



“十四五”职业教育新形态教材

地基与基础工程

DIJI YU
JICHU GONGCHENG

主 编 杨倡珍 张 平
副主编 李颜艳 肖宏宇
主 审 周德泉



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

· 长 沙 ·

内容简介

《地基与基础工程》依据最新的规范和标准编写，是校企合作新形态教材，由来自教学与工程一线专家团队共同编写，参与编写的团队成员包括长期在教学领域耕耘的教授、博士，以及在该领域有多年工作经验的企业高级工程师，由本科院校该领域的权威教授严把质量关。教材具有科学性、实用性、先进性。

本书包括六个模块：模块一地基基础认知、模块二地基处理、模块三浅基础、模块四桩基础、模块五地下连续墙、模块六沉井基础。建议学习者安排48学时进行系统学习。本书设计了43个教学情境和43个学习任务，包括300多个习题和近百个拓展资源，逐个击破“地基与基础工程”课程学习的重难点，提升学生实践能力、综合技能。本书配有优质课件和精品教案。

本书适合作为高等职业教育土木工程专业、道路与桥梁工程技术专业的教学用书，也可供相关技术人员参考。

出版说明 INSTRUCTIONS

为了深入贯彻党的二十大精神和全国教育大会精神，落实《国家职业教育改革实施方案》（国发〔2019〕4号）和《职业院校教材管理办法》（教材〔2019〕3号）有关要求，深化职业教育“三教”改革，全面推进高等职业院校土建类专业教育教学改革，促进高端技术技能型人才的培养，依据教育部高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》和国家教学标准及职业标准要求，通过充分的调研，在总结吸收国内优秀高职高专教材建设经验的基础上，我们组织编写和出版了这套高职高专土建类专业新形态教材。

高职高专教学改革不断深入，土建行业工程技术日新月异，相应国家标准、规范，行业、企业标准、规范不断更新，作为课程内容载体的教材也必然要顺应教学改革和新形势，适应行业的发展变化。教材建设应该按照最新的职业教育教学改革理念构建教材体系，探索新的编写思路，编写出版一套全新的、高等职业院校普遍认同的、能引导土建专业教学改革的系列教材。为此，我们成立了教材编审委员会。教材编审委员会由全国30多所高职院校的权威教授、专家、院长、教学负责人、专业带头人及企业专家组成。编审委员会通过推荐、遴选，聘请了一批学术水平高、教学经验丰富、工程实践能力强的骨干教师及企业专家组成编写队伍。

本套教材具有以下特色：

1. 教材遵循《“十四五”职业教育规划教材建设实施方案》的要求，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，注重立德树人，在教材中有机融入中华优秀传统文化、“四个自信”、爱国主义、法治意识、工匠精神、职业素养等思政元素。

2. 教材依据教育部高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》及国家教学标准和职业标准（规范）编写，体现科学性、综合性、实践性、先进性等特点。

3. 体现“三教”改革精神，适应高职高专教学改革的要求，以职业能力为主线，采用行动导向、任务驱动、项目载体，教、学、做一体化模式编写，按实际岗位所需的知识能力来选取教材内容，实现教材与工程实际的零距离“无缝对接”。

4. 体现先进性特点，将土建学科发展的新成果、新技术、新工艺、新材料、新知识纳入教材，结合最新国家标准、行业标准、规范编写。

5. 产教融合，校企双元开发，教材内容与工程实际紧密联系。教材案例选择符合或接近真实工程实际，有利于培养学生的工程实践能力。

6. 以社会需求为基本依据，以就业为导向，有机融入“1+X”证书内容，融入建筑企业岗位(八大员)职业资格考试、国家职业技能鉴定标准的相关内容，实现学历教育与职业资格认证的衔接。

7. 教材体系立体化。为了方便教师教学和学生学习，本套教材建立了多媒体教学电子课件、电子图集、教学指导、教学大纲、案例素材等教学资源支持服务平台；部分教材采用了“互联网+”的形式出版，读者扫描书中的二维码，即可阅读丰富的工程图片、演示动画、操作视频、工程案例、拓展知识等。

高职高专土建类专业新形态教材

编 审 委 员 会

前言 PREFACE

本教材是根据我国高职院校土木工程专业专科培养目标和“地基与基础工程”课程的教学大纲,高等职业教育专业委员会制定的道路与桥梁技术专业教育标准、人才培养方案及专业平台课程教学基本要求,并按照国家颁布的《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)、《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)等有关设计新规范、施工规范、新标准编写的。

“地基与基础工程”是一门理论性和实践性均较强的专业基础课,内容广泛,综合性强,编写过程中,编者结合长期教学与实践的经验,融入多项资源,结合行业需求和岗位特点,以培养技术应用能力为主线,对基本理论的讲授以应用为目的,教学内容取材以满足学习需求、能反映本学科的新成果为原则,注重针对性和实用性,强调理论与工程实际相联系,体现高等职业教育特色,使读者掌握课程要点及正确的学习方法,提高学生分析和解决地基与基础工程中存在的实际问题的能力,使读者学习到的知识能适应工程建设的需求,为相关专业学生今后从事工程设计、施工等工作打下坚实基础。

教材教学的形态由浅入深:学习导图指点迷津,学习情境引入抛出问题,知识导航解决问题,巩固拓展深化认识,思政理念穿针引线,注重依托项目背景,抽丝剥茧重塑经典案例,层层深入。

本教材编写与时俱进、图文并茂,融入岗位标准特点,结合多年教学改革实践,借助道路桥梁工程技术专业课程建设之机遇,进行校企深度合作,开发新形态教材。具体特点如下:

(1) 任务驱动贯穿于学习项目

依托企业真实素材设计教材内容,基于工作过程和工作任务设计课程体系。分析岗位技能和要求,以具体项目为背景,基于认知—设计—施工—检验的过程重新整合教学内容、重构情境化学习型项目,将地基基础涉及的知识和技能内容进行整合提炼、加工重组,形成6个模块:地基基础的认知、地基处理、浅基础、桩基础、地下连续墙、沉井基础。设计多个情境化学习单元,提炼多个学习任务,学习情境与学习任务相辅相成,理实一体,实现理论学

习和技能训练统一、教学目标和职业素养统一、教学内容与岗位工作统一。

(2) 教学框架层层深入, 思政教育内化于形, 1+X 考试资源有效融入

教材建设中, 建设团队从不同专业, 多视角、多时期, 将育人元素融入。教材框架包含“学习导图”“学习情境”“知识导航”“单元知识巩固”“知识点拓展”等几部分, 设计意图层层递进, 充分体现以学生为主体的学习地位。思政点拨“润物细无声”地穿插其中, 直面引导。

学习导图: 使学生明确学习内容, 认识到学习本单元的意义和重要性等。

学习情境: 为教学内容展开作铺垫, 创建工作情境, 抛砖引玉, 提出问题。

知识导航: 涵盖解决学习问题, 知识点。

单元知识巩固和拓展: 知识点的汇聚和凝练, 便于学生总结归纳; 习题引入大量注册岩土工程师考试真题, 为学生热身训练。

知识点拓展: 延伸行业新知识, 拓展学生知识版图。

思政点拨: 从质量、安全责任意识、家国情怀、工程实践、求真务实等多个角度引导学生养成良好的职业道德修养和正确的价值观。坚持研类型构造、琢设计方案、建地基基础、立道德品行、砌工匠心的思政主线, 引导学生创新思维与意识的教育与提升。

(3) 数字化升级, 多元化资源交融

本教材是一本具有创新性的“数字化”教材, 以信息资源优化为核心, 实现了传统教材的数字化升级。通过嵌入微课、动画、视频等多媒体元素, 生动直观地呈现了复杂的概念和原理。教材中还提供了丰富的标准规范和工程案例, 并利用二维码技术, 将学习内容强化训练和巩固拓展到更广阔的知识领域, 为读者打造了一个深度学习、个性化发展的立体化学习媒介, 实现教材、课堂、教学资源三者有机结合。本教材具有更强的互动性、开放性和实用性, 提供集思考、操练、观看、互动于一体的数字化媒介, 满足不同学习者的需求。全书主要分为6大模块: 模块一为地基基础的认知, 模块二为地基处理, 模块三为浅基础, 模块四为桩基础, 模块五为地下连续墙, 模块六为沉井基础。

本书由杨侶珍、张平主编, 李颜艳、肖宏宇任副主编, 主审为长沙理工大学周德泉教授。本书为校企人员共建教材, 确保教材的针对性和实用性。全书主要由“地基与基础工程”课程团队各位骨干编写完成, 具体编写工作情况如下。肖宏宇编写了模块一(部分)、模块二(部分), 陈小薇编写了模块二(部分), 赵曦编写了模块三(部分), 杨侶珍编写了模块一(部分)、模块二(部分)、模块四(部分)、模块五(部分)、模块六, 李颜艳编写了模块三(部分)、模块

四(部分)、模块六(部分),全书由杨侣珍统稿,汇总整理完成。在本书编写过程中,得到了企业一线人员的鼎力和长沙理工检测咨询有限责任公司的大力支持,张平编写了模块二、模块三、模块四的部分内容,在涉及岩土材料介绍、地基检测、桩基检测方面给予了专业指导。感谢长沙市公路桥梁建设有限责任公司的大力支持,何伟军在不同类型地基和基础的施工方面给出了专业指导。特此感谢他们的热情付出!在编写本书时,还得到了其他兄弟院校等单位的大力支持,他们提出了一些宝贵的意见;感谢中交一公局厦门公司提供的部分教学素材,把“现场”搬进“课堂”,让我们了解了工程人坚持不懈的魅力。

本书得到了湖南交通职业技术学院路桥工程学院领导们的大力支持,特向各位专家及领导们表示感谢!

本书引用了一些国内专家和学者的文献资料及工程现场照片,向提供资料的单位和个人表示衷心感谢!

限于编者理论水平和实践经验,不妥或者错误之处难免,恳请广大读者和同行专家批评指正。

编 者

2024年8月

教学课时参考

《地基与基础工程》教学内容建议课时 48 课时，具体安排如下，不同专业可以结合相关内容展开教学，课时安排仅供参考。

模块	知识单元	主要内容	课时规划
模块一 地基基础 认知	单元一 地基基础概述	学习任务 1 认识地基与基础	2 课时
		学习任务 2 收集分析基础设计和施工所需原始资料	
		学习任务 3 作用效应组合计算	
	单元二 地基岩土的分类、工程特性与地基承载力	学习任务 1 地基岩土分类，岩土与地基基础的关系	4 课时
		学习任务 2 认识地基岩土的工程特性	
		学习任务 3 计算地基承载力	
		学习任务 4 浅层平板载荷试验确定地基承载力	
模块二 地基 处理	单元一 软弱地基处理	学习任务 1 识别软土地基	2 课时
		学习任务 2 处理软土地基	
	单元二 其他特殊地基处理	学习任务 1 认识其他特殊地基	2 课时
		学习任务 2 处理其他特殊地基	
模块三 浅基础	单元一 识别浅基础的类型、构造	学习任务 1 认识浅基础类型	2 课时
		学习任务 2 识别浅基础构造	
	单元二 浅基础的设计与计算	学习任务 1 刚性扩大基础的设计与计算	6 课时
		学习任务 2 重力式桥墩刚性扩大基础设计案例分析	
	单元三 浅基础施工	学习任务 1 旱地浅基础施工	2 课时
		学习任务 2 水域浅基础施工	

续表

模块	知识单元	主要内容	课时规划
模块四 桩基础	单元一 桩基础的认知	学习任务1 认识桩基础及了解其特点应用	2 课时
	单元二 识别桩和桩基础 的类型及构造	学习任务1 识别桩和桩基础的类型	
		学习任务2 识别桩和桩基础的构造	
	单元三 单桩的工作机理	学习任务1 单桩竖向荷载工作机理	1 课时
		学习任务2 单桩横向荷载工作机理	
		学习任务3 桩的摩阻力与抗拔力	
	单元四 群桩基础的工作 机理	学习任务1 认识端承桩群桩基础和摩擦桩群桩基础	2 课时
		学习任务2 群桩基础的破坏模式和验算	
	单元五 单桩承载力的 确定	学习任务1 单桩竖向容许承载力的确定	3 课时
		学习任务2 单桩横向容许承载力的确定	
	单元六 桩基础设计流程 分析	学习任务1 桩基础设计流程分析	4 课时
		学习任务2 桩基础方案的选择	
	单元七 桩基础施工	学习任务1 钻孔灌注桩施工	6 课时
		学习任务2 预制桩施工	
		学习任务3 深水中桩基础栈桥平台及围堰施工	
		学习任务4 识读桩基础设计图,领悟施工重难点	
	单元八 桩基础工程质量 控制及检验	学习任务1 灌注桩的质量控制及检验	2 课时
		学习任务2 预制桩的质量控制及检验	
模块五 地下 连续墙	单元一 认识地下连续墙	学习任务1 了解地下连续墙的发展、特点,识别地下连续墙的类型	2 课时
	单元二 地下连续墙施工	学习任务1 地下连续墙施工工艺流程分析	
		学习任务2 地下连续墙施工案例分析	
模块六 沉井基础	单元一 认识沉井	学习任务1 了解沉井的发展、特点,识别沉井类型及构造	2 课时
	单元二 旱地沉井施工	学习任务1 分析旱地沉井施工	2 课时
		学习任务2 分析旱地沉井基础施工案例	
	单元三 水域沉井施工	学习任务1 分析水域沉井施工	2 课时
		学习任务2 分析水域沉井基础施工案例	

目 录 CONTENTS

模块一 地基基础认知

单元一 地基基础概述	(3)
学习任务1 认识地基与基础	(4)
学习任务2 收集分析基础设计和施工所需原始资料	(6)
学习任务3 作用效应组合计算	(10)
单元二 地基岩土的分类、工程特性与地基承载力	(18)
学习任务1 地基岩土分类, 岩土与地基基础的关系	(19)
学习任务2 认识地基岩土的工程特性	(34)
学习任务3 计算地基承载力	(36)
学习任务4 浅层平板载荷试验确定地基承载力	(42)

模块二 地基处理

单元一 软弱地基处理	(53)
学习任务1 识别软土地基	(54)
学习任务2 处理软土地基	(59)
单元二 其他特殊地基处理	(68)
学习任务1 认识其他特殊地基	(69)
学习任务2 处理其他特殊地基	(73)

模块三 浅基础

单元一 识别浅基础的类型、构造	(87)
学习任务1 认识浅基础类型	(88)
学习任务2 识别浅基础构造	(90)

单元二 浅基础的设计与计算	(97)
学习任务1 刚性扩大基础的设计与计算	(98)
学习任务2 重力式桥墩刚性扩大基础设计案例分析	(111)
单元三 浅基础施工	(122)
学习任务1 旱地浅基础施工	(123)
学习任务2 水域浅基础施工	(130)

模块四 桩基础

单元一 桩基础的认知	(141)
学习任务1 认识桩基础,了解其特点应用	(142)
单元二 识别桩和桩基础的类型及构造	(151)
学习任务1 识别桩和桩基础的类型	(152)
学习任务2 识别桩和桩基础的构造	(165)
单元三 单桩的工作机理	(176)
学习任务1 单桩竖向荷载下工作机理	(177)
学习任务2 单桩横向荷载工作机理	(180)
学习任务3 桩的摩阻力与抗拔力	(182)
单元四 群桩基础的工作机理	(190)
学习任务1 认识端承桩群桩基础和摩擦桩群桩基础	(191)
学习任务2 群桩基础的破坏模式和验算	(194)
单元五 单桩承载力的确定	(200)
学习任务1 单桩竖向容许承载力的确定	(201)
学习任务2 单桩横向容许承载力的确定	(216)
单元六 桩基础设计流程分析	(224)
学习任务1 桩基础设计流程分析	(226)
学习任务2 桩基础方案的选择	(245)
单元七 桩基础施工	(254)
学习任务1 钻孔灌注桩施工	(255)
学习任务2 预制桩施工	(273)

学习任务 3 深水中桩基础栈桥平台及围堰施工	(278)
学习任务 4 识读桩基础设计图, 领悟施工重难点	(285)
单元八 桩基础工程质量控制及检验	(295)
学习任务 1 灌注桩的质量控制及检验	(295)
学习任务 2 预制桩的质量控制及检验	(300)

模块五 地下连续墙

单元一 认识地下连续墙	(309)
学习任务 1 了解地下连续墙的发展、特点, 识别地下连续墙的类型	(309)
单元二 地下连续墙施工	(317)
学习任务 1 地下连续墙施工工艺流程分析	(318)
学习任务 2 地下连续墙施工案例分析	(324)

模块六 沉井基础

单元一 认识沉井	(331)
学习任务 1 了解沉井的发展、特点, 识别沉井类型及构造	(331)
单元二 旱地沉井施工	(343)
学习任务 1 分析旱地沉井施工	(344)
学习任务 2 分析旱地沉井基础施工案例	(351)
单元三 水域沉井施工	(356)
学习任务 1 分析水域沉井施工	(357)
学习任务 2 分析水域沉井基础施工案例	(361)
参考文献	(367)

模块一 地基基础认知

单元一 地基基础概述



学习目标

【知识目标】

1. 知道地基和基础的定义、特点。
2. 理解基础设计和施工所需资料的作用。
3. 知道基础设计需要考虑哪些作用。

【能力目标】

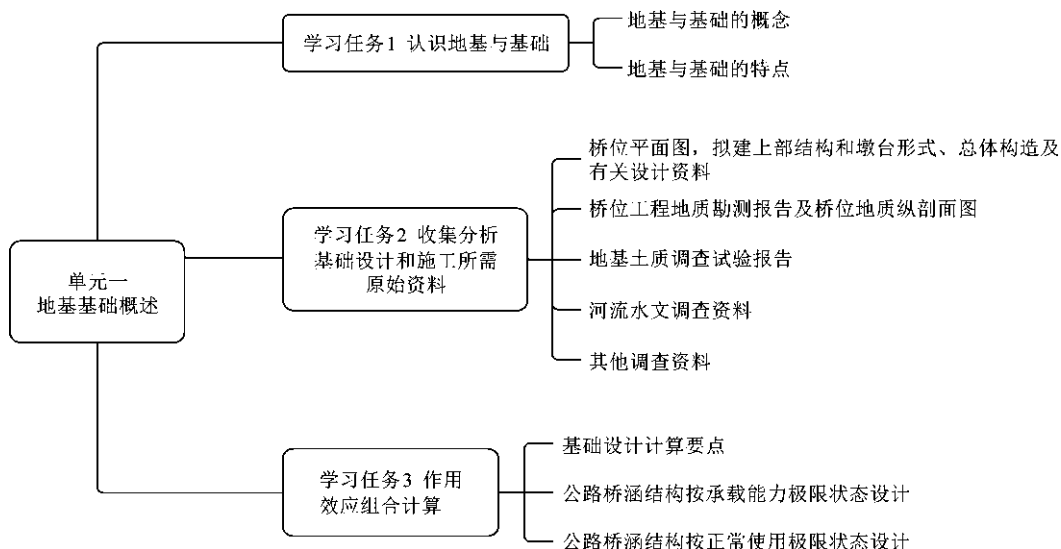
1. 能根据地基与基础的特点，辨别不同类型地基和基础。
2. 会识读收集的各种设计和施工资料。
3. 能鉴定常见的地基与基础，能初步判断地基与基础工程性质。

【素质目标】

1. 培养文化自信、科技强国责任意识。
2. 培养严谨求实、一丝不苟的职业素养。
3. 培养刻苦钻研、团结协作、乐于奉献的职业素养。



学习导图



学习任务1 认识地基与基础

学习情境

“逢山开路，遇水架桥”，对于交通而言，桥梁的修建，无疑是突破河流天堑的最主要且最有效的手段。早在原始社会，人们就利用自然倒下的树木及沿岸生长的藤蔓等来跨越河流和峡谷。据史料记载，从我国周朝开始，诸如梁桥、浮桥、索桥等多种形式的桥梁逐渐出现。距今 1400 多年的赵州桥，是一座位于河北省石家庄市赵县城南洺河之上的石拱桥。赵州桥建于隋开皇十五年至大业元年(595—605 年)，由匠师李春设计建造，因赵县古称赵州而得名。赵州桥是世界上现存年代久远、跨度最大、保存最完整的单孔坦弧敞肩石拱桥。它的根基是由 5 层石条砌成的高 1.56 m 的桥台，直接建在较浅的密实砂土层上，沉降很小，现反算基底压力为 500~600 kPa，与现行规范要求的该土层承载力容许值(550 kPa)接近。

随着时代的发展，科学技术的进步，不同类型的地基与基础不断涌现，如图 1-1、图 1-2 所示。“中国制造”在世界的呼声也越来越响亮，也留下了很多杰作。



图 1-1 赵州桥

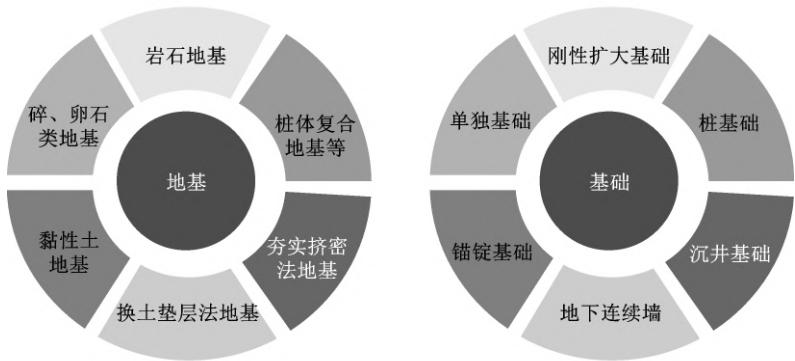


图 1-2 地基与基础的类型(例举部分)



知识导航

一、地基与基础的概念

我们日常生活中常见的道路工程、桥梁工程、隧道工程、房建工程、港口工程等各类土建构物均依靠地球的土体或岩体支撑。这些建筑物建造在地面以下一定深度的土体或岩体部分,统称为地层。建筑物通过其下部结构将荷载传递到地层中去,受建筑物荷载影响的地层称为地基。

“万丈高楼平地起”,所有的土建构物都需要牢固的地基。地基的功能是承受建筑物的荷载并保持建筑物稳定。地基一般可分为天然地基和人工地基,天然地基是不需要对原有地基进行加固处理就能满足设计要求的地基,自然状态下就可承担基础全部荷载。采用天然地基的基础可缩短工期,降低造价。当天然地基土质软弱,无法满足上部结构对地基承载力和变形的要求时,需对其进行加固处理,这种地基称为人工地基。

通常将建筑物向地基传递荷载的下部(扩大)支承结构统称为基础,如图1-3所示。承受建筑物荷载最大的那一部分地基称为地基持力层(也称为主要受力层)。持力层以上的所有地层统称为覆盖层。位于持力层之下的地基称为下卧层。当下卧层的土性明显比持力层软弱时,则将该层称为软弱下卧层。

基础根据埋置深度和施工工艺特点分为浅基础和深基础,一般埋置深度较浅(通常埋置深度 $h \leq 5$ m)只需要经过开挖、排水等施工后就可以建造的称为浅基础,如墙下条形基础、柱下独立基础等;由于浅层土质不良或建筑物荷载过大而需要将基础底面置于较深(通常埋置深度 $h > 5$ m)的良好的土层上,并且施工较为复杂的基础称为深基础,如桩基础、沉井基础和地下连续墙等。

基础依据建筑物材料的抗压和抗拉性能,还可以分为刚性基础和柔性基础。刚性基础是指用抗压性能较好而抗拉、抗剪性能较差的材料建造的基础,受刚性角的限制,常用的材料有砖、三合土、灰土、混凝土、毛石、毛石混凝土等。柔性基础是指用钢筋混凝土修建的基础。与刚性基础相比,柔性基础钢材、水泥用量增加,技术复杂,造价较高。当然,柔性基础的抗弯和抗剪能力大大提高,且不受刚性角的限制。

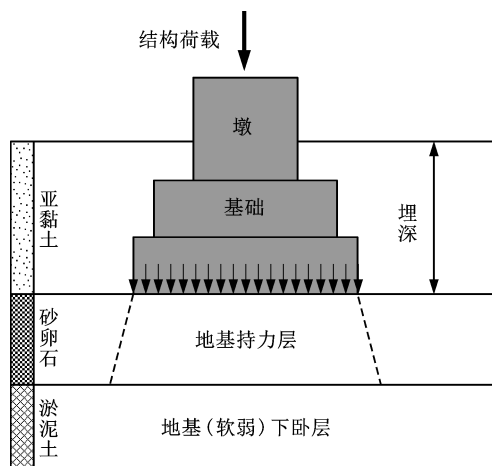


图 1-3 桥梁地基、基础示意图

二、地基与基础的特点

1. 地基的特点

隐蔽性。地基位于基础以下,虽然能进行量测和检测,但往往无法直接观测。同时,建筑物地基建设过程中会受多种外界因素影响,过程相对复杂,因此,在地基施工过程中任何

一个因素欠缺考虑都会对整个地基处置的施工质量带来巨大的影响。

离散性。地基由岩土体组成,由于其母体和生成条件的复杂性,各种岩(土)性指标的离散性也很大,当不同岩土体的组成使地基具有典型的地域性。

低强度。相对于其他建筑材料,由于岩土体母体组合排列的多样性,岩土体(特别是土)的强度偏低,当天然地基无法支承时,需采用人工地基。

变形复杂。与其他建筑材料相比,岩土体(特别是土)在荷载作用后易于变形且呈现出复杂的变形性质。

2. 基础的特点

基础位于地下,具有隐蔽性;基础的施工环境一般较差,所以施工质量通常较难控制,容易成为建筑体系中的薄弱环节,如图 1-4 所示。基础工程施工难度大,因为常在地下或水下进行,往往需挡土排水。基础的造价比较高,工期也比较长。在一般的多、高层建筑中,其造价约占总造价的 25%,工期占总工期的 25%~30%,如需采用人工地基或深基础,其造价和工期所占比重会更大。



(a) 钻芯后灌注桩内灌注不密实



(b) 混凝土脱落、钢筋外露

图 1-4 基础暴露出的问题

学习任务 2 收集分析基础设计和施工所需原始资料



学习情境

某高速公路穿越南方某景区城市。该城市交通量较大,为亚热带季风气候,气候条件比较好。预建设一座特大桥横跨某大河,水流流速不大,建成后的情况如图 1-5 所示。在大桥的基础设计和施工过程中,需要在事前通过详细的调查研究,充分分析和解读各项资料,认真设计,规范施工。思考:在基础设计和施工过程中需要准备哪些原始资料呢?这些资料在不同的环节有什么用途?



图 1-5 某桥梁建成通车示意图



知识导航

地基与基础的设计方案、计算中有关参数的选用,都需要根据当地的地质条件、水文条件、上部结构形式、作用特性、材料情况及施工要求等因素进行全面考虑。施工方案和方法也应该结合设计要求、现场地形、地质条件、施工技术设备、施工季节、气候和水文等情况来研究确定。因此,应在事前通过详细的调查研究,充分掌握必要的、符合实际情况的资料。在此对桥梁基础工程设计和施工所需资料及计算荷载确定原则作简要介绍。

在桥梁的地基与基础设计及施工开始之前,除了应掌握有关上部结构形式、跨径、作用、墩台结构及国家颁布的桥梁设计和施工技术规范等全桥的资料外,还应注意地质、水文资料的搜集和分析,重视土质和建筑材料的调查与试验。基础设计主要应掌握的地质、水文、地形等资料,各项资料内容可根据桥梁工程规模与重要性、建桥地点工程地质与水文条件的具体情况、设计阶段确定取舍。

1. 桥位平面图、拟建上部结构和墩台形式、总体构造及有关设计资料

在进行大中型桥梁基础初步设计时,应掌握经过实地测绘和调查取得的桥位地形、地貌、洪水泛滥线、河道主河槽和河床位置等资料及绘成的地形平面图,图形比例为 $1:500 \sim 1:5000$,测绘范围应根据桥梁工程规模与重要性、河道情况确定,若桥址处有不良工程地质现象,如滑坡、崩坍和泥石流等,以及河道弯曲、主支流汇合、河心滩和活动沙洲等,均应在图上标示出。

桥梁上部结构的形式、跨径和墩台的结构形式、高度、平面尺寸等对地基与基础设计方案的选择和具体的设计计算都有很大的影响,如超静定结构的上部结构对地基、基础的沉降有较严格的要求,上部结构、桥墩、桥台的永久作用、可变作用是地基基础的主要荷载,除了特殊情况,基础工程的设计荷载标准、等级应与上部结构一致,因此应获得全面的上部结构及墩台的总体设计资料、数据、设计等级、技术标准等。

桥位平面图如图 1-6 所示,其资料主要包括:桥位地形,桥位附近地貌、地物,不良工程地质现象的分布位置,桥位与两端路线平面关系,桥位与河道平面关系等。其资料用途包括:桥位的选择,下部结构位置的研究,施工现场的布置,地质概况的补充描述,河岸冲刷及水流方向改变的估计,墩台、基础防护构造物的布置等。

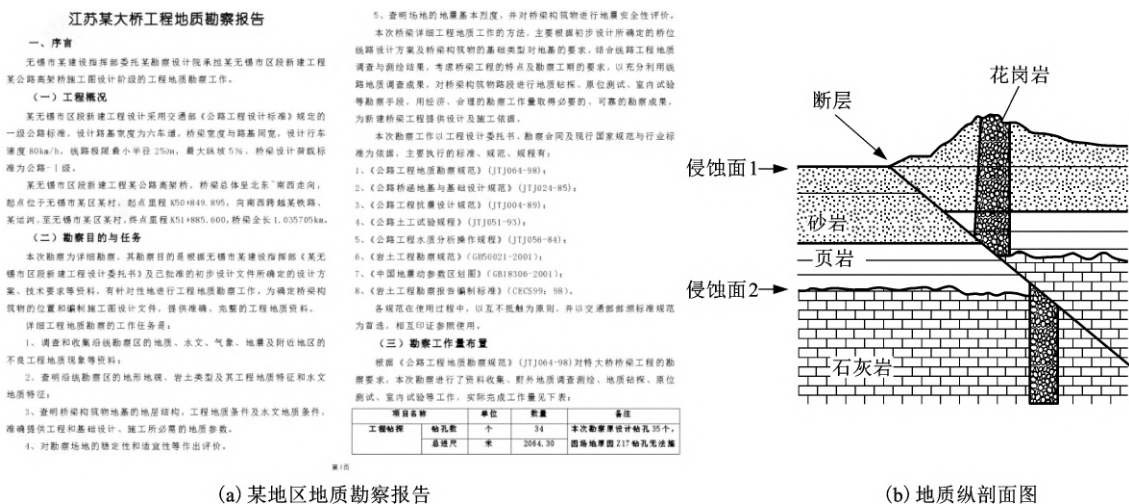


图 1-6 桥位平面示意图

2. 桥位工程地质勘测报告及桥位地质纵剖面图

对桥位地质构造进行工程评价的主要资料包括：河谷的地质构造，桥位及附近地层的岩性，如地质年代、成因、层序、分布规律及工程性质(岩层产状、构造、结构、完整及破碎程度、风化程度等)，以及覆盖层厚度和土层变化关系等。并且，对建桥地点一定范围内各种不良工程地质现象或特殊地貌，如溶洞、冲沟等的成因、分布范围、发展规律及其对工程的影响进行说明。

桥位工程地质勘测报告及桥位地质纵剖面图如图 1-7 所示。其资料主要内容包括：桥位地质勘测调查资料，地质、地史资料的说明，不良工程地质现象及特殊地貌的调查勘测资料等。其资料用途包括：桥位、下部结构位置的选定，地基持力层的选定，墩台高度、结构形式的选定，墩台、基础防护构筑物的布置等。



(a) 某地区地质勘察报告

(b) 地质纵剖面图

图 1-7 工程地质勘测报告与地质纵剖面图

3. 地基土质调查试验报告

地基土质调查试验报告通常包括地质背景，土(岩)质分类，土的物理、力学性质等信息，并进行原位测试和地下水位情况调查，如图 1-8、1-9 所示。其资料主要内容包括：钻孔资料，



覆盖层及地基土层状生成分布情况,分层土(岩)层状生成分布情况,载荷试验报告,地下水位调查资料等。其资料用途包括:分析和掌握地基的层状,地基持力层及基础埋置深度的研究与确定,地基各土层强度及有关计算参数的选定,基础类型和构造的确定,基础沉降的计算等。

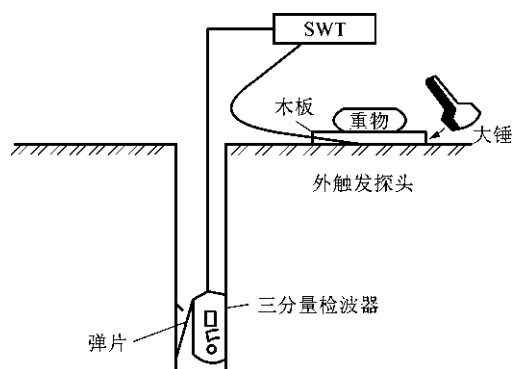


图 1-8 单孔剪切波试验示意图

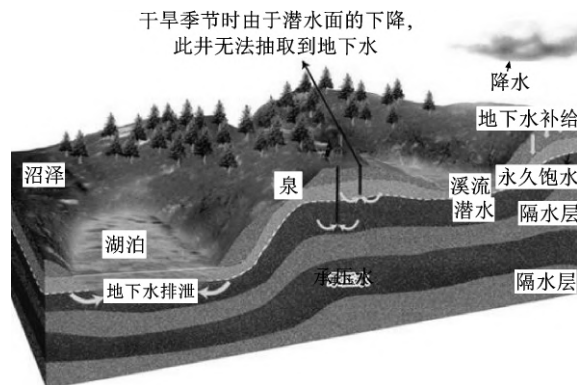


图 1-9 地下水位示意图

在进行施工详图及施工设计时,应掌握地基土层的类别及物理力学性质。在工程地质勘测时,应调查、钻(挖)取各层地基上足够数量的原状土(岩)样,用室内或原位试验方法得到各层土(岩)的物理力学指标,如粒径级配、塑性指数、液性指数、天然含水率、密度、孔隙比、抗剪强度指标、压缩特性、渗透性指标,以及必要的载荷试验、岩石抗压强度试验等的结果,并将这些结果编制成表,在土(岩)层柱状剖面图中予以说明。

根据土质调查试验报告评定各土层的强度和稳定性,报告中应有各层土的颜色、结构、密实度和状态等的描述资料,对岩石还应包括有关风化、节理、裂隙和胶结物等情况的说明。地基土质调查资料包括地下水及其随季节升降的高程,在冰冻地区应掌握土层的冻结深度、冻融情况及有关冻土力学数据。

当遇到湿陷性黄土、多年冻土、软黏土、含大量有机质土或膨胀土、盐碱土时,对这些土层的特性应有专门的试验资料,如湿陷性指标、冻土强度、土壤可溶盐和有机质含量等。

4. 河流水文调查资料

桥梁墩台基础的设计,要有通过计算和调查取得的比较可靠的设计冲刷深度数据,并了解设计洪水频率的最高洪水位、低水位和常年水位及流量、流速、流向变化情况,河流的下蚀情况与侵蚀和河床的稳定性,架桥地点河槽、河滩、阶地淹没情况,如图 1-10 所示,并应注意收集河流变迁情况和水利设施及规划情况的资料,还应有河水及地下水侵蚀的检验资料。在沿海地点应了解潮汐、潮流有关资料及其对桥梁的影响。

河流水文调查资料主要内容包括:桥位附近河道纵横断面图,有关流速、流量、水位调查资料,各种冲刷深度的计算资料,通航等级、漂浮物、流冰调查资料等。其资料用途包括:确定根据冲刷要求基础的埋置深度,计算桥墩身水平作用力,确定施工季节、施工方法的研究等。

5. 其他调查资料

其他调查资料主要包括:地震资料、施工所需的建筑材料、气象资料、附近桥梁的调查资料、施工方面的资料等(见表 1-1)。

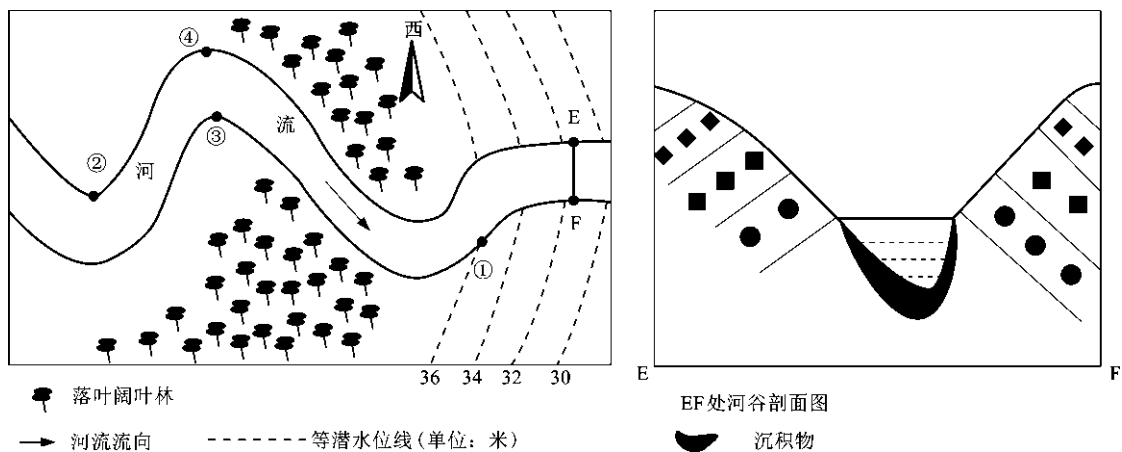


图 1-10 河流水文信息图

表 1-1 其他调查资料

资料种类	资料主要内容	资料用途
地震	(1) 地震记录; (2) 震害调查	(1) 确定抗震设计强度; (2) 抗震设计方法和抗震措施的确定; (3) 地基土振动液化和岸坡滑移的分析研究
建筑材料	(1) 就地可采取、可供应的建筑材料种类、数量、规格、质量、运距等; (2) 当地工业加工能力、运输条件有关资料; (3) 工程用水调查	(1) 下部结构采用材料种类的确定; (2) 就地供应材料的计算和计划安排
气象	(1) 当地气象台有关气温变化、降水量、风向风力等的记录资料; (2) 实地调查采访记录	(1) 气温变化的确定; (2) 基础埋置深度的确定; (3) 风压的确定; (4) 施工季节和方法的确定

学习任务 3 作用效应组合计算



学习情境

在不同的环境下进行工程建设,受到的荷载类型有很多。如图 1-11 所示,桩基础受到的荷载有桥塔质量、桥面的自重、拉索的质量、桥墩的自重、基础的自重、汽车荷载、风载、水流的作用等。在多项荷载的影响下,结构可能会出现一些不利的状态,需要我们提前研究和消除其不利影响。不同的荷载作用下叠加组合的方式不一样,对基础产生的效果(弯矩、扭矩、位移)也不相同。下面一起了解作用、作用类型、作用效应以及它的计算组合。

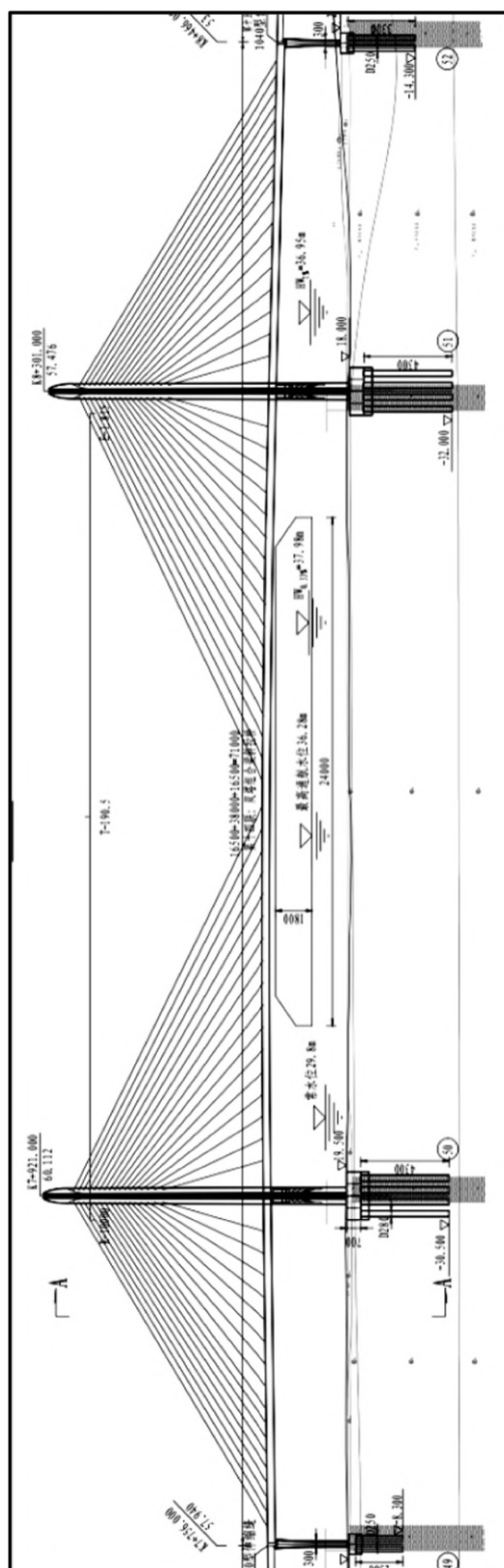


图1-11 桥梁结构图



一、基础设计计算要点

基础设计计算要点主要是指建筑物承载的各种作用。

作用是指施加在结构上的一组集中力或分布力，或引起结构外变形或约束变形的原因。前者叫直接作用(荷载)，后者叫间接作用。现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)根据作用出现的概率、持续时间、量值的变化，将公路桥涵设计采用的作用分为永久作用、可变作用、偶然作用、地震作用四类，规定详见表 1-2。

表 1-2 作用分类

编号	分类	作用名称
1	永久作用	结构重力(包括结构附加重力)
2		预加力
3		土的重力
4		土侧压力
5		混凝土收缩、徐变作用
6		水浮力
7		基础变位作用
8	可变作用	汽车荷载
9		汽车冲击力
10		汽车离心力
11		汽车引起的土侧压力
12		汽车制动力
13		人群荷载
14		疲劳荷载
15		风荷载
16		流水压力
17		冰压力
18		波浪力
19		温度(均匀温度和梯度温度)作用
20		支座摩阻力
21	偶然作用	船舶的撞击作用
22		漂流物的撞击作用
23		汽车撞击作用
24	地震作用	地震作用

作用效应是指结构对所受作用的反应，如弯矩、扭矩、位移等。组合原则：按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行作用效应组合，取其最不利效应进行组合。最不利作用效应组合指所有可能的作用效应组合中对结构构件产生总效应最不利的一组作用效应组合。桥梁结构设计的关键是全面合理的作用效应组合，而各种作用效应组合又与预期中桥梁所能达到的极限状态密切相关。

根据国际标准《结构可靠性总原则》(ISO2394)，采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。极限状态是指结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求。公路桥涵结构设计应考虑结构上可能同时出现的作用，按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行作用效应组合，取其最不利的作用效应组合进行设计；只有在结构上可能同时出现的作用，才进行其效应的组合。当结构或结构构件需做不同受力方向的验算时，则应以不同方向的最不利的作用效应进行组合。当可变作用的出现对结构或结构构件产生有利影响时，该作用不应参与组合。实际不可能同时出现的作用或同时参与组合概率很小的作用，按表 1-3 规定不考虑其作用效应的组合。

- (1)永久作用(恒载)：结构重力，土的重力，土的自重产生的侧压力，水浮力，预应力结构中的预加力，超静定结构中因混凝土收缩、徐变和基础变位而产生的作用。
- (2)可变作用(活载)：汽车荷载、汽车冲击力、汽车离心力、汽车引起的土侧压力、人群荷载、平板挂车或履带车荷载引起的土侧压力；风荷载、汽车制动力、流水压力、冰压力、支座摩阻力，在超静定结构中尚需考虑温度变化的作用。
- (3)偶然作用：船舶或漂流物撞击力。
- (4)地震作用：地震力。

表 1-3 可变作用不同时组合

编号	作用名称	不与该作用同时参与组合的作用编号
12	汽车制动力	16, 17, 18, 20
16	流水压力	12, 17, 18
17	冰压力	12, 16, 18
18	波浪力	12, 16, 17
20	支座摩阻力	12

施工阶段的作用组合，应按计算需要及结构的条件而定，结构上的施工人员和施工机具设备均应作为可变作用加以考虑。组合式桥梁中，当把底梁作为施工支撑时作用组合效应宜分两个阶段计算，底梁受荷为第一个阶段，组合梁受荷为第二个阶段。多个偶然作用不同时参与组合，地震作用不与偶然作用同时参与组合。

现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中规定，公路桥涵结构的设计基准期为 100 年，在设计计算时应考虑基准期内各种可能出现的作用效应组合，并分别按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。下面对现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中有关承载能力极限状态和正常使用极限状态下的各种作用效应组合进行简单的介绍。

二、公路桥涵结构按承载能力极限状态设计

公路桥涵结构按承载能力极限状态设计时，应采用作用效应基本组合和偶然组合。承载能力极限状态是指达到最大承载能力或不适于继续承载大变形的状态，参考 JTG D60—

2015 公路桥涵设计通用规范。

按承载能力极限状态设计时,永久作用的设计值效应与可变作用设计值效应相组合,称基本组合。按承载能力极限状态设计时,永久作用标准值效应与可变作用某种代表值效应、一种偶然作用标准值效应组合,称为作用效应偶然组合。对持久设计状况和短暂设计状况应采用作用的基本组合,对偶然设计状况应采用作用的偶然组合,对地震设计状况应采用作用的地震组合。

(1)基本组合表达式为:

$$S_{ud} = \gamma_0 S \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} G_{ik}, \gamma_{L1} \gamma_{Q1} Q_{1k}, \psi_c \sum_{j=2}^n \gamma_{Lj} \gamma_{Qj} Q_{jk} \right) \quad (1-1)$$

$$S_{ud} = \gamma_0 S \left(\sum_{i=1}^m G_{id}, Q_{1d}, \sum_{j=2}^n Q_{jd} \right) \quad (1-2)$$

式中: S_{ud} 为承载能力极限状态下作用基本组合的效应组合设计值,当作用与作用效应可按线性关系考虑时,作用偶然组合的效应设计值 S_{ud} 可通过作用效应代数相加进行计算。 $S(\quad)$ 为作用组合的效应函数。 γ_0 为结构重要性系数,按持久状况承载能力极限状态设计时,公路桥涵结构的设计安全等级应根据结构破坏可能产生的后果的严重程度划分为三个设计等级,并不低于表 1-4 的规定,对应于设计安全等级一级、二级和三级分别取 1.1、1.0、0.9。 γ_{G_i} 分别为第 i 个永久效应的分项系数。 G_{ik} 、 G_{id} 为第 i 个永久作用的标准值和设计值。 γ_{Q1} 为汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)的分项系数,采用车道荷载计算时取 $\gamma_{Q1} = 1.4$,采用车辆荷载计算时,其分项系数取 $\gamma_{Q1} = 1.8$ 。当某个可变作用在效应组合中其值超过汽车荷载效应时,则该作用取代汽车荷载,其分项系数与车道荷载计算时的分项系数同值;对专为承受某作用而设置的结构或装置,设计时该作用的分项系数与车道荷载计算时的分项系数同值;计算人行道板和人行道栏杆的局部荷载,其分项系数也与车道荷载计算时的分项系数同值。 Q_{1k} 、 Q_{1d} 分别为汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)的标准值和设计值。 γ_{Qj} 为作用组合中除汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)、风荷载外的其他第 j 个可变作用的分项系数,取 $\gamma_{Qj} = 1.4$,但风荷载的分项系数取 $\gamma_{Qj} = 1.1$ 。 Q_{jk} 、 Q_{jd} 为除汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)外的其他第 j 个可变作用的标准值和设计值。 ψ_c 为除汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)外的其他可变作用的组合值系数,取 $\psi_c = 0.75$ 。 $\psi_c Q_{jk}$ 为在作用组合中除汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)外的第 j 个可变作用的组合值。 γ_{Lj} 为第 j 个可变作用的结构设计使用年限荷载调整系数。公路桥涵结构的设计使用年限按现行《公路工程技术标准》(JTG B01)取值时,可变作用的结构设计使用年限荷载调整系数取 $\gamma_{Lj} = 1.0$;否则, γ_{Lj} 取值应按专题研究确定。

表 1-4 公路桥涵结构的设计安全等级

设计安全等级	破坏后果	适用对象
一级	很严重	(1)各等级公路上的特大桥、大桥、中桥; (2)高速公路、一级公路、二级公路、国防公路及城市附近交通繁忙公路上的小桥
二级	严重	(1)三级公路、四级公路上的小桥; (2)高速公路、一级公路、二级公路、国防公路及城市附近交通繁忙公路上的涵洞
三级	不严重	三级公路、四级公路上的涵洞

(2)偶然组合表达式为:

$$S_{ad} = S \left(\sum_{i=1}^m G_{ik}, A_d, (\psi_{f1} \text{ 或 } \psi_{q1}) Q_{1k}, \sum_{j=2}^n \psi_{qj} Q_{jk} \right) \quad (1-3)$$

式中: S_{ad} 为承载力极限状态下作用偶然组合的效应组合值, 当作用与作用效应可按线性关系考虑时, 作用偶然组合的效应设计值 S_{ad} 可通过作用效应代数相加进行计算。 A_d 为偶然作用的设计值。 ψ_{f1} 为汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)的频遇值系数, 取 $\psi_{f1} = 0.7$; 当某个可变作用在组合中其效应值超过汽车荷载效应时, 则该作用取代汽车荷载, 人群荷载取 $\psi_f = 1.0$, 风荷载取 $\psi_f = 0.75$, 温度梯度作用取 $\psi_f = 0.8$, 其他作用取 $\psi_f = 1.0$ 。 $\psi_{f1} Q_{1k}$ 为汽车荷载的频遇值。 ψ_{q1} 、 ψ_{qj} 为第 1 个和第 j 个可变作用的准永久值系数, 汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)取 $\psi_q = 0.4$, 人群荷载取 $\psi_q = 0.4$, 风荷载取 $\psi_q = 0.75$, 温度梯度作用取 $\psi_q = 0.8$, 其他作用取 $\psi_q = 1.0$ 。 $\psi_{q1} Q_{1k}$ 、 $\psi_{qj} Q_{jk}$ 为第 1 个和第 j 个可变作用的准永久值。

三、公路桥涵结构按正常使用极限状态设计

公路桥涵结构按正常使用极限状态设计时, 应采用作用的频遇组合和准永久组合。正常使用极限状态是指桥涵结构或其构件达到正常使用或耐久性的某项限值的状态。按正常使用极限状态设计时, 永久作用标准值效应与可变作用频遇值效应的组合, 称为作用的频遇组合。按正常使用极限状态设计时, 永久作用标准值效应与可变作用准永久值效应的组合, 称为作用的准永久组合。

当基础结构需要进行正常使用极限状态设计时, 应根据不同的设计要求, 采用作用的频遇组合和作用的准永久组合两种效应组合。

(1)频遇组合表达式为:

$$S_{fd} = S \left(\sum_{i=1}^m G_{ik}, \psi_{f1} Q_{1k}, \sum_{j=2}^n \psi_{qj} Q_{jk} \right) \quad (1-4)$$

式中: S_{fd} 为作用频遇组合的效应设计值, 当作用与作用效应可按线性关系考虑时, 作用频遇组合的效应设计值 S_{fd} 可通过作用效应代数相加计算。 ψ_{f1} 为汽车荷载(不计汽车冲击力)频遇值系数, 通常取 0.7。

(2)准永久组合表达式为:

$$S_{qd} = S \left(\sum_{i=1}^m G_{ik}, \sum_{j=1}^n \psi_{qj} Q_{jk} \right) \quad (1-5)$$

式中: S_{qd} 为作用准永久组合设计值。 ψ_{qj} 为汽车荷载(不计汽车冲击力)准永久值系数, 通常取 0.4;

单元知识巩固和拓展



一、知识要点汇总

1. 了解地基和基础的概念。了解地基与基础的定义(地基是指承受建筑物荷载影响的地层;基础是建筑物下部传递荷载到地基的扩大支承结构);了解地基类型(天然地基和人工地基);了解基础类型的划分(分为浅基础和深基础,以及刚性基础和柔性基础)。

2. 熟悉设计与施工原则。资料收集:设计和施工前需收集地质、水文、地形等资料,以确保设计准确性和施工安全。计算要点:基础设计涉及永久作用、可变作用、偶然作用、地震作用等荷载的合理计算。

3. 掌握作用效应组合计算。了解作用效应基本概念(包括弯矩、扭矩、位移等结构对荷载的反应);明白组合原则(按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行作用效应组合,采用以概率理论为基础的极限状态设计方法);清楚永久作用与可变作用(结合结构可能同时面临的多种作用,采用基本组合或偶然组合进行设计)。



二、习题练习

(一) 单选题

1. 地基分为以下哪几种类型?()
A. 天然地基和人工地基
B. 浅基础和深基础
C. 刚性基础和柔性基础
D. 永久作用和可变作用
2. 基础设计计算不需要考虑下面哪项作用?()
A. 永久作用
B. 可变作用
C. 偶然作用
D. 外力作用
3. 浅基础按受力条件不同分为()。
A. 刚性基础和柔性基础
B. 浅基础和深基础
C. 天然地基和人工地基
D. 临时基础和永久基础
4. 天然地基指的是()。
A. 需要进行人工加固处理的地基
B. 无须人工加固即可满足设计要求的地基
C. 仅包含土体的地基
D. 仅包含岩石的地基
5. 关于基础工程设计的原则描述不正确的是哪项?()
A. 基础底面的压应力小于地基的容许承载力
B. 地基及基础的变形值大于建筑物要求的沉降值
C. 地基及基础的整体稳定性有足够保证
D. 基础本身的强度、刚度、耐久性满足要求

(二) 判断题

1. 所有的土建构物均依靠地球的土体或岩体支承。()
2. 浅基础的埋置深度通常大于 5 m。()
3. 承载能力极限状态的设计,指的是考虑结构达到其最大承载能力或不宜继续承载大变形的状态。()
4. 作用效应组合计算时,不同荷载类型通常可以随意组合使用。()
5. 在地基施工过程中,任何一个因素的欠缺考虑都不会对整个地基处置的施工质量带来影响。()
6. 软弱下卧层是位于持力层之下的地基,且其土性明显比持力层软弱。()
7. 进行桥梁基础设计时,不需要考虑所处河流的水文情况。()
8. 地基持力层上方的所有土层称为覆盖层。()
9. 地基与基础的设计方案和计算中的参数选择不需要考虑地质条件。()



习题练习答案

(三) 简答题

1. 简述地基和基础的定义及它们各自的特点。
2. 地基设计和施工所需的资料包括哪些方面？请举例说明它们各自的作用。
3. 解释什么是天然地基和人工地基，并给出它们各自的应用实例。
4. 进行基础设计时，浅基础和深基础的区别是什么？并请举例说明。
5. 赵州桥的基础是怎样构建的？其概述有助于我们了解哪些地基特性？
6. 在基础结构的设计和施工中，对地质、水文调查资料的了解有什么重要性？
7. 列举承载能力极限状态和正常使用极限状态下，基础结构设计应该考虑的作用效应组合。
8. 阐述永久作用和可变作用之间的主要区别，并说明为什么这些区别对基础设计至关重要。
9. 如何选择适当的地基持力层？举例说明持力层对基础设计的重要性。
10. 描述桥梁结构中的偶然作用，并解释其在基础设计中的考虑因素。

(四) 计算题

赵州桥的基底应力反算出的承载力为 500~600 kPa，现有一个相似的地基承载设计，地基面积为 10 m²，要求地基的最小安全承载力为 5500 kN，请根据赵州桥的数据计算，该地基是否满足要求？

(五) 实验题

设计一个简单的桥梁地基实验，要求：使用不同密度的沙土模拟不同承载力的地基环境，设计一个质量为 5 N 的小型桥梁模型并放于上述沙土上，记录桥梁模型在不同密度沙土上的下沉深度。请简述实验步骤、使用的工具材料以及进行预期实验结果分析。



三、知识点拓展

案例一：某商业建筑地基沉降案例

某商业大楼位于城市新开发区域，该区域土质主要以软黏土为主，地下水位较高。土体承载力较低，大楼在建设过程中，发现地基出现了不均匀沉降的问题，大楼墙体出现明显的裂缝，楼层局部下沉，建筑物裂缝如图 1-12 所示，使用功能受到严重影响，大楼的部分建筑位于软土地基区域，建设初期没有采取充分的地基加固措施，导致地基沉降现象加剧，后期监测发现该建筑物地基在不同区域的沉降量不一致，最大沉降差达到 10 cm。考虑在建筑物周边及下方采用化学注浆法，通过注入高强度的化学浆液，填充和加固地基土体，提高地基承载力。在沉降严重区域设置沉降缝，减小不均匀沉降对建筑结构的影响。对受损的墙体和楼板进行修复，更换变形的门窗，并进行整体加固。经过加固处理以及沉降缝和结构修复后，建筑物的使用功能恢复正常，进一步监测表明结构稳定性显著改善。



图 1-12 地基不均匀沉降导致建筑物裂缝

单元二 地基岩土的分类、工程特性与地基承载力



学习目标

【知识目标】

1. 知道不同类型的岩土及其工程特性。
2. 知道地基承载力定义和计算承载力的方法。
3. 领会地基破坏的主要模式，地基变形的三阶段。
4. 理解用经验公式法确定地基承载力容许值的流程。

【能力目标】

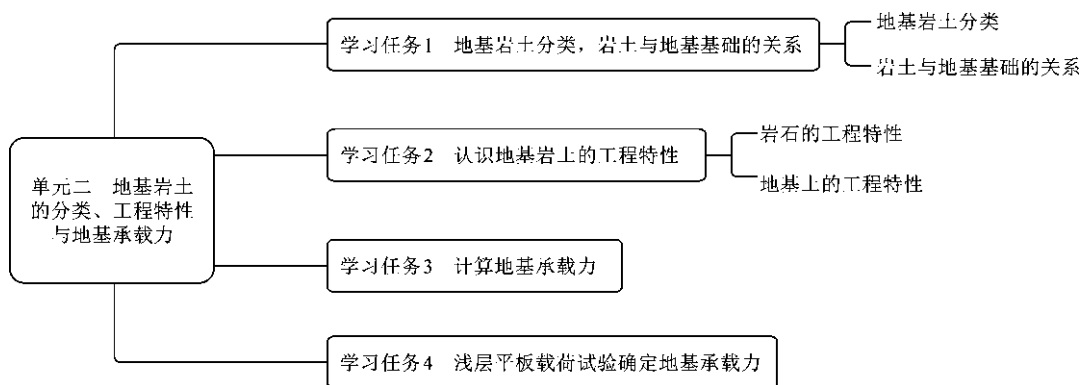
1. 能区分不同类型的地基岩土。
2. 能计算不同类型地基岩土容许承载力。
3. 会识别不同类型岩土的工程特性。
4. 能进行简单浅基础载荷试验操作。

【素质目标】

1. 培养文化自信、科技强国责任意识。
2. 培养敢于担当、求真务实的职业素养。
3. 培养不断钻研、不断探索的创新意识。



学习导图



学习任务1 地基岩土分类，岩土与地基基础的关系



学习情境

某高速公路中某标段所属的丘陵区段部分临水，其路基主要由河流冲积层和沉积层组成，河流冲积层主要包含粉质黏土、砂类土、砾石等，沉积层主要包含分布量较大的淤泥、淤泥粉质细砂、粉细砂、中砂等，局部路段分布有软土层。该标段虽然是重型交通区段，但经过现场试验后，在不改变原有路基填筑材料的情况下，路基压实环节采用重型压实标准，按照分层顺序依次压实到位即可。

同项目中某 x 标段所属的丘陵地带部分临山，其路基岩性以强风化岩土为主，其典型代表是风化千枚岩。该标段路基压实作业遵循就地取材、经济合理的原则，在路堤填筑阶段，考虑采用4%水泥改良风化千枚岩。在路床填筑阶段，考虑强风化千枚岩遇水后力学强度大大降低，加之考虑其稳定变形时间较长，后期不均匀沉降变形无法预测，路床填筑采用碎石铺筑，辅以4%水泥和适量石屑填充。

同一项目中的路基压实作业，因不同标段路基岩性特征不同，路基作业选用的施工方案也各不相同。通常情况下，施工单位会综合考虑标段内的地质岩土、水文情况、施工环境等因素后选择更为合理的施工方法。



知识导航

一、地基岩土分类

从工程建筑观点出发，组成地壳的任何一种岩石和土的集合体统称为岩土。以“学习情境”中提及的高速公路项目为例，在设计阶段项目开展了大量的土工试验来确定沿线的土质类别和属性，设计单位依据现场勘察资料同时结合当地地质历史资料，参照规范对沿线的岩体和土体进行分级。根据试验结果，结合各类岩体和土体的施工指南及相关规范，在施工时结合当地气象、水文条件进行处理，如临水段潮湿类岩土或临山段干燥类岩土不能直接用于土方工程，潮湿类岩土在施工时需掺灰或晾晒后填筑，干燥类岩土则需进行洒水或采用水硬性材料改良，以风化千枚岩为代表的软岩也需要依据施工需求采用水泥进行改良。由于岩石和土的种类、比例、含水量等情况不同，岩土所呈现的工程性质也各不一样。本教材中介绍的岩土分类主要参考《岩土工程勘察规范(2009年版)》(GB 50021—2001)。

(一)岩石(体)的分类

岩石是地球上由矿物质或矿物质的碎屑组成的固体物质。岩石是自然界中的基本矿物组合，可以包括一种或多种不同类型的矿物质。岩石是微观层面的概念，通常用来描述矿物质的组成、结构、坚硬程度、颜色等性质。岩石的分类通常基于其形成过程，如火成岩、沉积岩、变质岩等。岩体是指自然界中一定范围内的岩石集合，通常包括多个岩石体积和结构相互关联的部分。岩体是宏观层面的概念。岩体考虑的是大规模的地质构造，如山脉、山脊、峡谷或岩层，它们由多岩石形式组成，并以一定的方式相互关联。岩体的性质包括其稳定

性、岩层倾角、节理、断层、岩石类型的分布等。这些特性对于土木工程、采矿和隧道建设等具有重要影响。

岩石(体)根据不同指标可以进行多种类型的划分,本教材从风化程度、抗风化能力、坚硬程度、软化性、结构类型、完整程度及节理发育程度角度进行分类。

1. 岩石的风化

岩石风化是一个十分复杂的过程,受到物理、化学和生物多种风化作用的影响。

物理风化是岩石破碎的主要途径,主要是指受岩石自身性质(孔隙度和含水率)和气候(温度和降水)等因素的影响。通过大量试验研究发现,含水率高的岩石更易风化。岩石自身的孔隙度和经历冻融循环次数对岩石的风化也有很大影响。一般认为岩石中部分水分的流失是引起岩石风化的主要原因,温差变化引起的冻融作用加速了物理风化,这类现象常见于日夜温差较大地区。

化学风化是岩石成土的必经过程,主要受到氧气、水和水中二氧化碳等因素的影响。水作为一种天然溶剂,在与岩石接触的过程中,可使岩石中的部分物质发生溶解和流失。岩石中的某些矿物质与水发生水合作用形成次生矿物,例如氧化铁转变为氢氧化铁,硬石膏转变为石膏等。另外,遇到空气中的水与二氧化碳,岩石中的某些碳酸盐类矿物会发生水解作用,例如菱铁矿、方解石、白云石等。

生物风化能有效促进岩石风化。植物生长动物的活动以及人类的工程建设都会对岩石产生生物风化作用,加速岩石的分解和破坏。

风化作用削弱了岩体的物理力学性能。削弱的程度取决于岩体的风化程度。风化岩石工程地质研究的主要内容就是要对岩体风化程度进行分带,研究各带岩体的工程地质及风化效应,确定物理力学性质指标,以便选择岩石的利用高程(建基面)。岩体按风化程度分带,国内外对风化壳划分的带数不完全相同,通常划分为4~6带。现阶段我国根据岩石风化程度主要划分为5带:未风化带、微风化带、弱风化带、强风化带和全风化带。

识别各种新鲜岩石的抗风化能力,对工程建筑有重要意义,例如各种建筑石料的使用,路堑边坡、地下坑道稳定性的预测等,都受到岩石抗风化能力的影响。因此,在勘察调研过程中有必要了解新鲜岩石抗风化能力的划分标准,具体如表 1-5 所示。

表 1-5 新鲜岩石抗风化能力的分级指标与特征

指标	分级		
	不易风化的	易风化的	
软化性	不易软化的	易软化的	
抗冻性	抗冻的	不抗冻的	
岩浆岩的结构	细粒的	粗粒的	
造岩矿物	以石英为主	长石、辉石、角闪石较多	黄铁矿、橄榄石、黑云母较多
胶结物	硅质的	钙质的	泥质的
耐风化时间	暴露 1~2 年风化不明显		暴露后数日至数月即出现风化

2. 岩石的坚硬程度



岩石单轴抗压强度试验

岩石的坚硬程度通常采用定性划分，以描述其相对硬度和抵抗磨损的能力。这样的定性划分有助于描述岩石的坚硬程度，如极硬的表面光滑而难以划伤的钻石、蓝宝石，中硬的能一定程度抵抗划伤的砂岩、石灰岩，极软的容易变形的煤、泥炭等。定性划分在地质学和工程领域广泛应用，以选择合适的岩石用于不同的工程项目或研究，具体如表 1-6 所示。

表 1-6 岩石坚硬程度的定性划分

名称		定性鉴定	代表性岩石
硬质岩	坚硬岩	锤击声清脆，锤击有回弹，震手，难击碎，浸水后大多无吸水反应	未风化或微风化的花岗岩、玄武岩、片麻岩、闪长岩、石英岩、硅质灰岩、硅质胶结的砂岩或砾岩等
	较硬岩	锤击声较清脆，锤击有轻微的回弹，稍震手，较难击碎，浸水后有轻微的吸水反应	弱风化的极硬岩；未风化或微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、灰岩、钙质胶结的砂岩等
软质岩	较软岩	锤击声不清脆，锤击无回弹，较易击碎，吸水明显，浸水后指甲可划出印痕	强风化的极硬岩；弱风化的硬岩；未风化或微风化的千枚岩、云母片岩、砂质泥岩、钙泥质胶结的粉砂岩和砾岩、泥灰岩、页岩、凝灰岩等
	软岩	锤击声哑，锤击无回弹，有凹痕，易击碎，浸水后手可掰开	强风化的极硬岩；弱风化~强风化的硬岩；弱风化的较软岩；未风化或微风化的泥质岩类，如泥岩、泥质胶结的砂岩和砾岩等
	极软岩	锤击声哑，锤击无回弹，有较深的凹痕，手可掰开，浸水后可捏成团或捻碎	全风化的各类岩石；强风化的软岩；成岩作用差的岩石；第三纪砂岩、泥岩等半成岩

3. 岩体的结构类型

岩体按结构类型分类是指对地下或地表的岩石集合进行宏观级别的分类，是根据其内部结构和组织方式来进行区分的。不同结构类型的岩体对岩体结构有着显著的影响，清晰区分岩体结构类型有助于工程、地质勘探、隧道建设、采矿、地质灾害研究等领域的探索，主要可以分为巨块状整体结构、块状结构、层状、块石、碎石状结构、碎石角砾状结构、散体状结构。

岩石中含有特殊的矿物成分或结构，具有特殊的物理力学和化学性质，并影响工程地质条件时，定义为特殊岩石。

4. 岩体的完整程度

岩体的完整程度，是地质专业人员用以描述岩体在承受外力作用后仍能保持其连续性和完整性的程度的指标。了解岩体的完整程度对于诸多领域都有着深远的意义，如为评估一个地区的地质稳定性提供依据，预测工程建设中可能遇到的地质问题，甚至帮助工程师评估矿产资源的开采价值。

工程师通常会通过节理间距、岩体破碎程度以及结构面密度等因素来衡量岩体的完整

度，此外，通过观察岩体的颜色、矿物成分及岩石结构等特征来进一步判断其完整程度。这些因素不仅为工程师提供了关于岩体在过去经历的外部作用的理解，也提供了关于其未来可能的变化的宝贵信息，具体划分如表 1-7 所示。

表 1-7 岩体完整程度划分

完整程度	结构面特征	结构类型	岩体完整性指数 K_v
完整	结构面 1~2 组，以构造型节理或层面为主，裂隙为密闭型	巨块状整体结构	$K_v > 0.75$
较完整	结构面 2~3 组，以构造型节理、层面为主，裂隙多呈密闭型，部分为微张型，少有充填物	块状结构	$0.55 < K_v \leq 0.75$
较破碎	结构面一般为 3 组，以节理及风化裂隙为主，在断层附近受构造作用影响较大，裂隙以微张型和张开型为主，多有充填物	层状、块石、碎石状结构	$0.35 < K_v \leq 0.55$
破碎	结构面大于 3 组，以风化型裂隙为主，在断层附近受构造作用影响较大，裂隙以张开型为主，多有充填物	碎石、角砾状结构	$0.15 < K_v \leq 0.35$
极破碎	结构面杂乱无序，在断层附近受构造作用影响很大，宽张裂隙全是泥质或泥夹岩屑充填，充填物厚度大	散体状结构	$K_v \leq 0.15$

5. 岩体的节理发育程度

节理是在岩石形成过程中或其后经历一系列地壳运动而产生的一种剥裂面，是岩石中最常见的工程地质现象。节理主要是地壳变动和地表风化作用的结果。节理的特征主要包括节理面形态、节理间距、节理连续性、节理面的粗糙度等，这些特征受到地壳应力、矿物含量、岩石类型等许多因素的影响。岩体的节理是岩体中的自生裂缝，是岩体的重要结构特征之一。节理的发育程度对岩体的完整性、力学性质和工程行为有着重要的影响。节理的存在会改变岩体的强度、渗透性、抗风化能力等，会对隧道、坝基、斜坡等岩土工程项目的稳定性产生重要影响，在水工建筑物中，甚至可能影响其防渗效果。工程实践中，需要根据岩体的节理发育程度来采取相应的措施，以确保工程的安全和稳定。

节理发育程度会影响岩体的完整性、力学性质和工程行为。岩体节理发育程度分为以下等级：节理不发育、节理较发育、节理发育、节理很发育。通常节理发育程度越高，岩体的完整性越差，岩体更容易破碎；节理发育程度越高，岩体的抗压强度、抗剪强度和弹性模量等力学性质越低；节理发育程度越高，岩体的稳定性越差，更容易发生滑坡、崩塌等工程事故。

(二)土的分类

土壤是地球表面的一种自然资源，是地球表层的一种疏松物质，由岩石风化而成。土壤对于植物生长至关重要，因为它为植物提供水分、营养和支撑，它还存储碳并帮助调节气候。它由矿物质、有机物质、水和空气组成。

土的分类非常多，可以从不同的角度进行分类。如按成因分类，可以根据其形成的地质过程和环境分为残积土、冲积土、湖积土、海积土、风积土、冰川积土等。按粒径大小分类

(国际 ISO 标准), 常见的类型有砾石、粗砂、细砂、粉砂、粉土、黏土等。按塑限和液限分类, 可根据塑性指数(I_p)和液性指数(I_L)将土划分为低塑性土、中塑性土、高塑性土等类别。按密实性分类, 可以根据土密度或相对密度将土分为疏松土、中密土、密实土等级别。按含水量分类, 可以将土分为干土、湿土、饱和土、流塑土等。按有机质含量分类, 有机质含量较高的土壤可以分为泥炭质土和有机质土等类型。按力学性质分类, 根据土的力学行为和反应将土分为可压缩土、不可压缩土、可膨胀土、不可膨胀土等。按工程性质分类, 可以依据土的工程应用划分为填筑土、基础土、隔水土、自然堆积土等。本教材中介绍的岩土分类主要参考《岩土工程勘察规范(2009 年版)》(GB 50021—2001)和公路桥涵地基与基础设计规范 JTG 3363—2019。

1. 一般土的分类

土壤的颗粒分组是土木工程和地质学中的一个基本概念, 它以土颗粒的大小为依据, 将土壤划分为不同的类别。土按颗粒分组主要是基于土颗粒的大小来进行分类。这种分类方式对于理解土的物理性质和工程特性, 以及预测土壤在不同工程条件下的行为非常重要, 具体如表 1-8 所示。

表 1-8 土的颗粒分组

颗粒名称		粒径 d/mm
漂石(浑圆、圆棱)或块石(尖棱)	大	$d > 800$
	中	$400 < d \leq 800$
	小	$200 < d \leq 400$
卵石(浑圆、圆棱)或碎石(尖棱)	大	$100 < d \leq 200$
	小	$60 < d \leq 100$
粗圆砾(浑圆、圆棱)或粗角砾(尖棱)	大	$40 < d \leq 60$
	小	$20 < d \leq 40$
细圆砾(浑圆、圆棱)或细角砾(尖棱)	大	$10 < d \leq 20$
	中	$5 < d \leq 10$
	小	$2 < d \leq 5$
砂粒	粗	$0.5 < d \leq 2$
	中	$0.25 < d \leq 0.5$
	细	$0.075 < d \leq 0.25$
粉粒		$0.005 < d \leq 0.075$
黏粒		$d \leq 0.005$

1) 碎石土的划分

根据土壤颗粒的形状和级配来划分碎石土时, 可以将其分为以下几种不同的类型, 具体包括漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾。

碎石土的密实度定性描述可根据结构特征、地貌、天然坡形态、开挖及钻探情况, 确定规范, 可以分为密实、中密、稍密、松散。

对于平均粒径等于或小于 50 mm 且最大粒径小于 100 mm 的碎石土，密实度应按规范进行定量评价。对于平均粒径大于 50 mm，或最大粒径大于 100 mm 的碎石土，密实度应按规范定量评价。

2)砂类土的划分

砂土是粒径大于 2 m 的颗粒，含量不超过总质量 50%，且粒径大于 0.075 mm 的颗粒超过总质量 50%的土。砂类土是常见的岩土材料，其主要成分是砂粒。根据砂粒的粒径和含量，可以将砂类土进一步细分为不同的类型。按照颗粒级配划分砂类土应符合表 1-9 的规定。

表 1-9 砂类土的划分

土的名称	土的颗粒级配
砾砂	粒径大于 2 mm 的颗粒的质量占总质量的 25%~50%
粗砂	粒径大于 0.5 mm 的颗粒的质量超过总质量的 50%
中砂	粒径大于 0.25 mm 的颗粒的质量超过总质量的 50%
细砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒的质量超过总质量的 85%
粉砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒的质量超过总质量的 50%

注：定名时应根据颗粒级配由大到小，以最先符合者确定。

砂类土根据标准贯入实测击数或相对密度划分密实度，如规范所示。

3)粉土的划分

粉土是塑性指数等于或小于 10 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量不超过总质量的 50%的土。粉土密实度的划分应根据孔隙比，按规范定量评价。

粉土潮湿程度应根据天然含水率划分，如表 1-10 所示。

表 1-10 粉土潮湿程度的划分

潮湿程度	天然含水率 $w/\%$
稍湿	$w<20$
潮湿	$20\leq w\leq 30$
很湿	$w>30$

4)黏性土的划分

黏性土是指塑性指数大于 10 的土，且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过总质量 50%的土。黏性土的主要特征是其具有较强的塑性和可塑性，易于变形，并且在受水分影响时会发生明显的体积变化。

黏性土根据塑性指数 I_p 划分，如表 1-11 所示。

表 1-11 黏性土的划分

土的名称	塑性指数 I_p
粉质黏土	$10<I_p\leq 17$
黏土	$I_p>17$

黏性土的软硬状态以液性指数划分，如表 1-12 规定。土的液性指数介于 0~1 之间，液性指数越小表示土越坚硬，液性指数越大表示土越软。

表 1-12 黏性土软硬状态的划分

塑性状态	液性指数 I_L
坚硬	$I_L \leq 0$
硬塑	$0 < I_L \leq 0.25$
可塑	$0.25 < I_L \leq 0.75$
软塑	$0.75 < I_L \leq 1$
流塑	$I_L > 1$

2. 特殊土的分类

特殊土是一种具有独特性质，特殊成分、结构特征及独特的工程地质性质的区域性地基土。根据以上因素，可将特殊土划分为黄土、红黏土、膨胀土、软土、盐渍土、多年冻土、填土等。

1) 黄土的判定及分类

黄土为第四纪以来，在干旱、半干旱气候条件下形成的，土颗粒成分以粉粒为主，含碳酸钙及少量易溶盐，并具有大孔隙和垂直节理、抗水性能差、易崩解和潜蚀、上部多具有湿陷性等工程地质特征的土。黄土按堆积时代划分，如表 1-13 所示。

表 1-13 黄土按堆积时代划分

地层时代		地层名称		湿陷性及其他特征
全新世 Q ₄	近期 Q ₄ ²	新黄土	新近堆积黄土状土	一般为自重或非自重湿陷性黄土地基，常具有高压缩性
	早期 Q ₄ ¹		黄土状土	
晚更新世 Q ₃			马兰黄土	
中更新世 Q ₂		老黄土	离石黄土	部分土层上部具有湿陷性
早更新世 Q ₁		土	午城黄土	不具有湿陷性

注： Q_2 离石黄土层以下的黄土湿陷性应根据建筑物的实际压力或上覆土的饱和自重压力进行室内湿陷性试验或现场浸水性试验确定。

黄土的湿陷性应根据室内湿陷性试验在一定压力下测定的湿陷系数值确定，如表 1-14 所示。

表 1-14 黄土湿陷性的划分

名称	湿陷系数 δ_s
非湿陷性黄土	$\delta_s < 0.015$
湿陷性黄土	$\delta_s \geq 0.015$

黄土在上覆土的自重压力下受水浸湿发生湿陷时，应定为自重湿陷性黄土；黄土在大于上覆土的自重压力(包括土的自重压力和附加压力)下受水浸湿发生湿陷时，应定为非自重湿

陷性黄土。

2)红黏土的判定及分类

红黏土指碳酸盐类岩石经强烈化学风化后形成的高塑性黏土。原生红黏土颜色呈棕红色、褐黄色等，是覆盖于碳酸盐系岩层之上且液限等于或大于 50%的高塑性黏土。原生红黏土经搬运、沉积后仍保留残积黏土的基本特征，且液限大于 45%，应判定为次生红黏土。红黏土具有遇水软化、失水收缩强烈、裂隙发育、易剥落等工程地质特征。

红黏土按塑性状态划分，如表 1-15 所示。

表 1-15 红黏土塑性状态的划分

状态	含水比 α_w	比贯入阻力 P_s/MPa	经验指标
坚硬	$\alpha_w \leq 0.55$	$P_s \geq 2.3$	土质较干、硬
硬塑	$0.55 < \alpha_w \leq 0.70$	$1.3 \leq P_s < 2.3$	不易搓成 3 mm 粗的土条
软塑	$0.70 < \alpha_w \leq 1.00$	$0.2 \leq P_s < 1.3$	易搓成 3 mm 粗的土条
流塑	$\alpha_w > 1.00$	$P_s < 0.2$	土很湿，接近或处于流动状态

注：含水比为土的天然含水率与液限之比，液限采用液塑限联合测定法测定，液限为 10 mm 液限。

3)膨胀土的判定及分类

膨胀土也称为膨润土或可膨土，在含水量变化或荷载作用下，其体积会发生明显胀缩。膨胀土是含有蒙脱石或其他具有类似特性的黏土矿物的土壤类型，这些矿物具有吸水时显著膨胀、软化，崩解和失水时急剧收缩、开裂、硬结的现象。这种土壤的特性使得它在土木工程和建筑实践中需谨慎对待，因为其膨胀性可能对结构造成损害。膨胀土主要分布在干旱、半干旱地区，是我国特有的土种之一。

膨胀土的初判应根据地貌、土的颜色、结构、土质情况、自然地质现象和自由膨胀率等特征，按表 1-16 综合判定。

表 1-16 膨胀土的初判条件

地貌	具垄岗式地貌景观，常呈垄岗与沟谷相间状；地形平缓开阔，无自然陡坡，坡面沟槽发育
土的颜色	多呈棕、黄、褐色，间夹灰白、灰绿色条带或薄膜；灰白、灰绿色多呈透镜体或夹层出现
结构	多裂隙结构，方向不规则。裂面光滑，常见擦痕。裂隙中常充填灰白、灰绿色黏土
土质情况	土质细腻，具滑感，土中常含有钙质或铁锰质结核或豆石，局部可富集成层
自然地质现象	坡面常见浅层溜坍、滑坡、地面裂缝。当坡面有数层土时，其中膨胀土层往往形成凹形坡。新开挖的坑壁易发生坍塌
自由膨胀率 $F_s/\%$	$F_s \geq 40$

4)软土的判定及分类

软土是指天然含水量较高、质地软弱、强度较低的土。软土主要分布在河流、湖泊、滩涂等水体沉积区，以及冲积扇、洪积扇等地貌单元。软土为天然孔隙比大于或等于 1.0，天然含水率大于或等于液限，压缩系数大于或等于 0.5 MPa^{-1} ，不排水抗剪强度小于 30 kPa 的黏

性土。软土一般含有机质，具有压缩性高、强度低、灵敏度高和排水固结缓慢的特点。

软土在公路设计中按物理力学性质分类，有淤泥质土、淤泥、泥炭质土、泥炭、在铁路设计中除之前提及的四类还有软黏性土，如表 1-17。

表 1-17 软土的分类

分类指标	软黏性土	淤泥质土	淤泥	泥炭质土	泥炭
有机质含量 $W_u/\%$	$W_u<3$	$3\leq W_u<10$		$10\leq W_u\leq 60$	$W_u>60$
天然孔隙比 e	$e<1.0$	$1.0\leq e<1.5$	$e\geq 1.5$	$e>3$	$e>10$
天然含水率 $w/\%$	$w\geq w_L$			$w\geq w_L$	
渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$k<10^{-6}$			$k<10^{-3}$	$k<10^{-2}$
压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	$a_{1-2}\geq 0.5$			—	
不排水抗剪强度 C_u/kPa	$C_u<30$			$C_u<10$	
静力触探比贯入阻力 P_s/kPa	$P_s<700$				
静力触探端阻 q_c/kPa	$q_c<600$				
标准贯入试验锤击数 $N/\text{击}$	$N<4$		$N<2$		
十字板剪切强度 S_u/kPa	$S_u<30$				
土类指数 I_d	$I_d<0.35$				

注：1. 当粉土的物理力学性质大部分与表中指标相符时，可定名为“软粉土”。

2. μ 为修正系数：当 $I_p\leq 20$ 时， $\mu=1$ ；当 $20<I_p\leq 40$ 时， $\mu=0.9$ 。

5) 盐渍土的判定及分类

盐渍土是指土壤中可溶性盐分含量过高，导致土壤理化性质发生变化，对植物生长造成不良影响易溶盐含量大于 0.3% 的土。当地表以下 10 m 深度内易溶盐的平均含量大于 0.3% 时，应定为盐渍土地区或场地。盐渍土具有较强的吸湿、松胀、溶陷及腐蚀性等工程地质特性。它们主要存在于干旱地区或盐碱地区，如沿海地区、河流下游地区以及缺乏排水系统的区域。盐渍土的形成主要是由于土壤中水分蒸发后，地下水中的盐分随之被带到土壤表面，随着时间的推移，盐分逐渐在土壤表面积累，最终形成盐渍土。

盐渍土按含盐性质的不同，可以分为氯盐渍土、亚氯盐渍土、亚硫酸盐渍土、硫酸盐渍土、碱性盐渍土。盐渍土盐渍化程度的分类，应符合表 1-18 的规定。

表 1-18 盐渍土盐渍化程度的分类

盐渍化程度	土层的平均含盐量 $\overline{DT}/\%$		
	氯盐渍土及亚氯盐渍土	硫酸盐渍土及亚硫酸盐渍土	碱性盐渍土
弱盐渍土	$0.3<\overline{DT}\leq 1.0$	—	—
中盐渍土	$1.0<\overline{DT}\leq 5.0$	$0.3<\overline{DT}\leq 2.0$	$0.3<\overline{DT}\leq 1.0$
强盐渍土	$5.0<\overline{DT}\leq 8.0$	$2.0<\overline{DT}\leq 5.0$	$1.0<\overline{DT}\leq 2.0$
超盐渍土	$\overline{DT}>8.0$	$\overline{DT}>5.0$	$\overline{DT}>2.0$

注：平均含盐量按取样所代表的厚度加权平均计算。

6)冻土的判定及分类

冻土是指温度为 0℃或低于 0℃并含有冰晶的土(岩)，其广泛存在于高纬度地区和高海拔山区，约占地球陆地表面面积的 15%。这类土壤可以分为 3 大类：短时冻土、多年冻土(permafrost)；季节冻土(seasonally frozen ground)。土木工程设计必须基于对冻土区气候、地质、水文及土壤特性的深入理解，精确地评估地区的冻融周期、土壤的温度分布和冰含量是确保工程安全和有效的重要前提。

当多年冻土温度改变后，其物理力学性质随之改变，并可能产生冻胀、融沉、热融滑塌等现象。冻土地区的人类活动，例如建筑、基础设施建设等，都需要考虑冻土的存在对工程的影响。多年冻土的分类应根据土的类别、总含水率、平均融化下沉系数 δ_0 ，按表 1-19 进行划分。

$$\text{平均融化下沉系数 } \delta_0 = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中： h_1 为冻土试件融化前的高度(mm)； h_2 为冻土试件融化后的高度(mm)。

表 1-19 多年冻土的分类

多年冻土 的类型	土的名称	总含水率 $\omega_A/\%$	融化后的 潮湿程度	平均融化下沉 系数 $\delta_0/\%$	融沉 等级	融沉 类别
少冰 冻土	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量不大于 15%）	$\omega_A<10$	潮湿	$\delta_0\leq 1$	I	不融沉
	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量大于 15%）	$\omega_A<12$	稍湿			
	细砂、粉砂	$\omega_A<14$				
	粉土	$\omega_A<17$				
	黏性土	$\omega_A<\omega_p$	坚硬			
多冰 冻土	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量不大于 15%）	$10\leq\omega_A<15$	饱和	$1<\delta_0\leq 3$	II	弱融沉
	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量大于 15%）	$12\leq\omega_A<15$	潮湿			
	细砂、粉砂	$14\leq\omega_A<18$				
	粉土	$17\leq\omega_A<21$				
	黏性土	$\omega_p\leq\omega_A<\omega_p+4$	硬塑			

续表1-19

多年冻土 的类型	土的名称	总含水率 $\omega_A/\%$	融化后的 潮湿程度	平均融化下沉 系数 $\delta_0/\%$	融沉 等级	融沉 类别
富冰 冻土	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量不大于 15%）	$15 \leq \omega_A < 25$	饱和出水 （出水量 小于 10%）	$3 < \delta_0 \leq 10$	Ⅲ	融沉
	碎石类土，砾砂、粗砂、 中砂（粉黏粒质量大于 15%）		饱和			
	细砂、粉砂	$18 \leq \omega_A < 28$				
	粉土	$21 \leq \omega_A < 32$				
	黏性土	$\omega_p + 4 \leq \omega_A < \omega_p + 15$	软塑			
饱冰 冻土	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量不大于 15%）	$25 \leq \omega_A < 44$	饱和出水 （出水量 小于 10%）	$10 < \delta_0 \leq 25$	Ⅳ	强融沉
	碎石类土，砾砂、粗砂、中砂 （粉黏粒质量大于 15%）		饱和			
	细砂、粉砂	$28 \leq \omega_A < 44$				
	粉土	$32 \leq \omega_A < 44$				
	黏性土	$\omega_p + 15 \leq \omega_A < \omega_p + 35$	软塑			
含土冰层	碎石类土、砂类土、粉土	$\omega_A \geq 44$	饱和大量出水 （出水量 10%~20%）	$\delta_0 > 25$	Ⅴ	融陷
纯冰层	黏性土	$\omega_A \geq \omega_p + 35$	软塑			
	厚度大于 25 cm 或间隔 2~3 cm 冰层累计超过 25 cm					

注: 1. 总含水率包括冰和未冻水。

2. 盐渍化冻土、泥炭化冻土、腐殖土、高塑性黏土未列。

 3. ω_p 为塑限含水率。

季节冻土是指地壳表层冬季冻结, 暖季又全部融化的土(岩)。季节冻土和多年冻土季节融化层土的冻胀性分级, 应根据土层的平均冻胀率按表 1-20 划分。

表 1-20 季节冻土与季节融化层土的冻胀性分级

土的类别	冻前天然含水率 $\omega/\%$	冻前地下水位距设计冻深的最小距离 h_w/m	平均冻胀率 $\eta/\%$	冻胀等级	冻胀类别
粉黏粒质量不大于 15% 的粗颗粒土(包括碎石类土,砾砂、粗砂、中砂,以下同),粉黏粒质量不大于 10% 的细砂	不饱和	不考虑	$\eta \leq 1$	I	不冻胀
粉黏粒质量大于 15% 的粗颗粒土,粉黏粒质量大于 10% 的细砂	$\omega \leq 12$	$h_w > 1.0$			
粉砂	$12 < \omega \leq 14$	$h_w > 1.0$			
粉土	$\omega \leq 19$	$h_w > 1.5$			
黏性土	$\omega \leq \omega_p + 2$	$h_w > 2.0$			
粉黏粒质量不大于 15% 的粗颗粒土,粉黏粒质量不大于 10% 的细砂	饱和含水	无隔水层时	$1 < \eta \leq 3.5$	II	弱冻胀
粉黏粒质量大于 15% 的粗颗粒土,粉黏粒质量大于 10% 的细砂	$\omega \leq 12$	$h_w \leq 1.0$			
	$12 < \omega \leq 18$	$h_w > 1.0$			
粉砂	$\omega \leq 14$	$h_w \leq 1.0$			
	$14 < \omega \leq 19$	$h_w > 1.0$			
粉土	$\omega \leq 19$	$h_w \leq 1.5$			
	$12 < \omega \leq 22$	$h_w > 1.5$			
黏性土	$\omega \leq \omega_p + 2$	$h_w \leq 2.0$			
	$\omega_p + 2 < \omega \leq \omega_p + 5$	$h_w > 2.0$			
粉黏粒质量不大于 15% 的粗颗粒土,粉黏粒质量不大于 10% 的细砂	饱和含水	有隔水层时	$3.5 < \eta \leq 6$	III	冻胀
粉黏粒质量大于 15% 的粗颗粒土,粉黏粒质量大于 10% 的细砂	$12 < \omega \leq 18$	$h_w \leq 1.0$			
	$\omega > 18$	$h_w > 0.5$			
粉砂	$14 < \omega \leq 19$	$h_w \leq 1.0$			
	$19 < \omega \leq 23$	$h_w > 1.0$			
粉土	$19 < \omega \leq 22$	$h_w \leq 1.5$			
	$22 < \omega \leq 26$	$h_w > 1.5$			
黏性土	$\omega_p + 2 < \omega \leq \omega_p + 5$	$h_w \leq 2.0$			
	$\omega_p + 5 < \omega \leq \omega_p + 9$	$h_w > 2.0$			

续表1-20

土的类别	冻前天然含水率 $\omega/\%$	冻前地下水位距设计冻深的最小距离 h_w/m	平均冻胀率 $\eta/\%$	冻胀等级	冻胀类别
粉黏粒质量大于 19% 的粗颗粒土, 粉黏粒质量大于 10% 的细砂	$\omega > 18$	$h_w \leq 0.5$	$6 < \eta \leq 12$	IV	强冻胀
粉砂	$19 < \omega \leq 23$	$h_w \leq 1.0$			
粉土	$22 < \omega \leq 26$	$h_w \leq 1.5$			
	$26 < \omega \leq 30$	$h_w > 1.5$			
黏性土	$\omega_p + 5 < \omega \leq \omega_p + 9$	$h_w \leq 2.0$			
	$\omega_p + 9 < \omega \leq \omega_p + 15$	$h_w > 2.0$			
粉砂	$\omega > 23$	不考虑	$\eta > 12$	V	特强冻胀
粉土	$26 < \omega \leq 30$	$h_w \leq 1.5$			
	$\omega > 30$	不考虑			
黏性土	$\omega_p + 9 < \omega \leq \omega_p + 15$	$h_w \leq 2.0$			
	$\omega \geq \omega_p + 15$	不考虑			

- 注: 1. ω_p 为塑限, ω 为冻前天然含水率在冻层内的平均值(%)。
2. 盐渍化冻土未列。
3. 塑性指数大于 22, 冻胀性降低一级。
4. 粒径小于 0.005 mm 的颗粒含量大于 60% 时, 为不冻胀土。
5. 当充填物大于总质量的 40%, 碎石类土的冻胀性按填充物土的类别判定。
6. 隔水层指季节冻结、季节融化活动层内的隔水层。
7. 对冻胀变形敏感的工程尚应分析冻胀类别为“不冻胀”土的微冻胀性对工程的影响。

$$\text{冻土层的平均冻胀率 } \eta = \frac{\Delta_z}{h - \Delta_z} \times 100\%$$

(1-7)

式中: Δ_z 为地表冻胀量(mm); h 为冻结层厚度(mm)。

7) 填土的判定和分类

填土是人为活动堆填的土, 一般具有成分复杂、固结时间短等特点。填土涉及将土壤、岩石或类似材料搬运至特定地点, 以建立土坝、堤岸、路基或者平整地面。填土的目的通常是改变地形, 为建筑工程提供支撑, 或修复环境。

填土按物质组成和堆填方式分类, 应符合表 1-21 的规定。

表 1-21 填土的分类

名称	填土特征
杂填土	土中含有较多的建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂质
素填土	由碎石类土、砂类土、粉土、黏性土组成, 不含杂质或杂质很少
冲填土	由水力冲填泥、砂等而成
填筑土	经人工按一定标准夯实、压密

二、岩土与地基基础的关系

岩土作为地基基础的重要组成部分,其本身的稳定性发挥了不可替代的作用。建筑物的安全和正常使用与基础工程勘察、设计、施工质量密切相关。随着大型、重型、高层建筑和大跨径桥梁等的日益增多,国内外在基础工程勘察设计与施工方面积累了不少成功的经验和出现了不少工程典范,然而也有不少失败的教训。因为基础属于地下隐蔽工程,一旦出现事故,事后补救十分困难。国内外对建筑物的地基基础勘察设计或施工不当,导致建筑物承载失效和造成重大经济损失的例子屡见不鲜。地基不均匀沉降导致建筑物倾斜、开裂、垮塌,如下文案例一、案例二中情境。

(1)专业学科的包容。岩土工程起着基础作用,岩土工程是指研究土与岩石在工程中的性质、行为以及它们与工程结构相互作用的科学。地基基础工程则是岩土工程的一个分支,主要研究建筑物或结构物的支承层的性质和承载能力,以及如何在此基础上设计安全稳固的基础。

(2)地基承载力的重要性。地基基础的设计和施工均依赖于对岩土即地基介质(土和岩石)的理解。土和岩石的性质,如强度、压缩性和透水性等,决定了地基的承载力,进而影响基础的设计方案。

(3)岩土条件的影响。不同的岩土条件对地基基础有着不同的影响。例如,软土、膨胀土、含水量高的土壤等,对基础的稳定性和安全性提出了额外的挑战,需要通过特殊的工程技术和设计手段来解决。

(4)地质灾害的考虑。岩土工程还需要考虑地质灾害对地基基础的影响,如地震、滑坡、沉降等,这要求岩土和地基基础工程师充分考虑这些因素,以确保结构的安全性。

(5)可持续发展的角色。随着对环境问题的日益关注,岩土与地基基础工程也需要考虑到可持续发展的要求。这涉及选择环境友好的材料和技术,减少工程对环境的影响,同时保障工程的安全性和稳定性。

案例一:苏州虎丘塔(云岩寺塔)

虎丘塔位于江苏省苏州市阊门外西北郊3.5 km的虎丘山之巔,因其位于云岩寺内,也称为云岩寺塔,如图1-13所示。虎丘塔始建于五代后周末期(约959年),北宋建隆二年(961年)落成,距今已有1000多年的历史,比意大利的比萨斜塔还早建200多年。虎丘塔采用楼阁式砖塔形式,塔高47.7 m,平面呈八角形,分别由外壁、回廊、塔心组成。虎丘塔在明代崇祯十一年(1638年)改建第7层时发生倾斜,当时曾将此层位置略向相反方向校正以纠正倾斜,但由于地基出现不均匀沉降,近300年来塔身倾斜还在继续发展。1956—1957年,苏州市政府首先对塔身进行加固,即在每层塔身加钢箍3道,并在每层楼面的东西方向和南北方向加置十字钢筋,于塔身钢筋拉结在一起,由此保住了虎丘塔不坍塌,并对塔体裂缝和塔壁缺损部位喷灌水泥砂浆进行修补。1981—1986年,苏州市进行了第二次大修,这次以加固塔基和基础为主,在塔底外围2 m处共打了44个深坑,直至岩石层,再在坑里构筑混凝土壳体基础,试图从根本上消除塔体沉降和倾斜的危险。据初步测量,塔顶部中心点距塔中心垂直线已过2.34 m,斜度为2.48 m,由于倾斜成因与意大利的比萨斜塔相似,故其被誉为“东方比萨斜塔”。



图 1-13 苏州虎丘塔

案例二：加拿大特朗斯康谷仓

1913年建成的加拿大特朗斯康谷仓，由65个圆柱形筒仓组成，高31 m，平面尺寸为23.5 m×59.4 m，基础为钢筋混凝土筏板基础，厚0.6 m。谷仓装谷物后，出现明显下沉，在24 h内西端下沉8.8 m，东端上抬1.5 m，谷仓整体倾斜 $26^{\circ}53'$ 。事后勘察发现，基础下有厚达16 m的高塑性软黏土，谷物及谷仓质量在基底处产生的平均压力为330 kPa，远远超过了地基承载力251 kPa，从而造成地基整体破坏，如图1-14所示。因谷仓整体性很强，谷仓虽倾斜但完好无损。采取的补救措施是在谷仓下做了70多个支承于基岩上的混凝土墩，使用了388个50 t的千斤顶及支撑系统，才把仓体纠正，但其标高比原来降低了4 m。

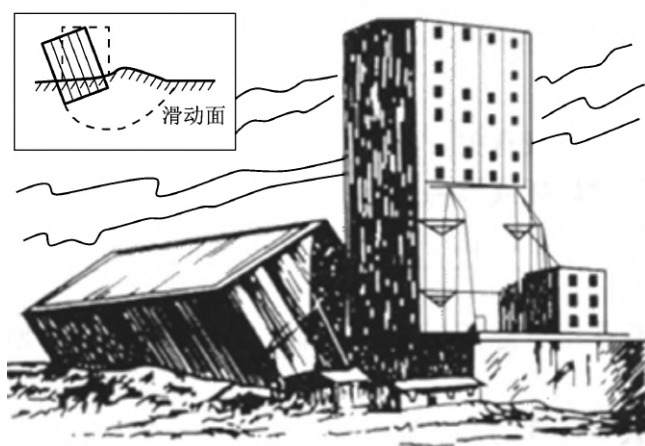


图 1-14 加拿大特朗斯康谷仓事故示意图

学习任务2 认识地基岩土的工程特性

学习情境

中国位于亚洲东部、太平洋西岸，国土面积约 960 万平方公里，地大物博。区域环境不一样，地质条件也不一样，岩土的颜色、质地、物理力学性质差异很大。进行工程建设必须了解不同地区的地质条件，工程岩土的特点，因地制宜地开展工程建设。如图 1-15 所示，你知道都是什么岩土吗？有什么工程特性？让我们一起认识了解一下。

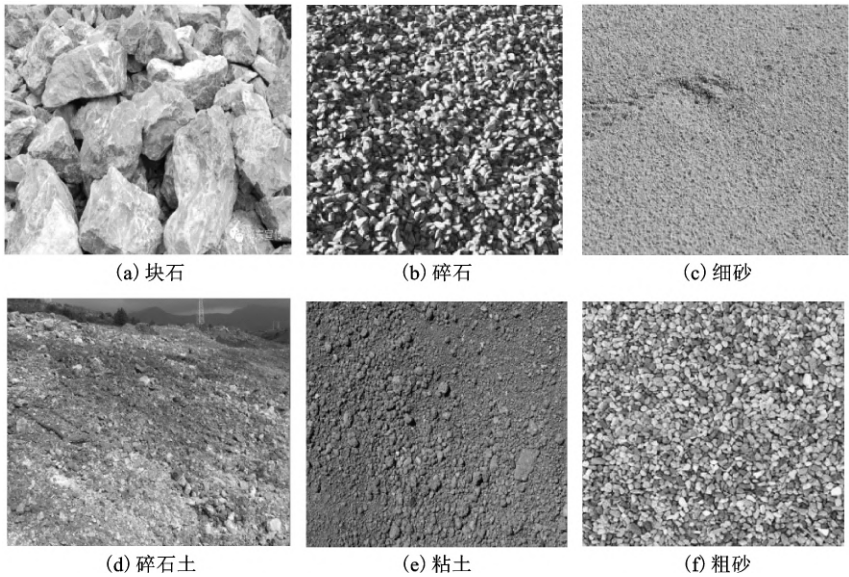


图 1-15 不同类型地基土

知识导航

工程项目现场的地基岩土主要由岩石和地基土构成，不同区域、不同环境中的岩土差异性很大。岩土的工程特性可采用抗压强度、抗剪强度、湿陷性、压缩性、静力触探探头阻力、动力触探锤击数、地基承载力、侧摩阻力、端阻力等指标描述。

一、岩石的工程特性

组成岩石的矿物成分不同，成因及风化程度也不一样，岩石表现出的软硬程度也不尽相同，因此其地基承载力不同。土建工程中，根据岩石的坚固程度可将其分为硬质岩石和软质岩石，根据岩石的风化程度可分为未风化岩石、微风化岩石、弱风化岩石、强风化岩石和全风化岩石。土建工程中微风化岩石和弱风化岩石可以作为土建结构物地基或桩基础持力层。

1. 岩石的组成

我们所居住的地球从外到内分别由地壳、地幔、地核三个部分组成。地壳厚度一般为 30~80 km，土建结构物的基础都位于这个部分。地壳位于地球的最外层，地壳组成物质中最

基本的就是矿物，矿物是地壳中的各种化学元素在一定的地质条件下结合形成的天然化合物或单质。矿物的种类很多，能被人类利用的就是矿产，例如煤、石英、石墨、石油、铁矿石等，含矿产的岩石就是矿石，例如大理石、花岗岩、石灰岩等，其中含量高的有石英、云母、长石、方解石等。岩石中的矿物通常按照一定的规律聚合分布。

2. 岩石的指标

本教材对岩石的坚硬程度、软化性、结构类型、完整程度及节理发育程度进行分类，分类依据主要是岩石的不同指标。岩石坚硬程度的定量划分依据是岩石饱和单轴抗压强度(f_r)。同一岩体中岩石饱和单轴抗压强度与烘干状态下岩石饱和单轴抗压强度的比值就是岩石的软化性(K_r)，岩石的软化性按软化系数划分。岩石的质量通常是根据岩石质量指标(RQD)确定，如表 1-22 所示。

表 1-22 岩石质量指标

岩石质量	好的	较好	较差	差	极差
RQD 值	>90	75~90	50~75	25~50	<25

二、地基土的工程特性

土是一种在自然界中广泛存在的三相体系，自然界中的土体由固相(固体颗粒)、液相(土中水)和气相(土中气)组成，通常称为三相分散体系。固体颗粒构成土的骨架部分，骨架中的孔隙被液相水和气相气体填充。自然界中的每个土单元中由于三相部分所占比例不同，土的物理状态和工程性质也各不相同。

1. 土的颗粒组成

土的颗粒组成是指土中各种颗粒的类型、含量和粒度分布。土的颗粒类型主要有三种：砂粒，指粒径为 0.075~2 mm 的颗粒；粉粒，指粒径为 0.002~0.075 mm 的颗粒；黏粒，指粒径小于 0.002 mm 的颗粒。土的粒度分布是指土中各种颗粒含量的百分比。土的粒度分布可以用粒度曲线表示。

2. 土的孔隙性

土的孔隙性是指土中孔隙的多少和大小。土的孔隙性对土的渗透性、压缩性、承载力等工程特性有着重要影响。土的孔隙度是指土中孔隙的体积与土体总体积的比值。土的孔隙度越大，土的孔隙性越好。

3. 土的含水量

土的含水量是指土中水的质量与土的干土质量的比值。土的含水量对土的强度、变形性、压缩性等工程特性有着重要影响。土的含水量越低，土的强度越高，变形性越低，压缩性越低。

4. 土的密度

土的密度是指土的质量与土的体积的比值。土的密度反映了土的紧密程度。土的密度越大，土的紧密程度越高，强度越高。

5. 土的塑性

土的塑性是指土在含水量变化时体积和形状发生可逆性改变的能力。土的塑性对土的施

工和使用有着重要影响。土的塑性越好，土的施工性越好，但土的稳定性越差。

6. 土的强度

土的强度是指土抵抗破坏的能力。土的强度是土的重要工程特性之一，是土体稳定性的重要指标。土的强度取决于土的颗粒组成、结构状态、含水量和密度等因素。

7. 土的变形性

土的变形性是指土在荷载作用下发生变形的能力。土的变形性是土的重要工程特性之一，是土体稳定性的重要指标。土的变形性取决于土的颗粒组成、结构状态、含水量和密度等因素。土的压缩模量、变形模量、压缩系数等压缩性指标可采用室内压缩、旁压、深层平板载荷或原位浅层等试验确定。

8. 土的渗透性

土的渗透性是指水流过土体的能力。土的渗透性是土的重要工程特性之一，是土体稳定性的重要指标。土的渗透性取决于土的颗粒组成、结构状态和含水量等因素。

学习任务3 计算地基承载力



学习情境

如图 1-16 所示为某区域的地质剖面图，上面要建设一座中桥，地层情况从上到下分别为腐殖土地层、一般黏性土地层、砂卵石地层、中等风化岩石地层，通过前期勘探和试验获得钻孔柱状图、土质的物理力学性质指标，以及水文条件、地质条件、桥梁的工程地质评价表。思考：如何确定不同土层的承载能力？确定不同类型地基土的容许承载力的方法有哪些？

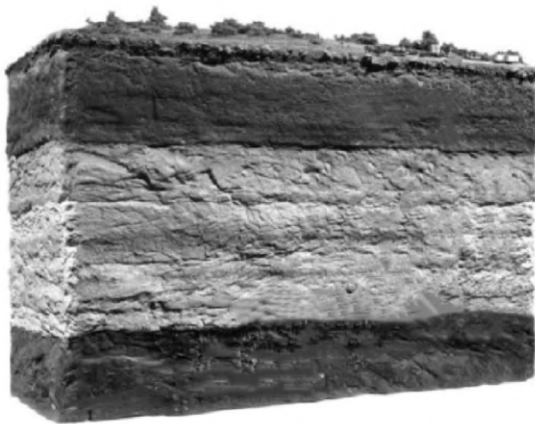


图 1-16 某区域的地质剖面图



知识导航

地基承载力是指地基土单位面积上承受荷载的能力。在荷载作用下，地基土内部应力改变附加应力引起地基土体变形，使地基沉降，土体剪应力增加。当荷载不断增大，地基承载



不满足要求时,地基会失稳破坏,此时地基承载力达到极限承载力大小。地基破坏主要有整体剪切破坏、局部剪切破坏、冲切剪切破坏等三种破坏形式。实践表明,地基发生破坏多数是由地基土持力层抗剪强度不足,土体发生剪切破坏引起的。

地基的比例界限是指地基土中即将出现且未出现塑性变形区时对应的基底压力。地基的临界荷载是指允许地基内产生一定范围塑性区所对应的荷载。地基的极限荷载(地基的极限承载力)是指地基承受基础传递荷载的极限压力。

地基承载力特征值(地基容许承载力)是指保证地基不发生破坏(不产生过大沉降)、留有一定安全储备时所允许的最大基底压力,(兼顾地基强度、稳定性和变形)。地基承载力特征值(地基容许承载力)是在地基原位测试或规范给出的各类岩土承载力特征值 f_{a0} 的基础上,经修正后得到。桥涵地基承载力的验算应以修正后的地基承载力特征值 f_a 乘以地基承载力抗力系数 γ_R 确定,并应符合规范条款要求。

地基及岩土的工程特性指标的代表值可采用平均值、标准值或特征值。岩土的强度指标应取标准值,压缩性指标应取平均值,地基承载力指标应取特征值。

1. 地基容许承载力的确定方法

地基容许承载力的确定方法如图 1-17 所示。

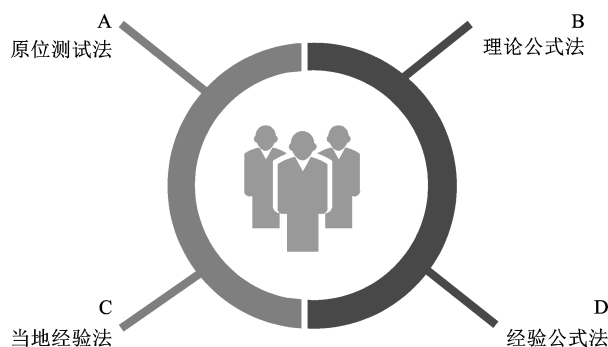


图 1-17 地基容许承载力确定方法

1) 原位测试法

原位测试法是一种通过现场试验确定地基承载力的方法。以实测数据为基础,结合区域性、工程经验确定地基土的承载力。这种方法快捷、方便、适用、准确。

原位测试法是在保持岩土层的位置不变,保持天然结构不变,在天然含水量以及天然应力状态下,测定岩土的工程力学性能指标的方法。

原位测试方法主要包括静力触探、动力触探、标准贯入试验、载荷试验(浅层平板载荷试验、深层平板载荷试验)、十字板剪切试验、旁压试验、扁铲侧胀试验、应力铲试验、现场直剪试验、岩体应力试验、岩土波速测试等(图 1-18)。其中,载荷试验为最可靠的原位测试法。

动力触探试验利用一定的锤击动能,将一定规格的圆锥探头打入土中,然后依据贯入击数或动贯入阻力判别土层的变化,确定土的工程性质,对地基土作出岩土工程评价。按贯入能力的大小重锤质量不同可分为轻型、重型、超重型三种。

标准贯入试验(SPT),是用质量为 63.5 kg 的穿心锤,以 76 cm 的落距,将标准规格的贯

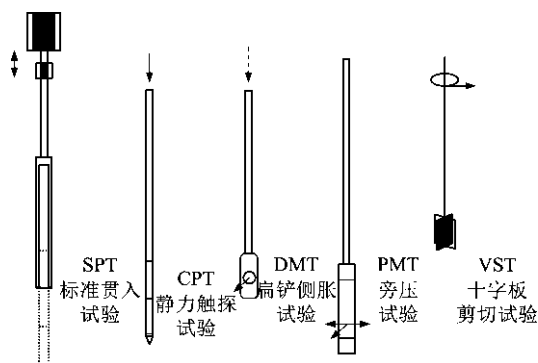


图 1-18 部分原位测试方法

入器，自钻孔底部打入 15 cm，以后每打入土层 30 cm 的锤击数，为实测锤击数 N ，记录打入 30 cm 的锤击数，判定土的力学特性。

地基承载力特征值 f_{a0} 宜通过载荷试验或者其他原位测试方法实测取得，其值应小于等于地基极限承载力的一半，对其他实测开展有困难的，查规范表格确定。

2) 理论公式法

理论公式法是通过试验确定土的抗剪强度指标，然后套用公式计算以确定地基土承载力的方法。抗剪强度指标根据不同土质条件、不同试验方法、不同工程情况选用。确定土的抗剪强度的方法主要有室内试验和现场试验。室内试验主要有直接剪切(直接快剪、固结快剪、直接慢剪)试验、三轴剪切(固结排水剪、不固结不排水剪、固结不排水剪)试验、无侧限抗压强度试验(单剪试验)。现场试验主要是十字板剪切试验、旁压试验。用理论公式法确定地基承载力受试验结果影响大，因为试样在采样、运输、保管的过程中可能受到干扰，试样易扰动，测试结果可能偏高或者失真。

3) 当地经验法(参照的方法)

当地经验法是一种基于同地区的使用经验进行类比判断以确定承载力的方法，这是一种辅助方法。在地层条件相近、地层起伏变化不大时，如附近已有建设资料包含地基承载力数据，新建工程可以根据经验和已有资料，参考周围地基的承载能力确定相关数值。

4) 经验公式法(规范表格法)

经验公式法是指根据岩土类别、岩土状态、工程经验、各项指标(室内物理力学指标、现场测试指标或野外鉴别指标)，通过查规范表格确定地基承载力特征值 f_{a0} 的方法，可按表 1-23 至表 1-26 的规定确定。这种方法快捷、方便，能近似计算，大部分土质条件适用，特殊地质土不能直接套用。采用的规范不同(包括不同部门、不同行业、不同地区的规范)，其承载力不会完全相同，应用时需注意各自的使用条件。

下面以《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)为例，介绍用经验公式法确定地基容许承载力的步骤和方法：首先确定土的分类名称，其次确定土的状态，最后确定土的容许承载力(根据情况确定是否需要修正)。

根据岩石的坚硬程度、节理发育情况按表 1-23 确定一般岩石地基承载力特征值 f_{a0} 。溶洞、断层、软弱夹层、易溶岩石、软化岩石等复杂的岩石应按各项因素综合确定地基承载力特征值。

表 1-23 承载力特征值 f_{a0} (岩石地基) 单位: kPa

坚硬程度	节理发育程度		
	节理不发育	节理发育	节理很发育
坚硬岩、较硬岩	>3000	2000~3000	1500~2000
较软岩	1500~3000	1000~1500	800~1000
软岩	1000~1200	800~1000	500~800
极软岩	400~500	300~400	200~300

根据碎石土密实度、碎石土类别按表 1-24 确定碎石土地基承载力特征值 f_{a0} 。

表 1-24 承载力特征值 f_{a0} (碎石土地基) 单位: kPa

类别	密实度			
	密实	中密	稍密	松散
卵石	1000~1200	650~1000	500~650	300~500
碎石	1000~800	800~550	550~400	400~200
圆砾	600~800	400~600	300~400	200~300
角砾	500~700	400~500	300~400	200~300

根据砂土地基的密实程度、湿度条件按表 1-25 确定地基承载力特征值 f_{a0} 。

表 1-25 承载力特征值 f_{a0} (砂土地基) 单位: kPa

土的名称	湿度	密实度			
		密实	中密	稍密	松散
砾砂、粗砂	与湿度无关	550	430	370	200
中砂	与湿度无关	450	370	330	150
细砂	水上	350	270	230	100
	水下	300	210	190	—
粉砂	水上	300	210	190	—
	水下	200	110	90	—

根据天然孔隙比 e 、液性指数 I_L ，按表 1-26 确定一般黏性土地基承载力特征值 f_{a0} 。

表 1-26 承载力特征值 f_{a0} (一般黏性土地基) 单位: kPa

天然孔隙比 e	液性指数 I_L												
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
0.5	450	440	430	420	400	380	350	310	270	240	220	—	—
0.6	420	410	400	380	360	340	310	280	250	220	200	180	—
0.7	400	370	350	330	310	290	270	240	220	190	170	160	150

续表1-26

天然孔隙比 e	液性指数 I_L												
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
0.8	380	330	300	280	260	240	230	210	180	160	150	140	130
0.9	320	280	260	240	220	210	190	180	160	140	130	120	100
1.0	250	230	220	210	190	170	160	150	140	120	110	—	—
1.1	—	—	160	150	140	130	120	110	100	90	—	—	—

修正后的地基承载力特征值 f_a 按式(1-8)确定。当基础位于水中不透水地层上时, f_a 按平均常水位至一般冲刷线的水深每米再增大 10 kPa 提升。

$$f_a = f_{a0} + K_1 \gamma_1 (b-2) + K_2 \gamma_2 (h-3) \quad (1-8)$$

式中: f_a 为修正后的地基承载力特征值(修正后的地基容许承载力)(kPa)。 f_{a0} 为地基承载力特征值(地基容许承载力)(kPa)。 K_1 、 K_2 分别为基础宽度、深度方面的修正系数, 根据基底持力层土的类别按表 1-27 示确定。 γ_1 为基底下持力层土的天然重度(kN/m³), 当持力层在水面以下且为透水性土时, 应采用浮重度。 γ_2 为基底以上土的重度(为多层土时采用换算重度计算)(kN/m³), 当持力层在水面以下且为不透水性土时, 不论基底以上土的透水性质如何, 应一律采用饱和重度; 当持力层为透水性土时, 水中部分土层应取浮重度。 b 为基础底面的最小边宽(m), 当 $b < 2$ m 时, 取 $b = 2$ m; 当 $b > 10$ m 时, 取 $b = 10$ m。 h 为基础底面的埋置深度(m), 有水流冲刷的基础, 按一般冲刷线算起; 没有水流冲刷的基础, 按天然地面算起; 当 $h < 3$ m 时, 取 $h = 3$ m; 当 $h/b > 4$ 时, 取 $h = 4b$ 。

表 1-27 地基承载力宽度、深度方面的修正系数

土类 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	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

注: 1. 对于稍密和松散状态的砂、碎石土, K_1 、 K_2 值可采用表列中密值的 50%。

2. 强风化和全风化的岩石, 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. 软弱下卧层承载力的确定方法

当持力层下存在明显的软弱层时, 此时必须验算软弱层地基承载力。软土地基承载力容许值 f_a 按规范表格确定。软土地基承载力特征值 f_{a0} 应由载荷试验或其他原位测试方法取得。当原位测试方法和载荷试验有难度时, 中小桥、涵洞基底未经处理的软土地基承载力容许值 f_a 可采用以下两种方法确定。

(1) 根据原状土天然含水率 ω , 按规范表格确定软土地基承载力特征值 f_{a0} , 然后计算修

正后的地基承载力容许值 f_a 。

(2) 根据原状土强度指标确定软土地基承载力容许值 f_a 。经排水固结方法处理的软土地基,其承载力特征值 f_{a0} 应通过载荷试验或其他原位测试方法确定;经复合地基方法处理的软土地基,其承载力特征值 f_{a0} 应通过载荷试验确定,然后按规范公式计算修正后的软土地基承载力容许值 f_a 。

3. 案例分析

某公路桥梁基础采用刚性扩大基础,桥梁类型为中桥,桥梁基础的宽度 b 为5 m,勘察报告揭露地质条件,岩土的参数指标和基础的入土情况如图1-19所示。河流中有冲刷作用,现已知淤泥质土的饱和重度 $\gamma_{sat1}=23\text{ kN/m}^3$,黏性土饱和重度 $\gamma_{sat2}=22\text{ kN/m}^3$,中密中砂饱和重度 $\gamma_{sat3}=25\text{ kN/m}^3$,根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019),试确定持力层的地基容许承载力 f_a 。

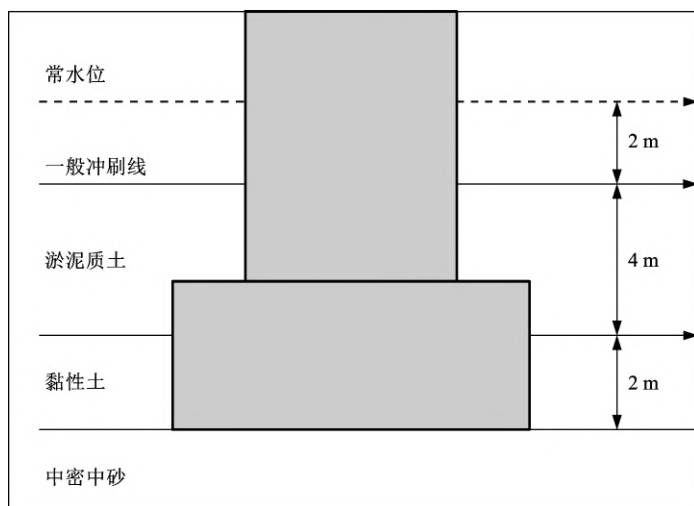


图 1-19 某中桥示意图

(1) 刚性扩大基础的持力层为中密中砂,地基的承载能力好,查表1-25得持力层地基承载力特征值 $f_{a0}=370\text{ kPa}$,深度修正系数查表1-27 $K_1=2.0$,宽度修正系数 $K_2=4.0$ 。

(2) 因持力层透水中密中砂,故取浮重度计算, γ_1 为 $25-10=15\text{ kN/m}^3$,后续代入式中计算。

(3) 因基底以上为有淤泥质土和黏性土两层土,基底以上土需要换成加权平均重度计算,且持力层透水,水中部分土层取浮重度计算,计算过程如下:

$$\gamma_2 = \frac{(23-10) \times 4 + (22-10) \times 2}{4+2} = 12.67 (\text{kN/m}^3) \quad (1-9)$$

$$(4) \text{ 所以 } f_a = f_{a0} + K_1 \gamma_1 (b-2) + K_2 \gamma_2 (h-3) \quad (1-10)$$

$$f_a = 370 + 2 \times (25-10) \times (5-2) + 4 \times 12.67 \times (6-3) = 612.04 (\text{kPa})$$

因此确定持力层中密中砂的地基容许承载力为 612.04 kPa 。

学习任务4 浅层平板载荷试验确定地基承载力



学习情境

某天然地基的承载能力为 60 kN，地基土质条件为较软的黏性土，不满足工程建设要求，经过人工处理后，需要重新测定复合地基的承载能力，采用如图 1-20 所示方法检测。思考：该方法的基本原理是什么？这种方法有什么特点？如何确定地基土的承载能力呢？



图 1-20 利用浅层平板载荷试验确定地基承载力



知识导航

1. 浅层平板载荷试验原理

浅层平板载荷试验是原位测试的方法之一，其基本原理是在测试场地（地基持力层、岩土体原位）上放置圆形或方形的一定面积的荷载板（刚性板或承压板），然后逐级施加竖向荷载在地基土上，观测在逐级荷载作用下的稳定沉降量，直至达到地基破坏标准，收集数据绘制 $p-s$ 曲线（ p 是指荷载， s 是指沉降），然后依据相关规范确定地基土的承载力值和变形参数。浅层平板载荷试验具有直观、可靠、准确等特点，被广泛应用在地基基础勘察设计中。

2. 浅层平板载荷试验目的

浅层平板载荷试验的主要目的包括：可以确定地基土的变形特征，为地基上部工程的评价提供帮助；可以确定地基土的变形模量，为计算地基沉降提供参考；可以确定地基承载力特征值，为合理进行基础的设计提供依据；还可以为工程管理和施工验收提供参考资料，保障工程的质量和安全。

3. 浅层平板载荷试验适用条件

浅层平板载荷试验适用于 5 m 以内深度范围内地基的承压板下应力主要影响范围内地基承载力和变形参数确定，也适用于天然地基及人工地基（无竖向增强体），还适用于单桩和多桩复合地基承载力的确定。《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363—2019）规定：试验点不应少于 3 点，当试验实测值的极差不超过其平均值的 30% 时，取平均值作为地基（复合地

基)承载力特征值;当试验实测值的极差超过其平均值的 30%时,根据地质条件、测试结果、试验操作、工程情况等分析确定。

4. 浅层平板载荷试验方法

浅层平板载荷试验的地基反力通过堆载法或地锚法等提供。结合地基土质条件、持力层的深度、碎石土的最大粒径、基础类型,在满足规范要求的情况下,合理地选择承压板的尺寸。例如,承压板可采用圆形、正方形钢板或钢筋混凝土板,承压板面积应不小于 0.25 m^2 ,软土面积应不小于 0.5 m^2 ,对于处理过的复合地基承载力的检验,承压板面积要求覆盖桩加固的面积,如图 1-21 所示。



浅层平板载荷试验

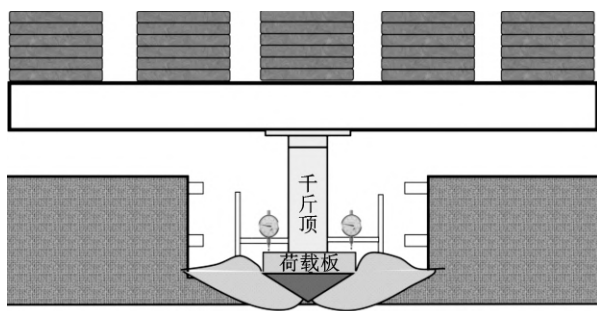


图 1-21 基坑内浅层平板载荷试验

标高和尺寸满足要求。载荷试验的基坑的底部标高应与基础设计基底标高相符,且试坑尺寸满足要求。保持试验土层的原状结构和天然湿度。试验基坑宽度应大于等于承压板宽度或直径的 3 倍。在拟试压表面使用不超过 0.02 m 厚的中砂、粗砂层找平。

采用压力表或压力传感器测定载荷,根据千斤顶校准结果换算荷载,也可以用压力传感器直接测定;变形沉降采用百分表或位移传感器测量,百分表或位移传感器数量根据测试面积大小确定,一般为 2~4 个。

测点数量结合面积大小(每 $500 \text{ m}^2 \geq 1$ 个点)确定,要求土(岩)地基载荷试验的检测数量大于等于 3 个;重要工程和复杂环境地基应增加检测点数。

试验荷载分多级施加,每级加载后在不同时间内测读一次沉降值,之后每隔 0.5 h 测读一次沉降值。沉降稳定判定标准是指在连续 2 h 内,沉降量不超过 0.1 mm/h 。当沉降稳定后可施加下一级荷载。当出现下列情况之一时,即可终止加载。

- (1)刚性板周围的土体侧向挤出明显。
- (2)变形沉降突然增大, $p-s$ 曲线有陡降段出现。
- (3)在某一级荷载下, 24 h 内的沉降速率未达到稳定标准。

极限荷载的确定。当出现终止加载的上述情况之一时,取其对应的前一级荷载为极限荷载。当平板载荷试验达预定最大荷载时,未出现如上终止加载情况,最大荷载即极限荷载。

当 $p-s$ 曲线上有比例界限且比例界限小于极限荷载的一半时,取该比例界限所对应的荷载值为承载力特征值;当比例界限大于等于极限荷载的一半时,取极限荷载值的一半为承载力特征值;当比例界限难以判定时,可取沉降量与承压板宽度之比等于 $0.01 \sim 0.015$ (宽度为 0.7 m 时,沉降量为 $7.00 \sim 10.50 \text{ mm}$)所对应的荷载值为承载力特征值。

5. 浅层平板载荷试验案例分析

某地层上预建工程项目，采用浅层平板载荷试验检验地基土的承载力，该处地基土是全风化的破碎带及全风化砂岩，含水率较低，土质坚硬，强度较低。设计要求的基础的承载力为 200 kPa，承压板面积为 0.5 m²。试验共检测了 4 个测点，收集了各级数据，绘制了荷载的 $s\text{-}lgt$ 曲线、 $p\text{-}s$ 曲线。根据表 1-28 所示浅层平板载荷试验结果，试判断：各点承载能力是否满足要求？需如何处理？

表 1-28 浅层平板载荷试验结果表

测点编号	最大荷载/kPa	总沉降量/mm	极限荷载/kPa	同级沉降量/mm	承载力特征值/kPa	相应沉降量/mm
测点 1	760	49.44	720	29.02	360	9.02
测点 2	520	51.46	480	42.48	240	6.0
测点 3	400	52.18	360	38.36	180	9.8
测点 4	680	49.35	640	36.03	320	3.5

数据分析如下。

因试验点均在全风化土上，比例界限均不明显，所以承载力特征值的确定统一为极限荷载的一半。

测点 1 最大荷载为 760 kPa，总沉降量为 49.44 mm，曲线出现停止加载特征，判断达到破坏标准，根据规范要求，判断承载力特征值为极限荷载的一半，即承载力特征值为 360 kPa，承载力大于设计要求的基础的承载力。

测点 2 最大荷载为 520 kPa，总沉降量为 51.46 mm，曲线出现终止加载特征，判断达到破坏标准，根据规范要求，判断承载力特征值为极限荷载的一半，即承载力特征值为 240 kPa，承载力大于设计要求的基础的承载力。

测点 3 最大荷载为 400 kPa，总沉降量为 52.18 mm，曲线出现终止加载特征，判断达到破坏标准，根据规范要求，判断承载力特征值为极限荷载的一半，即承载力特征值为 180 kPa，地基承载力低于设计要求的基础的承载力。

测点 4 最大荷载为 680 kPa，总沉降量为 49.35 mm，曲线出现终止加载特征，判断达到破坏标准，根据规范要求，判断承载力特征值为极限荷载的一半，即承载力特征值为 320 kPa，承载力大于设计要求的基础的承载力。

综上，测点 1、2、4 承载力均高于设计要求的基础的承载力，只有测点 3 承载力低于设计要求的基础的承载力，于是需要分析测点 3 的土质情况，并对周围环境采取有效措施增大地基土的承载能力，满足设计需求。

单元知识巩固和拓展

一、知识要点汇总

1. 岩土的分类和结构类型划分：岩土主要分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾、砂砾等，分类依据为颗粒的大小；不同的结构类型如厚层状、块状、柱状等对工程建设的稳定



性和地基承载力有显著影响。

2. 地基容许承载力是指使地基不发生破坏(不产生过大沉降)、留有一定安全储备时所允许的最大基底压力。地基的破坏形式,主要包括整体剪切破坏、局部剪切破坏和冲切剪切破坏,多数破坏是由地基土持力层抗剪强度不足引起的。

3. 原位测试方法包括触探试验(静力、动力)、标准贯入试验、载荷试验、十字板剪切试验、旁压试验、扁铲侧胀试验、应力铲试验、现场直剪试验、岩体应力试验、岩土波速测试等。

4. 地基容许承载力确定方法主要有原位测试法、经验公式法、理论公式法等。其中,现场原位试验法主要有平板载荷试验、标准贯入试验、静力触探试验;经验公式法根据公式的建立方法有回归分析法、聚类分析法和主成分分析法;理论公式法主要有极限平衡法、弹塑性理论法、有限元法。

5. 经验公式法是指一种基于历史数据、长期实践和地基工程经验建立起来的计算方法。这种方法通过简单的数学公式来估算地基的承载力。它通常用于初步设计阶段或在地质数据不充分的情况下快速提供预估。其中,经验公式是指根据以往工程经验和实际测量的数据归纳总结出的,用于快速计算特定工程参数的数学表达式。

6. 浅层平板载荷试验基本原理是在测试场地上放置圆形或方形的一定面积的承压板,然后逐级施加竖向荷载在地基土上,观测在逐级荷载作用下的稳定沉降量,直至达到地基破坏标准。试验时需要收集数据绘制 $p-s$ 曲线,然后依据相关规范确定地基土的承载力值和变形参数。



二、习题练习

(一) 单选题

- 地基岩土的分类中,颗粒粒径大于 800 mm 的是()。
A. 中砂
B. 漂石或块石
C. 细圆砾
D. 粉粒
- 地基承载力的定义是指()。
A. 地基土单位面积上的最大承载能力
B. 地基土单位面积上的平均承载能力
C. 地基土内部应力改变附加应力引起的变形
D. 地基土单位面积上承受荷载的能力
- 在岩土工程分类标准中,以下哪种岩体完整性指数 K_v 的描述是正确的?()
A. $K_v > 0.75$ 表示岩体完整
B. $0.55 < K_v \leq 0.75$ 表示岩体较完整
C. $0.35 < K_v \leq 0.55$ 表示岩体较破碎
D. 所有选项都正确
- 下列关于土的结构描述错误的是()。
A. 单粒结构的土体渗透性强
B. 浮粒结构的土体抗剪剪强度高
C. 团粒结构的土体有良好的透水性
D. 浮粒结构的土体压缩性较高
- 以下关于土的构造描述正确的是()。
A. 层状构造是由侵蚀作用形成的
B. 块状构造的土体弹性较强
C. 柱状构造多见于冻胀土中
D. 土的构造不影响工程性质
- 柱状构造一般是因为以下哪种作用形成?()
A. 水力作用
B. 风化作用
C. 冻胀作用
D. 构造作用



习题练习答案

7. 需要考虑岩石的哪些特征, 从而对其完好程度进行判断? ()
- A. 色泽 B. 矿物成分 C. 结构特征 D. 所有选项
8. 粗角砾的粒径(d)范围是多少? ()
- A. $40\text{ mm} < d \leq 60\text{ mm}$ B. $20\text{ mm} < d \leq 40\text{ mm}$
- C. $10\text{ mm} < d \leq 20\text{ mm}$ D. B 和 C 都正确
9. 以下哪个选项不是地基土的工程特性? ()
- A. 颗粒组成 B. 孔隙性 C. 密度 D. 热导性
10. () 是保证地基不发生破坏(不产生过大沉降)、留有一定安全储备时所允许的最大基底压力。
- A. 地基承载力 B. 地基压力
- C. 地基强度 D. 地基的承载力特征值(地基容许承载力)
11. 某浅基础底面的压应力为 200 kPa , 地基土的容许承载力为 400 kPa , 请问进行基础设计计算时, 施工阶段地基承载能力满足要求吗? (暂不考虑其他因素)()
- A. 满足 B. 不满足 C. 不知道
12. () 是一种通过现场试验确定地基承载力的方法, 以数据为基础, 结合区域性、工程经验, 确定地基土的承载力, 这种方法方便、适用、快捷、准确。
- A. 原位测试法 B. 理论公式法 C. 经验公式法 D. 当地经验法
13. () 是根据岩土类别、岩土状态、工程经验、各项指标(室内物理力学指标、现场测试指标或野外鉴别指标), 通过查规范表格确定承载力特征值 f_{a0} 的方法。
- A. 当地经验法 B. 理论公式法 C. 经验公式法 D. 原位试验法
14. (2015 年注册岩土工程师试题) 以下关于载荷试验的终止条件描述正确的是? ()
- A. 承压板周围的土体有明显的侧向挤出
- B. 沉降量超过承压板直径或宽度的 $1/12$
- C. 24 h 内沉降随时间近似等速或加速开展
- D. A、B、C 三者之中的任何一种
15. (2012 年注册岩土工程师试题) 某建设场地为岩石地基, 进行了 3 组岩基载荷试验, 试验数据如下。请问根据试验数据, 岩石地基承载力特征值为()。

序号	比例界限(kN)	极限荷载(kN)
1	640	1920
2	510	1580
3	560	1440

- A. 480 kPa B. 510 kPa C. 570 kPa D. 823 kPa

16. 浅层平板载荷试验适用于深度 5 m 以内地基的承压板下应力主要影响范围内的地基承载力和变形参数确定, 试验点不应少于()点, 承压板面积应不小于 0.25 m^2 , 软土面积应不小于() m^2 。

- A. 3 0.5 B. 4 0.6 C. 5 0.7 D. 6 0.8

17. 原位测试中静力触探适用于下面哪种土质条件? ()

- A. 淤泥、黏性土 B. 填土、黏性土、密实粉砂
- C. 粉土、淤泥、黏性土、密实粉砂 D. 粉土、黏性土、密实粉砂及含碎石的土层

18. 原位测试中标准贯入的锤重质量为? ()

- A. 40 kg B. 10 kg C. 120 kg D. 63.5 kg

19. 《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)把岩土分为以下几类,描述错误的是()。

- A. 工程岩土可以分为特殊性岩土、岩石、碎石土、砂土、粉土、软黏土
B. 黏性土有坚硬、硬塑、可塑、软塑、流塑几种状态
C. 砂土包含砾砂、粗砂、中砂、细砂、粉砂
D. 特殊性岩土包含软土、膨胀土、湿陷性土、红黏土、冻土、盐渍土、填土几种

20. (2019年注册岩土工程师试题)根据《岩土工程勘察规范(2009年版)》(GB 50021—2001),标贯试验中钻杆直径使用正确的是下列哪个选项? ()

- A. 42 mm B. 50 mm
C. 42 mm 或 50 mm D. 50 mm 或 60 mm

(二) 多选题

1. 地基破坏的三种主要形式是哪些? ()

- A. 整体剪切破坏 B. 局部剪切破坏
C. 冲切剪切破坏 D. 弯曲破坏

2. 在确定地基承载力时经验公式法(规范表格法)需要考虑的因素包括哪些? ()

- A. 岩土类别和状态 B. 工程经验和指标
C. 土的颜色和味道 D. 岩石含水量和渗透系数

3. (2018年注册岩土工程师试题)采用换填垫层法处理的地基,下列关于地基承载力的确定或修正的说法中,正确的选项有哪些? ()

- A. 按地基承载力确定基础底面尺寸时,其基础宽度的地基承载力修正系数取零
B. 垫层的地基承载力宜通过现场静载荷试验确定
C. 处理后的垫层承载力不应大于处理前地基承载力的1.5倍
D. 某基槽式换填垫层,采用干密度大于 2100 kg/m^3 的级配砂石换填,其基础埋深的修正系数可取2.0

(三) 判断题

1. 地基岩土分类中将粒径为 $0.075 \sim 2.0 \text{ mm}$ 的颗粒定义为砂粒。()
2. 地基承载力是指地基土内部应力改变附加应力引起地基土体剪应力增加的能力。()
3. 地基破坏主要有两种形式:整体剪切破坏和局部剪切破坏。()
4. 团粒结构的土体比单粒结构的土体具有更强的渗透性。()
5. 岩石的结构面间距对其稳定性和承载力具有显著影响。()
6. 地基的临界荷载是指基底压力达到造成塑性变形区出现的荷载。()
7. 土的微观组成与宏观构造相互独立,互不影响。()
8. 任何时候土中的液相(孔隙水)不存在时,土被称为饱和土。()
9. 土的含水量对土的强度、变形性、压缩性等工程特性没有显著影响。()
10. 在地基土的工程特性中,土的密度是指土的质量与体积的比值。()

(四) 简答题

1. 不同岩土类型按照粒径的分类及其对应的粒径范围有哪些?

2. 什么是地基承载力和地基容许承载力?
3. 列举造成地基破坏的三种主要形式, 并简要解释每种形式。
4. 土的结构对其工程特性有何影响?
5. 经验公式法如何确定地基土的承载力?
6. 什么叫原位测试法? 原位测试包含哪些试验?
7. 地基承载力的确定方法有哪些?
8. 浅层平板载荷试验的原理和目的是什么?
9. 列举原位测试方法(任写其五)。

(五) 计算题

(2018 年注册岩土工程师试题) 桥梁墩台基础底面尺寸为 $5\text{ m} \times 6\text{ m}$, 埋深 5.2 m 。地面以下均为一般黏性土, 按不透水考虑, 天然含水率 $\omega = 24.7\%$, 天然重度 $\gamma = 19.0\text{ kN/m}^3$, 土粒相对密度 $G = 2.72$, 液性指数 $I_L = 0.6$, 饱和重度为 19.44 kN/m^3 , 平均常水位在地面上 0.3 m , 一般冲刷线深度为 0.7 m , 水的重度取 $\gamma_w = 9.8\text{ kN/m}^3$ 。按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019) 确定修正后的地基承载力容许值, 其值最接近以下哪个选项? ()

- A. 275 kPa B. 285 kPa C. 289 kPa D. 303 kPa



三、知识点拓展

案例拓展一：北方某城市房屋变形沉降案例分析

北方某城市高层建筑的地表突然出现大面积沉陷和开裂, 如图 1-22 所示, 地表的破坏情况比较严重。随后专家们从设计、施工方面进行了详细的调查和分析。专家们审慎、科学地给定研判结果, 将其定性为突发地质灾害。主观原因不排除地热井打井施工触及了深层地质构造, 从而导致涉事地区浅层水土流失, 出现地面沉降等现象。客观原因可能是房屋建筑下有一定深度的地下水层, 事发地底下 1300 m 深度以下存在地质空腔。总的来说, 因为人为的干预(地热井打孔贯穿了地下水层, 部分水可能流入了下部的地质空腔)破坏了原有的地质平衡, 房屋建筑下地基土的承载力减弱, 由量变引起了质变, 导致这一问题的发生。

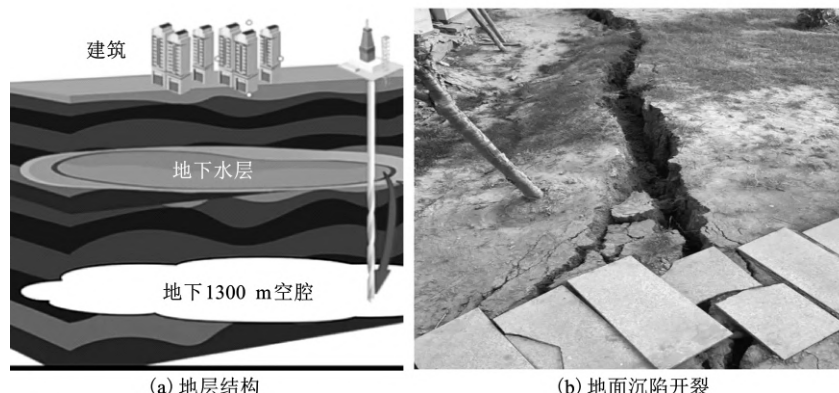


图 1-22 某城市房屋变形沉降案例

(案例来源——网络平台资料)

案例拓展二：砂土地基液化案例分析

砂土液化是指砂土受到振动时，砂土空隙中的水会被排出，形成“喷砂冒水”现象。如果砂土体的透水性不好，孔隙水不能及时排出，必然引起孔隙水压力上升，则砂土的有效应力会随之降低，直至为零，于是砂土就会悬浮于水中，此时砂土的抗剪强度与抗剪刚度几乎都等于零，土体处于流动状态，这就是砂土液化现象，如图 1-23 所示。砂土液化的危害是常使地基失效，地面出现不同程度的沉陷，造成建筑物倾斜、开裂、倾倒或下沉，破坏农田。



图 1-23 砂土地基液化

在设计基础时应尽量避免将未经处理的液化土层作为地基持力层，而是选择表层非液化盖层厚度大、地下水埋藏深度大的地区作为建筑场地。计算非液化土层和不饱和水砂层的自重压力，如其值接近或等于液化层的临界值，则属符合要求的场地。选择地表地形平缓、液化砂层下伏底板岩土体平坦无坡度者为宜；选择液化均匀且轻微的地段时，液化层厚度均一较不均一的为好。

砂土液化地基处理：可采用加密法（如振冲、振动加密，挤密碎石桩，强夯等）加固处理至液化深度下界，且对地基边缘以外的处理宽度按规范要求实施；采用非液化土替换全部液化土层或增加上覆非液化土层厚度。

砂土液化基础和上部结构处理：选择合适的基础埋深（因基础形式而定）；调整基础底面积，减少基础偏心；加大基础刚度和加强整体性；减轻荷载，增大上部结构的整体刚度和增强均匀对称性。

模块二 地基处理

单元一 软弱地基处理



学习目标

【知识目标】

1. 理解软土的定义，软土地基的病害及其成因，软土的类型及其特点。
2. 熟悉软土的类型、识别方法，并了解软土地基的常见处理方法。
3. 学习具体案例，掌握软弱地基处理工程在实践中的应用。

【能力目标】

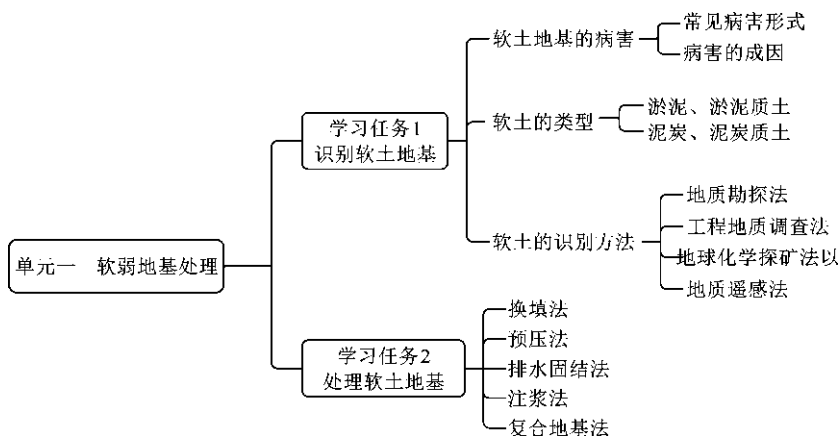
1. 分析评估能力：能够对软弱地基的特性进行准确评估，包括土壤的分类、物理和力学性质。
2. 培养施工技术能力：能够举一反三地匹配或设计出施工安全、经济效益好和环境可持续的软弱地基解决方案。
3. 培养问题解决能力：在遇到软弱地基的不利条件时，能够快速识别问题、分析原因、提出解决方案，并进行调整优化。

【素质目标】

1. 培养适应地基工程领域专业精神的职业素养，展现出对地基工程专业的热情与承诺，不断追求精益求精，确保工作质量满足高标准要求。
2. 培养具有责任感的职业素养，对所承担的地基工程项目有高度责任感，确保遵守规范、尊重自然、注意安全、保护环境。
3. 培养在地基工程领域持续学习的职业素养，树立终身学习观念，对知识的渴求不仅局限于专业技术，还拓展到专业相关领域。



学习导图



学习任务 1 识别软土地基

学习情境

作为一名年轻的工程师，你参与了位于城市郊区的大型土建施工项目。该地区的土壤为深层软土地基，之前的初步勘探报告表明，该地区的地下存在大量的软土层，这对结构的稳定性和安全性提出了严峻的挑战。由于软土具有较高的压缩性和低承载力，传统的地基处理方法在此种地基条件下可能并不适用，或需要在施工阶段特殊考量。作为一名工程师，你要如何开始工作？让我们一起开始软土地基处置的学习。

首先是资料收集。翻阅历史地质调查报告，以收集该区域的地质资料，包括土层分布、土壤的物理及化学性质、过去处理软土问题的案例。

其次是现场考察。安排现场考察，直接观察土壤的状态，并与土木工程师、地质学家交流以获取更多的第一手资料。记录软土层的颜色、质感、水分、气味等特征和现场检测试验结果。

再次是方案讨论。组织一个团队讨论会，向团队展示收集到的数据，并初步分析软土地基的特点、承载力，探讨地基处理可行方案，并制定一系列施工和设计准则。

最后是总结。基于以上工作，归纳软土地基的识别要点，总结并评估提高软土地基稳定性的方法，将这一过程形成文档记录，用于类似情境参考或工程报告。

知识导航

软土地基常指强度低、压缩量高、透水性差、易液化的地基，软土地基是由软黏土、淤泥质土、沼泽泥炭质土等松散的土壤构成的地基，其承载力低，变形大，易发生沉降、变形、液化等问题。其特殊的工程性质对建筑物的结构安全性和耐久性有着严重威胁，因此，需要采取有效的措施进行防治，确保建筑物的安全稳定(图 2-1)。

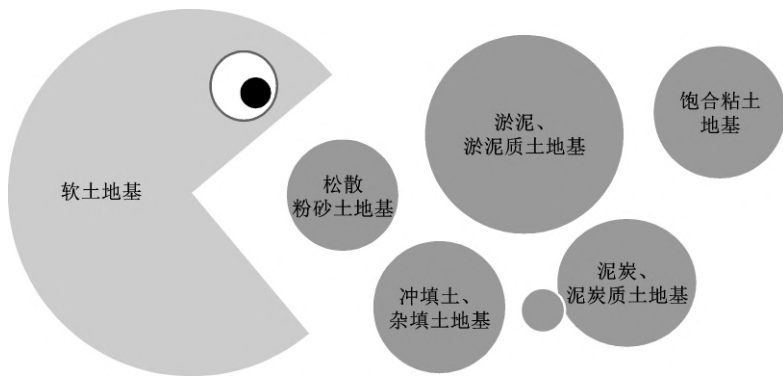


图 2-1 软土地基

一、软土地基的病害

软土地基由于软土构造、组成的不同，其病害的表现形式多样，进而导致建筑物病害情况不一，需要对不同病害形式进行不同分析。

1. 常见病害形式

软土地基病害主要包括沉降、变形、液化、地基破坏等问题。

1) 沉降

软土地基在建筑物自重和荷载的作用下,会发生压缩变形,导致建筑物整体或局部沉降。沉降过大会导致建筑物倾斜、开裂甚至倒塌。

2) 变形

软土地基在荷载的作用下,会发生不均匀压缩变形,导致建筑物发生倾斜、扭曲、拱起等。变形过大会导致建筑物结构破坏、使用功能受损。

3) 液化

在强震等动荷载的作用下,软土地基中的孔隙水压力会迅速上升,导致土体失去抗剪强度,发生液化。液化会使建筑物失去支撑,发生倾倒、沉陷等灾害。

4) 地基破坏

软土地基在长期荷载的作用下,可能会发生蠕变、剪切破坏等,导致地基承载能力下降,引发建筑物基础开裂、墙体倾斜、楼层坍塌等事故。

2. 病害的成因

软土地基病害的发生是多种因素共同作用的结果。

(1) 软土地层的性质。软土地层越厚,性质越软弱,其发生病害的可能性就越大。

(2) 建筑物的荷载。建筑物的荷载越大,对地基的压力就越大,导致地基发生病害的可能性就越大。

(3) 地下水位。地下水位越高,对软土地基的稳定性影响就越大,导致地基发生病害的可能性就越大。

(4) 地震活动。地震等动荷载会对软土地基产生强烈的冲击,导致地基发生液化等病害。

(5) 施工质量。地基施工质量不合格,也会导致地基发生病害。

软土地层的厚度和性质、建筑物的荷载大小和分布、地下水位和地震活动等因素影响软土地基病害的程度。为了防止软土地基病害,需要针对不同软土类型采取对应的措施,提高地基的承载能力和稳定性。

二、软土的类型

软土通常是指强度低、压缩性大、承载能力低的土层,主要是指天然孔隙比 ≥ 1.0 且天然含水量大于液限的细粒土。软土地基的类型繁多,其不同类型特征对工程建设的影响也不同,需要在工程设计和施工中进行详细的勘察和分析,并采取相应的处理措施,以确保工程的稳定性和安全性。工程建设中软土分为淤泥、淤泥质土、泥炭和泥炭质土、冲填土、系填土、杂填土、饱和软黏土以及其他高压缩性土等,如图 2-1 所示。

1. 淤泥、淤泥质土

淤泥是在水中沉积,含水率大于液限,天然孔隙比大于等于 1.5 的黏性土。淤泥质土是指淤泥含量大于 50% 的土,它是一种富含黏土和有机质的土壤类型,通常呈现黏稠、湿润的状态,具有较高的保水性和肥力。这种土壤适合种植水稻、蔬菜和其他需要湿润环境的作物,常见于湖泊、河流、滩涂等区域,如图 2-2 所示。其物理力学性质的特点主要有:含水量



软土地基介绍

高(>50%), 孔隙比大(>1), 压缩性大(压缩系数 $C_v>0.5 \text{ MPa}^{-1}$), 抗剪强度低(<20 kPa), 敏感性高, 扰动后强度和稳定性会降低, 具有较强的流动性, 容易发生液化。其在工程方面主要体现为: 地面沉降变形大, 容易发生不均匀沉降, 导致结构物倾斜、开裂甚至倒塌。

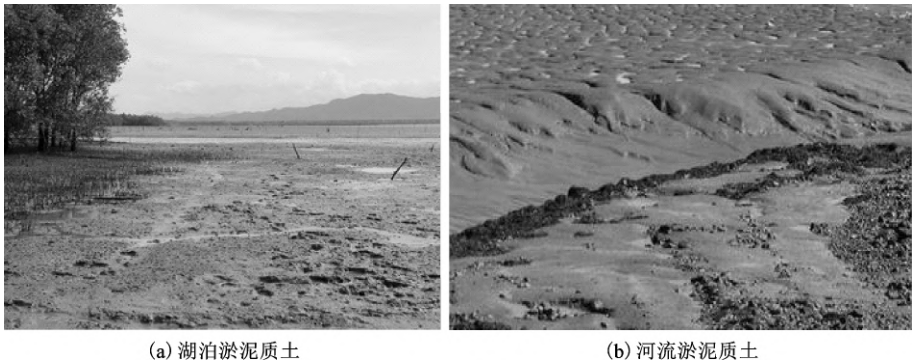


图 2-2 河流、湖泊、滩涂区域常见淤泥质土

2. 泥炭、泥炭质土

泥炭是有机质含量大于 60%时的土, 泥炭质土是由植物残体在缺氧条件下堆积而成的土。在某些河湖沉积低平原及山间谷地中, 由于长期积水, 水生植被茂密, 在缺氧情况下, 大量分解不充分的植物残体积累并形成泥炭层的土壤。尽管泥炭质土在工程性质上存在一些不利因素, 但它作为有机物质资源具有巨大的开发利用潜力, 可用于土壤改良、肥料、能源等方面。其物理力学性质的特点主要有: 质地松软, 容重小($<1.2 \text{ g/cm}^3$), 孔隙比大(>90%), 压缩性大($C_v>10 \text{ MPa}^{-1}$), 有机质含量高(>60%), 腐殖酸含量高, 酸性强($\text{pH}<4$), 具有较强的吸水性和保水性。常见的有水藓泥炭地、沼泽泥炭地, 如图 2-3 所示。泥炭质土在工程方面主要体现为: 压缩变形大, 长期沉降持续时间长, 且易发生二次沉降, 颜色呈黑色或深褐色。



图 2-3 常见泥炭质土

三、软土的识别方法

软土地基的识别是土木工程中的重要内容。在设计和施工中, 对软土地基的认识和识别是至关重要的, 直接影响工程的稳定性、承载力和变形性能, 涉及地基的稳定性、安全性和

经济性。进行相应的地质勘查和土力学测试是识别、评估软土地基特性的关键步骤。软土地基常用的识别方法有地质勘探法、工程地质调查法、地球化学探矿法和地质遥感法。

1. 地质勘探法

通过钻孔、取样、试验等手段,获取地层的物理性质和力学性质,如密度、含水量、压缩系数、抗剪强度等,从而判断地层是否为软土。地质勘探是通过各种手段和方法对地质进行调查和探测的活动,主要目的是寻找和评价矿产资源、水资源、工程地质条件等。

地质勘探的常用方法是坑探、槽探、钻探和地球物理勘探。其中,坑探、槽探是用人工或机械方式挖掘坑、槽、井、洞,以直接观察地层岩性、结构和矿化情况,并取得原状土样;钻探是用钻机在地层中钻孔,以鉴别和划分地表下地层,并沿孔深取样。钻探是当前最常用的一种勘探方法,可以直接获得深层的地质资料。取样是获取地下地质信息的重要手段。取样时应注意保持样品的完整性,并尽量避免样品受到扰动。试验是获取地下地质信息的重要手段。常用的试验包括土工试验、力学试验、化学试验等。土工试验可以获取土壤、岩石的物理力学特性信息;力学试验可以获取土壤、岩石的强度特性信息;化学试验可以获取土壤、岩石的化学成分信息。

地球物理勘探是利用岩石和矿石的密度、磁性、导电性、弹性、放射性等物理性质的差异,用不同的物理方法和仪器探测天然的或人工的地球物理场的变化,推断和解释地质构造和矿产分布情况。常用物探方法有重力勘探、磁法勘探、电法勘探、地震勘探、放射性勘探等。

2. 工程地质调查法

工程地质调查是为了满足工程建设和地质灾害评估的需要,对地质情况进行系统、综合、科学的调查和研究。它涉及土壤、岩石、地下水等地质要素,以确保工程建设的可行性、安全性和稳定性。通过工程地质调查,可以对周边地形、地貌、植被、水文等因素进行相对详细的了解,如了解软土地基的分布范围和特征。工程地质调查是软土地基识别的间接方法,可以为地质勘查提供参考。工程地质调查常规调查项目包括地形地貌调查、植被调查、水文调查。

地形地貌调查可以了解软土地基的起伏程度、坡度等信息。软土地基通常分布在平坦、低洼地带,以及坡度较小的区域。地形地貌调查的结果可以提供关于地表地质特征的丰富信息,为地质勘查、工程设计、自然资源评估和环境保护提供基础数据。地形是指地表高低起伏的总体特征。地形调查可以了解工程建设区域的地势起伏、坡度、形态等信息。地貌是指地表由自然力作用形成的各种形态。地貌调查可以了解工程建设区域的岩石类型、土壤类型、植被类型等信息,主要采取野外调查和遥感调查等调查方法进行。

植被调查是工程地质调查中的一项重要任务,旨在了解和记录调查区域内的植被分布、类型、密度、生长状况等信息,还可以了解软土地基的含水率、盐碱度等信息。软土地基通常植被稀疏,土壤颜色较深。这些信息对于环境评估、土地利用规划、生态学研究以及地质勘查中的土壤稳定性评估等都具有重要的意义。常见的调查内容包括植被类型、植被覆盖度、植被生长状况;常见的调查方法包括野外调查、遥感调查等。

水文调查是工程地质调查的重要组成部分,是对工程建设区域的水文特征进行调查研究的方法。水文调查可以为工程设计、施工、维护提供依据。软土地基通常地下水位较高,土壤含水率较高,需要引起高度重视。

3. 地球化学探矿法

地球化学探矿是指利用岩石和矿石的化学成分和元素含量的差异，用不同的化学方法和仪器采集并分析岩石、土壤、水等样品中的化学元素，确定和评价矿产分布情况。常用的地球化学探矿方法有岩溶法、流溶法、气溶胶法等。

地球化学探矿岩溶法是一种利用岩溶作用产生的地球化学异常来寻找矿产资源的方法。岩溶作用是指碳酸盐岩、石膏、盐岩等易溶岩石在地下水的的作用下发生溶解、沉淀、再结晶等的过程，形成各种岩溶地貌和岩溶空间。岩溶作用可以改变岩石的物理性质和化学成分，从而影响地球化学场的分布。岩溶法主要适用于寻找与碳酸盐岩有关的矿产资源，如铅锌、铁、锰、金、铜等。岩溶法的基本原理是当含有矿物质的水流通过岩溶空间时，会在其中沉积或吸附一定量的矿物质，产生岩溶异常。通过对岩溶异常的采样、分析和解释，可以判断矿体的位置、规模和品位。

地球化学探矿流溶法是一种利用地表水或地下水中的溶解物来反映矿体的存在和分布的方法。流溶法的基本原理是矿体与水接触时，会向水中释放出一些元素或化合物，产生流溶异常。流溶异常的产生受到多种因素的影响，如矿体的性质、地质构造、水文条件、气候条件等。流溶法的优点：可以探测到深部或隐伏的矿体，可以覆盖大面积的区域，可以减少样品数量和降低分析费用，可以提高探矿效率和精度。流溶法的缺点：流溶异常受到多种干扰因素的影响，需要对复杂的异常进行解释和划分，需要结合其他方法进行综合分析和评价。

地球化学探矿气溶胶法是利用气溶胶的物理和化学特性对矿物进行预测和勘探的方法。气溶胶是指在空气中悬浮的固体或液体粒子，其粒径通常在 $0.001 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间。矿物质在风化过程中会释放出各种化学元素，这些元素会被气溶胶吸附或包裹。因此，气溶胶的组成和含量可以反映矿物的存在。

常见的地球化学探矿气溶胶法主要有气溶胶的化学分析法、放射性分析法和光谱分析法。气溶胶的化学分析法主要是利用化学分析方法对气溶胶的组成进行分析，探测矿物质的含量。气溶胶的放射性分析法主要是利用放射性分析方法对气溶胶进行分析，探测矿物质的含量。气溶胶的光谱分析法主要是利用光谱分析方法对气溶胶进行分析，探测矿物质的含量。地球化学探矿气溶胶法是近些年发展起来的一种矿产资源勘探方法。

4. 地质遥感法

利用航空或卫星等平台搭载的各种传感器，获取地表的电磁波反射或发射信息，经过处理和解译，能识别和判别地表的岩性、构造、植被、水文等特征，为地质勘查提供宏观和综合的信息。常用的遥感方法有光学遥感、雷达遥感、红外遥感等。

软土地基的识别是一个复杂的过程，需要采取多种方法进行综合判断。除了上述提到的地质勘探法、工程地质调查法、地球化学探矿、地质遥感法，还可以根据土壤采样、实验室分析和原位测试等方法对软土成分、力学性质进行相关分析，也可以通过地震勘探技术等手段来确定地下地质结构，进一步明确软土层的分布和性质。在进行工程设计和施工前，必须对拟建场地的地质条件进行全面调查和评估，以确保地基的稳定性和安全性。综合运用各种科学手段和方法，能够为工程设计和施工提供更加准确可靠的地质资料，从而确保工程的顺利实施和质量安全。

学习任务2 处理软土地基



学习情境

作为一名工程师，你参与了位于沿海城市新区的大型公共设施建设。该项目场地位于河口附近，地质勘查报告显示，土层主要由深度超过 30 m 的软黏土组成，含有较多水分，属于典型的软土地基。该软土地基的存在对项目的建设构成重大挑战，因为软土具有较高的压缩性和低承载力，若不进行适当处理，建筑物可能发生不均匀沉降甚至崩塌。作为一名工程师，你会如何处理？

在上一个学习情境中掌握了相关方法的基础上，开展如下工作。

首先是案例研究，根据当前项目条件筛选常用处置方法，分析历史上类似地基条件下的成功处理案例，研究他们采取的方法、过程中遇到的问题及解决方案，借鉴经验教训。

其次是技术方案实施计划编制。根据确定的地基处理方法，制定详细的施工实施计划，包括施工工艺、时间安排、预期效果与成本估算等。

再次是模拟演练与评估。通过建模模拟软土地基处理过程，预测地基处理后的效果，如土体强度提升、沉降量控制等，对方案进行评估和优化。

最后是总结。将整个学习过程中收集到的资料、讨论的内容和方案制定过程整理成文档，用于分组学习和经验分享，同时可以准备一次交流，向相关人员讲解软土地基处理的重要性和技术要点。



知识导航

软土地基普遍存在强度低、压缩性高、承载力低的土层，容易发生沉降、变形、液化等，对建筑物结构的稳定性和安全性造成严重威胁。软土地基处理的目的是提高地基的承载力和稳定性，减少沉降和变形，防止液化，确保建筑物的安全使用。

软土地基的处理是工程地质处置中的常见问题。由于软土地基工程性质较差，易产生较大的沉降和变形，在工程建设中需要进行相应的处理以保证工程的安全和稳定。常见的软土地基处理方法有换填法、预压法、排水固结法、加固法和桩基础法等。

一、换填法

换填法是将软土挖除，换填坚硬的土料(图 2-4)。换填法是处理软土地基极有效的方法之一，适用于软土厚度较小(<5 m)、上部建筑物荷载较大、周围环境允许挖土换填的情况。

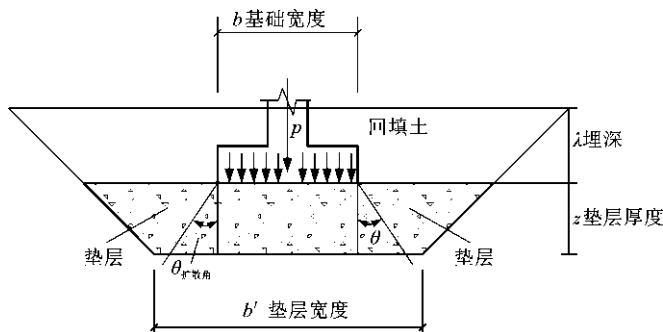


图 2-4 换填法示意图



软土地基处理方法

案例：浦东国际机场 T2 航站楼地基换填法处置

上海浦东国际机场 T2 航站楼位于上海市浦东新区，地处长江三角洲冲积平原，地基土层为软弱淤泥质土，厚度为 30~40 m，承载力低，压缩性高，容易发生沉降和变形，对航站楼的安全性和稳定性造成严重威胁。为了提高地基承载力，减少沉降和变形，确保航站楼的安全使用，项目方采用了换填法处理软弱地基。

1. 处理方案

本案例中采用换填法，将软弱地基土层挖除，换填强度较高和压缩性较低的土料，以提高地基承载力，减少沉降和变形。

2. 具体适用条件

- (1) 软弱地基土层厚度较大，且分布均匀。
- (2) 有足够的场地和合格的换填土料。
- (3) 有足够的施工资金和时间。

3. 换填法施工工艺

- (1) 按照设计要求，确定换填深度和范围。
- (2) 采用挖掘机、卡车等机械设备进行土方开挖，将软弱淤泥质土挖除。
- (3) 采用压路机、夯实机等机械设备进行换填土料的碾压夯实，确保换填土料密实度符合要求。
- (4) 进行回填土料的质量检测，确保回填效果符合设计要求。

4. 换填法施工效果

通过换填法处理后，T2 航站楼的地基承载力明显提高，沉降和变形得到有效控制，航站楼的安全性和稳定性得到有效保障。

二、预压法

预压法是一种软土地基处理方法，通过在软土地基上施加预压荷载，加速软土地基的压缩变形和孔隙水排出，提高地基承载力和稳定性。预压法是利用荷载作用下土体的压缩性，通过预先压缩软土地基，使地基在建筑物自重和荷载作用下产生的沉降和变形提前发生，并在建筑物建造之前完成大部分沉降，从而减少建筑物建成后的沉降和变形(图 2-5)。该方法适用于软土厚度较大、上部建筑物荷载不大、有足够的时间进行预压的情况。

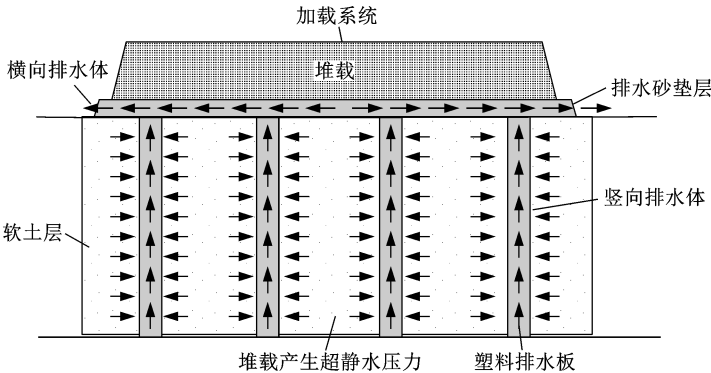


图 2-5 预压法示意图

案例：某高速公路软土地基利用预压法处置

某高速公路位于长江三角洲地区，地处冲积平原，地基土层主要为软弱淤泥质土，厚度为 5~10 m，具有含水量高、压缩性高、承载力低等特点，对路基稳定性和行车安全造成了严重威胁，难以满足高速公路建设要求。为提高地基承载力，减少路基沉降和变形，确保高速公路安全运营，项目方采用预压法对软土地基进行处理。

1. 处理方案

本案例中采用预压法，通过在软土地基上施加预压荷载，利用土体的压缩性，使土体在施工前预先压缩到一定程度，从而提高地基承载力，减少路基沉降和变形。

2. 具体适用条件

- (1) 软弱地基土层厚度相对均匀。
- (2) 有足够的场地和时间进行预压。
- (3) 有足够的预压荷载来源。

3. 预压法施工工艺

(1) 堆载荷载施加：根据地基土的性质、厚度和上部建筑物荷载，采用土料堆载、水袋堆载或真空预压等方式施加预压荷载。本案例采用土料堆载方式，堆载土料取自路基填料，最大堆载高度达 3 m。

(2) 排水措施：在堆载体下设置砂垫层和排水管，以加快软土地基中的孔隙水排出，提高地基固结速度。本案例采用的砂垫层厚度为 0.5 m，排水管间距为 5 m。

(3) 监测与控制：在预压过程中，设置沉降观测点、孔隙水压力观测点等，对地基沉降、孔隙水压力等进行监测，并根据监测结果及时调整预压方案。本案例设置的沉降观测点每 20 m 一个，孔隙水压力观测点每 50 m 一个。

4. 预压法施工效果

经过预压处理后，软土地基压缩变形得到有效控制，地基承载力明显提高，满足高速公路建设要求。经监测，路基沉降平均值不大于 50 mm，最大沉降值不大于 80 mm，孔隙水压力基本消散。

三、排水固结法

排水固结法是一种软土地基处理方法，通过在软土地基中设置排水通道，加速孔隙水排出，提高地基承载力和稳定性。排水固结法是利用荷载作用下土体的压缩性，通过增加排水途径，缩短排水距离，加速土体中的孔隙水排出，使土体有效应力增加，从而提高地基承载力和稳定性(图 2-6)。该方法适用于具有较好透水性的软土、地下水位较低的情况。

根据排水方式的不同，排水固结法可分为重力排水法、真空排水法、电渗排水法和强制排水法等类型。重力排水法是利用重力作用，通过砂井、塑料排水板等竖向排水体排出孔隙水，该方法适用于透水性较好的软土地基。真空排水法是利用真空泵抽真空，降低地下水位，加速孔隙水排出，该方法适用于透水性较好的软土地基。电渗排水法是利用电场作用，改变土体孔隙水的流动方向，加速孔隙水排出，该方法适用于具有较高含水量的软土地基。强制排水法是利用水泵或压缩机等设备，强制排出孔隙水，该方法适用于透水性较差的软土地基。本教材以重力排水法为例进行介绍。

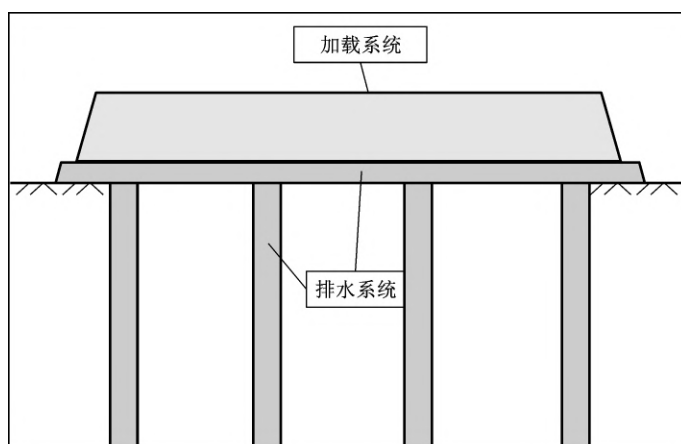


图 2-6 排水固结法示意图

案例：某高速公路软土地基排水固结法处置

珠江三角洲地区的一条高速公路，其所处地理环境为冲积平原。这一区域的地基土层主要由软弱淤泥质土构成，土层厚度为 10~15 m。该区域软土具有显著的高含水量、高压缩性和低承载力等特性。这些特性使得土层难以满足高速公路建设的工程要求，而且这种地质条件对高速公路的路基稳定性和行车安全构成了严重威胁。项目方为提高地基承载力，减少路基沉降和变形，确保高速公路安全运营，采用排水固结法对软土地基进行处理。

1. 处理方案

本案例采用排水固结法，利用排水措施降低土体孔隙水压，使土体在自重荷载作用下发生固结，从而提高地基承载力，减少路基沉降和变形。

2. 具体适用条件

- (1) 软弱地基土层厚度相对均匀。
- (2) 土体具有较好的排水性。
- (3) 有足够的场地和时间进行排水。

3. 排水固结法施工工艺

- (1) 砂井施工：沿路基中心线每隔 2 m 设置一口砂井，砂井直径为 0.5 m，深度达软土层底。
- (2) 排水板施工：在砂井周围铺设塑料排水板，排水板与砂井连接，形成排水通道。
- (3) 荷载施加：在路基上堆载土料，以促进地基固结。

4. 排水固结法施工效果

经过排水固结法处理后，软土地基压缩变形得到有效控制，地基承载力明显提高，满足高速公路建设要求。经监测，路基沉降平均值不大于 50 mm，最大沉降值不大于 80 mm，孔隙水压力基本消散。采用排水固结法处理软土地基是一种有效的方法，可以有效提高地基承载力，减少路基沉降和变形，确保高速公路安全运营。

四、注浆法

注浆法是通过将黏稠的浆液注入土体内部，以改善土体物理力学性质，提高地基的承载能力和稳定性。常见注浆浆液有，水泥基浆液，化学浆液，其他浆液等，如图 2-7 所示。

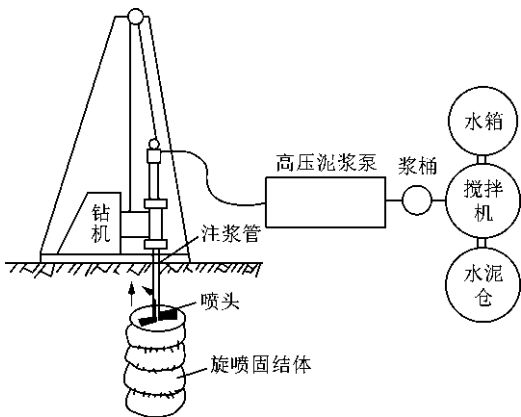


图 2-7 注浆法示意图

案例：某城市中心区域加固

某工程位于某城市中心区域，地基土层主要为淤泥质土和粉质黏土，承载力较低，且存在不均匀沉降的风险。为了保证高层建筑的安全性和稳定性，施工单位决定采用地基注浆法进行加固处理。

1. 处理方案

考虑到地基土的特性，选用水泥-粉煤灰复合浆液作为注浆材料。该材料具有较高的强度、良好的黏结性以及较小的收缩性，能够有效改善土体的强度和密实度。根据地基土的承载力、不均匀沉降的程度以及建筑物的荷载分布，合理布置注浆孔。注浆孔的深度、间距和数量均经过详细的计算和分析。采用分层注浆的方式，从下向上逐层进行。每层注浆完成后，进行静置养护，待浆液充分硬化后再进行下一层注浆，注浆压力和流量根据地基土的渗透性进行调整。

2. 具体适用条件

- (1) 淤泥、淤泥质土、粉土、黏土等软弱土层。
- (2) 地基的不均匀沉降。
- (3) 地基裂缝或渗漏严重的地基。
- (4) 地下空洞或岩溶地基。

3. 注浆法施工工艺

- (1) 钻孔：使用钻机在设计位置钻孔，孔径和深度符合设计要求。
- (2) 清孔：用高压水冲洗钻孔，清除孔内的泥浆和杂物。
- (3) 安装注浆管：在钻孔内安装注浆管，确保注浆管位置准确。
- (4) 配制浆液：根据设计配合比，将水泥、粉煤灰、水等材料按比例混合，配制成浆液。

(5)注浆：使用注浆泵将浆液注入注浆管，并控制注浆压力和流量。

(6)养护：注浆完成后，对注浆区域进行养护，防止浆液过快失水，影响强度。

4. 注浆法施工工艺效果

通过静载荷试验、动载荷试验和原位测试等方法，对注浆加固的效果进行评价。结果表明，注浆加固后，地基土的承载力显著提高，不均匀沉降得到有效控制，满足了工程设计要求。

五、复合地基法

复合地基法是指通过在天然地基中引入增强体(如桩、土工合成材料等)，改善地基土的工程性质，提高地基承载力、稳定性的一种地基处理方法。复合地基兼具天然地基和人工地基的优点，在工程实践中得到了广泛应用。

案例：上海市某高层建筑采用复合地基加固软弱地基

某高层建筑位于上海市，通过钻探取样和原位测试判定该区域地基土层主要为淤泥质土和软塑黏土，承载力较低，且存在较大的不均匀沉降风险。为了保证建筑物的安全性和使用寿命，施工方决定采用复合地基法对地基进行加固处理。

1. 处理方案

为了提高地基承载能力，确保建筑物安全稳定，项目方考虑到地基土的软弱程度和建筑物的荷载，选择碎石桩复合地基作为加固方案。碎石桩具有较好的承载力、耐久性和经济性。

2. 具体适用条件

- (1)高层建筑、重型建筑；
- (2)大跨度建筑、水上建筑；
- (3)地震烈度较高区域的重要建筑；

3. 复核地基法施工工艺

- (1)准备工作：清理施工场地，设置施工围挡，进行测量放线。
- (2)钻孔：采用旋挖钻机或冲击钻等设备进行钻孔。
- (3)碎石填充：采用自卸车或输送带将碎石运至施工现场，并通过振动锤等设备进行密实。
- (4)桩顶处理：采用混凝土浇筑或预制桩顶的方式进行桩顶处理。
- (5)质量检测：对桩的承载力、完整性等进行检测，确保施工质量。

4. 复合地基施工效果

通过碎石桩复合地基的处理，显著提高了地基的承载力，减小了地基的不均匀沉降，确保了高层建筑的安全性和使用寿命。

单元知识巩固和拓展



一、知识要点汇总

1. 软土地基常指强度低、压缩量高、透水性差、易液化的地基。
2. 软土通常指强度低、压缩性大、承载能力低的土层，主要分为淤泥、淤泥质土、泥炭和泥炭质土等。
3. 软土的识别方法有地质勘探法、工程地质调查法、地球化学探矿法和地质遥感法。
4. 软土地基的处理方法有换填法、预压法、排水固结法、注浆法和复合地基法等。



二、习题练习

(一) 选择题

1. 软土地基处理中，排水固结法适用于哪种类型的土？（ ）
 - A. 砂土
 - B. 黏土
 - C. 碎石土
 - D. 有机土
2. 在处理软土地基时，预压法的主要目的是什么？（ ）
 - A. 增强土壤的抗剪强度
 - B. 减少土壤的含水量
 - C. 加速土壤的固结过程
 - D. 减小土壤的液化风险

(二) 多选题

1. (2019 年注册岩土工程师试题) 下列关于砂石桩特性说法错误的是哪些选项？（ ）
 - A. 均匀地层中桩间土抵抗桩体膨胀能力随深度降低
 - B. 砂石桩易在地基深部局部软土处发生剪切破坏
 - C. 饱和软土中置换砂石桩单桩承载力大小主要取决于桩周土的侧限力
 - D. 砂石桩在饱和软土中容易发生膨胀破坏
2. 排水堆载预压法适合于（ ）。
 - A. 淤泥
 - B. 淤泥质土
 - C. 饱和粘性土
 - D. 湿陷黄土
 - E. 冲填土
3. (2020 年注册岩土工程师试题) 软土特性描述正确的是哪几项？（ ）
 - A. 天然含水量大于液限
 - B. 孔隙比大于 1
 - C. 不均匀系数大于 10
 - D. 仅在缓慢流动的海洋环境下沉积形成

(三) 简答题

1. 描述软土地基的常见问题以及可能导致这些问题的原因。
2. 软土地基处理方法中，换填法的工作原理是什么？



习题练习答案



三、知识点拓展

案例拓展一：泡沫混凝土在桥头软土地基处理中的效果研究

某桥于 2003 年建成，原桥头台背路基经过多年的运营已基本稳定。2020 年初，因某航道网集装箱运输通道建设工程的实施，需抬高桥梁高度以适应航道要求，而大桩号方向桥头两侧的路基放坡因涉及基本农田而受到限制，故拟采用泡沫砼结合悬臂式挡土墙方案施工。

建设地点的地表从上至下分别如下：①素填土，厚度 0.5~2.7 m；①粉质黏土，厚度 0.9~3.5 m；②淤泥质粉质黏土，厚度 14.4~27.0 m；③淤泥质粉质黏土，厚度 11.4~22.7 m；④粉质黏土，厚度 9.0~16.5 m；④粉质黏土夹粉土，厚度 3.4~5.7 m；⑤粉质黏土，厚度 3.1~5.1 m；⑤粉质黏土，厚度 3.3~8.2 m；⑥含砂粉质黏土，最大层厚 16.3 m；⑦粉质黏土，最大层厚 17.5 m。工程自上而下采用沥青面层、水泥稳定碎石基层、泡沫混凝土路堤。台背路基最大高度 3.05 m，两侧设置悬臂式挡土墙收缩坡脚，施工时采用分层填筑的方式，其中桥头段设置水泥搅拌桩，桩长 8~10 m，采用三角形布置，间距 1.3 m，台背填筑材料采用泡沫混凝土。泡沫混凝土是采用物理方式将发泡剂制作成泡沫，再将泡沫按预设的体积占比混入水泥浆料中，并掺入外加剂、掺合料等材料，凝固成含有大量均匀封闭气孔的轻质混凝土路堤材料。该方法工程造价较高，应用实例大多局限于高速公路、国道等规格较高的工程项目。经过近年来的不断发展，泡沫混凝土被认为是一种力学性能较好的路基替代材料。路基示意图如图 2-8 所示。

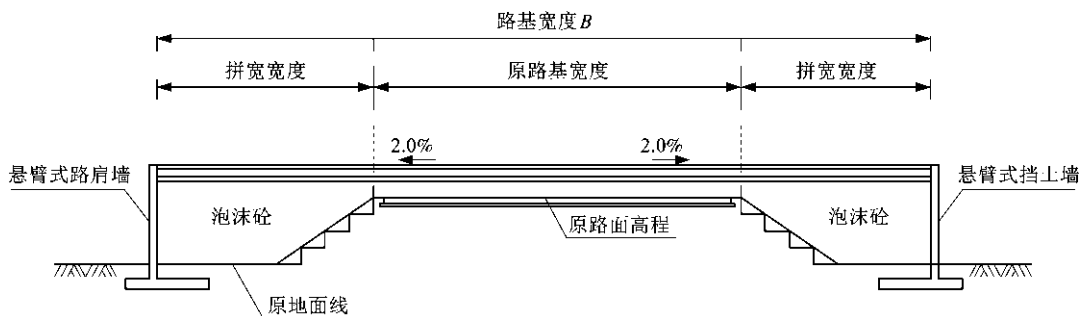


图 2-8 某桥改建工程路基示意图

(案例来源——知网论文《泡沫砼在桥头软土地基处理中的效果研究》)

案例拓展二：某市政城市道路真空联合堆载预压法处理软土地基

某市政城市道路 K0+600~K1+200 标段处有鱼塘和农田路段，均有软土地基分布，且软土深厚(厚度为 15~30 m)，力学性能差。为保证路堤的稳定，减小施工后沉降和沉降差，提高路面的平整度和行车的舒适性，标段范围内的所有道路均需要进行软土地基处理。后期软土地基处理的形式主要为真空联合堆载预压。

真空联合堆载预压施工内容包括：平整场地→量测地面起始高程、铺设砂垫层、土中原

型观测→打设塑料排水板、打设黏土围幕→挖密封沟、安装主管出膜装置、铺设主管和滤管、埋设砂垫层中的真空度测头→量测施工沉降、铺设密封膜、安装抽真空装置→回填密封沟、连接主管抽真空设备→埋设沉降板→测沉降初始值→试抽真空→检查膜上及密封沟漏气情况→正式抽真空开始→施工监测开始→抽真空结束。真空联合堆载预压施工工艺流程如图 2-9 所示。

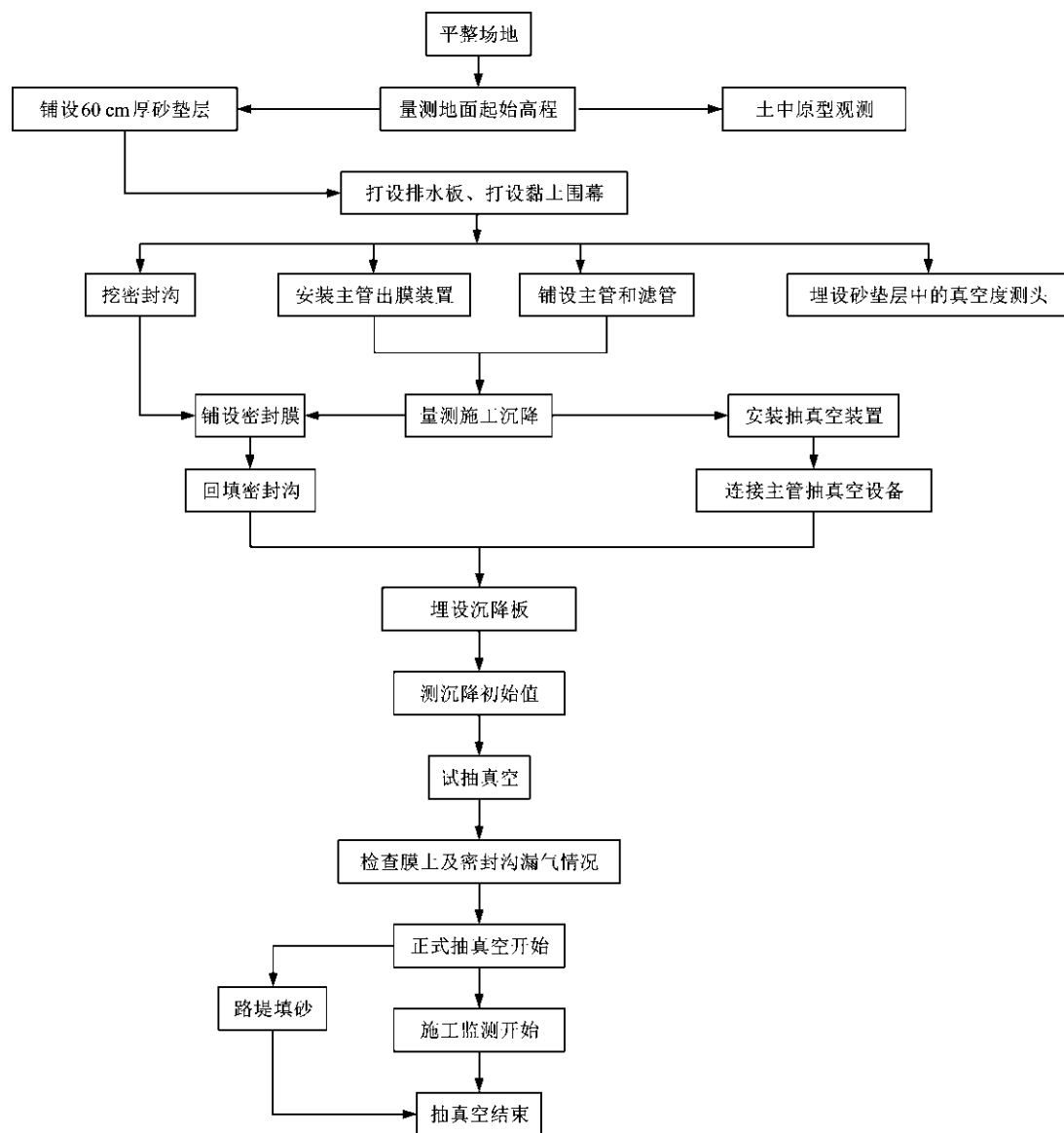


图 2-9 真空联合堆载预压施工工艺流程

(案例来源——知网论文)

单元二 其他特殊地基处理



学习目标

【知识目标】

- 1. 知道膨胀土的定义、分布区域、特点、危害。
- 2. 知道冻土的定义、分布区域、特点、危害。
- 3. 知道红黏土的定义、分布区域、特点、危害。
- 4. 知道湿陷性黄土地的定义、分布区域、特点、危害。

【能力目标】

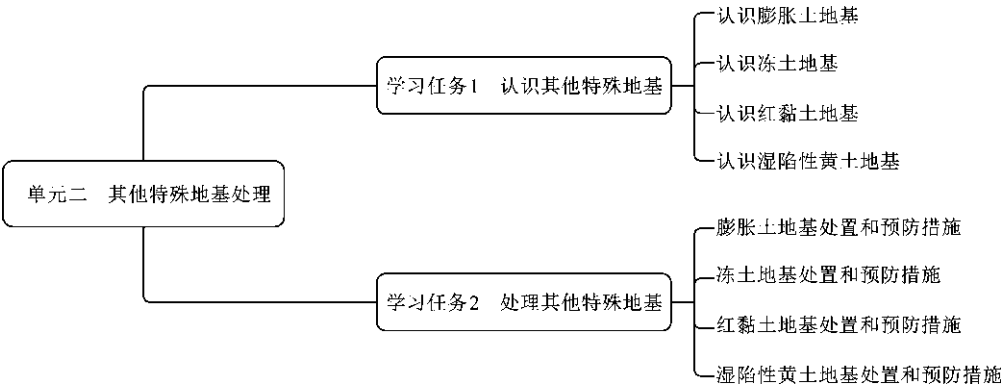
- 1. 能识别膨胀土并能提出膨胀土地基常用处置方法。
- 2. 能识别冻土并能提出冻土地基常用处置方法。
- 3. 能识别红黏土并能提出红黏土地基常用处置方法。
- 4. 能识别湿陷性黄土并能提出湿陷性黄土地基常用处置方法。

【素质目标】

- 1. 培养分析问题、解决问题的能力。
- 2. 培养实事求是、严谨细致的职业素养。
- 3. 培养刻苦钻研、团结协作的职业素养。



学习导图



学习任务1 认识其他特殊地基



学习情境

房屋建筑、公路、铁路、桥梁、隧道、民航建设等工程中常常会遇到不同的特殊土，特殊土形式多种多样。在这些特殊土层上进行地基施工作业会有一定安全隐患。我们只有了解它们，深入研究它们，摸透它们的“脾气秉性”，在设计和施工中采取一些有效的措施，才能在工程建设中规避很多不良的问题，保障工程建设顺利有序地进行，保障后期工程的质量。

案例一：某市为华东地区重要的交通枢纽，有地铁建设项目，然而在地铁建设过程中膨胀考虑土层以及地铁接近施工对周边结构安全性影响大等众多问题。该地区梅雨季节长，干湿交替频繁，对地层膨胀土力学性质影响显著。该市的膨胀土为弱膨胀土，具有膨胀结构、多裂隙性、强胀缩性、高塑性和强度衰减性等特点。根据地质勘察报告，该地铁处膨胀土分布广泛，且深度大，地铁站点结构设计比较复杂，在施工将形成深基坑群。地铁项目周边分布有重要建筑物，对基坑变形控制严格。施工过程中，开挖卸载及持续的干湿循环等作用下，容易导致主、附属构开裂和不均匀沉降，也会诱发基坑边坡坍塌失稳。如果弱膨胀土地基强度受水进入而降低显著，原状样黏聚力显著下降。

通过实地取样试验，了解该土样的主要黏土矿物成分为蒙脱石(46%)和伊利石(37%)，液限为57.2%、塑限为25.7%、自由膨胀率为55.6%，测得该市地铁基坑土干密度为 1.6 g/cm^3 。地铁车站结构临近土层土样呈棕黄色、色泽灰暗、夹带灰色黏土条带、呈硬塑—坚硬状态等典型特性；且有比较粗的硬块，有滑腻感，遇水后黏性较强，可塑性高。请问膨胀土有什么特点？该处地铁建设中膨胀土的出现对工程有什么影响？如何评定膨胀土的等级？



知识导航

特殊土主要有软土、膨胀土、冻土、红黏土、黄土、人工填土。前面详细介绍了软土，这部分重点介绍其他几种特殊土。特殊地基是指膨胀土、冻土、湿陷性黄土、红黏土地基，以及山区地基、地震区地基等。特殊地基由于其独特的地质特点，常需要特殊的处理方法，以确保结构(道路)的安全和持久性。下面简单介绍几种不同类型的特殊地基，主要是膨胀土地基、冻土地基、红黏土地基、湿陷性黄土地基(图2-10)。

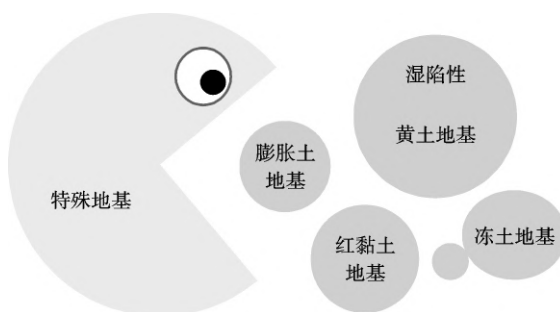


图 2-10 特殊地基

一、认识膨胀土地基

膨胀土是由富含强亲水性矿物质((蒙脱石)或伊利土)和高岭土组成的一种具有显著胀缩性的自由膨胀率大于或等于 40%高塑性黏土。膨胀土的主要黏粒成分为黏土,一般呈棕色、黄色、褐色及灰白色。膨胀土主要分布在我国广西、云南、四川、陕西、湖北、河南、河北、安徽、江苏等地。由膨胀土形成的地基称膨胀土地基,膨胀土地基有着膨胀土的显著特征。

膨胀土的介绍

膨胀土一般承载力较高,具有吸水膨胀、失水收缩、反复胀缩变形、浸水承载力衰减、干缩裂隙发育等特性,它是一种“脾气特别古怪”的土,是一种膨缩变化明显的土。膨胀土具有反复胀缩的特性,性质极不稳定,如图 2-11 所示。膨胀土在反复的干湿循环过程中,内部结构改变,膨胀土体产生大量裂缝。在雨水的作用下,水渗入裂缝,会降低土体的抗剪强度。膨胀土产生的隐蔽性的灾害对工程的破坏极大且不易修复:对路基的破坏作用大,很难修复;膨胀土路堤一般会出现沉陷、边坡溜塌、路肩坍塌、滑坡等破坏现象;膨胀土路堑易出现剥落、冲蚀、溜塌、滑坡等破坏现象;膨胀土地基沉降容易使建筑地基受影响,使房屋变形、沉降甚至开裂。解决膨胀土造成的工程问题是很重要的。

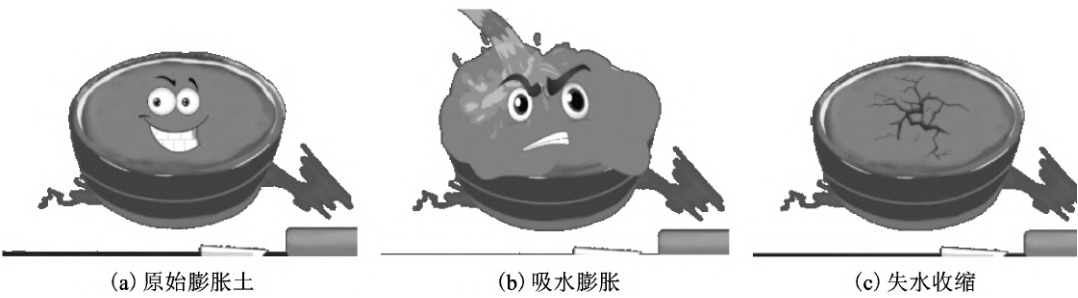


图 2-11 膨胀土吸水 and 失水示意图

膨胀土的失水收缩产生的裂隙对水文和气候特别敏感,由膨胀土裂隙引发的工程问题已成为工程界的焦点,主要不良工程性质有胀缩性、裂隙性、超固结性、渗透性等。

膨胀土根据自由膨胀率、标准吸湿含水率、液限、塑性指数、<0.003 mm 胶体颗粒含水量等指标,可以划分为弱膨胀土、中膨胀土、强膨胀土三种类型,如表 2-1 所示。

表 2-1 膨胀土的分类

技术指标	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土
自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	$40<\delta_{ef}<60$	$60\leq\delta_{ef}<90$	$\delta_{ef}\geq90$
标准吸湿含水率 $w_a/\%$	2.4~4.7	4.7~6.9	≥6.9
液限/ $\%$	40~52	52~72	≥72
塑性指数 I_p	$15\leq I_p<28$	$28\leq I_p<40$	$I_p\geq40$
<0.003 mm 胶体颗粒含水量/ $\%$	≤35	35~52	≥52

膨胀土地基应结合地基的膨胀、收缩变形量、对结构物的影响程度进行划分,可分为轻微、中等、严重破坏程度。

二、认识冻土地基

冻土是一种性质不稳定、温度敏感性强、温度低于 0°C 且含有冰的特殊性岩土。冻土根据冻结持续时间不同,一般可分为短时冻土、季节冻土、多年冻土三大类。短时冻土的冻结持续时间很短,小于 30 d,一般为几天或几个小时,冻结深度从几毫米至几十毫米;季节冻土的冻结持续时间略长,大于等于 30 d,冻结深度从几十毫米至 2 m,呈现冬季冻结—夏季融化、每年周期性交替的趋势;多年冻土的冻结持续时间很长,大于等于两年。

我国冻土主要可分为多年冻土和季节冻土。我国多年冻土可分为高纬度的多年冻土和高海拔的多年冻土。东北地区多分布高纬度的多年冻土;在西部高山高原及东部一些较高山地,如大兴安岭南端,则多分布高海拔的多年冻土。

我国多年冻土面积约为 $206.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占我国国土面积的 22%,占世界多年冻土面积的 10%,我国是世界上第三大冻土大国。我国领土面积的 54% 分布季节冻土,其主要分布在长沙、安庆、杭州、四川盆地北边、昆明、贵阳附近区域,大致可以划分为东北冻土区、西北冻土区、西南冻土区。季节冻土冻结深度在北方寒冷地区比如黑龙江南部、内蒙古东北部、吉林西北部,大于等于 3 m,并且冻结深度随纬度的降低逐渐减小。

依照公路桥涵地基与基础设计规范 (JTG 3363—2019) 按冻胀性不同,根据冻胀系数 K_d 地基土分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀、特强冻胀、极强冻胀几类。融沉性是评价多年冻土工程性质的关键指标,多年冻土依据平均融沉系数。含水率分为不融沉、弱融沉、融沉、强融沉、融陷等五类。融沉的等级由轻到重分为五级: I、II、III、IV、V。某冻土区域见图 2-12。冻土类型分为少冰冻土、多冰冻土、富冰冻土、饱冰冻土。



图 2-12 某冻土区域

在冻结状态下,冻土地基具有较低的压缩性或不具有压缩性,以及较高的强度等工程特性。冻土地基对温度特别敏感,在全球变暖影响之下,多年冻土地基也出现了显著的变化,改变了冻土的结构、冻土的强度与性质,会产生冻胀和融沉。冻胀是指气温低于 0°C 时,地基土中水会冻结形成冰体,体积变大,导致土体膨胀、地表拱起的现象。冻胀的原因主要是水结冰体积膨胀;水从未冻结区向冻结区转移。融沉是指气候变暖后,冻土地基承载力降低,压缩性变化较大,使地基土产生融陷。冻土会发生融化,体积会变小,改变内部结构与体积,在荷载的作用下地基大幅度沉降,土体会变成稀泥土,挤压并排出土体空隙中的水,加速土体密实。含冰量高的冻土地基,融沉现象更为明显。

地基冻融是地质灾害的一种,大量的铁路、公路线路位于冻土地区,地基冻融会给工程建设和人民生活带来很大的危害。多年冻土地区,融沉和冻融问题严重,地基冻融对工程结构的影响显著。因为地基在冻融过程中,土层冻结使体积膨胀,融化使土层变软产生沉陷,会导致建筑物基础破坏,墙体开裂,产生斜裂缝、水平裂缝或垂直裂缝;还会使道路路基变形,威胁道路行车安全,影响通行等。地基冻融还会导致主体构造产生倾斜或倾倒,因为春

季解冻后地基发生不均匀沉陷,导致建筑物倾斜。在斜坡地区,还会产生冻融、滑塌、冻融泥流,这种现象在西南、西北高海拔地区常见,会给工程建设造成很大影响。

三、认识红黏土地基

红黏土是在特殊的地质条件下形成的土,是碳酸盐类岩石(如石灰岩)在一定的气候条件影响下,在剧烈的风化作用影响下,形成的颜色呈棕红色、褐红色、黄褐色的,液限大于 50 的高塑性黏土,区域性特别强。红黏土中黏土矿物成分主要是高岭石,也包含比较丰富的石英颗粒。根据红黏土形成的原因和特征,其可分为原生红黏土、次生红黏土。原生红黏土是指液限大于等于 50% 的红黏土。次生红黏土是指原生红黏土经搬运、沉积仍保留其基本特征且液限大于 45% 的红黏土。按物理和力学性质不同,其可分为一类红黏土和二类红黏土。石灰岩经过岩石风化并经过复杂的红土化作用形成的棕红色、褐黄色等颜色的高塑性黏土,称为石灰岩类红黏土,如图 2-13 所示。



图 2-13 红黏土

红黏土广泛分布于我国云南、贵州、四川东部、湖南和湖北的北部、广东和广西的北部。

红黏土工程特性十分特殊,在结构特征、变形特性、物理性质、力学性质、剪切特性等方面与一般黏性土不同。比如,红黏土的工程物理性质与其他土的性质不同,主要受到含水状态、工程扰动、气候、地质条件等各个方面的影响。

红黏土具有“三高一低”不良物理特性,即高含水率、高孔隙比、高塑性和低密度;红黏土具有“一高二低”不良力学特性,即高力学强度、低压缩性、低膨胀性。红黏土是一种区域性特殊土,天然条件下的红黏土含水率一般较高,红黏土液限大于 50%、孔隙比大于 1.0,结构疏松,失水收缩性强。高液限红黏土的透水性能较差,吸水后承载力小,稳定性差,毛细现象比较明显,黏土粒含量高,随着埋藏深度的增大,红黏土从上到下含水率逐渐增大,呈上硬下软状态,土质情况由硬变软。

红黏土具有明显的胀缩性、裂隙性、分布不均匀等工程地质特性,因而存在很大的工程隐患。将红黏土地基作为建筑地基和铁路或公路的持力层时,因为红黏土失水干裂、遇水强度骤降的特性,结构上常呈现上硬下软和厚度变化大的特性,导致在荷载过大时,红黏土地基会产生过大的差异沉降、工后沉降,不均匀沉降过大时容易出现上部建筑物开裂、结构基础破坏、开挖的基坑破坏、地基塌陷破坏。比如胀缩性,红黏土胀缩性极强,胀量小,缩量小,发生收缩时易导致房屋开裂,影响房屋使用寿命。红黏土滑坡容易引起边坡失稳、边坡坍塌等问题。在不良的气候条件和地下水的影响下,还可能会出现泥石流、红黏土溜塌、红黏土剥落、支挡结构破坏等病害。

四、认识湿陷性黄土地基

湿陷性黄土是一种浸水后产生附加沉降且湿陷系数大于等于 0.15 的黄土。湿陷性黄土浸水饱和后结构迅速破坏,强度迅速降低,产生较大的湿陷性沉降。湿陷性黄土分布广泛,

主要分布在我国西北黄土高原地区，如山西省、甘肃省、陕西省、河南西部等。湿陷性黄土地基是指在含水饱和状态下遭受荷载作用时，由于黄土中含有较多的黏土和黏粒，黄土发生明显的沉降和变形现象的地基（图 2-14）。湿陷性黄土显著的湿陷性沉降与变形会导致地基基础沉降或产生不均匀变形，进而引发上部建筑物（结构物）开裂、倾斜和下沉等病害。



图 2-14 湿陷性黄土地基

湿陷性黄土主要有以下特点：具有吸水膨胀和干燥收缩的特点，易导致湿陷性黄土地基容易产生荷载诱发的沉降和变形；具有较高的含水量，在外界含水量突然增加时，地基易软化，丧失地基承载力，可能引发地基塌陷；具有较高的抗剪强度、较强的可塑性，其黏性较大，易产生黏聚力，在受到外部荷载作用时容易发生剪切断裂和塑性变形；具有湿陷性，容易形成地基不均匀沉降，导致结构产生裂缝和坑洼，影响结构的安全和使用。

黄土的湿陷性应根据湿陷系数 δ_s 来确定。黄土地区桥涵地基的湿陷类型根据自重湿陷量 Δ_{zs} 来确定。当自重湿陷量 $\Delta_{zs} \leq 70$ mm 时，判定为非自重湿陷性黄土地基；当 $\Delta_{zs} > 70$ mm 时，判定为自重湿陷性黄土地基。由自重湿陷量 Δ_{zs} 和基底以下地基湿陷量确定湿陷性黄土地基的湿陷等级，具体分类参考表 2-2。

表 2-2 湿陷性黄土地基的湿陷等级

湿陷性类型		非自重湿陷性地基	自重湿陷性地基	
自重湿陷量 Δ_{zs} /mm		$\Delta_{zs} \leq 70$	$70 < \Delta_{zs} \leq 350$	$\Delta_{zs} > 350$
基底以下地基的湿陷量 Δ_s	$\Delta_s \leq 300$ mm	I (轻微)	II (中等)	—
	$300 \text{ mm} < \Delta_s \leq 700$ mm	II (中等)	II (中等) 或 III* (严重)	III (严重)
	$\Delta_s > 700$ mm	II (中等)	III (严重)	IV (很严重)

注：III* 对应于湿陷量的计算值 $\Delta_s \geq 600$ mm 且自重湿陷量的计算值 $\Delta_{zs} \geq 300$ mm 的情况，其他情况可判定为 II (中等)。

学习任务 2 处理其他特殊地基

学习情境

案例一：某地区铁路全长 1800 多公里。部分地段处于北亚热带季风型大陆性气候，形成了大量膨胀土。膨胀土地区普遍存在严重的边坡变形与基床变形，容易导致边坡溜塌、滑坡、线路不均匀下沉等变形病害现象。通过改良膨胀土地基，可以提高路线的稳定性，降低工程维护成本，确保工程的可持续运行，从而支持整个区域的基础设施和经济发展。该地区处于山间丘陵盆地，膨胀土厚度大于 10 m，该区域主要分布的是中等膨胀土，长度约 23.05 km，占比 72.60%；弱膨胀土长度约 8.70 km，占比 27.40%。由于膨胀土的工程特性，

为防止地基下沉对路线平顺性及运营安全的影响,需对膨胀土地基进行改性加固。该地区适合有什么方法进行改良呢?大家一起探讨下吧?膨胀土有什么危害和评定其等级呢?

案例二:某高速公路位于北方地区,公路沿线均为黄土层,为马兰黄土、黄土状土,以“戴帽黄土”的形式分布于黄土台地及局部山体上部,大多为灰黄色原生黄土。黄土的厚度大,胶结压实作用较弱,有垂直节理,黄土地基以中等-强湿陷性为主,湿陷层的深度为5~10 m。该区域属于自重湿陷性地基。采用灰土挤密桩对地基进行处理,如图2-15所示。湿陷等级为Ⅱ(中等)。假如区域基底以下地基的湿陷量计算值 Δ_s 为400 mm,自重湿陷量 Δ_{zs} 为200 mm。请思考:如何确定湿陷程度等级?为什么要采用灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基?

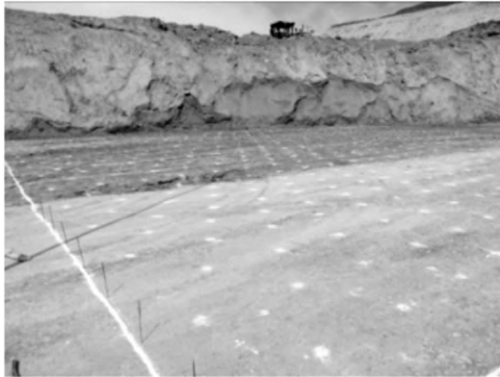


图 2-15 施工后的灰土挤密桩地基



知识导航

一、膨胀土地基处置和预防措施

膨胀土与一般的黏性土有着显著的不同,在设计和施工中必须采取有效的措施,防止膨胀土地基变形给地基上的构造物(建筑物)带来灾害,破坏工程结构。膨胀土地基处置方法主要有置换法、垫层法、强夯法、改良法、砂石挤密桩法、桩基础加固法(图2-16)。



膨胀土地基处理



图 2-16 膨胀土地基处置方法

(1)置换法。其基本原理是挖除地基土后置换为非膨胀性黏土、砂砾土、碎石土、灰土等,直接从源头改善和消除膨胀土的不利影响。该法施工简单易操作,适用于小面积区域,面积较大区域不具备经济性。根据当地的气候特点,由膨胀土的工程性质来确定膨胀土地基置换深度。

(2) 垫层法。一是在工程设计时加设垫层, 预留一定的变形膨胀空间。其基本原理是挖除部分膨胀土, 然后铺设一定厚度的砂、石、碎石垫层消除地基的胀缩性, 因为造成膨胀土裂隙最主要的外界因素是大气干湿循环和地下水。该法可以减缓沉降, 将变形量降至最低, 避免建筑结构因不均匀沉降而变形。二是可以适当设计较高的基础埋深, 将基础埋深加大至大气影响深度范围以外, 减小外界因素的影响。

(3) 强夯法。其基本原理是通过反复把夯锤提高至一定高度落下, 用机械方法产生冲击动能和冲击波来夯实地基土, 提升地基土的强度, 防止地面水渗入。同时它能保持地基土中含水量的稳定, 使土体不容易产生显著胀缩变形。

(4) 改良法。其原理是利用无机改良材料改良土体, 从本质上改变土体结构和成分, 提升性能。改良法既可以改良土体性质, 又可以充分利用土体资源, 应用广泛, 造价较低。膨胀土常用的改良材料主要有水泥、石灰、粉煤灰。水泥价格便宜, 而且把水泥掺入膨胀土后会发生水化反应, 水化反应后生成强度较高的水化产物, 水化产物逐渐硬化形成复合的骨架。石灰能够降低土体胀缩性并提高其强度。通过掺入石灰材料, 能较好地降低土体中的含水量, 提升整个土体的水稳性, 提高地基土的强度。水泥相比石灰更适用于膨胀土的改良, 但是后期对环境影响比较大。膨胀土地基施工要点主要包括场地平整、基底处理、布灰拌和、分层填筑、摊铺整平、机械碾压。现场施工前一般会根据室内试验数据和模拟现场施工试验段获得有效的施工方法和工艺参数, 为现场施工提供一定的技术指导。

(5) 砂石挤密桩法。其原理是采用砂石等松散材料, 利用振动沉管机械的下沉入土, 将砂或石材料振动压入土体之中, 通过挤密、排水、直接提供承载等方式, 形成具有一定深度和较大直径的密实砂(石)桩与天然地基形成的人工地基, 提高地基的承载力, 减少沉降量。也可以用水泥粉煤灰碎石桩法(CFG桩), 其基本原理是将混合材料水泥、粉煤灰、碎石掺入膨胀土地基中, 使无机结合材料产生凝胶作用后抵消膨胀土产生的膨胀力, 从而降低裂隙的发生概率, 使膨胀土地基更加稳定。

(6) 桩基础加固法。桩基础加固膨胀土地基主要是将桩基础的持力层打入稳定的土体中, 而桩自身承载力会在一定程度上限制膨胀土的胀缩变形, 进而减少膨胀土对上部结构的影响。结合工程条件设计基础, 选用适宜的基础类型, 并利用上部结构物(建筑物)竖向荷载作用, 使基底压力远大于膨胀土的膨胀力, 削弱膨胀土的影响。

二、冻土地基处置和预防措施

在冻土区域修建结构物时, 不但要了解冻土作为结构物地基时冻土地基的强度随温度和时间变化的情况, 还要考虑结构物的强度与变形情况。采用合适的防冻胀和防融沉措施是工程建设成功的关键。通常冻土地基的处置方法主要有地源热泵法、热棒技术、复合型基础、碎(片、块)石路基、换填法、隔热材料法、保温护道法等, 它们可以减轻冻胀融沉的程度, 解决冻土地基或路基的问题。

(1) 地源热泵法。设计专用地源热泵系统, 满足冻胀需求。比如, 内蒙古中部及山西北部准池铁路某路段冻胀严重, 表层填筑 0.5 m 厚非冻胀性填料, 下部填筑 0.1 m 厚中粗砂垫层。路基顶面上部为 0.4 m 厚的道砟, 试验路段布置多套热泵, 纵向间距设计为 2.5 m, 使用后, 冻结深度满足要求, 轨道变形量控制在规范要求以内, 换热温度完全满足设计要求, 冻结期相比天然路基减少 45 d, 冻胀病害基本解决。

(2)热棒技术。热棒是一种气液两相闭式热虹吸管。热棒上部为冷凝段,中间是绝热材料,下部为蒸发段。热棒技术主要是利用热虹吸原理驱动热棒中工作介质进行循环,吸收地基中热量将其排放到大气中,冷却地基。热棒具有优良的导热性能,其作为“冷却路基”的首选,被广泛应用于公路、铁路、输电塔基、输油管道等工程结构中,特别是在路基工程中,可以起到维护多年冻土热稳定性的作用。青藏公路、青藏铁路冻土路基处理中,该技术的应用显著地降低了路基温度,实现了路基稳定的目的。

(3)复合型基础。多年冻土区域为防治冻土工程灾害采取复合型基础(CFG桩、碎石桩)处理冻土地基。在暖期,地基土的承载力下降,主要由碎石桩承担上部荷载——碎石桩刚度较大,压缩性低,能提升地基土的承受荷载能力;在寒期,碎石桩比地基土体渗透性要好,能够阻止地基产生冻胀现象。

(4)碎(片、块)石路基。碎石、片石、块石层起到隔热、传冷作用,使得块石路基内年平均温度下降,促使冻土上限上升。利用碎(片、块)石路基大孔隙的特点,可以使空气在空隙中较自由地流通。在暖期,上部质量较轻的热空气往下传递会受到制约;在寒期,有利于对流,将路基内部的热量排出。碎(片、块)石路基施工需要大量的碎石材料,需要因地制宜合理采用。碎(片、块)石排水性能较差,在雨水丰富区域应结合其他措施综合选用。

(5)换填法。换填法是一种常用的冻土地基处理方法。在土层比较浅的多年冻土地区,利用砾石、碎石等填充稳定、透水性好的材料去置换出冻结深度范围内透水性较差的冻胀土,减少下部毛细水的向上迁移,缓解冻胀问题。换填法能有效地提升地基的稳定性和地基承载力。该法适用于容易获取置换材料砾石、碎石且换填冻土层的深度不大的情况,通常来说,随着换填深度的增加,地基温度场温度会越高。

(6)隔热材料法。常用隔热材料聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)板、挤塑聚苯乙烯板处理冻土地基。隔热材料法是在路基内铺设高热阻的保温材料形成保温层,形成一层保温结构,阻止地表热量向下传导,阻止上层地基土热能传入下层地基土里。隔热材料具有吸水性弱、导热性低、环保性好、隔水效果好等特点,阻断冻胀阶段地下水的作用,能有效阻止保温板下水分的迁移。不同隔热层材料、不同隔热层厚度对冻土地区产生的温度和深度影响不一样。不同隔热层材料与不同隔热层厚度对冻土地基融化深度的作用如下:当隔热层厚度相同时,聚苯乙烯泡沫塑料板地基融化深度大于挤塑聚苯乙烯板材料跑道地基融化深度;当隔热层材料相同时,冻土地基融化深度越浅,隔热层厚度越厚,地基融化深度增大的速率越缓。工程实践中,换填法和隔热材料法有时候可以组合互补,共同提升冻土地基处置效果。

(7)保温护道法。该法是指在护道两侧设置保温材料的一种方法,能增大路基坡脚处地表热阻,阻止路基侧向地表水渗入基底,提高路基稳定性,但保温护道的表面对冻土的影响大于天然地面,会加速冻土融化,且融化深度逐渐加大,平均地温也会逐渐升高,所以保温护道处理方式不能作为冻土地基处理的主要方法。

例如,某公路平均海拔在4000 m以上,公路周围广泛分布低温多年冻土,在试验段路基结构设置有碎(片、块)石路基、热棒技术路基、普通路基、通风管法路基,区域地质主要为黏土夹泥灰岩,土质疏松,孔隙较大,局部覆盖砂砾石层。通过在路基设置监测设备,从冻土的上限、温度稳定值、含水率、沉降等方面对比不同位置实测数据及进行数理分析可得,该处多年冻土区路基结构适用性由强到弱分别为热棒技术路基、通风管法路基、碎(片、块)石路基、普通路基,它们都具有保护高山多年冻土稳定性的作用。

综上,每种方法都有一定的适用性,根据区域的特点,结合处置方法的优势,秉承技术可行、经济合理的原则综合选择合适的方法处理冻土地基或路基,或者采用多种方法组合形式,能起到不错的效果。

三、红黏土地基处置和预防措施

红黏土地基处置方法多种多样,常采用换填垫层法、改良法、深层搅拌法、碎石桩法(复合地基法)、强夯法等方法进行地基处理。处理红黏土地基的原理是通过提高土体密实度减小地基土中的孔隙率,减少地基土中水分渗入。设计中也可以掺砂增加压实厚度,设计排水结构进行处理等。

(1)换填垫层法。换填垫层法指使用稳定性材料代替原有地基土层,在实施过程中主要使用压实性能好的合成材料(例如碎石、砾石)更换缓冲层来处理地基,保证地基的整体稳定性。换填碎、砾石类似于在地基内设置复合碎石排水层。排水层通常为压实后的碎石层或粗砂层,它能调节地基温湿度变化范围,从而保持地基土的稳定性。换填垫层法特别适合地基土压实面积不大的工程,然而对于一些大面积、厚度较大的填筑工程,该法经济成本较高,工期长,不能有效地应用。

(2)改良法。改良法是指采用水泥或石灰改良红黏土地基。水泥改良红黏土地基的原理主要是水泥和地基土中的水发生水化反应,生成氢氧化钙及其他水化产物。水化产物凝结硬化后和土颗粒相互胶结形成水泥骨架,从而能提升结构强度,使水稳性增强,明显改善红黏土地基性质。

(3)高压旋喷法。利用钻机将带有喷嘴的注浆管钻进土层预定位置,通过高压设备将浆液或水(空气)的高压射流,冲切、扰动土体,将浆液与土体拌合形成圆柱状或葫芦形结合体。某隧道地基基础加固采用水泥旋喷桩,如图 2-17 所示。隧道明洞段基础置于红黏土中,暗洞衬砌下穿红黏土。隧道地基采用水泥旋喷桩进行加固处理,避免地基基础底部产生冒顶、塌方、掉块等现象。施工中相关参数为:旋喷桩直径设计为 60 mm,梅花形布置,间距设计为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,桩底深入基岩大于等于 0.5 m。

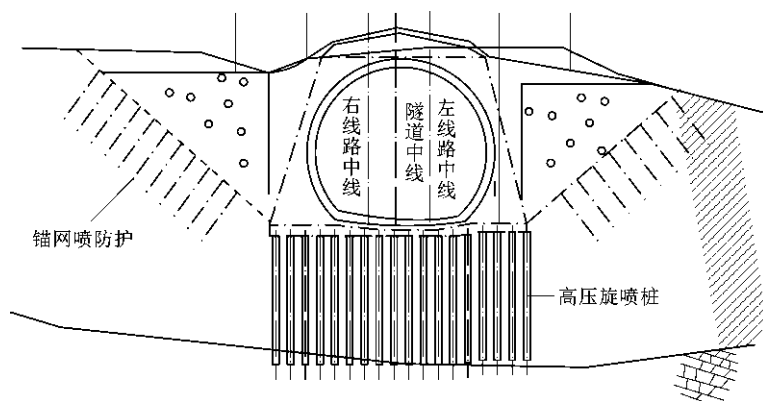


图 2-17 高压旋喷桩加固隧道地基

(4)碎石桩法(复合地基法)。碎石桩法主要利用挤入或灌入碎石桩在地层中形成竖向桩体。碎石桩主要起排水作用,一定程度上能提升地基土的强度,起到加固红黏土地基的作

用。因为碎石桩具有良好的透水性，能够促进红黏土地基的固结沉降，因此这种方法不但能满足地基承载力和沉降要求，还能提升红黏土地基的抗震性。该方法工期短、工程费用较低，因此在大面积的地基处理中应用广泛。另外也可以采用碎石桩和 CFG 桩组合型桩处理红黏土地基。组合布桩方式为 CFG 桩与碎石桩交错布置，布桩形式为正方形，如图 2-18 所示。常采用振动沉管进行碎石桩施工，桩径一般为 500 mm，按勘察钻孔处红黏土厚度，计算桩长至好的持力层。组合型复合地基施工顺序：测量放样→场地准备→机械就位→振动沉管→碎石桩施工(挤密)→桩位放线(CFG)→长螺旋钻孔灌注成桩→处理桩顶面松散土层→垫层铺设。

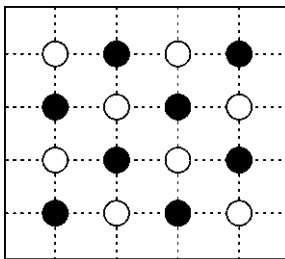


图 2-18 碎石桩和 CFG 桩交替布置(白色的为碎石桩，黑色的为 CFG 桩)

(5)强夯法。强夯法主要是利用一定质量的重锤，从高处自由松锤落下，对土体进行动态锤击，使土体在重力作用下被压密而降低其压缩性。强夯法是一种应用广泛的地基处理方法，可有效提高地基承载力，减小土层孔隙比，改善土层均匀性，有效减少工后沉降。随着高能级强夯工艺的推广应用，通过合理的强夯参数设置，可大幅提高地基承载力和压缩模量，取得更好的加固效果，且工期更短。采用强夯法处理红黏土地基时，施工人员应按照项目的实际情况，有效选择强夯机械设备，控制好夯锤与夯点之间的距离、夯击的次数，并及时检测强夯后地基压实度。对于红黏土地基，强夯处理技术成本低、流程简单、施工效率高，在地基压实处理上有着不可忽视的应用价值。

工程中当强夯法或单一桩型地基处理方法不再满足要求时，可采用多桩型复合地基，比如振动沉管碎石桩与 CFG 桩、不排水桩与排水桩、柔性桩与刚性桩相互组合，优势互补，充分发挥各桩型的优点，避免单一桩型的缺点。大量工程实践表明，采用强夯法处理山区非均匀回填地基，是一种有效、经济实用的方法，但是这种方法不适合厚度较大的红黏土地基。饱和度高的红黏土地基在施工中需要在基坑中添加一定量的粗颗粒夯实，保证红黏土地基整体稳定性。

四、湿陷性黄土地基处置和预防措施

湿陷性黄土地基的处理方法很多，需要结合地理因素、水文条件、气候条件、施工因素有针对性选择合适的方法。位于湿陷性黄土地区的桥涵基础，需要结合结构物分类、水流特征、湿陷性黄土的等级，因地制宜地采取合适的设计措施和处理方法。可参考表 2-3 中地基处理的措施，也可根据施工经验采用其他可靠措施。结构物可根据其重要性、结构特点、受水浸湿后的危害程度和修复难易程度进行分类，如表 2-4 所示。

表 2-3 湿陷性黄土地区地基处理措施

类型及措施		水流特征及湿陷等级							
		经常性流水(或浸湿可能性较大)				季节性流水(或浸湿可能性较小)			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
A	措施	①				①			
B	措施	②③	②③	①②	①	③		②③	②
	处理深度/m	2.0~3.0	3.0~5.0	4.0~6.0	6.0	0.8~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	5.0
C	措施	③			②	③			
	处理深度/m	0.8~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	3.0	0.5~0.8	0.8~1.2	1.2~2.0	2.0
D	措施	④				④			

注：①②③④为措施编号，各编号的处理措施如下：①墩台基础采用明挖、沉井或桩基，置于非湿陷性土层中；②采用强夯法或挤密桩法，并采取防水和结构措施；③采用重锤夯实，并采取防水和结构措施；④地基表层夯实。

表 2-4 湿陷性黄土地区结构物分类

类别	结构物
A 类	20 m 及以上高墩台和外超静定桥梁
B 类	一般桥梁基础,拱涵
C 类	一般涵洞及倒虹吸
D 类	桥涵附属工程

湿陷性黄土地基处置方法主要有换填法、强夯法、深层搅拌法、挤密法、复合型地基法等。它们可以有效地改善不良的地质条件，为工程的顺利建设提供支撑。湿陷性黄土的区域性、局部性较强，因此需要结合不同情况并采用合适的湿陷性地基处理方法和施工工艺。工程建设中必须充分考虑湿陷性黄土的特殊性，保证工程建设稳定、安全可靠。

(1)换填法。其基本原理是将受水浸泡的或受湿变形的湿陷性黄土置换为无湿陷性的素土或其他质地好、性能稳定、强度高的填料分层换填，同时分层碾压处理。该方法适合处理厚度较小(3 m 以内)的湿陷性黄土地基。换填法的优点是提高了路基稳定性，能降低土体中含水量，减小地基的湿陷变形，减小地基沉降，对周围建筑物影响很小。采用该法处理湿陷性黄土地基时应合理确定置换率和垫层厚度。换填法可以为新老路基提供一个良好的结合面，使其具有较高的整体强度和变形模量，有效提高地基承载力。换填材料可以选用砂石(碎石、卵石、粗砂、中砂)、粉土(不含有砖、石块等杂质)、灰土(粉质黏土与新鲜的氢氧化钙，颗粒粒径不得大于 5 mm)、粉煤灰、矿渣等。

(2)强夯法。其基本原理是通过起重机械将夯锤提升至一定高度，然后松开，让夯锤自由落下(提升高度一般为 10~40 m)，反复提锤、落锤，在强烈的冲击作用下，加固湿陷性黄土地基，起到降低黄土的湿陷性，提高地基土承载力及稳定性的作用。强夯法相当于竖向加密处理地基土。采用强夯法处理湿陷性黄土地基效果明显，施工操作简单，可见这是一种良好的地基处理方法。湿陷性黄土地基的处理方法较多，其中强夯法优势明显。其工艺流程如

下：施工准备→场地平整→确定夯击遍数及夯点布置→强夯孔隙水压力监测试验→强夯施工作业。强夯法适用于处理深度为3~5 m的湿陷性黄土地基，确定落距与击数是强夯施工作业质量控制的关键。

(3) 深层搅拌法。其基本原理是通过深层搅拌机械将黄土与搅拌剂(如水泥、石灰、粉煤灰或其他化学添加剂)混合，形成均匀的土壤-搅拌剂混合体。混凝土搅拌桩是最常用的深层搅拌法。将混凝土注入土体中，通过不断地搅拌和固化，土体形成具有一定强度和刚度的混凝土桩，以提高路基的承载能力。

(4) 挤密法。其作用机制是采用重锤(重1.5~2.5 t)将回填材料(素土、灰土)在孔内分层夯实至设计标高，使填料横向挤压周围土体，在形成桩体的过程中达到挤密桩周土的目的。深层强夯法(DDC工法)是挤密法的一种。挤密法相当于横向加密处理地基土，和强夯法原理不一样。该方法不但可以消除(5~10) m深度内黄土地基湿陷性，还可以大大提高地基承载力。也可采用深层超强夯法(SDDC工法)处理湿陷性黄土地基。挤密法工艺流程主要包括测量放样与桩位布设、成孔、夯实成桩。

(5) 复合型地基法。当湿陷性黄土的湿陷等级较低，地基的承载力不足时，在实践中可以采用复合型地基。考虑采用桩基础，要根据工程实际情况来选择合理的桩体形式，确保桩体在湿陷性黄土地基中能够分担地基的荷载。

工程实践中也可用土钉墙法和土工合成材料加固法。土钉墙法的基本原理是在斜坡或切土中，按要求打入一定的竖向的土钉(预应力锚杆)形成土钉墙，防止黄土滑动和塌陷，有效地提高湿陷性黄土地基的整体稳定性。土工合成材料加固法主要是在土体中加入土工合成材料，借助土工合成材料提高拉伸强度和抗剪强度，提高湿陷性黄土地基的强度和稳定性。

单元知识巩固和拓展



一、知识要点汇总

1. 膨胀土地基、冻土地基、红黏土地基、湿陷性黄土地基的特点和处置与预防措施汇总如表2-5所示。

表 2-5 不同类型地基汇总

地基类型	特点	处置和预防措施
膨胀土地基	承载力较高，具有吸水膨胀、失水收缩、反复胀缩变形、浸水承载力衰减、干缩裂隙发育的特性	置换法、垫层法、强夯法、改良法、砂石挤密桩法、桩基础加固法
冻土地基	对温度十分敏感且性质不稳定，在冻结状态下，冻土地基具有较低的压缩性或不具有压缩性以及较高的强度；在较高温度下，冻土地基承载力降低，压缩性变化较大，使地基产生融陷冻胀	地源热泵法、热棒技术、复合型基础、碎(片、块)石路基、换填法、隔热材料法、保温护道法

续表2-5

地基类型	特点	处置和预防措施
红黏土地基	高含水率、高孔隙比、高塑性、低密度、高力学强度、低压缩性、低膨胀性,结构疏松,失水收缩性强,透水性能较差,黏土粒含量高,从上到下含水率逐渐增大,上硬下软,土质由硬变软	换填垫层法、改良法、高压旋喷法、碎石桩法(复合地基法)、强夯法
湿陷性黄土地基	吸水膨胀和干燥收缩,具有较高的含水量,路基易软化,具有较弱的抗剪强度、较强的可塑性、湿陷性	换填法、强夯法、深层搅拌法、挤密法、复合型地基法

2. 膨胀土是由富含强亲水性矿物质((蒙脱石)或伊利土)和高岭土组成的一种具有显著胀缩性的自由膨胀率大于或等于40%高塑性黏土。

3. 由于冻土对温度敏感的特殊性,在冻土地基上修筑建筑物必将面临冻胀破坏和融沉破坏两大危险。

4. 红黏土是指碳酸盐类岩石(如石灰岩)在一定的气候条件影响下,在剧烈的风化作用影响下,形成的颜色呈棕红色、褐红色、黄褐色的,液限大于50的高塑性黏土。

5. 湿陷性黄土是一种浸水后产生附加沉降且湿陷系数大于等于0.15的黄土。



二、习题练习

(一) 单选题

1. 某多年冻土地区(富冰冻土)有一层粉质黏土,总含水率 $w_0=26.8\%$,塑限含水率 $w_p=18.2\%$,判断融沉类别,属于下列选项中的()。

- A. 不融沉 B. 弱融沉 C. 融沉 D. 强融沉

2. 黏性土的液性指数为0.2,判定土的状态为()。

- A. 坚硬 B. 硬塑 C. 可塑 D. 软塑

3. 冻土地区路堤填料应具备的要求是()。

- A. 应用保温隔温性能较好的土 B. 应用保温隔温性能较好的石灰土
C. 应用保温隔温性能较好的碎石土 D. 应用保温隔温性能较好的黄土

4. 下列各项属于非湿陷性土的是()。

- A. 湿陷系数 $\delta_s=0.03$ B. 湿陷系数 $\delta_s=0.025$
C. 湿陷系数 $\delta_s=0.02$ D. 湿陷系数 $\delta_s=0.01$

5. ()是一种在天然含水率下强度较高、压缩性较弱、有较强结构性的非饱和土。

- A. 湿陷性黄土 B. 软土 C. 膨胀土 D. 冻土

6. ()是在特殊的地质条件下形成的特殊土,碳酸盐类岩石在一定的气候条件影响下,在剧烈的风化作用影响下,形成的颜色呈棕红色、褐红色、黄褐色的一种高塑性黏土。

- A. 湿陷性黄土 B. 软土 C. 膨胀土 D. 红黏土

7. 冻土地基对温度特别敏感,在全球大环境变暖影响之下,多年冻土地基也出现了显著的变化,改变了冻土的结构、冻土的强度与性质,会产生()。

- A. 冻胀和融沉 B. 沉陷和滑坡 C. 冻胀和冲蚀 D. 塌陷和融沉

8. (2020年注册岩土工程师试题)某公路工程对湿陷性黄土地基采用强夯法处理。拟采



习题练习答案

用圆底夯锤,质量 10 t,落距 10 m。已知梅纳公式的修正系数为 0.5,估算此强夯处理有效加固深度最接近下列哪个选项?()

- A. 3 m B. 4 m C. 5 m D. 6 m

9. (2020 年注册岩土工程师试题)下列关于膨胀土性质的表述,错误的是哪个选项?()

- A. 蒙脱石含量越高,膨胀性越强
B. 硅铝分子比 $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 越大,膨胀性越强
C. 黏粒含量越高,胀缩变形越大
D. 密度越大,失水收缩越强

(二)多选题

1. 红黏土地基处置方法多种多样,常采用以下哪些方法?()

- A. 换填垫层法 B. 水泥(石灰)改良法
C. 高压旋喷法 D. 碎石桩法(复合地基)
E. 强夯法

2. 湿陷性黄土地基处理方法主要有()。

- A. 换填法 B. 强夯法 C. 深层搅拌法 D. 挤密法
E. 复合型地基法

3. 膨胀土地基处理方法主要有()。

- A. 置换法 B. 垫层法 C. 强夯法 D. 砂石挤密桩
E. 保温护道法

4. 冻土是一种性质不稳定、温度敏感性强、温度低于 0℃ 且含有冰的特殊性岩土。冻土根据冻结延续时间不同,一般可分为()。

- A. 短时冻土 B. 季节冻土 C. 多年冻土 D. 长时冻土



三、知识点拓展

案例拓展一：碎石桩处理红黏土地基

云南省某高速公路采用双向八车道高速公路技术标准建设,设计速度为 100 km/h,整体式路基设计宽度为 41 m。工程项目地处滇中高原,地势由西北向东南倾斜,山川多沿北南方向展布。沿线最低处位于嵩明盆地,海拔为 1900~2200 m,沿线地势起伏稍大。该项目处于亚热带和暖温带气候区,路线穿越了盆地、河谷、低中山区等地形。路线的主要地层分别是粉质黏土、红黏土、黏土及砂土、卵砾石等,性质差异大。全线所经过的特殊性岩土主要为软土、红黏土等,软土主要位于盆地地带,地下水较浅,含水量高,孔隙比大,压缩性强,物理力学性质较差。全线均分布红黏土,主要包含原生红黏土和次生红黏土。例如,路线局部 600 m 范围内地基土层为红黏土,表层 3 m 左右为非饱和土,其他土层均为饱和土体,红黏土覆盖层厚度为 26 m。要求复合地基承载力特征值不应小于 175 kPa;单桩竖向承载力特征值不应小于 135 kN。红黏土地基采用振冲碎石桩法处置,挤密土颗粒,加速排水固结,提高地基的整体承载力。具体施工中采用直径为 0.5 m 的碎石桩,桩间的距离设计为 1.2 m,碎石桩的桩长为 15 m,碎石直径为 20~40 mm。在碎石桩桩顶设 30 cm 砂砾石垫层,在砂垫层中下部和表面分别铺设一层土工格栅。处置后红黏土复合地基承载力满足设计要求,工后沉降

较小,工程质量良好,地基承载力满足设计要求,变形沉降可控。

(案例来源——知网论文《红黏土地区振冲碎石桩复合地基特性研究》)

案例拓展二:海上丝绸之路沿线地基处理技术

“21 世纪海上丝绸之路”从中国沿海港口过南海到东南亚、南亚、印度洋、欧洲、南太平洋,沿线穿越很多的国家和地区,跨度大,路径远,海上基础设施建设面临的环境比陆地上更加艰难、更加复杂!因为不同区域、不同国度、不同环境、不同气候下,沿线的岩土都具有一定的特殊性和工程特性,不同国家的标准和要求都不一样。“21 世纪海上丝绸之路”沿线国家重大工程建设中遇到的很多特殊岩土主要包括珊瑚礁砂、深厚粉细砂、软土、膨胀土、风化页岩、盐渍土、有机土、有机质土。特殊岩土是工程建设的重点和难点,主要地基问题包括地震区砂土地基处理、吹填砂土地基处理、含高细粒砂性土地基处理、强震区珊瑚礁砂地基处理、疏浚吹填(绞吸、耙吸)地基处理等。

砂土地基主要是采用动力密实法处理,强夯法、振冲密实法是境外常用的两种大面积地基处理方法。珊瑚礁砂常采用振冲密实法、碎石桩、强夯方式处理。软土地基常采用堆载预压、真空预压、真空联合堆载预压法处理。盐渍土采用堆载预压方式进行处理。疏浚吹填(绞吸、耙吸)地基常采用振冲密实法(深层)和表层碾压方式处理。采用高细粒含量吹填砂性土强夯加固地基,利用大功率振冲器加固吹填砂性土,采用高细粒含量振冲密实法加固地基。对水下地基的处理,可以采用水下爆炸挤淤、水下开挖、水下挤密砂桩、水下碎石桩(海外某集装箱码头)、水下振冲密实、水下强夯、水下深层水泥搅拌桩(深中通道)等方式。

(案例来源——全国土力学及岩土工程学术大会上中交集团海外发言资料)

模块三 浅基础

单元一 识别浅基础的类型、构造



学习目标

【知识目标】

1. 知道刚性基础、柔性基础的定义和特点。
2. 领会工程中刚性基础的适用条件。
3. 领会工程中柔性基础的适用条件。

【能力目标】

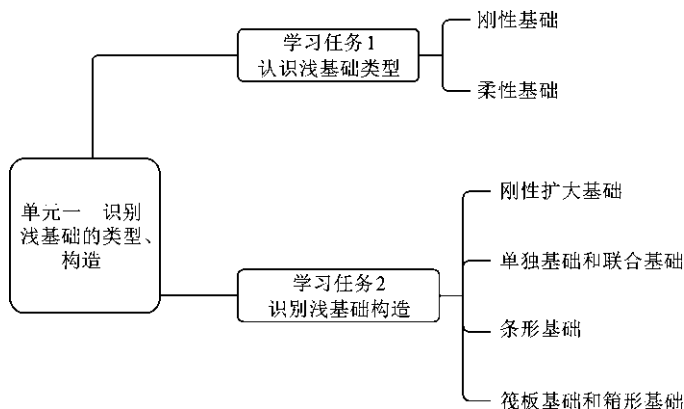
1. 能描述刚性基础、柔性基础的受力特点。
2. 能区别刚性基础和柔性基础的异同。
3. 会识别不同类型的浅基础。

【素质目标】

1. 培养文化自信、科技强国责任意识。
2. 培养严谨求实、一丝不苟的职业素养。
3. 培养刻苦钻研、团结协作、乐于奉献的职业素养。



学习导图



学习任务1 认识浅基础类型



学习情境

唐朝时出现了不少闻名天下的石梁桥。据《唐六典》记载,天下著名的石梁桥有4座,即洛阳的天津桥、永济桥和西安的中桥、灊桥。到了宋朝,人们改造自然的能力提高了,又在福建泉州建成了我国第一座濒临海湾的大石梁桥万安桥,又名洛阳桥。这座桥长834 m,宽7 m。因在江海交汇处造桥,江阔水深,工程艰巨。造桥者首创筏板基础以造桥墩,养殖牡蛎以固桥基。

北魏郦道元《水经注》云,公元282年在河南洛阳东六七里有一座用石头建造的旅人桥,下圆以通水。这是最早见于记载并保留至今的石拱桥——河北赵县的安济桥,即赵州桥。赵州桥建于1400多年前的隋朝,由工匠李春设计监造,是一座敞肩式单孔圆弧石拱桥,比欧洲19世纪建的同类拱桥早了1200多年,在世界桥梁史上占有重要地位。

介于北京西南郊的卢沟桥(图3-1)。是北京市现存古老的石造联拱桥,1192建成,是我国第一批国家重点文物保护单位。卢沟桥桥面略呈弧形,两端较低,中间隆起。桥墩、拱券以及望柱、栏板、抱鼓石、华表等都用天然石英砂岩及大理石砌筑,而桥面却是用天然花岗岩巨大条石铺设的。卢沟桥桥下河床铺设几米厚的鹅卵石和石英砂,整个桥体砌筑其上,十分坚实



图3-1 著名的石拱桥——卢沟桥

稳固。桥墩平面呈平底船形,北为上游,是进水面,砌筑分水尖,状若船头,长4.5~5.2 m,约占桥墩的1/4。这样的地基结构,承载力很强,非常适合用石料砌筑的刚性扩大基础。

这些古代的梁桥与拱桥,大多是以巨石为基础,也就是早期的刚性扩大基础,有独立式、条形、筏板等。在科学技术飞速发展的今天,各种巧夺天工的桥梁星罗棋布,虽然由于浅基础自重大、抗拉强度低等缺点,很大一部分现代化的大型桥梁更多地选择了其他类型的深基础,但刚性浅基础仍然以它稳定性好、强度高、耐久性强、适用范围广等特点应用于各种桥梁中,特别是桥台基础使用刚性扩大基础仍很常见。



知识导航

天然地基上的基础,因为埋置深度不相同,基础的构造类型和施工方法也有所不同,分为浅基础和深基础两类。

浅基础是指埋入较浅地层,常采用敞口开挖施工,主要由块石或混凝土砌筑而成的实体基础,也称为明挖基础或扩大基础。浅基础是指埋置深度 h (图3-2)小于5 m或埋置深度大于5 m,但埋置深度与基础宽度比值不大于1的基础,如筏板基础和箱形基础。

天然地基浅基础的特点是埋置深度浅,结构形式简单,施工方法简便,施工造价较低,

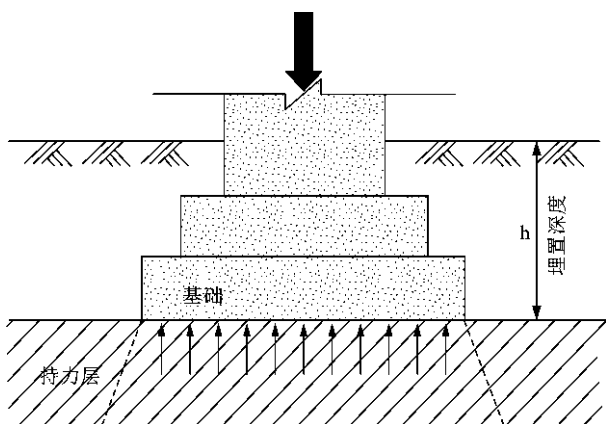


图 3-2 天然地基上的浅基础

因此是建筑物、中小桥梁、挡土墙下通道、涵洞等常用的基础类型。浅基础是一种实用且经济的基础。浅基础在设计计算时可以忽略基础侧面土体对基础的影响，所以基础结构形式和施工方法也较简单。

根据受力条件和构造的不同，天然地基上的浅基础可以分为刚性基础和柔性基础。如图 3-3 所示，基础在外部荷载 N 和基础自重 W 的作用下，基底受到地基向上的应力 f_a ，此时基础的悬出部分 $a-a$ 断面左端或右端相当于承受着强度为 f_a 的均布荷载的悬臂梁，在荷载作用下， $a-a$ 断面将产生弯曲拉应力和剪应力。

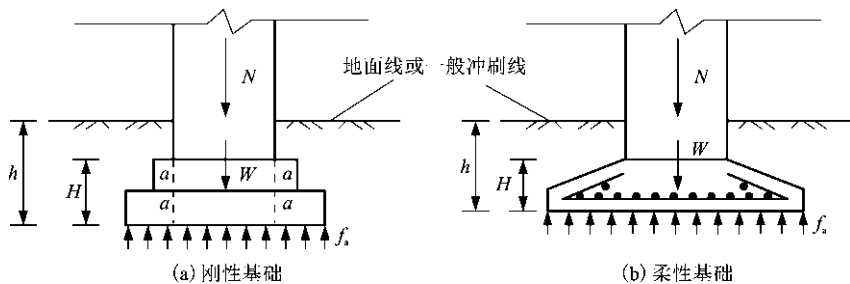


图 3-3 基础类型

一、刚性基础

刚性基础是指在基底反力作用下，基础圬工具有足够的截面强度，使材料的容许应力大于地基反力对基底产生的弯曲拉应力和剪应力时， $a-a$ 断面不会出现裂缝，此时，这种基础内无须配置受力钢筋[图 3-3(a)]。刚性基础是桥梁、涵洞、房屋等建筑物常用的基础类型。其主要形式包括刚性扩大基础、单独柱下刚性基础、条形基础等。

刚性基础可以选用混凝土、毛石混凝土、砖、毛石、灰土、三合土等材料。其中混凝土基础抗压强度高、耐久性好、抗冻性较好，可浇筑成任意形状的基础。刚性基础的抗拉强度值远小于其抗压强度值，为保证基础不发生破坏，基础相对刚度都比较大，几乎不会发生弯曲

变形。刚性基础的混凝土一般采用 C20~C25,当基础遇到有侵蚀性的地下水时,对混凝土的成分要严加选择,否则可能会影响基础的耐久性。为了节约水泥用量,对于大体积混凝土基础,可掺入砌体体积 25%以内的片石或块石,称为片块石混凝土基础。

刚性基础的主要优点:材料简单,稳定性好,造价不高,设计和施工简便,能承受较大的荷载,抗压性能好。不足之处:自重很大,截面尺寸大,埋深有要求,抗拉抗剪强度不高,荷载较大时尺寸受限。如果要將刚性基础设置在软弱土中,需要对地基进行处理或加固后才能采用,否则持力层会受到荷载破坏而使基础失稳。因此,对于荷载大或对不均匀沉降较敏感的建筑物,当持力层的土质较差又较厚时,不适合选择刚性基础作为浅基础。

二、柔性基础

柔性基础在地基的反力作用下,当在 $a-a$ 截面产生的弯曲拉应力和剪应力超过基础圬工的强度极限值,基础在 $a-a$ 截面有可能开裂甚至断裂时,重新优化基础尺寸,必须在基础内部掺入一定数量的钢筋[图 3-3(b)]。柔性基础的混凝土一般采用 C25~C35,柔性基础的常见形式有柱下扩展基础、条形基础、十字形基础、筏板基础及箱形基础。

柔性基础主要用钢筋混凝土浇筑,整体性能较好,外形尺寸较小,抗弯拉和抗剪强度较大,一般在地基承载力不高以及承受水平力和力矩荷载、竖向荷载较大等情况时采用。柔性基础不易产生裂缝,基础的高度不受台阶“宽高比”的约束,可以在“宽基浅埋”的环境中应用。

学习任务 2 识别浅基础构造



学习情境

浅基础在道路桥梁、房屋建筑、港口航道等专业领域应用比较广泛。设计者会根据不同的背景环境选择合适的浅基础结构类型,因地制宜地合理设计,因为其结构类型不一样,在不同的工程中发挥的作用也不相同。不同类型浅基础如图 3-4 所示。下面是部分浅基础在不同行业内的应用情况,大家可以思考:这种结构类型的浅基础有什么特点?受力情况如何?如果设计不当会有什么样的不良影响?带着这些问题一起来学习吧。

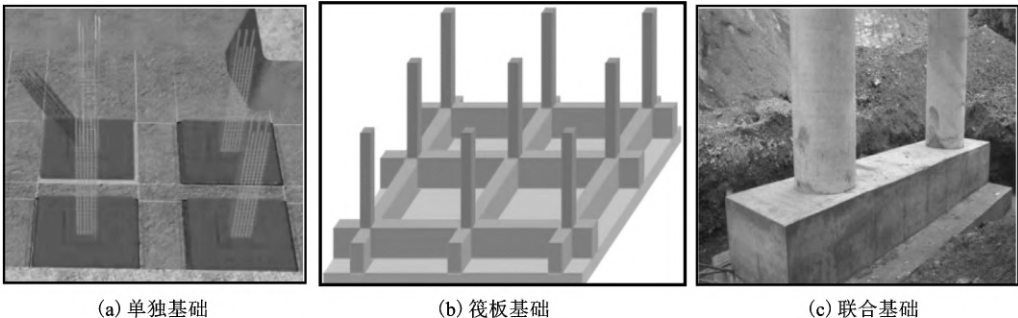


图 3-4 不同类型浅基础



知识导航

浅基础根据构造形式不同可以分为刚性扩大基础、单独基础、联合基础、条形基础、筏板基础、箱形基础等。上部结构的荷载通过柱、墙等承重构件传递下去,会产生较大的压强,这时需要设计刚性基础或柔性基础分担荷载,使其满足地基承载力和变形的要求,保证结构物稳定。

一、刚性扩大基础

刚性扩大基础是指由于地基强度一般较墩台或其他建筑物圬工的强度低,因而需要将基础平面尺寸扩大而使基底应力减小以满足地基强度要求,提高地基的稳定性和承载能力。刚性扩大基础是将上部结构墩传递的荷载逐级向下传递至较浅的支撑地基的一种基础形式。每边扩大的尺寸为 $0.20\sim 0.50\text{ m}$,扩大的尺寸结合土质条件、基础高度、埋置深度和施工方法而定,每边扩大的最大尺寸应受到材料刚性角的限制,比如当选用混凝土材料时,刚性角不超过 40° 。当基础较厚时,可在纵、横两个剖面上都做成台阶形,以减少基础自重,节省材料。混凝土强度等级一般采用C20,环境严寒地区应采用不低于C25的混凝土。

图3-5所示基础为刚性扩大基础。其平面形状为常见的矩形,实用性好,基础分两层,每层等厚,这种刚性扩大基础是桥梁、涵洞、其他建筑物经常用到的基础类型之一。



浅基础三视图

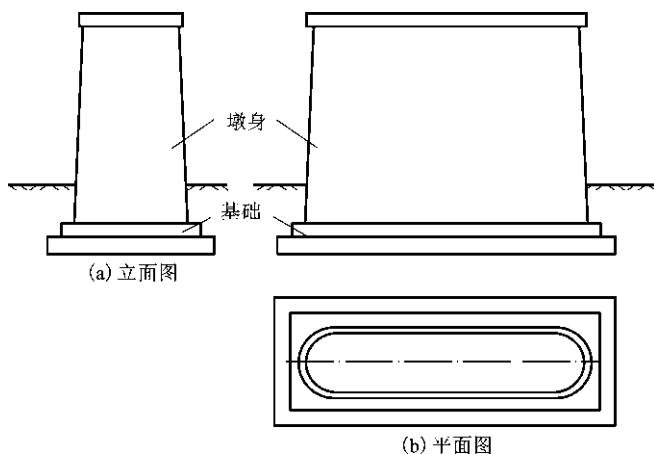


图3-5 刚性扩大基础

二、单独基础和联合基础

单独基础是指基础之间是相互独立的,没有关联的独立基础形式。单独基础的主要形式是单独柱下基础,房屋建筑和立柱式桥墩。单独柱下基础大部分是用石或砖等圬工材料砌筑的,它的纵、横剖面均可砌筑成台阶式,如图3-6(a)、图3-6(d)所示。个别情况下柱下基础用钢筋混凝土浇筑时,其剖面也可浇筑成锥形,如图3-6(c)所示。由于掺入了钢筋,钢筋发挥了作用,改变了结构的受力情况,此时为柔性扩大基础。

联合基础是指扩大相邻单独基础的平面尺寸，会导致相邻的单独基础在平面上相联系或部分重叠所形成的基础形式，基础的底面尺寸扩大可以提升地基的承载力，满足地基强度要求，如图 3-6(b) 所示。

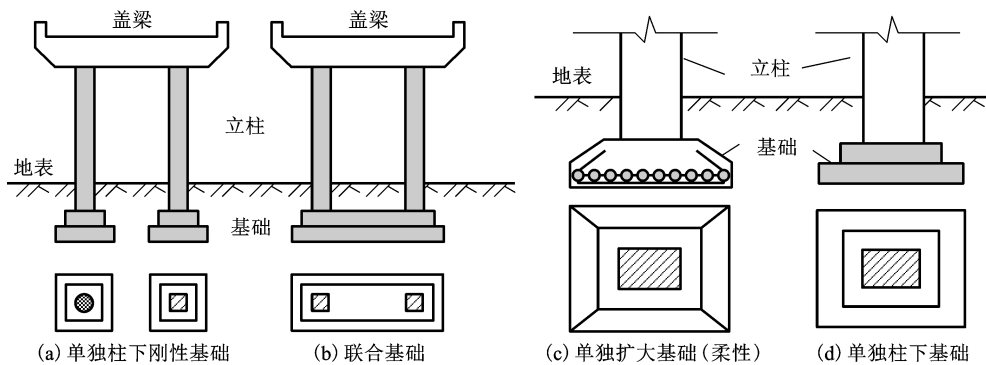


图 3-6 单独基础和联合基础

三、条形基础

条形基础是指基础的长度尺寸远大于宽度尺寸的基础形式。条形基础根据设置的位置不同可以分为墙下条形基础和柱下条形基础。条形基础采用的混凝土强度等级不低于 C20。

墙下条形基础是指常用的设置在挡土墙下或涵洞下的基础形式。墙下条形基础横剖面可以是矩形或筑成台阶形如图 3-7(a) 所示。当挡土墙很长时，为了避免在沿墙长方向因沉降不均匀而开裂，可根据土质和地形予以分段，设置沉降缝。

柱下条形基础是指设置在立柱下，并且把若干根柱子的基础联合的条形基础。这种基础能极大地增强结构物基础的承载能力。柱下条形基础的构造和倒置的 T 形截面梁有些类似，沿柱子的排列方向的剖面可以是等截面的，也可以如图 3-7(b) 所示，在柱位处加注混凝土呈锥形。在桥梁基础中，条形基础大多是做成刚性基础，个别的设计成钢筋混凝土的柔性基础。

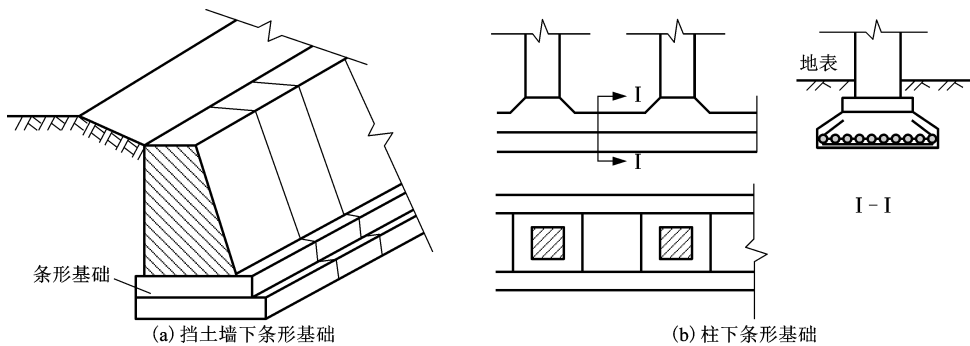


图 3-7 条形基础

此外，在地基土很软的情况下，当基础在宽度方向需要扩大面积同时保证基础具有一定的刚度来调整不均匀沉降时，可在柱下纵、横两个方向均设置条形基础，成为十字形基础。十字形基础在房屋建筑中经常用到，也称为交叉条形基础。



四、筏板基础和箱形基础

筏板基础是指采用钢筋混凝土材料做成的连续整片基础，像一大块倒置的楼盖板，也称为满堂基础、片筏基础、筏基。房屋建筑常用箱形基础和筏板基础，因为这种基础的整体刚度更大，可以有效地调整地基土层的不均匀沉降。当上部结构（立柱或承重墙）传递的荷载较大，地基土质条件不理想（软弱又不均匀），采用单独或条形基础形式不合适（承载力和沉降不满足要求）时，考虑采用筏板钢筋混凝土基础。筏板基础“大底板”受力面积显著地增大，筏板基础的整体性增强，防止建筑物发生不均匀沉降。

筏板基础类似于倒置的钢筋混凝土楼盖，可以分为平板式[图 3-8(a)]和梁板式[图 3-8(b)]，还有组合式的桩筏基础[图 3-8(c)]。平板式筏板基础主要由底板和立柱组成，而梁板式筏板基础主要由底板、立柱、梁组成；桩筏基础是指桩基础和筏板基础相结合的基础形式。平板式筏板基础多用于立柱传递荷载比较小、立柱排列均匀、立柱间距较小的情况。平板式筏板基础和梁板式筏板基础适用于土层很厚，地基土质条件较差，建筑物对不均匀沉降较敏感或荷载较大而基础建筑面积不太大的高层建筑，也适用于有水池、油库、地下室的房屋等。

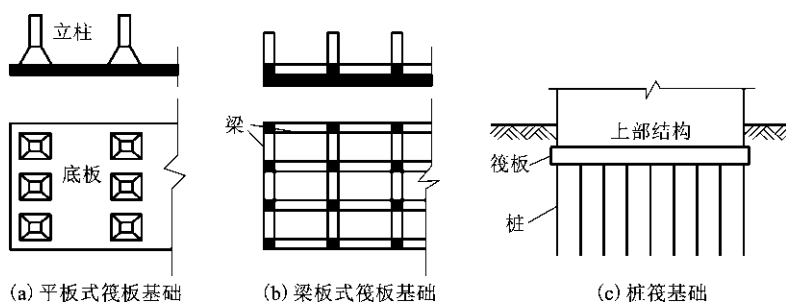


图 3-8 筏板基础

箱形基础，主要是由钢筋混凝土顶板、隔板（纵墙、横墙）、底板、外墙、梁（柱）等组成的单层或多层箱体式钢筋混凝土空间结构，刚度很大的箱基础形式，如图 3-9(a) 所示，也可以设计成桩基础与箱形基础组合的形式，如图 3-9(b) 所示。箱形基础内部支撑多，其刚度比筏板基础大得多，由基础顶板和底板围成的空间很大，可做地下室。箱形基础的特点是整体刚度大、稳定性强，内部空间具有很好的抗震性和附属功能（地下室、车库、设备间、人防、库房）。箱形基础多用于高层建筑（无水或少水），也可以和桩基础组合使用，组成桩箱基础。其不足之处是箱形基础形成的围护空间对材料需求量大，施工周期长，施工比较复杂，当有基坑开挖时，还需要考虑降水、支护费用及对相邻建筑的沉降影响。

箱形基础适合用于上部结构荷载较大，地基承载力较低，采用其他基础（十字交叉条形基础）无法满足承载力需求的情况。箱形基础内部的隔墙把空间分隔成较小空间，不适合用作地下停车场等，而筏板基础比较适合大型的地下停车场，空间大，设计方便。

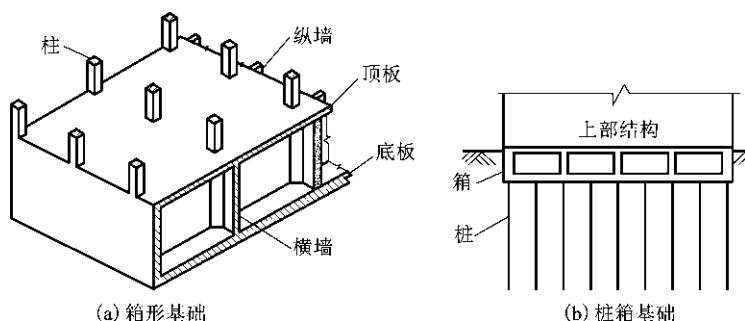


图 3-9 箱形基础与桩箱基础

单元知识巩固和拓展



一、知识要点汇总

1. 天然地基上的基础, 因为埋置深度不同, 基础的构造类型和施工方法也有所不同, 分为浅基础和深基础两类。

2. 浅基础是指埋入较浅地层, 常采用敞口开挖施工, 主要由块石或混凝土砌筑而成的实体基础, 也称为明挖基础或扩大基础。

3. 按受力条件和构造的不同, 天然地基上的浅基础可以分为刚性基础和柔性基础。

4. 刚性基础在基底反力作用下, 基础圬工具有足够的截面强度, 使材料的容许应力大于地基反力对基底产生的弯曲拉应力和剪应力时, $a-a$ 断面不会出现裂缝。此时, 这种基础内无须配置受力钢筋。

5. 柔性基础在地基的反力作用下, 当在 $a-a$ 截面产生的弯曲拉应力和剪应力超过基础圬工的强度极限值, 基础在 $a-a$ 截面有可能开裂甚至断裂时, 重新优化基础尺寸, 必须在基础内部掺入一定数量的钢筋。

6. 浅基础根据构造形式不同可以分为刚性扩大基础、单独基础、联合基础、条形基础、筏板基础、箱形基础等。



二、习题练习

(一) 单选题

1. () 是指埋入较浅地层, 常采用敞口开挖施工, 主要由块石或混凝土砌筑而成的实体基础, 也称为明挖基础。

A. 浅基础 B. 柔性基础 C. 深基础 D. 刚性基础

2. 关于天然地基浅基础的特点描述不正确的是()。

A. 施工造价较高
B. 施工方法简便
C. 埋置深度浅、结构形式简单



习题练习答案

D. 建筑物、中小桥梁、挡土墙下通道、涵洞等常用

3. 在基底反力作用下,基础圬工有足够的截面强度,基础材料的容许应力大于地基反力对基底产生的弯曲拉应力和剪应力时,基础的 A-A 截面不会出现裂缝,这种基础内部不需配置受力钢筋,这种基础称为()。

A. 柔性基础 B. 刚性基础 C. 扩大基础 D. 桩基础

4. 在地基的反力作用下,基础的截面产生的弯曲拉应力和剪应力超过基础圬工的强度极限值,基础某截面有可能开裂甚至断裂时,重新优化基础外形尺寸,必须在基础内部配置一定数量的钢筋,这种基础称为()。

A. 柔性基础 B. 刚性基础 C. 扩大基础 D. 桩基础

5. 刚性基础的特点描述不正确的是()。

A. 材料简单、稳定性好 B. 造价不高、设计和施工简便
C. 抗压性能好,抗弯、抗拉、抗剪能力差 D. 自重很小,截面尺寸大、埋深有要求

6. ()是指由于地基强度一般较墩台或其他建筑物圬工的强度低,因而需要将基础平面尺寸扩大而使基底应力减小以满足地基强度要求。

A. 刚性扩大基础 B. 箱形基础 C. 联合基础 D. 筏板基础

7. ()类似于刚度很大的箱体,它是由钢筋混凝土顶板、隔板(纵墙、横墙)、底板、外墙、梁(柱)等组成单层或多层的箱体式钢筋混凝土空间结构。

A. 刚性扩大基础 B. 箱形基础 C. 联合基础 D. 筏板基础

三、知识点拓展

案例拓展:长沙国际金融中心筏板基础施工

长沙国际金融中心坐落于黄兴路与解放路交会的东北角,临近五一大道和地铁 1、2 号线五一广场站。项目采用“双塔楼”设计,其中 1 号塔楼地上 93 层,建筑高度为 452 m;2 号塔楼地上 65 层,建筑高度为 315 m。长沙国金中心项目于 2017 年全部建成。

如图 3-10 所示,两座塔楼的基础采用天然筏板基础,整体浇筑成形的钢筋混凝土底板将承受高楼的荷载。1 号楼的底板厚达 5 m,2 号楼的底板厚达 3.7 m。基坑平均深度达 34.25 m,主楼处最大深度为 42.25 m,基坑面积比 10 个标准足球场还大。



图 3-10 长沙国际金融中心筏板基础施工

在基坑支护施工期间，地质勘测报告显示项目所在地地基基础土质非常好，在施工单位与勘测设计单位现场多次进行地基承载力试验后，设计单位通过试验数据调整了结构基础形式，取消了原本的桩基础方案，改成天然筏板基础。在当时，创下全国首例超 400 m 的高楼使用天然筏板基础来施工地基的记录。

和桩基础相比，天然筏板基础施工时间短，成本更省。整个项目，因为天然筏板基础的应用，施工工期缩短约 2 个月，成本减少 3000 万元左右。1 号楼基础筏板厚度为 5 m，采用 HRB400 级钢筋，C70 高性能混凝土，一次性浇筑混凝土量约 32000 m³。该筏板基础的钢筋和混凝土强度等级、钢筋含量、底板厚度、混凝土连续浇筑量均为湖南省之最。

单元二 浅基础的设计与计算



学习目标

【知识目标】

1. 知道刚性扩大基础的设计流程。
2. 理解刚性扩大基础设计的依据、原则和具体内容。
3. 理解天然地基上浅基础设计流程和设计要点。

【能力目标】

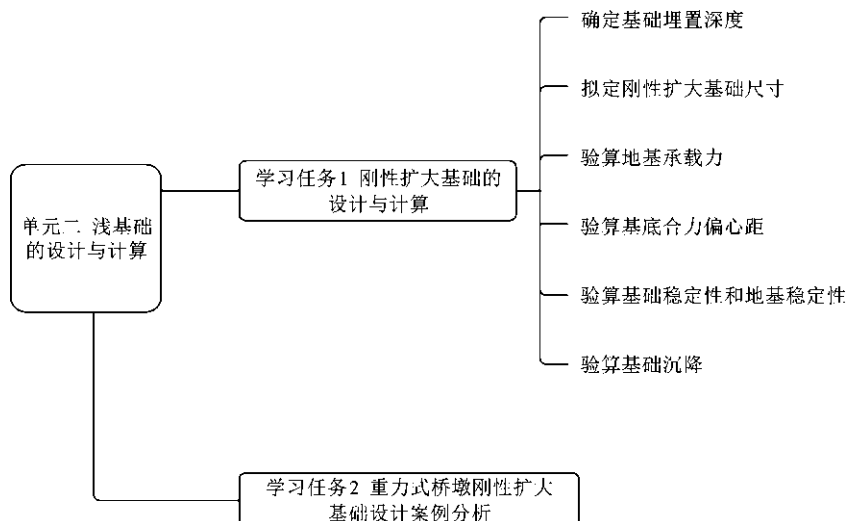
1. 能进行刚性扩大基础资料的收集分析。
2. 能进行刚性扩大基础的设计。
3. 会进行刚性扩大基础设计方案的简单优化。

【素质目标】

1. 培养发现问题、解决问题的能力。
2. 培养实事求是、一丝不苟、团结协作的职业素养。
3. 培养逻辑思维、创新思维和创新创造能力。



学习导图



学习任务1 刚性扩大基础的设计与计算



学习情境

考虑基础的埋置深度是天然地基上浅基础设计的第一步,直接影响构筑物的成本、施工工期、施工的措施等。基础的类型和外形尺寸决定了荷载的大小和对周围环境的适应性,基础的承载力验算、变形沉降、稳定性验算关乎结构的质量和安全。天然地基上的浅基础埋置深度与要求不相符容易导致冲刷、冻胀病害。浅基础的地基与要求不符容易导致基础断裂、倾斜及沉降的发生。因此,设计浅基础时,应先熟悉桥位处的地质水文状况,确定与设计依据是否相符,必须把隐蔽工程的验收与地基的勘探工作做好,确保地基均匀稳定且承载力满足要求。项目地地质水文情况与地基承载力的大小,决定基础类型的选择与基础的设计和施工。近年发生过数起由地质情况和地基承载力引起的桥梁垮塌事件,我们需要更加重视桥梁基础的设计,设计和施工两手抓。思考下列案例中病害产生的原因,以及需要如何处置呢?

案例一:2018年7月,某项目穿越较浅的河流,水流流速较缓。考虑到施工方便和造价因素,选择埋藏浅的砂砾石地层做持力层,桥梁采用浅基础,只进行了持力层承载力验算,忽略了下方1 m厚软黏土承载力的验算。运营一段时间后,部分桥墩之间直径变形沉降明显,局部桥面有不均匀开裂破坏。

案例二:2019年5月,某项目浅基础在施工时,发现地质条件和设计文件存在较大出入,地基容许承载力远小于设计中的地基容许承载力,而且没有做任何处理直接施工,后期地基变形沉降大,导致桥墩和基础变形沉降超限。

案例三:2022年4月,某陡坡上修建了浅基础,因为春季雨水多,陡坡内侧长时间被雨水浸泡后,边坡土体失稳,桥墩和其下基础一起出现了滑动破坏,导致桥梁结构部位受损。



知识导航

刚性扩大基础设计前需要收集各种资料(荷载资料、结构资料、地质资料、地形资料、水文资料、施工资料、建筑材料资料等),充分分析和选择适合的基础上的结构类型和材料,初步选择基础的持力层,确定基础的埋置深度,拟定基础的各项尺寸,计算不同荷载的大小(永久作用、可变作用、偶然作用等),验算相关指标(验算地基承载力、基础底面偏心距、抗倾覆稳定性和滑动稳定性、基础沉降)。验算合格则设计满足要求,如不符合则回到上一级,优化和调整部分参数。刚性扩大基础设计与计算的流程如图3-11所示,主要内容如下。

(1)选择合适的持力层放置基础,计算基础的埋置深度。

(2)拟定基础的各项尺寸:基础的高度(H)、平面尺寸(长度 a ,宽度 b)、立面尺寸(襟边、台阶宽度、扩散角)。

(3)计算基底受到的各项恒载、活载等荷载,考虑不同状态下的荷载组合方式,进行组合计算,为后续指标验算做准备。

(4)验算地基承载力:首先,计算基础底面的基底压力(p);其次,验算地基的承载力(f_a),包括验算地基持力层的承载力和验算软弱下卧层的承载力。

(5)验算基础底面合力偏心距大小。

- (6) 验算基础的稳定性：验算基础倾覆稳定性；验算基础滑动稳定性。
 (7) 验算基础沉降大小。(几种特定条件下需要验算沉降)

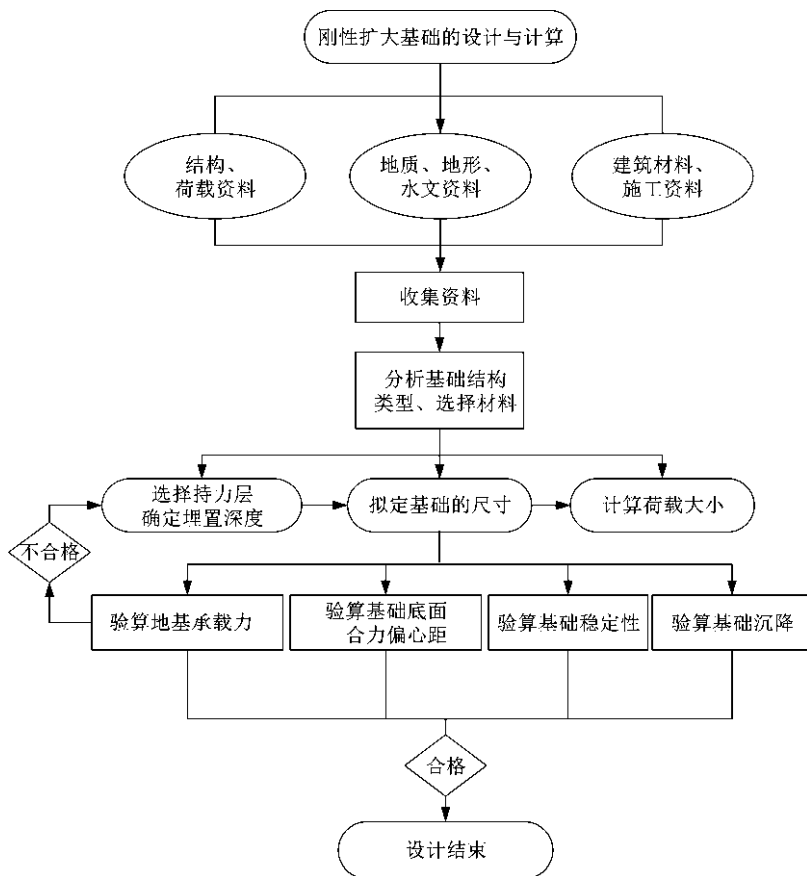


图 3-11 刚性扩大基础的设计与计算流程图

一、确定基础埋置深度

确定基础埋置深度是刚性扩大基础设计的第一步。其设计原则是尽可能地把基础设置在地层变形沉降较小而承载能力较大的持力层(其主要承重结构的土层)上,满足荷载传递下来而地基土不发生破坏(产生过大的沉降或沉降差)的要求,优先考虑埋藏浅、地基承载能力高的土层。除此之外,为了保证基础的稳定和基础的安全,基础还需埋置一定安全深度。确定基础的埋置深度时,必须综合考虑各种因素的作用,如图 3-12 所示。

1. 工程的地质因素

工程中的地基土具有离散性,通常由很多不同类型的土质组成,需要根据荷载的大小和特性选择合适的土层做持力层。工程中的地质条件是影响埋置深度的重要因素之一。

当基础埋置于岩石地基中时,如果为覆盖土层较薄(包括风化岩层)的岩石地基,就直接清除覆盖土和风化层,把基础修建在新鲜岩石地层上;如果岩石覆盖层(含风化层)很厚,全部清除困难,就考虑岩层的冲刷深度、风化程度、相应的容许承载力来确定基础嵌入风化层

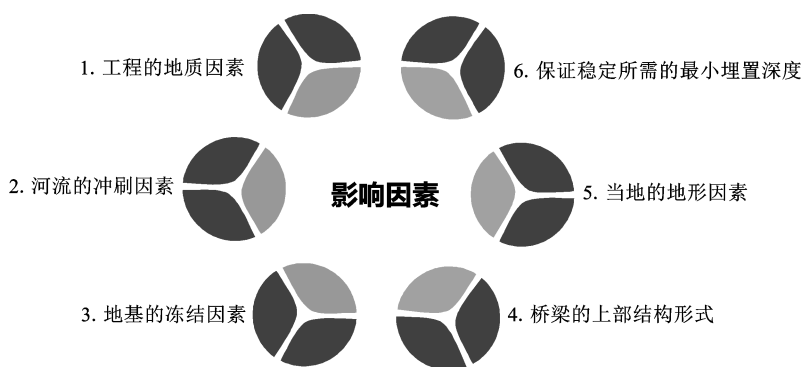
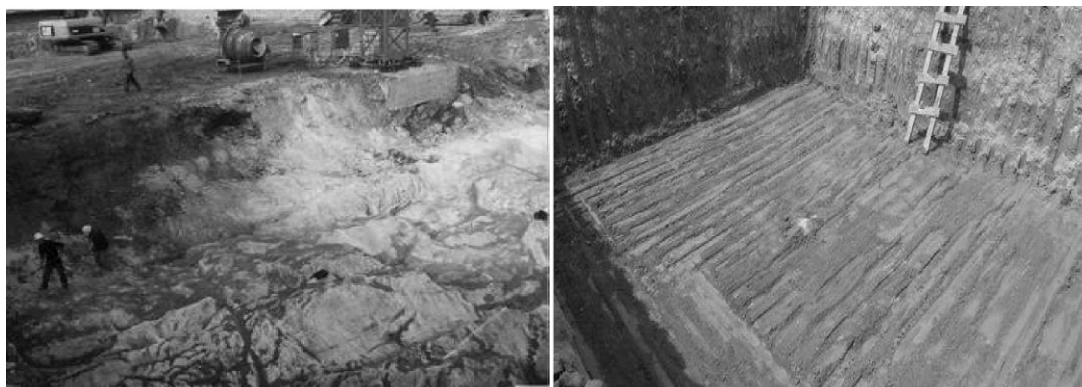


图 3-12 基础埋置深度影响因素

中的埋置深度；如果地基为表面倾斜岩层，就应该加以处理，严禁将基础置于受力不平衡的倾斜岩层上，避免岩层上的基础产生不均匀沉降而倾斜甚至断裂。

当基础埋置于非岩石地基中时，如果地基土质均匀，比较单一，可以根据河流的冲刷、土层的冻胀、上部荷载的大小、地基土的强度、沉降特性综合确定基础的埋置深度。如果地层土的类型较多或地质条件较复杂，那么大中型桥梁或其他建筑物基础持力层的选定，应通过较详细的比较持力层的方案，综合技术、经济、施工等方面最终确定。如图 3-13 所示为不同地基的埋置深度。



(a) 岩石地基

(b) 非岩石地基

图 3-13 岩石地基和非岩石地基的埋置深度

2. 河流的冲刷因素

冲刷是指水流的移动对河床的冲蚀和淘刷过程。当在有冲刷的河床上进行基础施工时，必须考虑洪水对基础下地基土的冲刷作用。水流越急，过水流量越大，水流的冲刷作用越大，被水流冲刷后，整个河床面会下降一定深度，如图 3-14 所示。

冲刷通常可划分为自然冲刷、一般冲刷、局部冲刷等三种。自然冲刷是指随着时间的推移，在水流作用影响下，自然演变而引起河床线降低的冲刷。一般冲刷是指桥梁中水中墩柱的存在缩小了过水断面，在水流作用下会使河底和两侧泥沙冲走，桥下河床断面内发生冲

刷。局部冲刷是指水流作用下，存在水中基础的阻拦作用，水流会在基础附近产生旋涡，将泥沙从基础周围带走并形成的冲刷。因此，水中基础附近的冲刷深度是最大的。从原河床面到局部冲刷线的垂直距离称为总的冲刷深度，包含河床自然演变冲刷深度、一般冲刷深度、局部冲刷深度之和(图 3-14)。

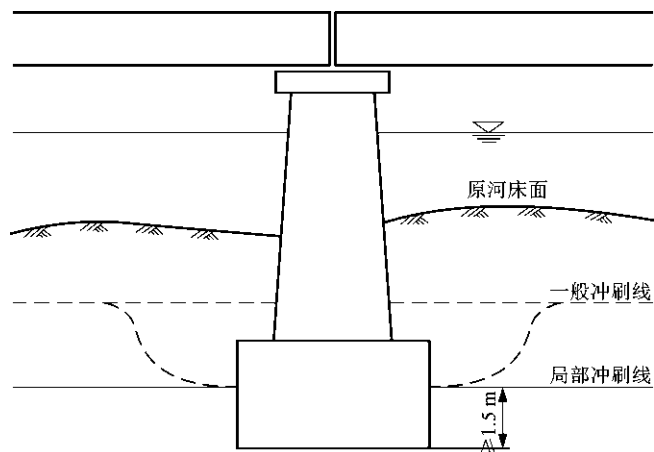


图 3-14 河流冲刷深度图

因此，为了避免桥梁墩和桥台基础四周和基础底部土层被水流冲刷掏空冲走而导致失稳倒塌，在有冲刷的河流中，基础必须埋置一定安全深度，规范要求基底必须埋置在设计洪水水位最大冲刷线 1.5 m 及以上。特别是在地质条件复杂、有陡峭边坡和河流的(山区和丘陵)地区，设计时考虑季节性的洪水冲刷作用很有必要。如表 3-1 所示为参考选取非岩石的河床桥梁墩台基础底面埋置深度的安全值。

表 3-1 基础底面埋置深度的安全值 单位：m

桥梁类别	总冲刷深度				
	0	5	10	15	20
大桥、中桥、小桥(不铺砌)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
特大桥	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

- 注：1. 表中的数值为墩台基底埋入总冲刷深度以下的最小值；当不确定设计流量大小、水位高低、原始断面资料时，河床演变准确资料，表中各值建议加大。
2. 新建桥梁墩台的基础埋置深度要参考上、下游已建桥梁，调查周围已建桥梁的特大洪水冲刷情况，新建桥梁的冲刷深度视情况确定其安全值。
3. 当有铺砌层在河床上时，基底距离铺砌层顶面不小于 1 m。

3. 地基的冻结因素

多年冻土约占我国国土面积的 22%，冻胀性土壤存在冬季冻结—夏季融化的每年周期性交替的趋势，土在不同季节冷暖交替，会出现地基的冻胀和融沉现象。土中水由液态变成固态，体积会膨胀，当土体温度持续保持在冻结温度下，水分不能从未冻结土层向冻结区转移时，容易发生地基的冻胀和隆起，冻胀产生的荷载作用大于基础荷载，基础可能发生上抬，基础会因此受到损坏；当温度升高时，土体软化，强度显著降低，地基产生融陷，如图 3-15 所示。在有冻胀的区域建设工程，为了保证建筑物地基土不受季节性冻胀的影响，根据地基土划分的冻胀土类别不同，基础底面应埋置在不受冻结影响的范围内。如果冻胀作用严重，基础一般宜埋置在天然最大冻结线以下大于 0.25 m 处；如冻胀作用不严重，基础埋置深度可以适当浅于冻结线深度。



图 3-15 冻结的地基

4. 桥梁的上部结构形式

桥梁有梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥、刚构桥等几种类型，不同的桥梁上部结构的形式对基础产生的沉降也不同。如图 3-16 所示为简支梁桥和拱桥。一般来说，中、小跨度简支梁桥的上部结构形式对基础的埋置深度影响较小，但是拱桥等超静定结构较大，当基础发生非常小的不均匀沉降时会使内力重新分布，对结构造成影响，因此需将拱桥桥台基础设置在较深的坚硬的土层中，尽可能减小沉降差值、水平位移对结构的影响。



(a) 简支梁桥



(b) 拱桥

图 3-16 简支梁桥和中承式拱桥

5. 当地的地形因素

在确定较陡的土坡上桥梁的墩台、挡土墙等结构的基础埋置深度时，还应考虑地基土和结构物基础整体的稳定性，避免产生滑动破坏。由于在确定地基容许承载力时，一般是按地面是水平状态计算的，所以当基础位于倾斜的地基土中时，应考虑整体情况，适当折减地基容许承载力，采取有效措施保持地基土体稳定。当基础埋置在较陡的岩体中时，可以将岩体开挖成一定尺寸的台阶，降低坡度，确保岩体的稳定，如图 3-17 所示。

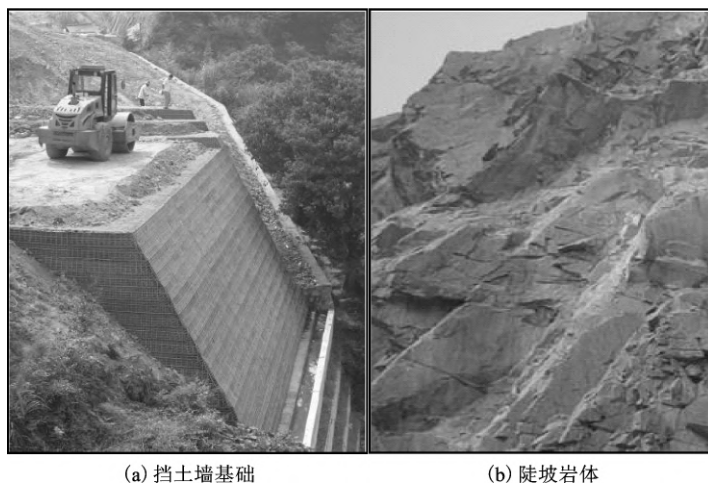


图 3-17 挡土墙基础和陡坡下的岩体

6. 保证稳定所需的最小埋置深度

地表是人类生产和生活的主要场所,人类、动物、植物等生物都在上面生产和生活、生长,一定程度上会破坏地面土层的结构,对其强度和稳定性产生影响。地表土受外界温度、湿度影响很大,地表岩土在搬运、沉积、风化作用下,性质不太稳定,因此一般地表土不宜作为持力层。为了保证地基和基础的整体稳定性,要求基础(除岩石地基外)应埋置在天然地面或无冲刷河底大于 1 m 深处。

考虑基础的埋置深度时不仅需要考虑上述因素,还需要考虑经济因素、施工的因素(施工设备、排水条件、围护要求)、相邻建筑物的扰动影响,综合分析确定最合适的持力层。以上因素不但适用于天然地基上的浅基础,对某些情况下的其他类型的基础也适用(如桩基础、沉井基础)。

二、拟定刚性扩大基础尺寸

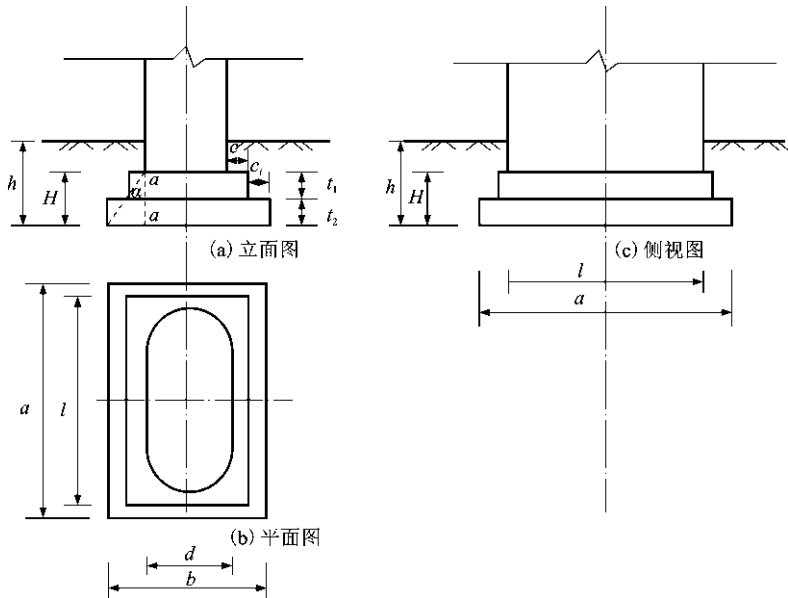
刚性扩大基础尺寸的拟定主要包括高度尺寸(H)拟定、平面尺寸长宽(a, b)拟定、立面尺寸[襟边(c)、扩散角(α)、台阶宽度(c_i)]拟定等。主要根据基础埋置深度确定基础长度和宽度,以及基础分层高度。在最不利荷载组合的条件下,既能满足基础本身有足够的结构强度要求,又能使地基与基础的承载力和稳定性均能满足规定要求,从而拟定经济合理的基础尺寸。

基础高度:应根据墩台结构形式,以及荷载大小、选用的基础材料等因素来确定。基底标高应按基础埋深的要求确定。水中基础顶面一般不高于最低水位,季节性河流或旱地上的桥梁墩台基础,则不宜高出地面,以防碰损。这样,基础高度可按上述要求所确定的基础底面和顶面标高求得。在一般情况下,大、中型桥的墩台混凝土基础高度为 1.0~2.0 m,在地质条件特别好的岩层上修建大型桥梁也可以采用浅基础。

基础的平面尺寸:基础平面形式需要考虑墩台底面的形状而确定,桥梁墩台底面常采用圆形或圆端形,基础平面形状常用矩形。基础的长度方向与桥梁行驶方向垂直,称为横桥向;基础的宽度方向与桥梁行驶方向平行,称为顺桥向。

基础剖面尺寸:刚性扩大基础的剖面形式一般是矩形或台阶形,各项尺寸如图 3-18 所示。自墩台底面边缘至基顶边缘的距离 c 称襟边,其作用是扩大基底面积增加基础承载力,同时便

于调整基础施工时在平面尺寸上可能产生的误差,也为了支立墩台模板的需要。其值应视基底面积的要求、基础厚度及施工方法而定。桥梁墩台基础襟边最小值为 20 cm。基础较厚(超过 1 m)时,可将基础的剖面浇砌成台阶形。



a —基础长度(m); b —基础宽度(m); h —基础埋置深度(m); H —基础高度(m); t_1 、 t_2 —台阶厚度(m);
 c_1 —台阶宽度(m), c —襟边; α —自墩台底面边缘至基础边缘线与垂线间的夹角;
 l —墩台底截面长度(m); d —墩台底截面宽度(m)。

图 3-18 刚性扩大基础

基础悬出总长度: 包含襟边与台阶宽度, 在基底反力作用下基础悬出去的长度类似悬臂梁, 在 $a-a$ 截面[图 3-18(a)]所产生的弯曲拉力和剪应力不超过基础圬工的强度限值。满足强度要求时墩台边缘处的垂线与基底边缘的连线间的最大夹角 $\alpha_{\max}$, 叫刚性角。刚性角 $\alpha_{\max}$ 的大小和基础所用的圬工材料强度相关, 当材料确定时, 刚性角也相应确定。设计时, 可使底面尺寸做大, 但是不能超过刚性角的范围, 保证基础底面不产生拉应力。在拟定浅基础尺寸时, 保持台阶宽度 c_i 与厚度 t_i 尺寸比例合适, 保证夹角 $\alpha_i \leq \alpha_{\max}$ 。当为刚性基础时, 在刚性基础内部不设置受力钢筋, 基础的弯曲拉应力和剪应力不需要进行强度的验算。基础每层台阶高度等高, t_i 通常设计为 0.5~1 m, 在一般情况下各层台阶宜采用相同厚度, 襟边 c 宽度通常不少于 0.2 m。旱地上刚性扩大基础如图 3-19 所示。



图 3-19 旱地上刚性扩大基础

例如,某高速公路特大桥,桥面离地面 180 多米,靠近山体的 5 号墩下为岩石地基,主桥 5 号墩索塔基础设计采用双层扩大基础形式,大跨度高塔斜拉桥基础采用扩大基础,基础总高度是 7.2 m,扩大基础平面尺寸长度为 42.344 m,宽度为 5.526 m,台阶宽度为 1 m,该扩大基础基坑开挖施工遇到溶沟、溶槽等不良地质状况,采用雷达电探和地质补勘手段确定地质条件,后采取台阶爆破、溶沟填充物清理施工,有效地解决了不良地质问题。

三、验算地基承载力

桥墩和桥台下浅基础必须按最不利荷载作用组合的情况验算地基的承载力。地基承载力验算包括确定地基容许承载力、验算持力层承载力、验算软弱下卧层承载力(有软弱下卧层时验算)。

1. 验算持力层承载力

基础下方与基底直接接触的主要承重结构的岩土层称为持力层,关于持力层承载力的验算,要求荷载在基底产生的地基力不能大于持力层的地基容许承载力。因为浅基础的埋置深度较小,在计算时忽略基础周围受到的摩阻力和抗力。

当不考虑嵌固作用时,按式(3-1)验算基础底面岩土承载力。

(1)当基底只承受轴心受压时

$$p = \frac{N}{A} \leq [f_a] \quad (3-1)$$

式中: p 为基础底面的平均压应力(kPa); N 为短期作用效应组合在基底产生的竖向力(kN); A 为基础的底面面积($a \times b$)(m^2); $[f_a]$ 为持力层土的地基容许承载力(kPa),可按式(1-8)计算。

(2)当基础底面单向偏心受压,基础底面受到的弯矩 M 和竖向力 N 共同作用时,既要满足式(3-1)的要求,又要符合式(3-2)的条件。

$$p_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq \gamma_R [f_a] \quad (3-2)$$

式中: $p_{\max}$ 为基础底面最大压应力(kPa); M 为短期作用效应组合产生的作用于桥梁墩台的水平力和竖向力对基础底面重心轴的弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); W 为基础底面偏心方向边缘弹性抵抗矩, $W = 1/6ab^2$ 。

(3)当基础底面双向偏心受压,基础底面承受竖向力 N 和绕 x 轴弯矩 M_x 与绕 y 轴弯矩 M_y 共同作用时,既要满足式(3-1)的要求,又要符合式(3-3)的条件。

$$p_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \gamma_R [f_a] \quad (3-3)$$

式中: M_x 、 M_y 分别为作用于基底的水平力和竖向力绕 x 轴、 y 轴对基底的弯矩; W_x 、 W_y 分别为基础底面偏心方向边缘绕 x 轴、 y 轴的弹性抵抗矩。

(4)当基础设置在基岩地基上时,基础底面承受单向偏心荷载作用,偏心距 e_0 超过核心半径时,不用考虑基底承受拉应力,只按受压区计算基底最大压应力即可,如图 3-20 所示。按式(3-4)计算基础底面为矩形截面的最大压应力 $p_{\max}$ 。

$$p_{\max} = \frac{3N}{3da} = \frac{2N}{3\left(\frac{b}{2} - e_0\right)a} \quad (3-4)$$

式中: a 为垂直于 b 边基础底面的边长; b 为偏心方向基础底面的边长; d 为 N 作用至基底受

2. 验算软弱下卧层承载力

当地基下受压层范围内地基由多层土(主要指地基承载力有差异)组成,且持力层以下有软弱下卧层(指下卧层的容许承载力小于持力层容许承载力的土层)时,此时还应验算软弱下卧层处的承载力,如图 3-21 所示,应按式(3-5)验算软土层或软弱地基的承载力。验算时先计算软弱下卧层顶面(在基底形心轴下)的压应力(包括自重应力及附加力),需小于等于此处地基土的容许承载力。

$$\begin{aligned} p_z &= \gamma_1(h+z) + \alpha(p - \gamma_2 h) \leq r_R[f_a] \\ [f_a] &= [f_{a0}] + k_1\gamma_1(b-2) + k_2\gamma_2(h-3) \end{aligned} \quad (3-5)$$

图 3-21 软弱下卧层承载力验算

在验算基底的偏心距时,采用计算基底应力相同的最不利荷载组合。桥梁墩台基础控制基底合力偏心距的目的是尽可能地使基底压应力分布比较均匀,以免基底两侧应力相差过

大,使基础产生较大的不均匀沉降,使桥梁的墩台发生倾斜,影响正常使用。当所有的合力通过基底中心,虽然可得均匀分布的应力,但实际情况下各种荷载组合条件下的合力通过基底的中心成本上不经济,往往也是不可能的,所以在设计时一般要求以不出现拉应力为原则,根据有关设计规范确定。

(1)桥涵墩台基底的合力偏心距容许值 $[e_0]$ 应符合表 3-2 的规定。

表 3-2 墩台基底的合力偏心距容许值 $[e_0]$

作用情况	地基条件	合力偏心距 $[e_0]$	备注
仅承受永久作用标准值效应组合	非岩石地基	桥墩 $[e_0] \leq 0.1\rho$	拱桥、刚构桥墩台,其合力作用点应尽量保持在基底重心附近
		桥台 $[e_0] \leq 0.75\rho$	
承受作用标准值效应组合或偶然作用(地震作用除外)标准值效应组合	非岩石地基	$[e_0] \leq \rho$	拱桥单向推力墩不受限制,但应符合规范规定的抗倾覆稳定系数
	软破碎~极破碎岩石地基	$[e_0] \leq 1.2\rho$	
	完整、较完整岩石地基	$[e_0] \leq 1.5\rho$	

注:表中 ρ 为基底的核心半径, $\rho = \frac{1}{6}b$ 。

(2)基底以上外力作用点对基底重心轴的偏心距 e_0 ,按式(3-6)计算。

$$e_0 = \frac{M}{N} \leq [e_0] \quad (3-6)$$

式中: e_0 为外力对基底截面重心的偏心距(m); N 为作用在基底的竖向力(kN); M 为所有外力(竖向力、水平力)对基底截面重心轴的弯矩(kN·m); $[e_0]$ 为偏心距容许值(m)。

(3)基底承受单向或双向偏心受压值的 p 值可按式(3-7)计算。

$$p = \frac{e_0}{1 - \frac{p_{\min} A}{N}} \quad (3-7)$$

$$p_{\min} = \frac{N}{A} - \frac{M_x}{W_x} - \frac{M_y}{W_y} \quad (3-8)$$

式中: $p_{\min}$ 为基底最小压应力,当为负值时表示拉应力; e_0 为 N 作用点与截面重心的距离(m);其余符号意义同上。

五、验算基础稳定性和地基稳定性

桥墩和桥台下浅基础必须按最不利荷载作用组合验算基础和地基的稳定性。稳定性验算包含验算基础稳定性和地基的稳定性。基础稳定性验算包括基础抗倾覆稳定性验算和基础抗滑动稳定性验算。此外,对某些土质条件下的桥台、挡土墙,还要验算地基的稳定性,以防桥台、挡土墙下地基的滑动。

1. 验算基础稳定性

(1)验算基础抗倾覆稳定性。基础抗倾覆或倾斜除了地基的强度和变形原因外,其往往发生在承受较大的单向水平推力而其合力作用点又离基础底面的距离较高的结构物上,如挡

土墙或高桥台受侧向土压力作用,大跨度拱桥在施工中其墩台受到不平衡的推力,以及有多孔拱桥中一孔被毁等,此时在单向恒载推力作用下,均可能引起墩台连同基础的抗倾覆和倾斜。理论和实践均证明,基础抗倾覆稳定性与合力的偏心距有直接关系;合力偏心距愈大,基础抗倾覆的安全度愈小,合力偏心距愈小,基础抗倾覆的安全度愈大,如图 3-22 所示。因此,设计中用控制合力偏心距 e_0 来保持基础的抗倾覆稳定性。

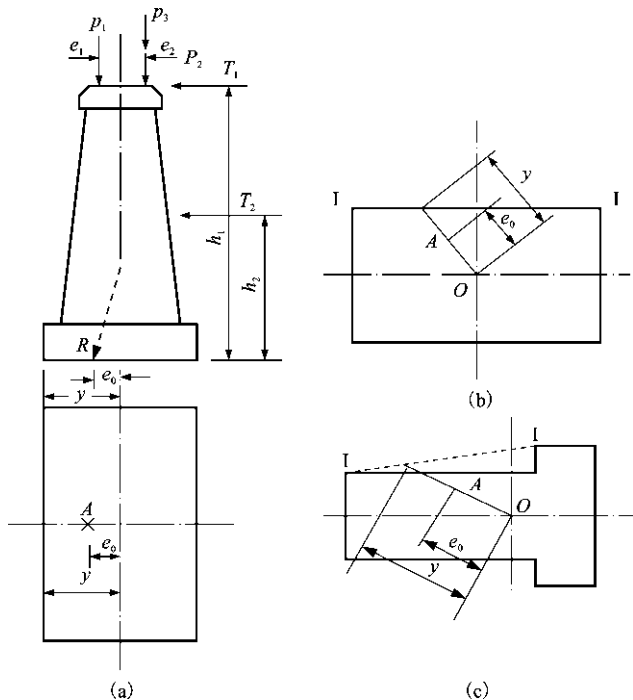


图 3-22 验算基础倾覆稳定性

假设基底截面重心至压力最大一边的边缘的距离为 y (荷载作用在重心轴上的矩形基础 $y = \frac{b}{2}$), 如图 3-22(a) 所示, 外力合力偏心距为 e_0 , 则两者的比值 κ_0 可反映基础倾覆稳定性的安全度, κ_0 称为抗倾覆稳定系数, 即

$$\kappa_0 = \frac{y}{e_0} \quad (3-9)$$

$$e_0 = \frac{\sum p_i e_i + \sum H_i h_i}{\sum P_i}$$

式中: κ_0 为桥涵墩台基础抗倾覆稳定性安全系数; y 为在截面重心至合力作用点的延长线上自截面重心至验算倾覆轴的距离 (m); e_0 为所在外力的合力 R 在验算截面上的作用点对基底重心轴的偏心距 (m); p_i 为不考虑其分项系数和组合系数的作用标准值组合或偶然作用 (地震除外) 标准值组合引起的竖向力 (kN); e_i 为竖向力 p_i 对验算截面重心的力臂 (m); H_i 为不考虑其分项系数和组合系数的作用标准值组合或偶然作用 (地震除外) 标准值组合引起的水

平力(kN)； h_i 为水平力 p_i 对验算截面重心的力臂(m)。

如果外力合力不作用在形心轴上，如图 3-22(b) 所示，或基底截面有一个方向为不对称，而合力又不作用在形心轴上，如图 3-22(c) 所示，基底压力最大一边的边缘线应是外包线，如图 3-22(b)、图 3-22(c) 中的 I-I 线， y 值应是通过形心与合力作用点的连线并延长与外包线相交点至形心的距离。不同的荷载组合，在不同的设计规范中，对抗倾覆稳定系数 κ_0 的容许值均有不同要求。

(2) 验算基础抗滑动稳定性。基础在水平推力作用下沿基础底面滑动的可能性即基础抗滑动安全度的大小，可用基底与土之间的摩擦阻力和水平推力的比值 κ_c 来表示， κ_c 称为抗滑动稳定系数，即

$$\kappa_c = \frac{\mu \sum p_i + \sum H_{ip}}{\sum H_{ia}} \tag{3-10}$$

式中： κ_c 为桥涵墩台的基础抗滑动稳定性安全系数； $\sum p_i$ 为竖向力总和(kN)； $\sum H_{ip}$ 为抗滑稳定水平力总和(kN)； $\sum H_{ia}$ 为滑动水平力总和(kN)； μ 为基础底面(圬工材料)与地基之间的摩擦系数，通过试验确定，当缺少实际资料时，可参照表 3-3 采用。

注： $\sum H_{ip}$ 和 $\sum H_{ia}$ 分别为两个相对方向的各自水平力总和，绝对值较大者为滑动水平力 $\sum H_{ia}$ ，另一方抗滑动稳定力 $\sum H_{ip}$ ； $\mu \sum p_i$ 为抗滑动稳定力。

表 3-3 基底摩擦系数 μ

地基分类	μ	地基分类	μ
黏土(流塑~坚硬)、粉土	0.25	软岩(极软岩~较软岩)	0.40~0.60
砂土(粉砂~砾砂)	0.30~0.40	硬岩(较硬岩~坚硬岩)	0.60、0.70
碎石土(松散~密实)	0.40~0.50		

验算墩台抗倾覆和抗滑动稳定性时，稳定性系数不应小于表 3-4 所示的规定。

表 3-4 抗倾覆和抗滑动稳定性系数

作用组合		验算项目	稳定性系数
使用阶段	永久作用(不计混凝土收缩及徐变、浮力)和汽车、人群的标准值效应组合	抗倾覆	1.5
		抗滑动	1.3
	各种作用(不包括地震作用)的标准值效应组合	抗倾覆	1.3
		抗滑动	1.2
施工阶段作用的标准值效应组合		抗倾覆	1.2
		抗滑动	

2. 验算地基稳定性

当桥梁基础位于软土地基或陡峭斜坡上时需验算桥台的滑动稳定性，基底下地基如在不深

处有软弱夹层,在台后土推力作用下,基础也有可能沿软弱夹层土层Ⅱ的层面滑动,如图3-23(a)所示;在较陡的土质斜坡上的桥台、挡土墙也有滑动的可能,如图3-23(b)所示。这种地基稳定性验算方法可按土坡稳定分析方法即圆弧滑动面法来进行验算。在验算时一般假定滑动面通过填土一侧基础剖面角点A,但在计算滑动力矩时,应计入桥台上作用的外荷载(包括上部结构自重和活载等)以及桥台和基础的自重的影响,然后求出稳定性满足规定的要求值。

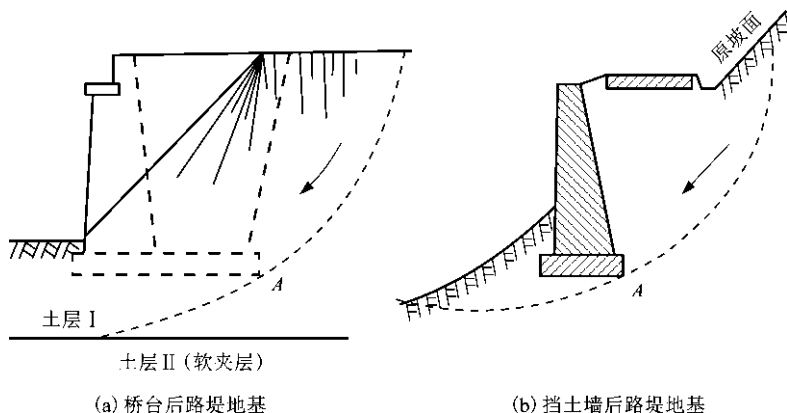


图 3-23 地基稳定性验算

当高填土的桥台基础或土坡上的挡墙地基可能出现滑动破坏或在土坡上出现开裂时,增大基础的埋置深度或采用桩基础形式,以增强墩台基础下地基的整体稳定性;或设置地面排水系统引走和拦截滑坡体以外的地表水,消除渗水造成滑动的不稳定因素。

当在拱脚水平推力作用下,拱桥桥台基础的滑动稳定性不能满足要求时,把基底四周做成齿槛,基底与土间的摩擦滑动改变为土的剪切破坏,以提高基础的抗滑力;当只受单向水平推力时,把基底设计成倾斜形,以减小滑动力,增加在斜面上的压力。同时要保持基底以下土层在施工时不受扰动。

当地基与基础的验算不满足设计规定的要求时,必须采取设计措施。对于梁桥桥台土压力引起较大倾覆力矩,基础的抗倾覆稳定性不能满足要求时,把台身做成不对称的形式,增加桥台身自重所产生的抗倾覆力矩,达到提高抗倾覆稳定性的目的。当采用这种外形时,为防止台身向后倾覆和转动,台后填土必须夯实;在墙身填筑碎石、干砌片石或填石灰土,减小倾覆力矩,增大填料的内摩擦角,减小土压力,提高抗倾覆的能力。

六、验算基础沉降

桥墩和桥台下浅基础必须在最不利荷载作用组合下验算基础的沉降。基础的沉降验算包括最终的沉降量和相邻基础沉降差验算。基础的沉降主要是土层受到竖向荷载作用产生压缩变形,基础由于地基不均匀沉降而发生沉降等。沉降量过大将影响结构物的正常使用和安全,应加以限制。在确定一般土质的地基容许承载力时,已考虑这一变形的因素,所以修建在一般土质条件下的中、小型桥梁的基础,只要满足了地基的承载力要求,地基(基础)的沉降也就满足要求。

但对于下列情况,则必须验算基础的沉降,沉降计算值应不大于规定的沉降容许值:

- (1)修建在非岩石地基上的拱桥、连续梁桥等超静定结构的基础。
 - (2)对于跨线桥、跨线渡槽要保证桥(或槽)下净空高度,预先要考虑沉降量。
 - (3)当相邻基础下地基土强度有显著不同或相邻跨度相差大而要考虑其沉降差时。
 - (4)修建在地质条件复杂、地层分布不均、承载力较小的地基土,以及软弱下卧层(压缩性高而且较厚的软黏土)的基础的沉降量计算。
- 桥梁墩台的沉降的验算,应符合下列规定:相邻墩台间不均匀沉降差值,扣除施工中的沉降,不得使桥面形成大于 2‰的附加纵坡。超静定结构桥梁墩台之间的不均匀沉降差值不但要满足上述要求,还需满足结构的受力要求。

学习任务2 重力式桥墩刚性扩大基础设计案例分析

学习情境

某三级公路某大桥全长 100 m,上部结构采用混凝土简支结构,下部结构采用浅基础,5 孔等跨。该桥墩地质水文条件如图 3-24 所示,桥墩下地质条件为黏土与亚黏土,受水流冲刷影响,水流流速 1~2 m/s,常水位 76.5 m,桥墩设计为实体墩,圆端形截面桥墩坡度为 30 : 1。墩帽为圆端形,长度为 9.1 m,宽度为 1.9 m,墩身与基础采用 C25 片石混凝土 $r_2 = 23 \text{ kN/m}^3$,墩帽采用 C25 钢筋混凝土 $r_1 = 25 \text{ kN/m}^3$ 。已知上部结构自重 2000 kN,汽车荷载采用公路-II 级荷载,请问该情景下,浅基础如何设计?需要进行哪些验算?

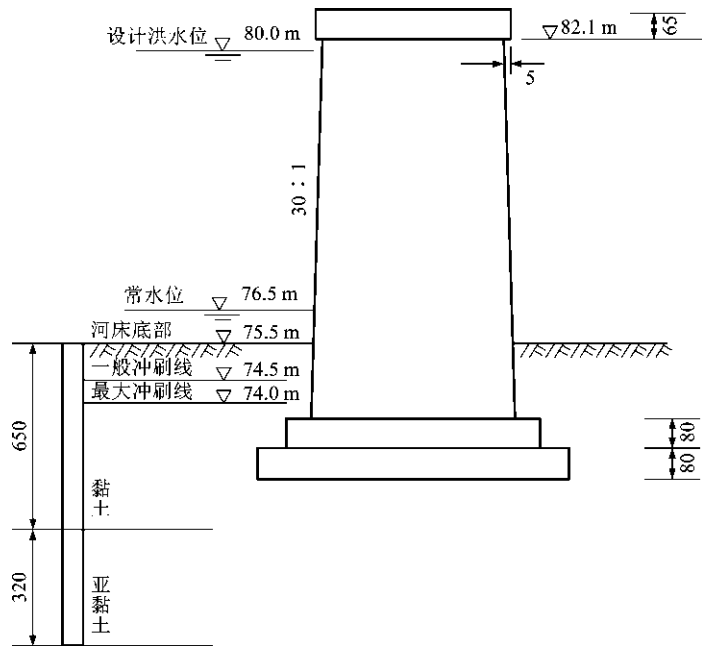


图 3-24 桥墩地质柱状图(尺寸单位: cm), 标高单位以 m 计



(一)设计资料

某钢筋混凝土简支空心板桥采用 5 孔等跨，标准跨径是 20 m，计算跨径 L_0 为 19.50 m，双车道，桥面净宽为净 7 m+2×1.0 m，一个固定支座一个滚动支座。设计荷载等级为公路-Ⅱ级荷载。墩帽采用 C25 钢筋混凝土， r_1 为 25 kN/m³，墩身和基础采用 C25 片石混凝土， r_2 为 23 kN/m³，基础刚性角为 40°。回填土 r_3 为 17 kN/m³。墩帽和墩身平面为圆端形，支座离桥墩中轴线距离为 20 cm，桥墩坡度 30：1，平面尺寸如图 3-25 所示。

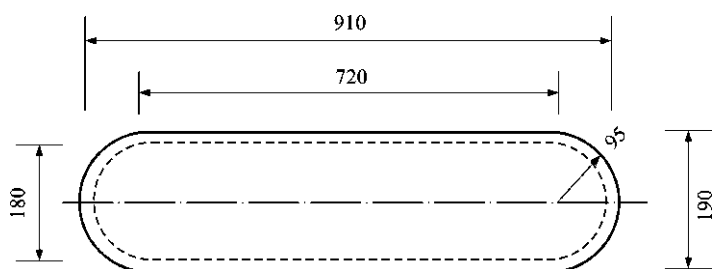


图 3-25 桥墩平面尺寸图(单位: cm)

水文、地质资料：设计洪水位高程 80.0 m，常水位 76.5 m，河床底部高程 75.5 m，一般冲刷线高程 74.5 m，最大冲刷线高程 74.0 m，基底摩擦系数 0.3。

地基土的物理性质指标见表 3-5。

表 3-5 地基土的物理性质指标表

层次	土名	层厚/m	天然状态下土的物理性质指标				塑性试验		
			天然容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	土粒容重 $\gamma_s/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	液性指数 I_L
1	黏土	6.5	19.8	27.3	23.0	0.664	33.8	15.8	0.40
2	亚黏土	3.2	18.5	27.2	29.6	0.889	34.7	19.8	0.66

按设计资料与《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)，设计该桥梁的中墩基础。

(二)确定基础埋置深度

从地质条件看，第一层黏土厚 6.5 m，液性指数 I_L 为 0.40，孔隙比 e 为 0.664，查表 1-28 承载力基本容许值 $[f_{a0}] = 328 \text{ kPa}$ ，对公路-Ⅱ级荷载而言，可作为持力层。考虑黏土 I_L 为 0.5(<1.0)，可视为不透水。常水位水深仅 1.0 m，可设计成浅基础，采用土围堰明挖

法施工。因此,初步拟定基础埋置深度为 3 m,基底高程为 74.5 m-3 m=71.5 m,桥墩顶面高程为 82.1 m,故桥墩高度为 82.1 m-71.5 m-1.6 m=9 m。由桥墩坡度为 30:1,可计算得桥墩底面长度 $l_0=9.6$ m,宽度 $b_0=2.4$ m。

(三)拟定基础尺寸

根据荷载和地基承载力情况,初步拟定基础设两层台阶,每层厚度为 0.8 m,襟边和台阶等宽,取 0.5 m。根据襟边和台阶构造要求初拟平面尺寸,如图 3-25 所示,验算不满足要求时再调整尺寸。C25 片石混凝土的刚性角 $\alpha_{\max}$ 为 40° 。基础的压力分布角为:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{0.5}{0.8} = 32^\circ < 40^\circ (\text{满足要求})$$

基础顶面尺寸为:

$$l_1 = 9.6 + 2 \times 0.5 = 10.6 \text{ m}$$

$$b_1 = 2.4 + 2 \times 0.5 = 3.4 \text{ m}$$

基础底面尺寸为:

$$l_2 = 9.6 + 4 \times 0.5 = 11.6 \text{ m}$$

$$b_2 = 2.4 + 4 \times 0.5 = 4.4 \text{ m}$$

(四) 荷载计算及组合

1. 恒载计算

(1) 上部结构 G_1 : 已知上部结构自重为 2000 kN。

(2) 墩帽 G_2 :

$$G_2 = r_1 \times V_1$$

(3) 墩身 G_3 :

$$G_3 = r_2 \times V_2$$

圆端形桥墩墩身体积计算:

$$V_2 = \frac{H(S_{\text{顶}} + S_{\text{底}} + \sqrt{S_{\text{顶}} S_{\text{底}}})}{3}$$

(4) 基础 G_4 :

$$G_4 = r_2 \times V_3$$

(5) 基础上的回填土 G_5 :

$$G_5 = r_3 \times V_4$$

式中: V_1 为墩帽体积(m^3); V_2 为墩身体积(m^3); V_3 为基础体积(m^3); V_4 为基础上回填土的体积(m^3)。恒载计算见表 3-6。

表 3-6 恒载计算表

荷载	计算公式	计算结果/kN
上部结构 G_1	已知	2000
墩帽 G_2	10.73×25	268.25
墩身 G_3	167.05×23	3842.15
基础 G_4	69.66×23	1602.18
基础上回填土 G_5	84.27×17	1432.59
Σ	$G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5$	9145.17

2. 计算可变荷载

1) 计算汽车荷载

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定,计算支座对桥上作用的汽车荷载产生反力时,应采用车道荷载。车道荷载由均布荷载和集中荷载组成,均布荷载满布于使结构产生最不利效应的同号影响线上,集中荷载只作用于相应影响线中一个最大影响线峰值处。公路-I级车道荷载的均布荷载标准值为 $q_k = 10.5 \text{ kN/m}$,桥涵计算跨径为 $5 \sim 50 \text{ m}$ 时,集中荷载标准值 $P_k = 2(L_0 + 130)$,计算剪力效应时, P_k 应乘以 1.2。公路-II级车道荷载的均布荷载标准值 q_k 和集中荷载标准值 P_k 按公路-I级车道荷载的 0.75 倍采用。

本例采用公路-II级荷载,计算跨径 $L_0 = 19.50 \text{ m}$,均布荷载满布全跨,集中荷载作用于支座处。

均布荷载标准值为: $q_k = 0.75 \times 10.5 = 7.88 \text{ kN/m}$

集中荷载标准值为: $P_k = 0.75 \times 2 \times (19.50 + 130) = 224.25 \text{ kN}$

支座反力标准值为:

$$R_1 = 0.5 \times 7.88 \times 19.50 = 76.83 \text{ kN}$$

$$R_2 = 1.2 \times 224.25 + 76.83 = 345.93 \text{ kN}$$

当桥墩左侧有汽车荷载时,汽车荷载水平力 H 为 0,汽车荷载竖向力 N 通过左侧的支座传递,且为双车道:

$$N = 2R_1 = 2 \times 76.83 = 153.66 \text{ kN}$$

支座与桥墩中轴线的距离为 0.2 m ,汽车荷载竖向力产生的力矩 M 为逆时针方向:

$$M = 153.66 \times 0.2 = 30.73 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当桥墩右侧有汽车荷载时,汽车荷载水平力 H 为 0,汽车荷载竖向力 N 通过右侧的支座传递,且为双车道:

$$N = 2R_2 = 2 \times 345.93 = 691.86 \text{ kN}$$

支座与桥墩中轴线的距离为 0.2 m ,汽车荷载竖向力产生的力矩 M 为顺时针方向:

$$M = 691.86 \times 0.2 = 138.37 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当桥墩左、右两侧均有汽车荷载时,汽车荷载水平力 H 为 0,汽车荷载竖向力 N 通过左、右两侧的支座传递:

$$N = 153.66 + 691.86 = 845.52 \text{ kN}$$

汽车荷载竖向力产生的力矩 M 为顺时针方向:

$$M = 138.37 - 30.73 = 107.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2) 计算人群荷载

人群荷载标准值为 3.0 kN/m^2 , 人行道宽度为 2 m , 支座反力标准值:

$$R_1 = R_2 = 0.5 \times 3.0 \times 2 \times 19.5 = 58.50 \text{ kN}$$

当桥墩左侧有人群荷载时, 人群荷载水平力 H 为 0 , 人群荷载竖向力 N 通过左侧的支座传递:

$$N = R_1 = 58.50 \text{ kN}$$

支座与桥墩中轴线的距离为 0.2 m , 人群荷载竖向力产生的力矩 M 为逆时针方向:

$$M = 58.50 \times 0.2 = 11.70 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当桥墩右侧有人群荷载时, 人群荷载水平力 H 为 0 , 人群荷载竖向力 N 通过右侧的支座传递:

$$N = R_2 = 58.50 \text{ kN}$$

支座与桥墩中轴线的距离为 0.2 m , 人群荷载竖向力产生的力矩 M 为顺时针方向:

$$M = 58.50 \times 0.2 = 11.70 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当桥墩左、右两侧均有人群荷载时, 人群荷载水平力 H 为 0 , 人群荷载竖向力 N 通过左、右两侧的支座传递:

$$N = 58.50 + 58.50 = 117.00 \text{ kN}$$

人群荷载竖向力产生的力矩 $M = 11.70 - 11.70 = 0$ 。

3) 计算汽车荷载制动力

汽车荷载制动力按同向行驶的汽车荷载(不计冲击力)计算, 一个设计车道上由汽车荷载产生的制动力标准值按规定的车道荷载标准值在加载长度上计算的总重力的 10% 计算, 公路-Ⅱ级汽车荷载的制动力标准值不得小于 90 kN 。同向行驶双车道的汽车荷载制动力的标准值为一个设计车道制动力标准值的 2 倍。

依照上述规定, 一个设计车道上车道荷载标准值在加载长度上计算总重力的 10% 为

$$T_1 = (224.25 + 7.88 \times 19.5) \times 10\% = 37.79 \text{ kN} < 90 \text{ kN}$$

因此取 90 kN 计算, 刚性简支梁桥墩支座传递制动力, 固定支座按 T_4 计算, 滚动支座按 $0.25T_5$ 计算, T_4 和 T_5 分别为固定支座和活动支座相应的单跨跨径的制动力, 桥墩承受的制动力为上述固定支座与活动支座传递的制动力之和。 T_4 和 T_5 双车道时为 $2 \times 90 = 180 \text{ kN}$ 。

简支梁桥墩固定支座制动力:

$$T = T_4 = 180 \text{ kN}$$

简支梁桥墩滚动支座制动力:

$$T = 0.25 \times T_5 = 45 \text{ kN}$$

当桥墩左侧有汽车荷载制动力时, 汽车荷载制动力 H 通过左侧滚动支座传递:

$$H = 45 \text{ kN}$$

由桥面与基底的竖直距离计算汽车荷载制动力产生的力矩 M , 方向按组合需要确定:

$$M = 45 \times (0.65 + 9.0 + 1.6) = 506.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

当桥墩右侧有汽车荷载制动力时, 汽车荷载制动力 H 通过右侧固定支座传递:

$$H = 180 \text{ kN}$$

由桥面与基底的竖直距离计算汽车荷载制动力产生的力矩 M ，方向按组合需要确定：

$$M=180\times(0.65+9.0+1.6)=2025\text{ kN}\cdot\text{m}$$

当桥墩左侧、右侧均有汽车荷载制动力时，汽车荷载制动力方向两侧一致：

$$H=45+180=225\text{ kN}$$

由桥面距基底的竖直距离计算汽车荷载制动力产生的力矩 M ：

$$M=225\times(0.65+9.0+1.6)=2531.25\text{ kN}\cdot\text{m}$$

4) 计算支座摩阻力

取滚动支座摩擦系数 μ 为 0.05，则支座摩阻力标准值为

$$W=0.5\times G_1=0.5\times 2000=1000\text{ kN}$$

$$F=\mu W=0.05\times 1000=50\text{ kN}>45\text{ kN}$$

以上对制动力和支座摩阻力的计算结果表明，制动力小于支座摩阻力。根据规定，活动支座传递的制动力，其值不应大于其摩阻力；当大于摩阻力时，按摩阻力计算。可变作用组合时，制动力和支座摩阻力不可同时组合。因此，不考虑支座摩阻力的荷载组合，活动支座制动力按其计算结果计。

3. 荷载组合

根据规定，在进行结构设计时，应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行作用效应组合，取其最不利效应组合进行设计。当结构需做不同受力方向的验算时，则应以不同方向的最不利效应进行组合。当可变作用的出现对结构产生有利影响时，该作用不参与组合。

根据实际可能出现的荷载情况，可按以下几种状况进行荷载组合：桥墩左侧有活载；桥墩右侧有活载；桥墩左、右两侧均有活载；施工期间桥墩仅受自重及土压力作用。各种组合的荷载标准值汇总如表 3-7 所示。

表 3-7 桥墩作用效应标准值汇总表

工作状态		桥墩左侧有活载时			桥墩右侧有活载时		
作用类别		水平力/kN	竖直力/kN	力矩/(kN·m)	水平力/kN	竖直力/kN	力矩/(kN·m)
永久作用	结构重力	0	7712.58	0	0	7712.58	0
	土的重力	0	1432.59	0	0	1432.59	0
可变作用	汽车荷载	0	153.66	-30.73	0	691.86	138.37
	人群荷载	0	58.50	-11.70	0	58.50	11.70
	汽车制动力	±45.00	0	±506.25	±180.00	0	±2025.00
	支座摩阻力	0	0	0	0	0	0
Σ		-45	9357.33	-548.68	180.00	9895.53	2175.07
工作状态		桥墩左、右两侧均有活载时			施工期无上部构造时		
作用类别		水平力/kN	竖直力/kN	力矩/(kN·m)	水平力/kN	竖直力/kN	力矩/(kN·m)
永久作用	结构重力	0	7712.58	0	0	7712.58	0
	土的重力	0	1432.59	0	0	1432.59	0

续表3-7

工作状态		桥墩左、右两侧均有活载时			施工期无上部构造时		
作用类别		水平力/kN	竖直力/kN	力矩/(kN·m)	水平力/kN	竖直力/kN	力矩/(kN·m)
可变作用	汽车荷载	0	845.52	107.64	0	0	0
	人群荷载	0	117.00	0	0	0	0
	汽车制动力	±225.00	0	±2531.25	0	0	0
	支座摩阻力	0	0	0	0	0	0
Σ		225.00	10107.69	2638.89	0	9145.17	0

注：水平力以右为正，力矩以顺时针为正。

(五)验算地基承载力

1. 计算基底应力

根据规定，按基础底面积验算地基承载力时，传至基础或承台底面上的荷载效应应采用正常使用极限状态下作用短期效应组合值，相应的抗力应采用地基承载力容许值。经试算，桥墩左、右两侧均有汽车荷载的作用组合为计算基底应力的最不利效应组合。

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{\sum p}{A} \pm \frac{\sum M}{W} = \frac{10107.69}{4.4 \times 11.6} \pm \frac{2638.89}{\frac{1}{6} \times 11.6 \times 4.4^2} = \frac{268.53}{127.53} \text{ kPa}$$

2. 计算持力层承载力

根据土工试验资料，持力层为一般黏性土，根据《公路桥涵地基与基础设计规范》，当 $e = 0.664$ ， $I_L = 0.40$ 时，查表 1-26 得承载力基本容许值 $[f_{a0}] = 328 \text{ kPa}$ 。因基础埋置深度为 $h = 3.0 \text{ m}$ （从一般冲刷线算起），不考虑深度修正，查表 1-27 得宽度修正系数 K_1 为 0，宽度也无须修正。但因持力层不透水，应考虑地面水影响。

$$h_w = 76.5 - 74.5 = 2.0 (\text{m})$$

所以 $[f_a] = [f_{a0}] + 10h_w = 328 + 10 \times 2.0 = 348 (\text{kPa})$

地基承受的作用效应为偶然荷载组合时， γ_R 取 1.25，故

$$\gamma_R [f_a] = 1.25 \times 348 = 435 \text{ kPa} > 268.53 \text{ kPa}$$

满足要求。

3. 计算下卧层应力

下卧层为一般亚黏土，由 $e = 0.889$ ， $I_L = 0.66$ 可查表 1-26 得承载力基本容许值 $[f_{a0}] = 187.74 \text{ kPa}$ ，小于持力层容许承载力，故为软弱下卧层，应进行下卧层承载力验算。

下卧层顶面处的应力 p_z 为：

$$p_z = \gamma_1(h+z) + \alpha(p - \gamma_2 h)$$

其中， h 从一般冲刷线算起， $h = 3.0 \text{ m}$ ，基底至下卧层顶面处的距离为 $z = 6.5 - 4.0 = 2.5 \text{ m}$ ， $(h+z)$ 和 h 范围内均为黏土，计算时按其天然容重计算。

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 19.8 \text{ kN/m}^3。$$

当 $a/b = 11.6/4.4 = 2.64$ ， $z/b = 2.5/4.4 = 0.57$ ，附加应力系数 $\alpha = 0.235$ ，且计算下卧层

顶面处压应力 p_z 时, $z/b < 1$, 基底压应力取平均值, 即

$$p = \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2} = \frac{268.53 + 127.53}{2} = 198.03 \text{ kPa}$$

所以

$$p_z = 19.8 \times (3 + 2.5) + 0.235 \times (198.03 - 19.8 \times 3) = 141.48 \text{ kPa}$$

4. 验算软弱下卧层强度

因持力层不透水, 可计入水深修正, 软弱下卧层顶面处的容许承载力为

$$[f_a]_{h+z} = [f_{a0}] + K_1 \gamma_1 (b-2) + K_2 \gamma_2 (h+z-3) + 10h_w$$

由下卧层一般性亚黏土 $I_L = 0.66 > 0.5$ 查表 1-27 得, 深度修正系数 $K_1 = 0$, 宽度修正系数 $K_2 = 1.5$, γ_2 为下卧层以上土层平均重度, 由于持力层不透水, 采用黏土层的饱和容重, 且考虑地面水影响。

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} = \frac{27.3 + 0.664 \times 10}{1+0.664} = 20.40 \text{ kN/m}^3$$

$$[f_a]_{h+z} = 187.74 + 1.5 \times 20.40 \times (3 + 2.5 - 3) + 10 \times 2.0 = 284.24 \text{ kPa}$$

$$\gamma_R [f_a]_{h+z} = 1.25 \times 284.24 = 355.30 \text{ kPa} > 141.48 \text{ kPa}$$

满足要求。

(六) 验算基底偏心距

控制基底合力偏心距的目的是尽可能使基底应力分布比较均匀, 以免基础产生较大的不均匀沉降, 使墩台倾斜, 影响正常使用。经试算, 在桥墩左、右两侧均有汽车荷载的状况下, 为最不利效应组合。

偏心距应满足 $e_0 \leq \rho$ 。

$$\rho = \frac{W}{A} = \frac{1}{6}b = \frac{1}{6} \times 4.4 = 0.73 \text{ m}$$

$$e_0 = \frac{\sum M}{\sum N} = \frac{2638.89}{10107.69} = 0.26 < \rho = 0.73 \text{ m}$$

满足要求。

(七) 验算基础稳定性

根据规定, 在验算基础稳定性时, 作用效应采用承载能力极限状态下作用效应的基本组合, 但其分项系数均为 1.0。

1. 验算倾覆稳定性

经验算, 在桥墩左、右两侧均有汽车荷载的状况下为最不利作用效应组合。抗倾覆稳定性系数 k_0 应满足

$$k_0 = \frac{s}{e_0} > 1.5$$

其中, $e_0 = 0.26 \text{ m}$, $s = b/2 = 4.4/2 = 2.2 \text{ m}$ 。

$$k_0 = \frac{2.2}{0.26} = 8.46 > 1.5$$

满足要求。

2. 验算滑动稳定性

基底摩擦系数为 $\mu=0.3$ ，作用效应组合以在桥墩左、右两侧均有汽车荷载的状况下为最不利作用效应组合。抗滑动稳定性系数 k_0 应满足

$$\kappa_c = \frac{\mu \sum P_i + \sum H_{ip}}{\sum H_{ia}} > 1.3$$

其中， $\sum P_i = 10107.69 \text{ kN}$ ， $\sum H_{ip} = 0$ ， $\sum H_{ia} = 225.0 \text{ kN}$ 。

$$\kappa_c = \frac{0.3 \times 10107.69}{225.0} = 13.48 > 1.3$$

满足要求。

(八) 验算地基沉降

本桥为静定桥梁，跨径不大，且地基土质良好，可不必计算沉降。

单元知识巩固和拓展



一、知识要点汇总

1. 基础埋置深度的确定应考虑：工程的地质因素；河流的冲刷因素，地基的冻结因素，桥梁的上部结构形式，当地的地形因素，保证稳定所需的最小埋置深度。

2. 基础悬出总长度，应使悬出部分在基底反力作用下，在 $a-a$ 截面所产生的弯曲拉力和剪应力不超过基础圬工的强度限值，这时墩台边缘处的垂线与基底边缘的连线间的最大夹角 $\alpha_{\max}$ ，称为刚性角。

3. 刚性扩大基础设计与计算的主要内容：①选择合适的持力层放置基础，计算基础的埋置深度。②拟定基础的各项尺寸：基础的高度、平面尺寸、立面尺寸。③计算基底受到的各项恒载、活载等荷载，考虑不同状态下的荷载组合方式，进行组合计算，为后续指标验算做准备。④验算地基承载力：计算基础底面的基底压力。验算地基持力层的承载力、验算软弱下卧层的承载力。⑤验算基础底面合力偏心距大小。⑥验算基础的稳定性：验算基础倾覆稳定性；验算基础滑动稳定性。⑦验算基础沉降大小。



二、习题练习

(一) 单选题

1. 在一般情况下，大、中桥墩、桥台混凝土基础厚度为()，在地质条件特别好的岩层上修建大型桥梁也可以采用浅基础。

- A. 0~1 m B. 0.5~1.0 m
C. 1.0~2.0 m D. 1.5~3 m

2. 满足强度要求时墩台边缘处的垂线与基底边缘的连线间的最大夹角叫()。它的大小和基础所用的圬工材料强度相关。

- A. 刚性角 B. 扩散角 C. 摩擦角 D. 内角



习题练习答案

3. 桥墩和桥台下浅基础必须按()验算地基的承载能力。地基承载力验算包括先确定地基容许承载力、验算持力层承载力、验算软弱下卧层承载力。

- A. 承载力极限状态
- B. 正常使用极限状态
- C. 最有利荷载作用组合下
- D. 最不利荷载作用组合下

4. 为了避免桥梁墩和桥台基础四周和基础底部土层被水流冲刷掏空冲走而导致失稳倒塌,在有冲刷的河流中,基础必须埋置一定安全深度,规范要求基底必须埋置在设计洪水位最大冲刷线()以上。

- A. 0.5 m
- B. 1.0 m
- C. 1.5 m
- D. 2.0 m

5. 为了保证地基和基础的整体稳定性,要求基础(除岩石地基外)的埋置深度应在天然地面或无冲刷河底大于()。

- A. 0.5 m
- B. 1.0 m
- C. 1.5 m
- D. 2.0 m

6. 桥梁墩台基础()的目的是尽可能使基底压应力分布比较均匀,以免基底两侧应力相差过大,使基础产生较大的不均匀沉降,使桥梁的墩、台发生倾斜,影响正常使用。

- A. 验算基底的偏心距
- B. 验算沉降
- C. 验算稳定性
- D. 验算强度

7. 在季节性冻土地区某人口大于 100 万的城市市区内修建一桥梁,桥址区地形平坦,地基土为黏性土,标准冻深为 1.60 m。冻前地基土的天然含水量 $w = 21\%$,塑限含水率 $w_p = 17\%$,冻前地下水位埋深 3.0 m,按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019),该桥址区的设计冻深最接近下列哪个选项的数值?()

- A. 1.22 m
- B. 1.30 m
- C. 1.45 m
- D. 1.50 m

8. (2019 年注册岩土工程师试题)确定基础埋置深度时,可不考虑下列哪个因素?()

- A. 扩展基础的配筋量
- B. 基础的类型
- C. 场地的冻结深度
- D. 建筑物的抗震要求

(二) 多选题

1. 基础埋置深度影响因素有哪些?()。

- A. 工程的地质因素
- B. 河流的冲刷因素
- C. 地基的冻结因素
- D. 桥梁的上部结构形式
- E. 当地的地形因素
- F. 保证稳定所需的最小埋置深度

2. 刚性扩大基础尺寸的拟定主要包括()。

- A. 高度尺寸(H)拟定
- B. 平面尺寸长宽(a, b)拟定
- C. 立面尺寸(襟边、扩散角、台阶宽度)

(三) 简答题

1. 刚性扩大基础设计与计算的主要内容是什么?

2. 地基不均匀沉降对工程有什么影响?

3. 在工程设计、施工和维护中,减轻建筑物不均匀沉降危害的措施有哪些?



三、知识点拓展

不同行业规范浅基础地基承载力的计算比较

常用地基承载力的计算方法有理论公式计算法、现场试验法、经验公式法等等。下面以经验公式法为例,查阅不同的行业规范,具体介绍下(公路和铁路桥梁下的地基,建筑地基)等不同行业领域内地基承载力的计算区别。

《公路桥涵地基基础设计规范》(JTG3363—2019)第4.3.4条地基承载力公式: $f_a = f_{a_0} + k_1 \gamma_1 (b-2) + k_2 \gamma_2 (h-3)$,式中:地基承载力基本容许值 f_{a_0} 可根据岩土类别、状态及其物理力学特性指标查表选用;宽度 b 取值范围为 $2\text{ m} \leq b \leq 10\text{ m}$;埋深 h 小于 3 m 时, h 取 3 m , h/b 大于 4 时, h 取 $4b$,埋深扣除 3 m ,与建筑地基基础设计规范不同。

《建筑地基基础设计规范》(GB5007—2011)第5.2.6条岩石地基承载力特征值一般根据岩石载荷试验方法确定,对于破碎、极破碎的岩石地基承载力特征值可根据平板载荷试验确定,对于完整、较完整和较破碎的岩石地基可根据室内饱和单轴抗压强度试验确定, $f_a = \psi_r \cdot f_{rk}$,其中折减系数由岩体完整程度确定选定。

《铁路桥涵地基基础设计规范》(TB10093—2017)第4.1.3条地基承载力公式: $[\sigma] = \sigma_0 + k_1 \gamma_1 (b-2) + k_2 \gamma_2 (h-3)$,式中:修正系数 k_1 、 k_2 与土的类别、状态及其物理力学特性指标有关;宽度 b 取值范围为 $2\text{ m} \leq b \leq 10\text{ m}$;埋深 h 小于 3 m 时, h 取 3 m , h/b 大于 4 时, h 取 $4b$,与公路桥涵地基基础设计规范相似。

(参考文献——浅谈不同行业规范中浅基础地基承载力计算)

单元三 浅基础施工



学习目标

【知识目标】

1. 知道旱地浅基础的基坑开挖施工工艺。
2. 知道旱地浅基础的基坑排水施工工艺。
3. 理解水中刚性扩大基础施工的工艺流程。
4. 理解旱地和水中浅基础施工的区别。

【能力目标】

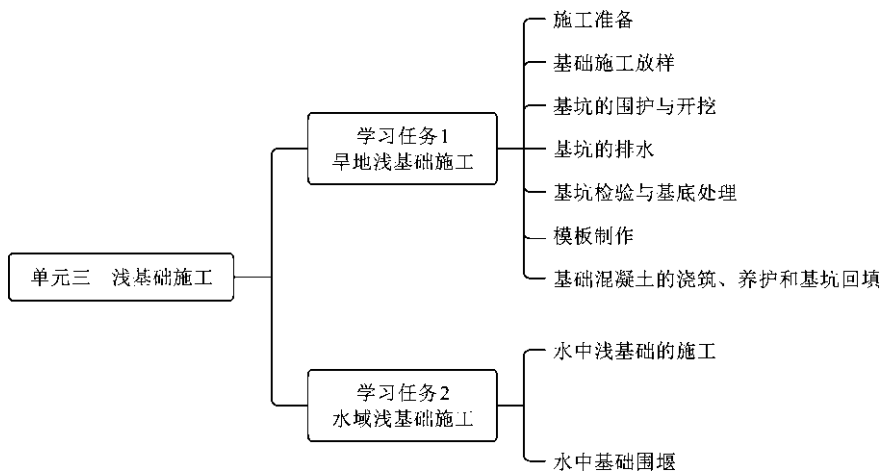
1. 能根据不同环境选择合适的浅基础进行施工。
2. 能处理浅基础施工中的简单技术问题。
3. 能辨别水中浅基础和旱地浅基础施工的异同。

【素质目标】

1. 培养自主学习、创新思维、施工逻辑分析能力。
2. 培养认真负责、吃苦耐劳、团结协作的职业素养。
3. 培养质量意识、安全意识、环保意识。



学习导图



学习任务1 旱地浅基础施工



学习情境

2021年10月2日凌晨,某地铁9号线道路恢复工程,在施工单位组织进行基坑开挖及地下污水管安装施工时,发生了一起基坑坍塌事故,造成两人死亡,直接经济损失约350万元。经调查,事故发生经过如下:2021年10月1日22时,施工单位为赶工程进度,在道路交叉口东北角,组织现场负责人和施工员等10人及1台挖掘机,开展地面开挖及地下污水管铺设作业。2日凌晨1时10分左右,形成上口宽约3m、下底宽约1.2m、深约4m的基坑作业面,基坑未支护、未放坡。而后两名工人分别乘用挖掘机挖斗和安全绳下到坑底,对污水井底部南侧预留的直径约60cm的孔洞进行清理,以便后续安装直径60cm的污水管。2日凌晨,这两名工人在坑底进行清理作业时,基坑东侧堆土突然坍塌,坍塌面约2m×4m,大量坍塌的回填土将两人掩埋。

事故调查报告指出,事故直接原因是施工单位未按专项施工方案进行施工,选择在基坑东侧一侧堆土,且堆土紧挨基坑边缘。堆土高度偏高、坡度不足,而开挖堆土处于松散状态,黏聚力偏低。在不能保证堆土坡度的情况下,现场同时存在施工振动荷载,堆土产生滑移坍塌,造成事故。施工总包单位制定专项施工方案时,表明基坑开挖深度均不大于3m,但是现场实际测量基坑开挖深度大于4.2m。方案未涉及开挖深度超过3m时的技术要求和安全措施等相关内容。这个案例警示我们施工质量和安全不可麻痹大意。浅基础施工也有基坑作业,基坑施工常采用人工和机械结合的方法,施工人员更需要具备规范的施工管理和安全施工意识,切不可存在侥幸心理。



知识导航

天然地基上浅基础的施工是工程中常见的基础性施工。随着行业的不断发展,涉及多种结构物类型和多种施工环境,针对不同结构物形式和不同地基形式采用不同的施工方法。天然地基分为旱地上浅基础、水中浅基础两种形式。下面主要围绕旱地上浅基础施工工艺、施工特点、施工要点进行介绍。

天然地基上浅基础通常采用敞口开挖基坑,在基坑开挖和砌筑时,会在基坑边缘至基础边缘留出适当的排水和施工范围,使得基坑坑底比基础底部面积大,因此,我们常把浅基础施工称为明挖扩大基础施工。

浅基础施工的特点:施工方法简单,施工的作业面、工作面大,施工的成本低,施工的时间短。

旱地上浅基础施工流程主要包括:施工准备,施工放样,基坑的围护与开挖,基坑的排水,基坑检验与基底处理,基础混凝土浇筑,基础的养护与拆模,隐蔽检查,基坑回填。浅基础施工的工艺流程如图3-26所示,下面针对部分工艺流程简单介绍下。

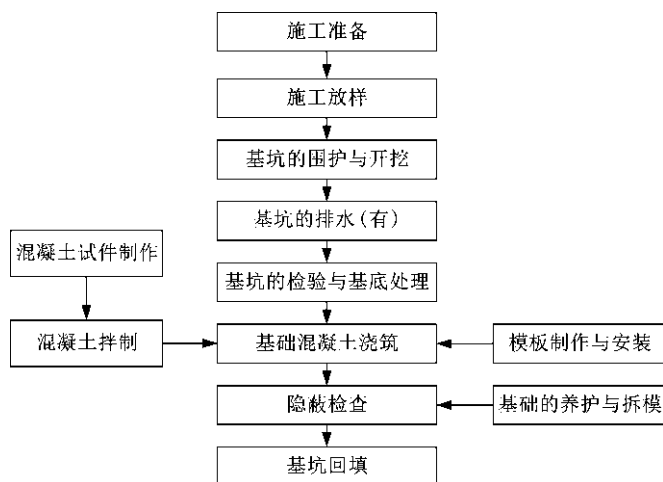


图 3-26 浅基础施工工艺流程

一、基础施工放样

基坑的放样指通过施工放样把基坑的平面位置和高程，用一定的测量仪器和方法测设到实地上去，为后期的基坑开挖施工提供依据。

(一) 基坑平面放样

基坑平面放样流程：利用控制测量网，通过全站仪定出墩台基础的中心位置，然后在中心位置上安置全站仪，以桥梁线路中心线为基准，放出桥梁墩台的纵横向中线。在纵横向中线的每端至少设置 2 个方向控制护桩。护桩必须位于基坑开挖范围以外的可靠点。最后，按十字线测设基坑开挖边线，定出边线在十字线上及交角处的桩点，用白灰连成线，确定基坑开挖范围，图 3-27 为基坑平面位置放样图。

1. 确认基坑底部形状

基坑开挖时为满足基坑内结构物的施工条件，要考虑支护结构位置、排水沟位置、施工空间、开挖误差、砌筑施工等，需要将基础尺寸放大，基坑尺寸要比基底尺寸每边大 0.5~1.0 m。如图 3-27 所示， a 、 b 、 c 、 d 为基础底部边角， A' 、 B' 、 C' 、 D' 为基坑底部四角的边桩。基坑底部形状大部分比较简单，多为四边形，但也有基坑底部形状比较复杂的。

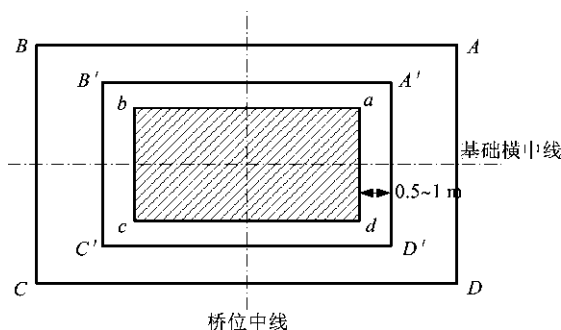


图 3-27 基坑平面位置放样图

2. 确定基坑边坡坡度

有无支护结构、基坑土层类型决定了开挖边坡坡度，坡度确认直接关系到边坡稳定性，坡度的大小也决定了基坑开挖方的大小。施工人员应该根据技术部门的技术交底，在测量前确认开挖坡度。

基坑平面位置测定后,打上护桩,画上白线就可以开挖了,十字护桩打在基坑顶面范围之外,以确保基坑开挖时检验基坑的中心位置。如图 3-27 所示, A 、 B 、 C 、 D 为基坑顶部四角的边桩。

(二) 基坑高程放样

如果对坑底高程精度要求不高,全站仪能测设到底部,可以使用全站仪进行测量;如果对高程精度要求高,必须用水准仪测设。用水准仪测量高程时,因为地面与坑底高差大,在水准仪上看不到标尺,只能使用高程传递的方法。可将地面高程点传到坑底,然后进行坑底测设,借助钢尺将地面水准点的高程传递到在坑底所设置的临时水准点上,再根据临时水准点测设其他各点的设计高程。

二、基坑的围护与开挖

天然地基上的浅基础的施工一般采用明挖的方法进行,基坑可用机械或人工开挖。明挖基坑应尽量在枯水或少雨季节进行,且不宜间断,接近基底设计标高应留 30 cm 高度由人工开挖,以免破坏基底土壤结构。挖至基底设计标高时应立即对基底土质及坑底情况进行检验,验收合格后应尽快修筑基础,不得将基坑暴露过久。

明挖浅基础基坑开挖,当开挖深度大的时候,要考虑基坑边坡的稳定。土质良好时,常用的方法就是放坡;当土质不好或者没有放坡条件时,基坑开挖就需要考虑围护。

基坑的围护是临时性结构。基坑围护的作用就是挡土、挡水、控制边坡变形。其主要目的是为地下施工创造安全的施工环境;确保基坑周边既有建筑物的安全性,保障环境安全;确保基坑开挖和基础结构施工安全、顺利;保证主体工程地基及桩基的安全,防止地面出现塌陷、坑底出现管涌等现象。

基坑断面类型需要考虑土的类别和性状、是否设坑壁围护结构、基坑暴露时间、基坑开挖时的天气、地下水位、土的透水性、建筑场地大小等多种因素综合确定。

(一) 无围护基坑施工

当基坑较浅,地下水位较低或渗水量较少,不影响坑壁稳定时,可将坑壁挖成竖直或斜坡形。竖直坑壁只适宜在岩石地基或基坑较浅又无地下水的坚硬黏土中采用。在一般土质条件下开挖基坑时,应采用放坡开挖的方法。无围护基坑边坡类型如图 3-28 所示。

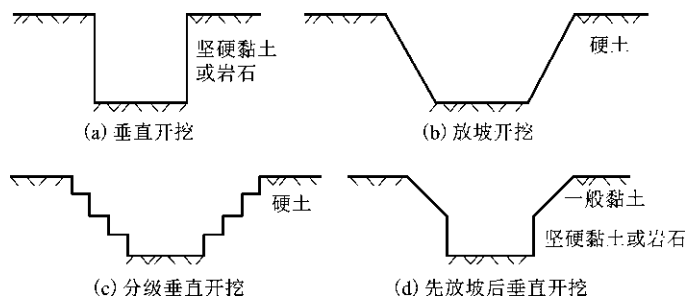


图 3-28 无围护基坑边坡

基坑可采用人工开挖或机械开挖,开挖至基底设计标高以上 30 cm 时应由人工开挖,以免破坏基底土壤结构。人工开挖采用铁锹、手推车、小白线、铅丝、钢卷尺、坡度尺等,机械开挖采用挖土机、推土机、自卸汽车等。

(二)有围护基坑施工

1. 挡板支撑

挡板支撑适用于开挖面积较小和深度较浅的基坑,挡板厚 4~6 cm,可直立或横放,再用横放或竖放加横撑木支撑。挡板支撑的特点是先开挖,后设围护结构。挡板支撑的作用是挡土。为便于挖掘运土,上、下支撑应设在同一垂直面内。对黏性和稳定性较好的土质,可一次挖至基底后再安装挡板支撑;对黏性差、易坍塌的土,可分段下挖,随挖随撑。

2. 板桩墙支护

板桩是在基坑开挖前先垂直打入土中至坑底以下一定深度,然后边挖边设支撑,开挖基坑过程始终是在板桩支护下进行的。

板桩墙有木板桩、钢筋混凝土板桩和钢板桩三种,最常用的是钢板桩,它拼接方便,可重复使用,较深的水中围堰也常用到钢板桩。

板桩墙分无支撑式[图 3-29(a)]、支撑式和锚撑式[图 3-29(d)]。支撑式板桩墙按设置支撑的层数可分为单支撑板桩墙[图 3-29(b)]和多支撑板桩墙[图 3-29(c)]。由于板桩墙多应用于较深基坑的开挖,故多支撑板桩墙应用较多。

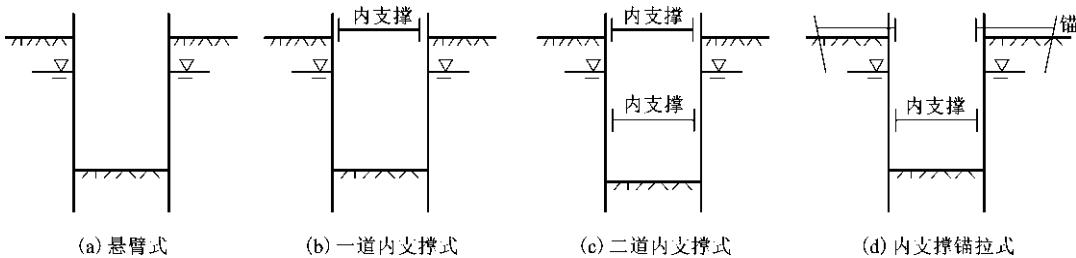


图 3-29 板桩墙支护

3. 喷射混凝土护壁

喷射混凝土护壁宜用于土质较稳定,渗水量不大,深度小于 10 m,直径为 6~12 m 的圆形基坑。对于有流沙或淤泥夹层的土质,也有使用成功的实例。喷射混凝土护壁的基本原理是以高压空气为动力,将搅拌均匀的砂、石、水泥和速凝剂干料,由喷射机经输料管吹送到喷枪,在通过喷枪的瞬间,加入高压水进行混合,自喷嘴射出,喷射在坑壁上,形成环形混凝土护壁结构,以承受土压力。

4. 混凝土围圈护壁

采用混凝土围圈护壁时,基坑自上而下分层垂直开挖,开挖一层后随即灌注一层混凝土壁。为防止已浇筑的围圈混凝土施工时因失去支撑而下坠,顶层混凝土应一次整体浇筑,以下各层均间隔开挖和浇筑,并将上、下层混凝土纵向接缝错开。开挖面应均匀分布对称施工,及时浇筑混凝土壁支护,每层坑壁无混凝土壁支护总长度应不大于周长的一半。分层高度以垂直开挖面不坍塌为原则,一般顶层高 2 m 左右,以下每层高 1~1.5 m。混凝土围圈护

壁也是用混凝土环形结构承受土压力,但其混凝土壁是现场浇筑的普通混凝土,壁厚较喷射混凝土大,一般为 15~30 cm,也可按土压力作用下环形结构计算。

喷射混凝土护壁要求有熟练的技术工人和专用设备,对混凝土用料的要求也较严格,用于超过 10 m 的深基坑尚无成熟经验,因而有其局限性。混凝土围圈护壁则适应性较强,可以按一般混凝土施工,基坑深度可为 15~20 m,除流砂及呈流塑状态黏土外,可适用于其他各种土类。

5. 桩体围护

桩体围护用在软弱土层的较深的基坑中,以深层搅拌桩、粉体喷射搅拌桩、旋喷桩等为主,按密排或格框形布置成连续墙,以形成支撑结构代替板桩墙等,多用于市政工程、工业与民用建筑工程,桥梁工程中也有应用。

三、基坑的排水

基坑如在地下水位以下,随着基坑的下挖,渗水将不断涌入基坑,因此施工过程中必须不断将渗入基坑中的水排出去,以保持基坑的干燥,一般要不断地边排水边往下开挖,便于基坑挖土和基础的砌筑与养护。基坑排水的目的在于当外界降水或者地下水渗入基坑时,仍能保证开挖基坑作业在无水或少水的情况下进行。目前常用的基坑排水方法有表面排水法(集水坑排水法)和井点降水法两种。

(一)表面排水法

它是在基坑整个开挖过程及基础砌筑和养护期间,在基坑四周开挖集水沟汇集坑壁及基底的渗水,并引向一个或数个比集水沟挖得更深一些的集水井,如图 3-30 所示。分别为表面排水法、平面图、剖面图。集水沟和集水井应设在基础范围以外,在基坑每次下挖以前,必须先挖沟和井。集水井的深度应大于抽水机吸水龙头的高度。应在吸水龙头上套竹筐围护,以防土石堵塞龙头。

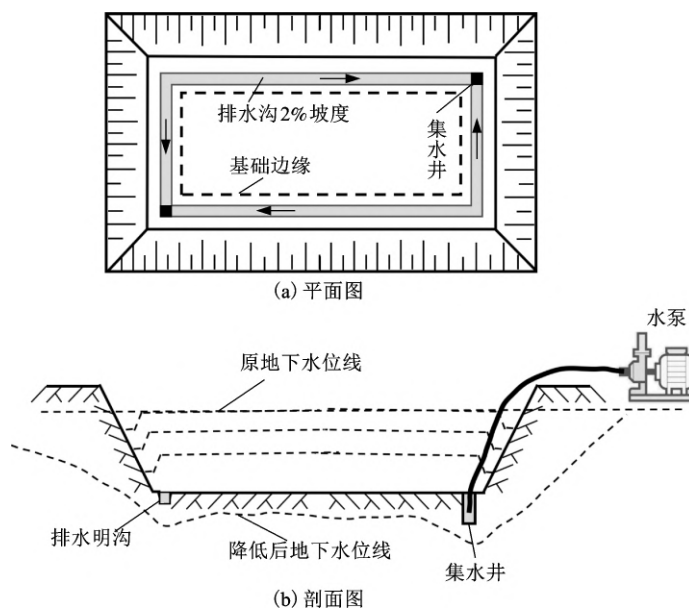


图 3-30 表面排水法

这种排水方法设备简单、费用低，一般土质条件下均可采用。除有严重流沙的基坑不宜采用，因为当地基土为饱和粉细砂土等黏聚力较小的细粒土层时，由于抽水会引起流砂现象，造成基坑破坏和坍塌，因此当基坑为这类土时，应避免采用表面排水法。

(二)井点降水法

对粉质土、粉砂类土等，如果采用表面排水，极易引起流砂现象，影响基坑稳定，此时可采用井点降水法排水。根据使用设备的不同，井点主要有轻型井点、喷射井点、电渗井点和深井泵井点等多种类型，可根据土体渗透系数，要求降低水位的深度及工程特点选用。井点降水法适用于旱地上土质为透水性较大的亚砂土、细砂、粉砂土地基。

轻型井点降水法是在基坑开挖前预先在基坑四周打入(或沉入)若干根井管，井管下端1.5 m 左右为滤管，上面钻有若干直径约2 mm 的滤孔，外面用过滤层包扎起来。各个井管用集水管连接并抽水。由于井管两侧一定范围内的水位逐渐下降，各井管相互影响形成了一个连续的疏水区。在整个施工过程中保持不断抽水，以保证在基坑开挖和基础砌筑的整个过程中基坑始终保持无水状态。该法可以避免发生流砂和边坡坍塌现象，且流水压力对土层还有一定的压实作用，如图 3-31 所示。

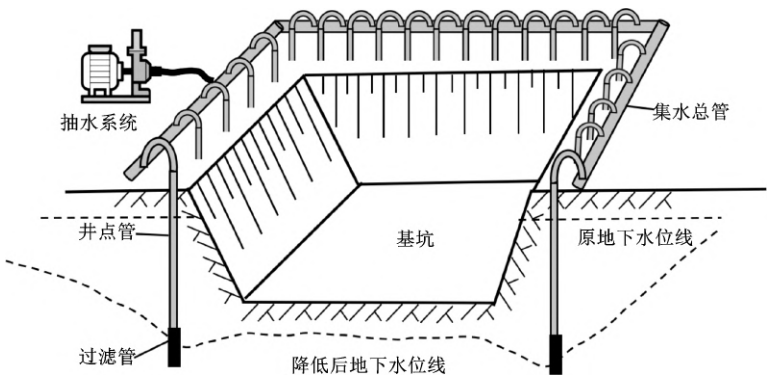


图 3-31 井点降水法

四、基坑检验与基底处理

(一)基坑检验

挖好基坑，在基础浇筑前应进行基坑的检验。施工现场实行三检制，即队伍自检合格、报项目部验收合格、报监理验收合格。当各项指标符合要求后，进行下道工序施工。

不同结构物对地基的要求不同，基础形式不同，验收的内容也不同。基坑检验的主要内容有：

(1) 根据设计图纸，检查基底平面位置、



图 3-32 基坑承载力的检验

尺寸大小、基底标高是否与设计图纸相符。

(2) 检查坑壁、基坑土质、地下水情况是否与勘察报告相符；核对基底的地质情况和承载力是否与设计资料相符，如图 3-32 所示。

(3) 检查基底处理、排水情况是否符合规范要求。

(4) 检查施工记录及有关试验资料等。

(二) 基底处理

对于不同地质、水文情况的基底，需要采用不同方式处理，使其符合设计和规范的要求，如图 3-33 所示。

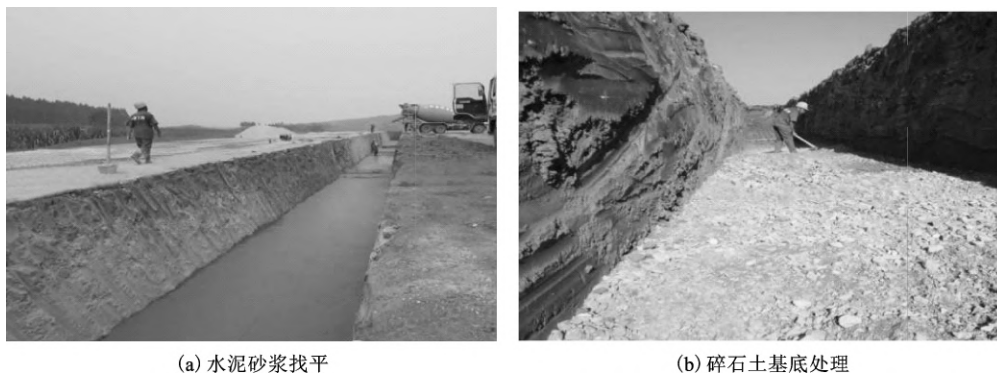


图 3-33 水泥砂浆找平基底和碎石土基底处理

(1) 岩层基底：将未风化岩面清理干净，风化岩面按基础尺寸凿除。倾斜大的岩层宜凿成多级台阶，台阶宽度不小于 0.3 m。施工前应润湿，铺一层厚 20~30 mm 的水泥砂浆找平，然后在水泥砂浆凝结前浇筑基础混凝土。

(2) 碎石类或砂类土：对于强度和稳定性满足设计要求的，将承重面修理平整；砌筑前铺一层 20~30 mm 厚的水泥砂浆找平。

(3) 黏性土：天然状态铲平；或向基底夯入 10 cm 碎石作为隔离层。

(4) 泉眼：可向泉眼内压注速凝水泥砂浆，再打入木塞堵眼处理。堵眼困难时将水引流排出。

不论采取哪种方式处理，均不能使基底浸泡在水中。

五、模板制作

(一) 模板的制作

(1) 钢模板应按批准的加工图进行制作，成品经检验合格后方可使用。组装前应对零部件的几何尺寸和焊缝进行全面检查，合格后方可进行组装。

(2) 制作钢木组合模板时，钢与木之间的接触面应贴紧。

(3) 木模板与混凝土接触的表面应抛光且应保持平整。木模板的接缝可制作平缝、搭接缝或企口缝，当采用平缝时，应有防止漏浆的措施；转角处应加嵌条或做成斜角。

(二)模板的安装

- (1)模板应按设计要求准确就位,且不宜与脚手架连接。
- (2)安装侧模板时,支撑应牢固,应防止模板在浇筑混凝土时产生移位。
- (3)在模板安装过程中,必须设置防倾覆的临时固定设施。
- (4)模板安装后,其尺寸、平面位置和顶部高程等应符合设计要求,节点联系应牢固。
- (5)固定在模板上的预埋件预留孔洞均不得遗漏,安装应牢固,位置应准确。

六、基础混凝土的浇筑、养护和基坑回填

基础混凝土的浇筑在基坑检验和基底处理完成以后,当基础混凝土模板安装制作完毕开始进行。刚性基础(石砌基础)在砌筑中应使石块大面朝下,外圈块石必须座浆,要求丁顺相间,以加强石块间的连接,每层均应保持基本水平。圬工在终凝后才允许浸水,不浸水部分仍须养护。基础浇筑完成后,按设计和施工要求养护一定时间,基坑回填前需要进行隐蔽检查,主要是检查基础施工质量和各部分尺寸是否符合设计要求,如无问题,即可选土质较好的土回填基坑,要求分层夯实,每层回填土厚度约为 30 cm,切勿用其他不合适的土层一次性回填到位。

学习任务 2 水域浅基础施工



学习情境

当建筑物(构筑物)穿越有水的环境时,可能很多人都会有疑惑:这些建筑物(构筑物)的基础是如何在水中施工呢?真相是利用围堰。古代基础施工往往采用土质材料、木质材料、石质材料来支撑,当水深较大时,会利用木质材料砌成围挡,中间填充泥土,形成临时性的挡墙,类似于当今的围堰,如图 3-34 所示。那么围堰到底是什么?它发挥了什么作用呢?浅基础施工中围堰有哪些类型?

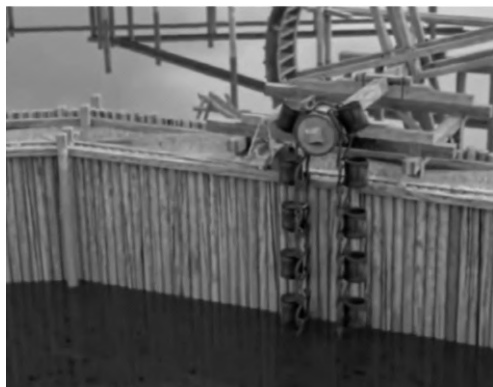


图 3-34 古代水中围堰



知识导航

一、水域浅基础的施工

水中浅基础施工主要在于有水的因素影响,每个施工环节都需要考虑水的影响因素,从技术、材料、设备、人员等各方面做相应的调整。具体工艺流程如图 3-35 所示。在施工放样后需要进行水中基础的围堰施工,根据围堰的类型通常需要结合水的深浅、通航要求、地质条件、施工因素、经济情况等各个方面综合进行选择。基坑的排水,根据情况可以排水也可

以不排水进行施工，进行基底处理时需要把基坑底的不良地层处理到位，满足设计要求后才能进行下一道工序——灌注混凝土。基础的浇砌，一般都在排水条件下进行，只有当水量较大，排水施工困难时，才采用直升导管法水下灌注混凝土。因为水中浅基础施工的大部分工艺和旱地浅基础类似，下面只就水中围堰进行介绍。

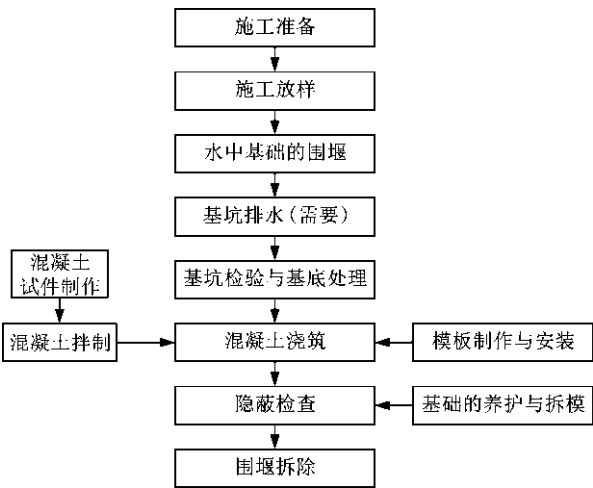


图 3-35 水中浅基础施工工艺流程

围堰是一种临时性的围护结构，一般在用完后拆除。围堰服务于水中浅基础施工或深基坑施工，其目的是防止土和水进入建筑物的施工位置，提供干燥的施工环境，有利于工作人员施工，方便完成排水、施工开挖、修建建筑物等工作。在水中修筑桥梁基础时，开挖基坑前需在基坑周围先修筑一道防水围堰，把围堰内水排干后，再开挖基坑修筑基础。如果排水较困难，也可在围堰内进行水下挖土，挖至预定标高后先灌注水下封底混凝土，然后抽干水继续修筑基础。在围堰内既可以修筑浅基础，也可以修筑桩基础等。

二、水中基础围堰

1. 浅基础围堰的要求

(1) 围堰顶面标高应高出施工期间可能出现的最高水位 0.5 m 以上，有风浪时应适当加高。

(2) 修筑围堰将压缩河道断面，使流速增大引起冲刷，或堵塞河道影响通航，因此要求河道断面压缩一般不超过流水断面积的 30%。对两边河岸河堤或下游建筑物有可能造成危害时，必须征得有关单位同意并采取有效防护措施。

(3) 围堰内尺寸应满足基础施工要求，留有适当工作面积，基坑边缘至堰脚距离一般不少于 1 m。

(4) 围堰结构应能承受施工期间产生的土压力、水压力以及其他可能产生的荷载，满足强度和稳定性要求，要求围堰插入土中一定深度，防止地下水渗入，因此围堰应具有良好的防渗性能。

2. 围堰的类型

浅基础围堰的主要类型有土围堰、土袋围堰、堆石围堰、钢板桩围堰。在水深较小、河边浅滩、流速缓慢、河床渗水性较小的河流中，基础的埋置深度不大时，修筑基础常采用土围堰、土袋围堰或堆石围堰等。

1) 土围堰(图 3-36)

土围堰是用黏性土或砂夹黏土填筑形成的围堰。无黏性土时，也可用沙土类填筑，但须加宽堰身以加大渗流长度，砂土颗粒越大堰身越要加厚。填土应自上游开始至下游合龙，必须将堰底下河床底下的杂物、石块及树根等清除干净。

土围堰适用于水深 ≤ 1.5 m、流速 ≤ 0.5 m/s、河边浅滩、河床渗水性较小的水中基础施工。土围堰堰顶宽度可为 1~2 m，机械挖掘时不宜小于 3 m。堰外边坡迎水流一侧坡度为 1:2~1:3，堰外边坡背水流一侧坡度宜在 1:2 以下，堰内边坡坡度宜为 1:1~1:1.5。

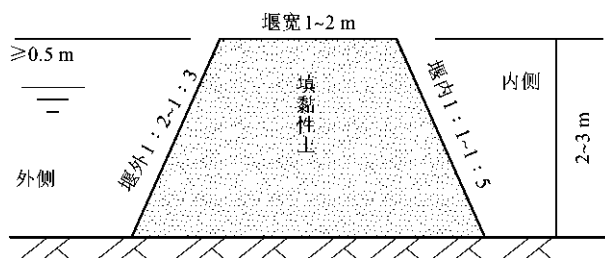


图 3-36 土围堰

2) 土袋围堰(图 3-37)

土袋围堰是在围堰两侧用草袋、麻袋、玻璃纤维袋或无纺布袋装土堆码形成的围堰。袋中宜装填不渗水的黏性土，装土量为土袋容量的 1/2~2/3，袋口应缝合；围堰中心部分可填筑黏土及黏土土心墙。堆码土袋，应自上游开始至下游合龙。上下层和内外层的土袋均应相互错缝，尽量堆码密实、平稳。

土袋围堰适用于水深 ≤ 3.0 m、流速 ≤ 1.5 m/s、河床渗水性较小或淤泥较浅的水中基础施工。土袋围堰有黏土心墙时，堰顶宽度可为 2~2.5 m，堰外边坡坡度可为 1:1~1:0.5，堰内边坡坡度可为 1:0.2~1:0.5。

此外，还可以用竹笼片石围堰和木笼片石围堰做水中围堰，其结构由内、外两层装片石的竹(木)笼中间填黏土心墙组成。黏土心墙厚度不应小于 2 m。为避免对基坑顶部压力过大，并为必要时变更基坑边坡留有余地，片石笼围堰内侧一般应距基坑顶缘 3 m 以上。

3) 堆石围堰

堆石围堰是在水流较快的河道中进行水流控制，保证结构物(建筑物)施工的一种有效方法，广泛应用于基础施工、河道整治、堤防加固、排涝等领域，对保护生态环境、保障民生安全具有十分重要的作用。堆石围堰处理时，基底应选择较好的地基。及时处理基底的不平整，确保围堰的稳定性。应选择大小合适且质量优良的石料作为围堰的主体，确保围堰的坚固性。石料的堆砌需要满足受力要求，准确计算数量，然后将石头和块头相互错垛、拼接、交织，及时检查。

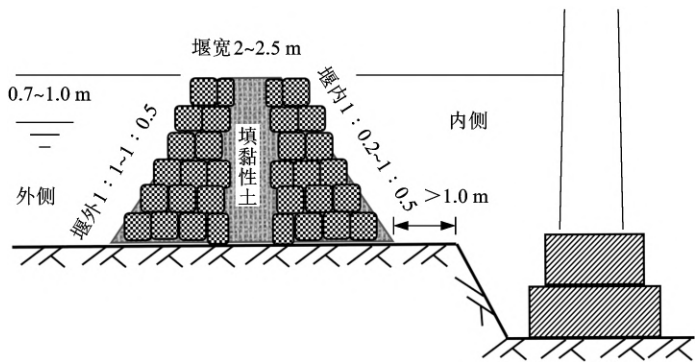


图 3-37 土袋围堰

4) 钢板桩围堰

钢板桩围堰是工程中最常用的围堰形式，截面形式常见的有直板形、槽形、Z 形等，采用带有锁口的型钢拼接而成，有各种尺寸及连锁形式。钢板桩围堰应用范围广，可用于各类地层的渗水基础工程。钢板桩的优势：强度高，容易打入坚硬土层；可在深水中施工，防水性能好；可灵活组成各种外形的围堰，多多使用。其在桥梁施工中常用于浅基础、桩基础、管柱基础、沉井顶端的围堰等工程中。

当河流水位较高时，可以采用钢板桩围堰。钢板桩在旱地上可用于基坑开挖时的围护，在较深的水中可用于基础开挖前的围堰。钢板桩围堰一般用于河床为砂土、碎石土和半干硬性黏土的情况，可嵌入风化岩层，适用于基底深度为 6~8 m 的中小型基础及承台基坑开挖时挡水、挡土的围护设施。钢板桩的最小长度有 6 m，最大可以超过 20m，越长施工难度越大，长度过大易变形。水中桥梁修建基础常使用单层钢板桩围堰，其支撑系统和导向系统的框架结构称为围圈或围笼。钢板桩围堰强度高，容易打入坚硬土层，可在较深的水中施工，防水性能好。它施工快捷方便，并能多次重复使用，材料用量少且回收率高。因为钢板桩围堰刚度较小，当基坑深度较大时，内部会设置较多支撑，增加刚度，因此施工空间容易受限。

围堰类型选择情况见表 3-8。

表 3-8 围堰类型选择

围堰类型	适用条件
土围堰	水深 $\leq 1.5\text{ m}$ ，流速 $\leq 0.5\text{ m/s}$ ，河床渗水性较小，河边浅滩
土袋围堰	水深 $\leq 3.0\text{ m}$ ，流速 $\leq 1.5\text{ m/s}$ ，河床渗水性较小或淤泥较浅
堆石围堰	河床渗水性很小，流速 $\leq 3.0\text{ m/s}$ ，石块能就地取材
钢板桩围堰	深水或深基坑，流速较大的砂类土、黏性土、碎石土及风化岩等坚硬河床

单元知识巩固和拓展



一、知识要点汇总

1. 浅基础通常采用敞口开挖基坑。在基坑开挖和砌筑时,会在基坑边缘至基础边缘留出适当的排水和施工范围,使得基坑坑底比基础底部面积大。我们常把浅基础施工称为明挖扩大基础施工。

2. 明挖扩大基础的开挖,土质良好时,常用的方法就是放坡;当土质不好或者没有放坡条件的时候,基坑开挖就需要考虑围护。常用的基坑围护方法有挡板支撑、板桩墙支护、喷射混凝土护壁、混凝土围圈护壁、桩体围护等。

3. 目前常用的基坑排水方法有表面排水法和井点降水法两种。

4. 旱地上浅基础施工流程主要包括:施工准备,施工放样,基坑的围护与开挖,基坑的排水,基坑的检验与基底处理,基础混凝土浇筑,基础的养护与拆模,隐蔽检查,围堰拆除。

5. 围堰是一种临时性的围护结构,一般在用完后拆除。围堰用于水中基础施工或深基坑施工,其目的是防止土和水进入建筑物的施工位置,提供干燥的施工环境,有利于工作人员施工,方便完成排水、施工开挖、修建建筑物等工作。

6. 围堰的主要类型有土围堰、土袋围堰、堆石围堰、钢板桩围堰、双壁钢围堰、钢套箱围堰、钢吊箱围堰、地下连续墙围堰等。



二、习题练习

(一)单选题

1. 明挖基坑应尽量在枯水或少雨季节进行,且不宜间断,接近基底设计标高应留()高度由人工开挖,以免破坏基底土壤结构。

- A. 0.3 m B. 0.5 m C. 0.7 m D. 1.0 m

2. 当开挖深度很大时,采用()在基坑开挖前先垂直打入土中至坑底以下一定深度,然后边挖边设支撑,开挖基坑过程始终是在它的支护下进行的。

- A. 桩体 B. 钢板桩 C. 喷射混凝土 D. 围挡

3. 对于浅基础施工基坑围护,下面描述不正确的是()。

- A. 在岩石地基采用竖直坑壁
B. 在一般土质条件下开挖基坑时,不应采用放坡开挖的方法
C. 在基坑较浅又无地下水的硬黏土中采用竖直坑壁
D. 基坑较浅、地下水位较低或渗水量较少,不需要进行基坑的围护

4. 基坑内排水时,当地基土为饱和粉细砂土等黏聚力较小的细粒土层时,适合用()排水。

- A. 表面排水法 B. 井点降水法
C. 抽浆法 D. 泵吸法

5. 以下支护结构中,有挡土、止水作用的支护结构是()。

- A. 混凝土灌注桩加挂网抹面护壁 B. 密排式混凝土灌注桩



习题练习答案

C. 土钉墙

D. 钢板桩

6. (2019 年注册岩土工程师试题) 某基坑采用悬臂桩支护, 下列选项中桩身承受的弯矩最大的部位是 (), 如图 3-38 所示。

- A. 坑底以上某部位
- B. 坑底下某部位
- C. 坑底处
- D. 不确定, 需看土质

(二) 多选题

1. 不同结构物对地基的要求不同, 基础形式不同, 验收的内容也不同, 基坑检验的主要内容不包括()。

- A. 检查基底平面位置、尺寸大小、基底标高是否与设计图纸相符
- B. 检查坑壁、基坑土质、地下水情况是否与勘察报告相符
- C. 检查基底处理、排水情况是否符合规范要求
- D. 基底的地质情况和承载力是否与设计资料相符
- E. 检查施工记录及有关试验资料

2. 关于浅基础围堰的要求描述正确的是()。

- A. 围堰要满足强度和稳定要求, 不需要有良好的防渗性能
- B. 河道断面压缩一般不超过流水断面积的 30%, 防止流速增大引起冲刷, 或影响通航
- C. 围堰内尺寸应满足基础施工要求, 由基坑边缘至堰脚距离一般不少于 1 m
- D. 顶面标高应高出施工期间可能出现的最高水位 0.5 m 以上, 有风浪时应适当加高

(三) 简答题

1. 围堰的主要类型有哪些?
2. 旱地浅基础施工流程?

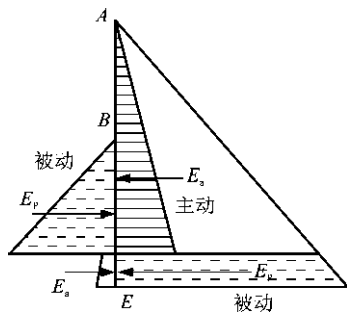


图 3-38 桩身受力图

三、知识点拓展

案例拓展：旱地上浅基础施工案例

江南互通桥跨越长江, 江面水域宽约 850 m, 河谷岸坡不对称。受构造作用和长江侵蚀影响, 长江两岸呈明显的台阶状地形。长江南岸丘陵岗地斜坡地貌区延伸至长江, 常年有流水, 旱季水量不大。江南互通桥位区属缓谷浅丘地貌, 土层厚度不均, 大部分基岩出露, 中风化岩体较完整, 裂隙不发育, 未见滑坡、崩塌、泥石流等不良地质现象, 场地区域稳定性良好。斜坡土体覆盖较薄或基岩出露, 未见开裂变形迹象, 斜坡稳定性较好。江南互通 C 匝道扩大基础基坑施工不受长江汛期及水库蓄水的影响。两岸为斜坡地形, 地形坡度较大, 大气降水多以坡面流形式直接排泄至长江, 故南岸斜坡段地下水贫乏。

主要扩大基础工程内容包括: 驸马长江大桥南岸引桥 17 号、19 号桥台基础; 南岸引桥 17 号、19 号桥台扩大基础设计为 C35 混凝土, 江南互通 C 匝道 0 号、13 号扩大基础设计为 C25 片石混凝土。扩大基础表面积较大, 地形地貌、地质情况复杂, 且易发生滑坡, 施工难点较多。扩大基础施工混凝土养护时间较长, 致使总体施工周期较长。扩大基础施工地质情况

较差，江南互通桥扩大基础位于斜坡坡脚地带，纵、横向地形横坡均较陡。江南互通桥扩大基础开挖时可能产生上部表层土体滑塌、下部基岩边坡局部掉块现象。施工工艺流程如图 3-39 所示。

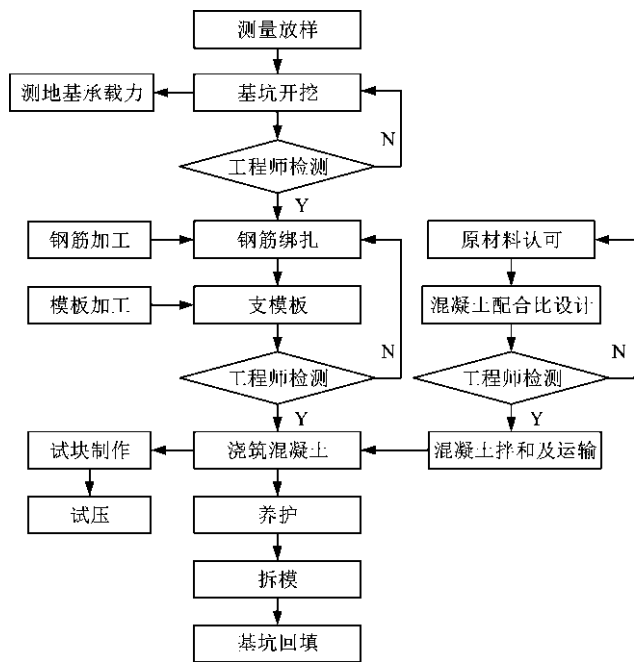


图 3-39 施工工艺流程图

1. 基坑测量放线：测量队用坐标法定出基坑各控制点的平面位置，并洒出白灰线。用水准仪测出控制点标高，根据设计标高计算出开挖深度。按地质水文资料，结合现场情况，决定开挖坡度、支护方案、开挖范围和防排水措施。

2. 基坑开挖。如图 3-40 所示，基坑采用放坡开挖，开挖作业以机械作业方式为主，采用挖掘机开挖，自卸汽车运输，人工辅助清槽。在施工过程中为避免雨水冲坏坑壁，基坑顶四周应做好排水，截住地表水，基坑下口开挖的大小应满足扩大基础施工的要求。基坑开挖应连续施工，避免晾槽，基底应避免超挖，一次开挖距基坑底面以上要预留 20~30 cm，待验槽前人工一次清除至标高，以保证基坑底面坚实。基坑开挖不宜间断，达到设计高程经检验合格后，立即灌注扩大基础。如基底暴露过久，应重新检验。岩石地基扩大基础开挖采用松动爆破法开挖，控制装药量，以确保基岩的整体性不被破坏。



图 3-40 基坑开挖

3. 基坑排水。有水基坑底面,应满足四周排水沟与汇水井的设置需要,每边放宽不小于 80 cm。明挖基坑,采用表面排水法或井点降水法排水,保持基坑底不被水淹。开挖基坑排水,抽水量为渗水量的 1.5~2 倍,基坑排出的水以水管或水槽远引。

4. 基坑检验及处理。按设计要求检测地基承载力,地基承载力不小于设计要求。如不满足要求,根据情况进行换填、夯实或固结处理,处理范围应宽出扩大基础底 50 cm。扩大基础底处理完毕后,恢复扩大基础控制点,测量基底标高。

岩层基底应清除岩面松碎石块、淤泥、苔藓,凿出新鲜岩面,表面应清洗干净。倾斜岩层,应将岩面凿平或凿成台阶。泉眼可用堵塞或排引等方法处理。

基底应检验下列内容:基底平面位置、尺寸大小;基底高程;基底地质情况;基底承载力;基底处理和排水情况。基坑检验合格后,进入下道工序。

5. 混凝土施工。为了确保混凝土施工质量,混凝土在装配有自动计量系统的强制式搅拌机的拌和站集中拌制,使用罐车运输,混凝土由罐车运至施工现场后,用输送泵或吊车吊装入模。浇筑应分层连续进行,最长间隔不得大于混凝土的初凝时间。混凝土振捣采用插入式振捣器振捣,振捣器移动间距不超过其作用半径的 1.5 倍,并插入下层 5~10 cm。振捣要均匀,不得漏振。不得触碰钢筋、模板等。对每一振动部位,必须振动到该部位混凝土密实,混凝土停止下沉,不再冒出气泡,表面平坦、泛浆。混凝土收浆后用土工布覆盖、洒水养生,养生时间为 7 d。

6. 基坑回填。扩大基础强度达到设计要求的强度后进行扩大基础回填。扩大基础采用开挖原土进行基坑回填,回填土对称、水平分层进行并采用多功能振动夯实机夯实。