k}{f_a - \gamma_G d} \tag{3-16}$$

式中：F_k——基础每米长度上的外荷载，kN/m。

3.4.1.2 偏心受荷基础

工程实践中，有时基础不仅承受竖向荷载，还可能承受柱、墩传来的弯矩及水平力作用。当偏心荷载作用时，除须符合式(3-13)要求外，还应符合下式：

$$p_{kmax} \leqslant 1.2 f_a \tag{3-17}$$

式中：p_{kmax}——相应于荷载的标准组合时基础底面边缘的最大压力值，kPa。

此时基底反力将呈梯形或三角形分布，如图3-8所示。当偏心距$e<l/6$时，基底反力将呈梯形分布，基础底面边缘的最大、最小压力值分别为

$$p_{kmax} = \frac{F_k + G_k}{A} + \frac{M_{yk}}{W_y} \tag{3-18}$$

$$p_{kmin} = \frac{F_k + G_k}{A} - \frac{M_{yk}}{W_y} \tag{3-19}$$

式中：W_y——基础底面抵抗矩，m^3；

M_{yk}——相应于荷载效应标准组合时作用于基础底面的力矩值，kN·m，如图3-8中的受力情况，$M_{yk}=M_k+Q_k d$。

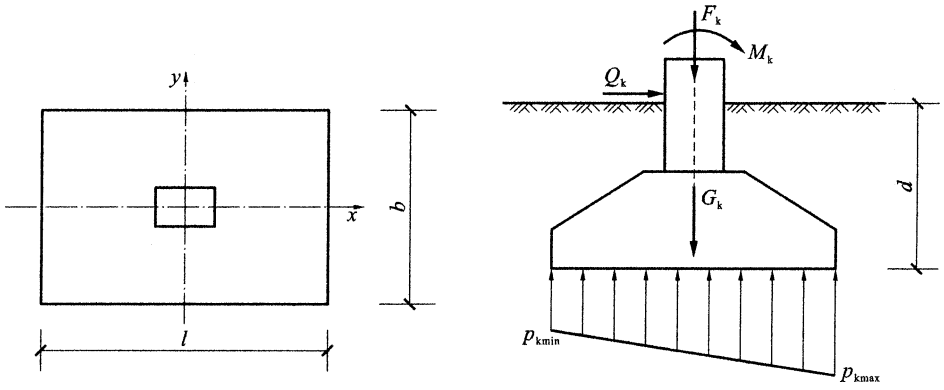

图3-8 偏心荷载作用下的基础

对于承受双向偏心荷载作用的基础，基底边缘的最大、最小压力值可按下式计算：

$$\begin{cases} p_{kmax} = \dfrac{F_k + G_k}{A} + \dfrac{M_{xk}}{W_x} + \dfrac{M_{yk}}{W_y} \\ p_{kmin} = \dfrac{F_k + G_k}{A} - \dfrac{M_{xk}}{W_x} - \dfrac{M_{yk}}{W_y} \end{cases} \tag{3-20}$$

或

$$\begin{cases} p_{kmax} = \dfrac{F_k + G_k}{A}\left(1 + \dfrac{6e_y}{b} + \dfrac{6e_x}{l}\right) \\ p_{kmin} = \dfrac{F_k + G_k}{A}\left(1 - \dfrac{6e_y}{b} - \dfrac{6e_x}{l}\right) \end{cases} \tag{3-21}$$

式中：l——力矩作用方向的矩形基础底面边长，m；

b——垂直于力矩作用方向的矩形基础底面边长，m，一般为矩形基础底面的短边；

W_x，W_y——基础底面对 x 轴和 y 轴的截面抵抗矩，m^3；

e_x，e_y——荷载对 y 轴和 x 轴的偏心距，m。

当偏心距 $e \geqslant l/6$ 时，按式(3-18)～式(3-21)计算基底压力时，可能出现 $p_{kmin}<0$。此时，基底的压力将重新分布，呈三角形分布在小于基础底面边长 l 的范围，其边缘最大压力 p_{kmax} 的计算公式为

$$p_{kmax}=\frac{2(F_k+G_k)}{3ba} \tag{3-22}$$

式中：a——偏心荷载作用点至最大压应力 p_{kmax} 作用边缘的距离，m，$a=(l/2)-e$；

b——垂直于力矩作用方向的基础底边边长，m。

利用式(3-15)及式(3-16)可直接求得中心荷载作用下的基础底面积或基础底面宽度，但对于偏心受荷基础，直接求基础底面积或基础底面宽度比较繁杂，工程实践中通常采用逐次渐近试算法进行计算，即：

①先按中心荷载作用下公式预估基础底面积 A_0 或宽度 b_0。

②考虑荷载偏心影响，根据偏心距的大小将 A_0 或 b_0 增大 10%～40%作为首次试算尺寸 A 或 b。

③根据 A 的大小初步选定矩形基础的底面边长 l 和 b。

④根据已选定的 l 和 b 验算偏心距 e 和基底边缘最大压力。

⑤如满足式(3-13)或稍有富余，则选定的 l 和 b 合适；如不满足要求或基底尺寸选择太大，则需重新调整 l 和 b 再进行验算。如此反复一两次，便可定出合适的尺寸。

必须指出，基底压力 p_{kmax} 和 p_{kmin} 相差过大则易使基础倾斜，为了减少因地基应力不均匀引起的不均匀沉降，p_{kmax} 与 p_{kmin} 相差不宜悬殊。一般认为，在中、高压缩性土上的基础，或有吊车的厂房柱基础，偏心距 e 不宜大于 $l/6$；对低压缩性地基土上的基础，当考虑短暂作用的偏心荷载时偏心距 e 应控制在 $l/4$ 以内。当上述条件不能满足时，则应调整基础尺寸，使基底形心与荷载重心尽量重合，做成非对称基础。

【例 3-1】 某柱下钢筋混凝土独立基础，如图 3-9 所示，基底尺寸为 2.0m×2.5m，基础埋置深度为 1.5m，作用在基础顶面处由柱传来的内力标准值组合：竖向力 $F_k=600kN$，力矩 $M_k=200kN\cdot m$，水平剪力 $V_k=150kN$。地基土为厚度较大的粉土，其重度 $\gamma=18kN/m^3$，黏粒含量 $\rho_c<10\%$，承载力特征值 $f_{ak}=230kPa$。基础及其上的土的加权平均重度取 $20kN/m^3$，基础底面以下土的重度 $\gamma=17.5kN/m^3$。验算该柱的基础底面压力是否满足要求。

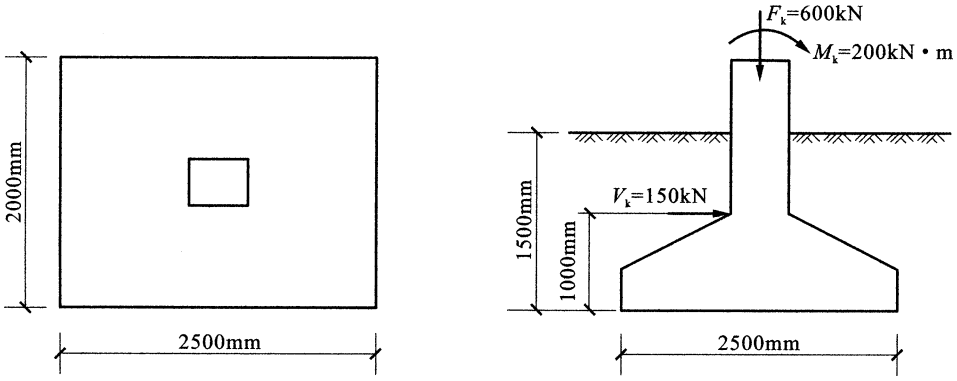

图 3-9 例 3-1 图

【解】 (1)计算基础底面处地基承载力特征值 f_a

根据表3-3，查得当粉土的黏粒含量 $\rho_c \ll 10\%$ 时，基础宽度的地基承载力修正系数 $\eta_b=0.5$，基础埋深的地基承载力修正系数 $\eta_d=2.0$。由于该基础底面宽度 $b<3.0\text{m}$，故不考虑基础宽度的修正系数。修正后的基础底面处地基承载力值 f_a 为

$$f_a=230+2.0\times18\times(1.5-0.5)=266(\text{kN/m}^2)$$

(2)基础底面处压力计算

应对轴心和偏心荷载作用分别进行验算。

①轴心荷载作用时：

$$G_k=20\times2.5\times2.0\times1.5=150(\text{kN})$$

$$p_k=\frac{F_k+G_k}{A}=\frac{600+150}{2.5\times2.0}=150(\text{kN/m}^2)<f_a$$

②偏心荷载作用时：

$$M_k=200+(150\times1.0)=350(\text{kN}\cdot\text{m})$$

基础底面处的偏心距 e 为

$$e=\frac{M_k}{F_k+G_k}=\frac{350}{600+150}=0.47(\text{m})$$

而

$$l/6=2.5/6=0.42(\text{m}),\ e>\frac{l}{6}$$

当偏心距 $e\geqslant l/6$ 时，基础底面边缘的最大压力值应按式(3-22)进行计算。

$$p_{k\max}=\frac{2(F_k+G_k)}{3ba}=\frac{2\times(600+150)}{3\times2.0\times\left(\frac{2.5}{2}-0.47\right)}=\frac{1500}{3\times2.0\times0.78}=320.51(\text{kN/m}^2)$$

$$1.2f_a=1.2\times266=319(\text{kN/m}^3)$$

$$p_{k\max}>1.2f_a$$

基础底面压力不满足要求。

【例3-2】如图3-10所示为某联合基础支承柱A和B，柱A、B尺寸为400mm×400mm，两柱相距 $l_1=3\text{m}$，在荷载基本组合条件下，柱A荷载 $F_1=360\text{kN}$，$M_1=50\text{kN}\cdot\text{m}$，柱B荷载 $F_2=500\text{kN}$，$M_2=20\text{kN}\cdot\text{m}$(方向与 M_1 相反)。基础埋深为1.2m，持力层为粉砂，基础及其上的土的加权平均重度取 18kN/m^3，基础底面以下土的重度 $\gamma=19\text{kN/m}^3$。地基承载力特征值 $f_{ak}=140\text{kPa}$，考虑基础左右两侧与柱A、B外侧对齐。试确定梯形联合基础的底面尺寸。

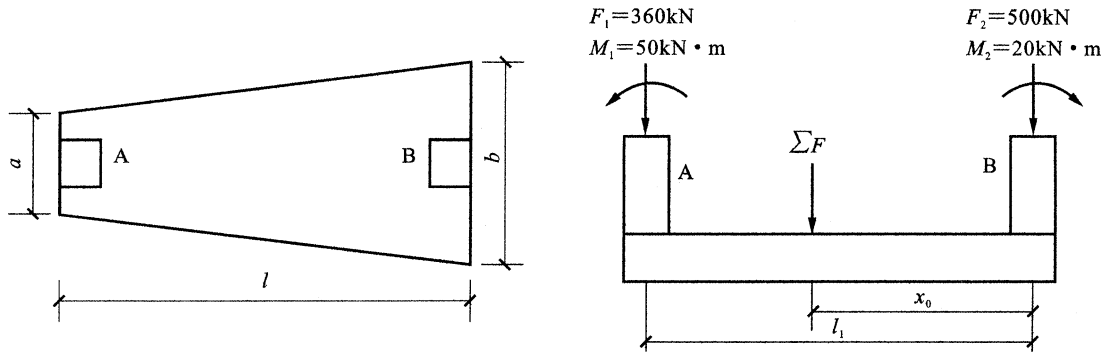

图3-10 例3-2图

【解】 (1)计算基础底面处地基承载力特征值 f_a

根据表 3-3，查得粉砂层，基础宽度的地基承载力修正系数 $\eta_b=2.0$，基础埋深的地基承载力修正系数 $\eta_d=3.0$。初步设计该基础底面宽度 $b<3.0\text{m}$，故不考虑基础宽度的修正系数。修正后的基础底面处地基承载力值 f_a 为

$$f_a=140+3.0\times18\times(1.2-0.5)=177.8(\text{kN/m}^2)$$

(2)确定基础长度 l 及计算基底形心位置 x_0

$$l=3.0+0.4=3.4(\text{m})$$

$$x_0=\frac{F_1l_1+M_1-M_2}{F_1+F_2}=\frac{360\times3+50-20}{360+500}=1.29(\text{m})$$

$l/3<x_0<l/2$，所以采用梯形基础是合适的。

(3)确定梯形基础 a、b

柱荷载标准组合值可近似取基本组合值除以 1.35：

$$F_{1k}=\frac{360}{1.35}=266.67(\text{kN})$$

$$F_{2k}=\frac{360}{1.35}=370.37(\text{kN})$$

$$(f_a-\gamma d)\frac{a+b}{2}l=F_{1k}+F_{2k}$$

$$a+b=\frac{2(F_{1k}+F_{2k})}{(f_a-\gamma d)l}=\frac{2\times(266.67+370.37)}{(177.8-18\times1.2)\times3.4}=2.40(\text{m})$$

根据梯形面积形心与荷载重心重合的条件，有

$$x_0=\frac{l}{3}\cdot\frac{2a+b}{a+b}$$

$$1.29=\frac{3.4}{3}\cdot\frac{2a+b}{a+b}$$

联解上述两式，得 $a=0.33\text{m}$，$b=2.07\text{m}$。

考虑 a 端不应小于柱 A 的尺寸，柱边缘距离基础边缘 150mm，设计 $a=0.4\text{m}+0.15\text{m}\times2=0.7\text{m}$，$b=2.1\text{m}$。

3.4.2 软弱下卧层承载力验算

建筑场地土大多数是成层的，一般土层的强度沿深度增加，而外荷载引起的附加应力则沿深度减小。一般情况下，基础底面持力层承载力满足设计要求即可。但是，也有部分特殊工况，持力层厚度不足，在持力层以下应力影响范围内存在软弱土层，其承载力较低。这种工况下，不但需要验算持力层的承载力，还需验算软弱下卧层的承载力，要求传递到软弱下卧层顶部附加应力与土体的自重应力之和不超过软弱下卧层的承载力，即

$$p_z+p_{cz}\leqslant f_{az} \tag{3-23}$$

式中：p_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；

p_{cz}——软弱下卧层顶面处土的自重压力值，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。

根据弹性半空间体理论可知，由基础荷载引起的地基土层中的附加应力，在基础底面中