



高等职业教育“十二五”规划教材

# 土力学 与 地基基础

张求书 姜仁安 主 编  
朱春风 季秋成 副主编  
王晓谋[长安大学] 主 审

本书附有“学习评价手册”



人民交通出版社  
China Communications Press

高等职业教育“十二五”规划教材

Tulixue yu Diji Jichu

# 土力学与地基基础

张求书 姜仁安	主 编
朱春风 季秋成	副主编
王晓谋[长安大学]	主 审

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是高等职业教育工学结合规划教材——项目引领与任务驱动系列。本书以土力学与地基基础知识的实际应用为主线,共设置了8个学习项目,分别为土中应力、土的压缩性与地基沉降计算、认知土的抗剪强度与确定地基承载力、计算土压力及分析土坡稳定性、天然地基上的浅基础、地基处理、桩基础、沉井。本书符合“校企合作、工学结合”的人才培养模式,旨在加强学生的实践能力和职业技能培养。

本书可作为高等职业院校、成人高校、本科院校的二级职业技术学院以及民办高校道路桥梁工程技术专业及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职、中职相关专业,并可作为相关专业工程人员的业务参考书及培训用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

土力学与地基基础 / 张求书主编. —北京:人民  
交通出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-114-09941-0

I. ①土… II. ①张… III. ①土力学②地基—基础(工程) IV. ①TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第161519号

高等职业教育“十二五”规划教材

书 名: 土力学与地基基础

著 者: 张求书

责任编辑: 夏 迎

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16

字 数: 403千

版 次: 2012年8月 第1版

印 次: 2012年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09941-0

印 数: 0001-2000册

定 价: 55.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

“十二五”时期,我国经济社会发展进入一个新的历史阶段,交通运输也将进入新的发展时期,对交通职业教育提出了更高的要求,根据我国高等职业教育“十二五”发展规划和高等职业教育内涵建设的要求,为满足培养交通行业实用型人才过程中对土力学与地基基础知识的需求,编写了本教材。

本书编写中力求体现以职业能力为本位,以应用为核心,以实用、实效为原则,紧密联系工程实际,及时反映交通行业对工程专业技术人员的要求。内容力求做到:(1)适应当前高等职业学院毕业生的工作实际需要,加强内容针对性。(2)结合高等职业教育特点,围绕交通高等职业技术教育专业培养目标,理论和实践并重,注重学生综合素质的提高。

本书在编写过程中,结合行业及市场前沿知识及编者多年在高等职业院校教学的经验,综合考虑目前道路与桥梁专业的教学内容体系,以工程项目开展过程为任务导向,结合工程项目实际案例,优化了教材内容。加强高职学生的实际操作能力,侧重路桥工程中应用性强的内容。本书分为两部分,第一部分是按照学生职业能力发展的需求,同时考虑了知识递进和能力提升,共编写了八个学习项目,形成知识和能力并进的教学内容。第二部分根据高等职业教学的特点和学生培养目标的要求,探索多样化的学习评价机制,完善知识与技能并重的学习评价体系,以学习能力、职业能力和综合素质为评价核心编写了针对每个学习项目的学习评价手册。

本书由吉林交通职业技术学院张求书、姜仁安担任主编,吉林交通职业技术学院朱春风、内蒙古大学交通学院季秋成担任副主编。吉林交通职业技术学院张宝成、高峰、郭梅、王雨楠、李月姝、李瑞涛、赵金云参与了本书的编写。具体编写分工如下:张求书编写绪论、项目1和项目2;姜仁安编写项目6和项目7;朱春风编写项目5;季秋成编写项目3;高峰、张宝成、王雨楠编写项目4和附录;郭梅编写项目8。李月姝、李瑞涛、赵金云编写学习评价手册。考虑到我国国情和地区性差异,并考虑各院校具体情况,教师在教学过程中可对本书内容进行适当增删。教学中应积极使用现代化教学手段,配备相应的教学辅件,提高教学效果。

鉴于编者水平和经验有限,书中难免有谬误和疏漏之处,敬请专家和读者批评指正。

编 者  
2012年6月

# 目 录

绪论	1
学习项目 1 土中应力	3
工作任务 1 土中自重应力计算	3
工作任务 2 土中附加应力计算	7
工作任务 3 建筑物基础下地基应力计算	20
学习项目 2 土的压缩性与地基沉降计算	23
工作任务 1 认知土的压缩性	23
工作任务 2 地基沉降量计算	30
工作任务 3 认知地基沉降与时间的关系	36
学习项目 3 认知土的抗剪强度与确定地基承载力	44
工作任务 1 认知土的抗剪强度	44
工作任务 2 确定地基承载力容许值	53
学习项目 4 计算土压力及分析土坡稳定性	65
工作任务 1 计算静止土压力	65
工作任务 2 应用朗金理论计算土压力	70
工作任务 3 应用库仑理论计算土压力	78
工作任务 4 分析土坡稳定性	87
学习项目 5 天然地基上的浅基础	97
工作任务 1 天然地基上浅基础设计	97
工作任务 2 天然地基上浅基础的施工	112
学习项目 6 地基处理	124
工作任务 1 认识软弱地基及处理方法	124
工作任务 2 换土垫层法	127
工作任务 3 挤密压实法	130
工作任务 4 排水固结法	137
工作任务 5 深层搅拌(桩)法	142
学习项目 7 桩基础	146
工作任务 1 认识桩基础的类型与构造	146

工作任务 2 单桩容许承载力的确定 .....	160
工作任务 3 弹性单排桩的内力和变位计算 .....	172
工作任务 4 桩基础的施工 .....	188
<b>学习项目 8 沉井</b> .....	211
工作任务 1 认识沉井的类型与构造 .....	211
工作任务 2 沉井的施工 .....	216
<b>附表</b> .....	224

# 绪 论

## 一、土力学与地基基础研究的内容

土力学将土作为研究的对象,以传统的工程力学和地质学的知识为基础,是研究与土木工程有关的土中应力、变形、强度和稳定性的应用力学分支。土力学主要研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形和强度问题,为工程设计、施工提供土的工程性质指标和评价方法,是土木建筑、公路、铁路、水利、地下建筑、采矿和岩土工程等有关专业的一门主要课程,属于专业基础课范畴。

土是在第四纪地质历史时期地壳表层母岩经受强烈风化作用后形成的大小不等的颗粒状堆积物,是覆盖于地壳最表面的一种松散的或松软的物质。土是由固体颗粒、液体和气体组成的一种三相体。固体颗粒之间没有联结强度或联结强度远小于颗粒本身的强度是土有别于其他连续介质的一大特点。土的颗粒之间存在有大量的孔隙,因此土具有碎散性、压实性、土粒之间的相对移动性和透水性。

土在地球表面分布极广,它与工程建设关系密切。在工程建设中土被广泛用作各种建筑物的地基或材料,或构成建筑物周围的环境或护层。在土层上修建工业厂房、民用住宅、涵管、桥梁和码头时,土是作为承受上述结构物荷载的地基;修筑土质堤坝和路基时,土又被用作建筑材料;修建涵洞和隧道时,土作为建筑环境和护层。总而言之,土的性质对于工程建设的质量、性状等具有直接而重大的影响。

建筑物修建以后,其全部荷载最终由其下的地层来承担,承受建筑物全部荷载的那部分天然的或经过人工改造的地层称为地基,直接与地基接触用于传递荷载的结构物最下部结构称之为基础。土的性质极其复杂。当地层条件较好,地基土的力学性能较好,能满足地基基础设计对地基的要求时,建筑物的基础直接设置在天然地层上,这样的地基称为天然地基;而当地层条件较差,地基土强度指标较低,无法满足地基基础设计对地基的承载力和变形要求时,常需要对基础底面以下一定深度范围内的地基土体进行加固或处理,这种部分经过人工改造的地基称为人工地基。

建筑物的修建使地基中原有的应力状态发生了改变,这就需要我们运用力学的方法来研究和分析建筑物荷载作用后(地基应力状态改变后)的地基土变形、强度和稳定性,保证地基在上部结构荷载作用下能满足强度和稳定性要求并具有足够的安全储备,控制地基的沉降使之不超过建筑物的允许变形值,保证建筑物不因地基的变形而损害或者影响其正常使用。

## 二、研究土力学与地基基础意义和方法

地基和基础是建筑物的根基,又属于隐蔽工程,它的勘察、设计和施工质量直接关系到建筑物的安危。工程实践表明,建筑物的事故很多都与地基基础问题有关,而且一旦发生地基基础事故,往往后果严重,补救十分困难,有些即使可以补救,其加固修复工程所需的费用也十分惊人。

建筑物的地基基础和上部结构虽然各自功能不同、研究方法相异,但是无论从力学分析入手还是从经济观点出发,这三部分却是彼此联系、相互制约的有机统一体。目前,要把这三部分完全统一起来进行设计计算还十分困难,但从地基—基础—上部结构共同工作的概念出发,尽量全面考虑诸方面的因素。随着科学的发展和工程技术的进步,工程中涉及的绝大多数问题仅靠传统的力学方法是很难甚至无法求得其解答的,计算机的出现为这类复杂、综合工程问题的数值结果分析提供了可能,数值计算作为一种行之有效的力学分析手段在岩土力学中占据了重要位置。

由于土的非均质性、各向异性且因地而异,所以本课程具有综合性、经验性和地区性的特点,研究中不得不通过建立多种力学模型,并借助大量土工试验来获取对工程实践有用的计算参数或经验公式,因此,土力学与地基基础又是一门实践性很强的学科。

在学习本课程时,应注意结合理论学习培养力学试验的技能,通过试验深化理论学习,理解和掌握确定计算参数的方法。另外,学习过程中应注意在分析例题的基础上进行一定量的练习,了解相关的工程地质知识、建筑结构和施工知识及其他课程与本课程有联系的知识。本课程内容的关联性和综合性很强,学习中要突出重点、兼顾全面,要做到融会贯通,学会由此及彼、由表及里的学习方法,培养抓住问题实质从而解决实际问题的能力。

### 三、学科发展简介

土力学与地基基础是既古老又年轻的应用学科。我国古代劳动人民创造了灿烂的文化,留下了令人叹为观止的工程遗产,恢宏的宫殿寺院,灵巧的水榭楼台,巍峨高塔,蜿蜒万里的长城、大运河等,这些工程无不体现出能工巧匠的高超技艺和创新智慧。然而这些还仅局限于工程实践经验,受到当时生产力水平的限制,前人未能形成系统的土力学和地基基础理论。

18世纪兴起工业革命的欧洲为满足资本主义工业化的发展和市场向外扩张的需要,工业厂房、城市建筑、铁路等大规模兴建,提出了许多与土力学相关的问题,例如铁路路基问题、建筑物地基承载力问题等。1773年,法国的库伦(Coulomb)发表了著名的砂土抗剪强度公式和土压力的滑楔理论。其后,英国的W·J·M朗金(Rankine)又从强度理论方面提出能应用于黏性土中的土压力理论。此外,法国的布辛奈斯克(Boussinesq)得出了半无限弹性体在竖向集中力作用下的应力与变形理论。1922年,瑞典的W·费兰纽斯(Fellenius)为解决铁路塌方问题,提出了土坡稳定分析方法。这些古典的理论和方法的确定影响着后人,为土力学成为独立学科奠定了理论基础。1925年,K·太沙基(Terzaghi)归纳了以往的研究成果,提出了一维固结理论,阐述了有效应力原理,发表了第一本《土力学》专著,标志着近代土力学学科的形成。1963年,罗斯科(Roscoe)等人创建发表了著名的剑桥弹塑性模型,标志着人们对土性质的认识和研究进入了一个崭新的阶段。

回顾新中国成立后的历史,围绕着解决工程建设中提出的问题,土力学学科在我国得到了广泛的传播和发展。尤其是改革开放以后,国家大规模的建设促进了本学科的发展。在土力学与地基基础理论和工程实践方面均取得了令世人瞩目的成就,为国民经济发展作出了贡献。许多大型水利水电工程、核电站工程、绵延万里的高速公路、大型桥梁、万吨级码头、大型厂房、林立的高楼大厦和地下空间开发利用等都呈现了本学科理论和实践的巨大成就。

工程建设需要学科理论,学科理论的发展更离不开工程建设。21世纪人类将面对资源和环境这一严酷生存问题的挑战,有各种各样地基基础问题需要解决,这恰恰是青年学生将来要肩负的任务。



# 学习项目1 土中应力

## 工作任务1 土中自重应力计算

### 学习目标

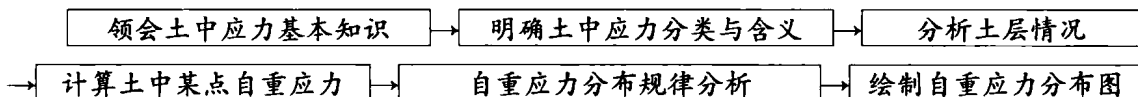
1. 叙述土中自重应力含义；
2. 知道土中自重应力计算基本理论；
3. 分析土中自重应力的分布规律；
4. 正确完成不同地基土的自重应力计算。

### 任务描述

本任务是要完成地基中自重应力计算,通过完成该任务,掌握土中应力的分类,自重应力的计算方法,并理解土中自重应力的分布规律,为继续学习地基的变形和承载力等知识打基础。完成该任务应领会弹性理论公式计算的假定,对地基土工程特性和地下水进行分析,确定计算方法并进行计算,最后绘制自重应力分布图。

### 学习引导

本工作任务沿着以下脉络进行学习:



## 一、知识准备

### 1. 土中应力分析

土体在自身重力、外荷载(如建筑物荷载、车辆荷载、土中水的渗流力和地震力等)作用下,土中会产生应力。土中应力按其产生的原因和作用效果分为自重应力和附加应力。自重应力是由于土的自身重力引起的应力。对于长期形成的天然土层,土体在自重应力的作用下,其沉降早已稳定,不会产生新的变形,所以自重应力又被称为原存应力或长驻应力。附加应力是由于外荷载作用在土体上时,土中产生的应力增量。土中某点的总应力应为自重应力与附加应力之和。这里要注意的是土中应力是矢量(如图1-1),本章主要讨论在实际应用中经常用到的竖向应力的计算方法。

**知识链接:**土中应力过大时,会使土体因强度不够发生破坏,甚至使土体发生滑动失去稳定。此外,土中应力的增加会引起土体变形,使建筑物发生沉降、倾斜以及水平位移。

### 2. 土中应力计算原理

目前计算土中应力的方法,主要是采用弹性理论公式,也就是把地基土视为均匀的、各向

同性的半无限弹性体。这虽然同土体的实际情况有差别,但其计算结果能满足实际工程的要求,其原因可以从以下几方面来分析:

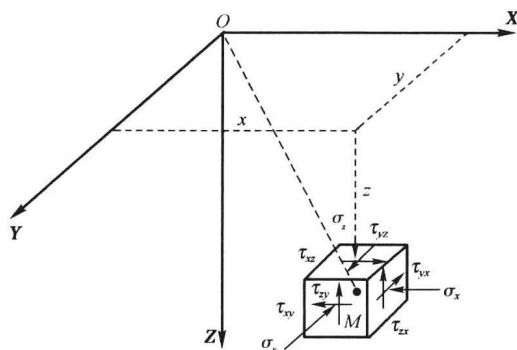


图 1-1 土中应力

(1)土的碎散性影响。土是由三相组成的分散体,而不是连续的介质,土中应力是通过土颗粒间的接触来传递的。但是,由于建筑物的基础面积尺寸远远大于土颗粒尺寸,同时我们研究的也只是计算平面上的平均应力,而不是土颗粒间的接触集中应力,因此可以忽略土碎散性的影响,近似地把土体作为连续体考虑。

(2)土的非均质性和非理想弹性体的影响。土在形成过程中具有各种结构与构造,使土呈现不均匀性。同时土体也不是一种理想的弹性体,而是一种具有弹塑性或黏滞性的介质。但是,在实际工程中土中应力水平较低,土体受压时,应力—应变关系接近于线性关系,因此,当土层间的性质差异不太悬殊时,采用弹性理论计算土中应力在实用上是允许的。

(3)地基土可视为半无限体。所谓半无限体就是无限空间体的一半,由于地基土在水平方向和深度方向相对于建筑物基础的尺寸而言,可以认为是无限延伸的,因此,可以认为地基土符合半无限体的假定。

## 二、任务实施

### 1. 均质土层中的自重应力

在计算自重应力时,假定土体为半无限体,即土体的表面尺寸和深度都是无限大,土体自重应力作用下的地基为均质的线性变形的半无限体,即任何一个竖直平面均可视为半无限体对称面。因此在任意竖直平面上,土的自重都不会产生剪应力,只有正应力存在。由此可以得知:在均匀土体中,土中某点的自重应力将只与该点的深度有关。

设土中  $M$  点距离地面的深度为  $z$ ,土的重度为  $\gamma$ ,如图 1-2 所示,求作用于  $M$  点上竖向自重应力  $\sigma_\alpha$ ,可在过  $M$  点平面上取一截面积  $\Delta A$ ,然后以  $\Delta A$  为底,截取高为  $z$  的土柱,由于土体为半无限体,土柱的 4 个竖直面均是对称面,而且对称面上不存在剪应力作用,因此作用在  $\Delta A$  上的压力就是土柱的重力  $G$ ,即  $\Delta A\gamma z$ ,那么  $M$  点的自重应力为:

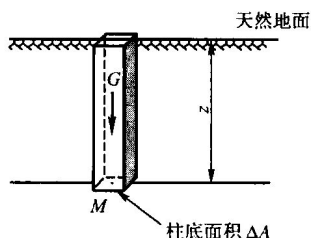


图 1-2 均质土层中的自重应力

$$\sigma_\alpha = \frac{\Delta A\gamma z}{\Delta A} = \gamma z \quad (\text{kPa}) \quad (1-1)$$

式中: $\gamma$ ——土的重度( $\text{kN}/\text{m}^3$ );

$z$ ——计算点的深度(m)。

$M$  点的水平方向自重应力为:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\gamma} = \xi \sigma_{\alpha} \quad (1-2)$$

式中: $\xi$ ——土的侧压力系数,其值与土的类别和土的物理状态有关,可通过试验确定。

在这里只研究竖直方向的自重应力,水平方向的自重应力将在后续项目中讨论。

### 2. 成层地基土中自重应力计算

天然地基土往往是成层的,各层天然土层具有不同的重度,所以需要分层来计算。如图 1-3 所示,第  $n$  层土中任一点处的自重应力公式可以写成:

$$\sigma_{\alpha} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1-3)$$

式中: $h_i$ ——第  $i$  层土的厚度;

$\gamma_i$ ——第  $i$  层土的重度。

### 3. 土层中有地下水时自重应力计算

计算地下水位以下土的自重应力时,应根据土的性质确定是否需考虑水的浮力作用。常认为砂性土是应该考虑浮力作用的,黏性土则视其物理状态而定。

一般认为,若地下水位以下的黏性土液性指数  $I_L \geq 1$ ,则土处于流动状态,土颗粒间存在着大量自由水,此时可以认为土体受到水的浮力作用,自重应力采用有效重度进行计算;如果  $I_L \leq 0$ ,则土处于固体状态,土中自由水受到土颗粒间结合水膜的阻碍不能传递静水压力,故认为土体不受水的浮力作用,自重应力计算应用土的天然重度计算,并考虑上覆的水重引起的应力;若  $0 < I_L < 1$ ,土处于塑性状态,土颗粒是否受到水的浮力作用就较难确定,一般在实践中均按不利状态来考虑。

技术提示:不透水层一般为基岩或只含强结合水的坚硬黏土层,不透水层不存在水的浮力,故作用在不透水层层面及层面以下的土的自重应力等于上覆土和水的总重。

【例题 1-1】某土层的物理性质指标如图 1-4 所示,试计算土中的自重应力,并绘制自重应力分布图。

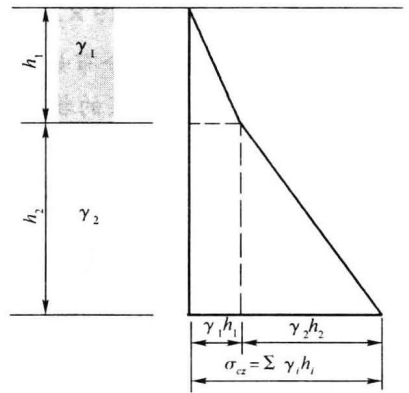


图 1-3 成层土中自重应力分布

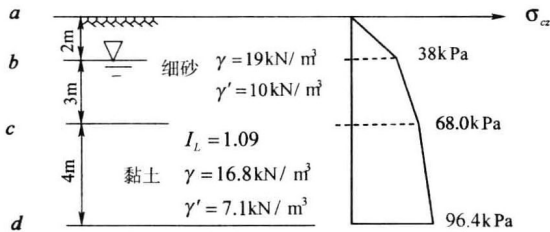


图 1-4 某土层的物理性质指标

解:

第一层为细砂,地下水位以上的细砂不受浮力作用,而地下水位以下的受到浮力作用;

第二层黏土  $I_L = 1.09$  大于 1,故认为黏土层受到浮力作用。

a 点:  $z = 0, \sigma_{\alpha} = \gamma z = 0$

b 点:  $z = 2\text{m}, \sigma_{\alpha} = \gamma z = 19 \times 2 = 38\text{kPa}$

c 点:  $\sigma_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i = 19 \times 2 + 10 \times 3 = 68\text{kPa}$

d 点:  $\sigma_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i = 19 \times 2 + 10 \times 3 + 7.1 \times 4 = 96.4\text{kPa}$

该土层的自重应力分布如图 1-4 所示。

**【例题 1-2】** 某土层的物理性质指标如图 1-5 所示, 试计算土中的自重应力, 并绘制自重应力分布图。

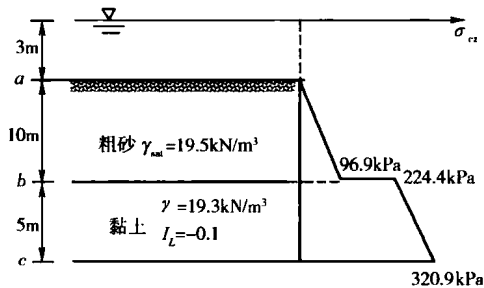


图 1-5 某土层的物理性质指标

解:

水下的粗砂受到水的浮力作用, 其有效重度:

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 19.5 - 9.81 = 9.69\text{kN/m}^3$$

黏土层因为  $I_L < 0$ , 所以认为土层不受水的浮力作用, 该土层还受到上面的静水压力作用。土中各点的自重应力计算如下:

a 点:  $z = 0, \sigma_{\alpha} = \gamma z = 0$

b 点:  $z = 10\text{m}$ , 但该点位于黏土层中, 则  $\sigma_{\alpha} = \gamma' z + \gamma_w h_w = 9.69 \times 10 + 9.81 \times 13 = 224.4\text{kPa}$

c 点:  $z = 15\text{m}, \sigma_{\alpha} = 224.4 + 19.3 \times 5 = 320.9\text{kPa}$

该土层的自重应力分布如图 1-5 所示。

#### 4. 土中自重应力的分布规律

通过以上学习可知: 自重应力在等重度的土中随深度呈直线分布, 自重应力分布线的斜率是土的重度; 自重应力在不同重度的成层土中呈折线分布, 折点在土层分界线和地下水位线处; 自重应力随深度的增加而增大。

### 三、学习评价

通过以上学习回答下列问题:

1. 土中自重应力计算的假定是什么?
2. 地基中自重应力的分布有什么特点?
3. 如图 1-6 所示某地基剖面图各土层的重度及地下水位, 计算土中的自重应力并绘制自重应力分布图。

请完成学习评价手册中的任务。

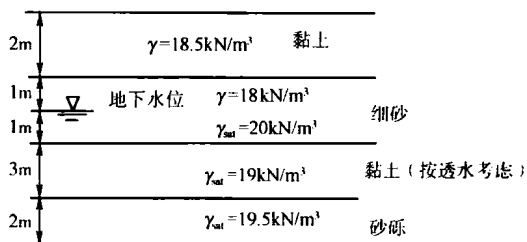


图 1-6 某地基剖面图

## 工作任务2 土中附加应力计算

### 学习目标

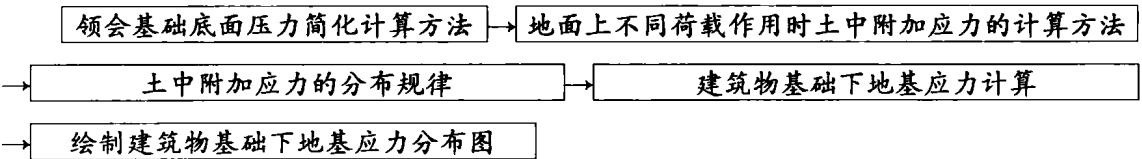
1. 叙述基底压力、附加应力的含义；
2. 知道基底压力简化计算方法；
3. 认知地面各种荷载作用下，土中附加应力的分布规律；
4. 完成土中附加应力计算；

### 任务描述

本任务是要完成建筑物基础下地基应力计算，通过完成该任务，掌握基底压力简化计算方法和附加应力的计算方法，并理解土中附加应力的分布规律，为继续学习地基的变形和承载力等知识打基础。

### 学习引导

本工作任务沿着以下脉络进行学习：



### 一、知识准备

前面已经指出土中的附加应力是由建筑物荷载作用所引起的应力增量，而建筑物的荷载是通过基础传到土中的，因此基础底面的压力分布形式将对土中应力产生影响。在讨论附加应力计算之前，首先需要研究基础底面的压力分布问题。

基础底面的压力分布问题涉及基础与地基土两种不同物体间的接触压力问题，在弹性理论中称为接触压力问题。这是一个比较复杂的问题，影响它的因素很多，如基础的刚度、形状、尺寸、埋置深度以及土的性质和荷载大小等。在理论分析中要综合顾及这么多的因素是困难的，目前在弹性理论中主要是研究不同刚度的基础与弹性半空间体表面的接触压力分布问题。关于基底压力分布的理论推导过程，在本课程中将不作介绍。本节仅讨论基底压力分布的基本概念及简化的计算方法。

#### 1. 基础底面压力分布的概念

若一个基础上作用着均布荷载，假设基础是由许多小块组成，如图 1-7a) 所示，各小块之间光滑无摩擦力，则这种基础相当于绝对柔性基础（即基础抗弯刚度  $EI \rightarrow 0$ ），基础上荷载通过小块直接传递到土上，基础底面的压力分布图形将与基础上作用的荷载分布图形相同。这时，基础底面的沉降各处不同，中央大而边缘小。因此，柔性基础的底面压力分布与作用的荷载分布形状相同。如由土筑成的路堤，可以近似地认为路堤本身不传递剪力，那么它就相当于一种柔性基础，路堤自重引起的基底压力分布就与路堤断面形状相同是梯形分布，如图 1-7b) 所示。

桥梁墩台基础有时采用大块混凝土实体结构如图 1-8 所示，它的刚度很大，可以认为是刚性基础（即  $EI \rightarrow \infty$ ）。刚性基础是指基础本身刚度相对地基土来说很大，在受力后基础产生的

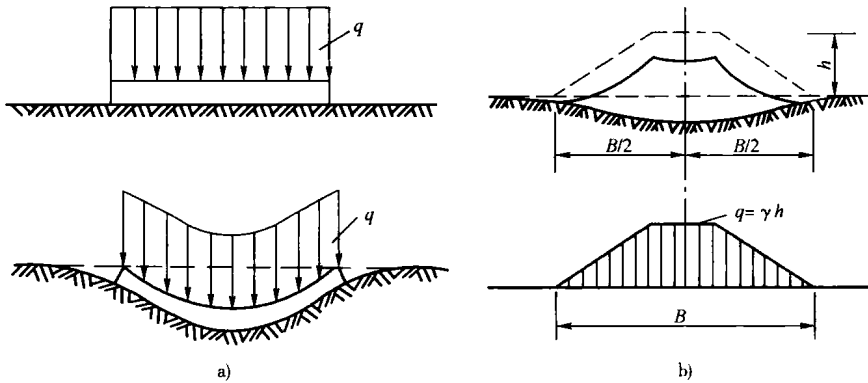


图 1-7 柔性基础下的压力分布

a) 理想柔性基础下的压力分布; b) 路堤底面压力分布

挠曲变形很小(可以忽略不计)的基础。桥梁中很多圬工基础属于这一类型,如许多扩大基础和沉井基础等。对于刚性基础,当基础底面为对称形状(如矩形、圆形)时,在中心荷载的作用下,一般基础底面的压力分布图形呈马鞍形,如图 1-8a)所示。但随着荷载的大小、土的性质和基础的埋置深度等不同,其分布图形还可能变化。例如,当荷载较大、基础埋置深度较小或地基为砂土时,由于基础边缘土的挤出而使边缘压力减小,其基底的压力分布图形将呈抛物线形,如图 1-8b)所示。随着荷载的继续增大,基底的压力分布图形可发展成倒钟形,如图 1-8c)所示。若按上述情况去计算土中的附加应力,将使计算变得非常复杂。在实际计算中常采用一种简便而又符合工程实际的方法。

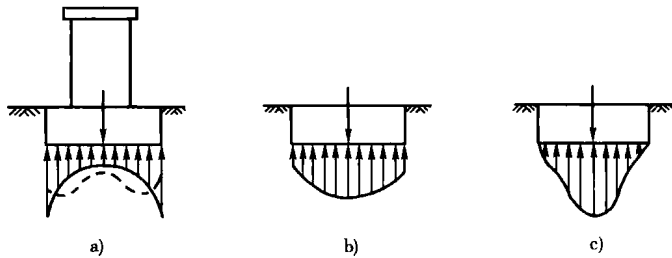


图 1-8 刚性基础下的压力分布

a) 马鞍形分布; b) 抛物线形分布; c) 钟形分布

## 2. 基底压力的简化计算方法

理论和实验均已证明:在荷载合力大小和作用点不变的前提下,基底压力分布形状对土中附加应力分布的影响,在超过一定深度后就不显著了。由此,在实际计算中,可以假定基底压力分布呈直线变化,这样就大大简化了土中附加应力的计算。根据这个假定,刚性基础底面压应力分布如图 1-9 所示。

当假定刚性基础底面的压力呈直线分布时,如图 1-9a)所示,即可按材料力学公式计算。

(1) 中心荷载作用时,如图 1-9a)所示,基础底面压力的计算公式为:

$$p = \frac{N}{A} \quad (1-4)$$

式中: $p$ ——基础底面压应力(kPa);

$N$ ——作用于基底中心上的竖向荷载合力(kN);

$A$ ——基础底面面积( $m^2$ )。

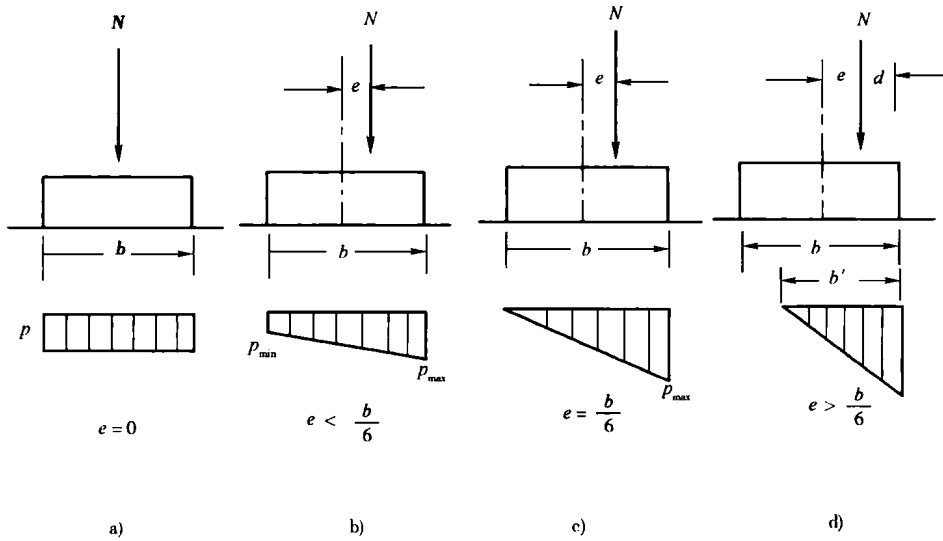


图 1-9 简化的基底压力分布

(2) 偏心荷载作用,且合力作用点不超过基底截面核心时,如图 1-9b)所示,基础底面压力的计算公式为:

$$p_{\max}^{\min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{N}{A} \pm \frac{N \cdot e}{W} \quad (1-5)$$

式中: $p_{\max}$ 、 $p_{\min}$ ——基础底面边缘处最大、最小压应力(kPa);

$N$ 、 $A$ ——同上;

$M$ ——偏心荷载对基底形心力矩( $\text{kN} \cdot \text{m}$ );

$W$ ——基础底面的截面抵抗矩( $\text{m}^3$ )。

对于长度为  $a$ 、宽度为  $b$  的矩形底面,  $A = ab$ ,  $W = \frac{ab^2}{6}$ , 所以公式(1-5)也可写成:

$$p_{\max}^{\min} = \frac{N}{ab} \left( 1 \pm \frac{6e}{b} \right) \quad (1-6)$$

(3) 偏心荷载作用,且合力作用点超过基底截面核心时,如图 1-9d)所示,对于矩形截面,当合力偏心距  $e > \frac{b}{6}$  时,如果按材料力学偏心受压的公式计算,截面上将出现拉应力,但基础与地基之间不可能出现拉应力,于是基底应力将会重新分布在 ( $b' \times a$ ) 上。此时,基础底面压力的计算公式不能再按式(1-4)或式(1-5)计算。假定基底压力在  $b'$  (小于基础宽度  $b$ ) 范围内按三角形分布,如图 1-9d)所示,根据静力平衡条件应有以下关系:

$$N = \frac{1}{2} p_{\max} b' a$$

因为  $N$  应该通过压力分布图三角形的形心,所以  $b' = 3d = 3\left(\frac{b}{2} - e\right)$

于是  $N = \frac{1}{2} p_{\max} \times 3\left(\frac{b}{2} - e\right) a$ , 由此可得基础底面压力的计算公式:

$$p_{\max} = \frac{2N}{3\left(\frac{b}{2} - e\right)a} \quad (1-7)$$

技术提示:一般而言,工程上不允许基底出现拉力,因此,在设计基础尺寸时,应使合力偏心距满足  $e < \frac{b}{6}$  的条件,以保证安全。

## 二、任务实施

地基中附加应力的计算可直接运用弹性理论的成果。弹性理论的研究对象是均匀的、各向同性的弹性体。显然地基土并非是均匀的弹性体,地基土通常是分层的,有时也不符合直线变化关系,尤其在应力较大时,明显偏离直线变化。但实验证明:当地基上作用荷载不大,土中的塑性变形区很小时,荷载与变形之间近似地呈直线关系,直接用弹性理论成果,具有足够的准确性。因此,对土体有条件地假定它为“直线变形体”,可以运用弹性理论公式来计算土中应力。

### (一) 竖直集中荷载作用下附加应力的计算

1885年法国数学家布辛奈斯克(J. Boussinesq)用弹性理论推出了在半无限空间弹性体表面上作用有竖直集中荷载  $P$  时(如图 1-10),在弹性体内任意点  $M(x, y, z)$  引起的全部应力 ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ ) 和全部位移 ( $u_x, u_y, u_z$ )。其中对基础竖向变形计算直接有关的竖向附加应力  $\sigma_z$  为:

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi z^2} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} = \alpha \frac{P}{z^2} \quad (1-8)$$

式中:  $P$ ——集中荷载(kN);

$z$ —— $M$ 点距弹性体表面的深度(m);

$\alpha$ ——应力系数,可由  $r/z$  值查表 1-1 得到;

$R$ —— $M$ 点到力  $P$  的作用点  $O$  的距离(m)。

由公式(1-8)可知,集中力为常数时,  $\sigma_z$  是  $r/z$  的函数,因此给定  $r$  或  $z$  值就能得出  $\sigma_z$  在土中的分布规律。

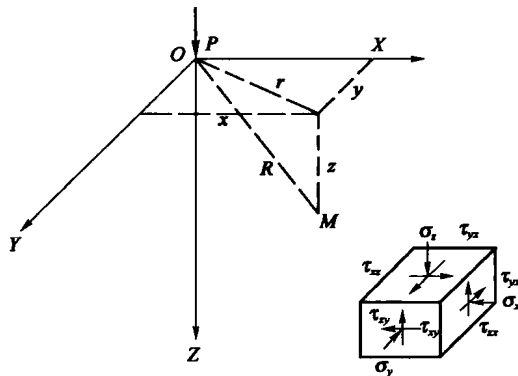


图 1-10 半无限体表面受竖直集中荷载作用时的应力



集中荷载下竖向附加应力系数  $\alpha$ 

表 1-1

$r/z$	$\alpha$	$r/z$	$\alpha$	$r/z$	$\alpha$	$r/z$	$\alpha$	$r/z$	$\alpha$
0.00	0.477 5	0.50	0.273 3	1.00	0.084 4	1.50	0.025 1	2.00	0.008 5
0.05	0.474 5	0.55	0.246 6	1.05	0.074 4	1.55	0.022 4	2.20	0.005 8
0.10	0.465 7	0.60	0.221 4	1.10	0.065 8	1.60	0.020 0	2.40	0.004 0
0.15	0.451 6	0.65	0.197 8	1.15	0.058 1	1.65	0.017 9	2.60	0.002 9
0.20	0.432 9	0.70	0.176 2	1.20	0.051 3	1.70	0.016 0	2.80	0.002 1
0.25	0.410 3	0.75	0.156 5	1.25	0.045 4	1.75	0.014 4	3.00	0.001 5
0.30	0.384 9	0.80	0.138 6	1.30	0.040 2	1.80	0.012 9	3.50	0.000 7
0.35	0.357 7	0.85	0.122 6	1.35	0.035 7	1.85	0.011 6	4.00	0.000 4
0.40	0.329 4	0.90	0.108 3	1.40	0.031 7	1.90	0.010 5	4.05	0.000 2
0.45	0.301 1	0.95	0.095 6	1.45	0.028 2	1.95	0.009 5	5.00	0.000 1

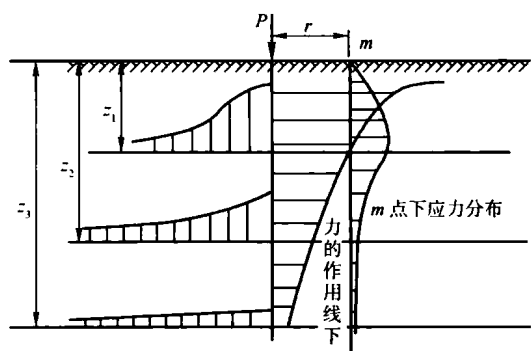
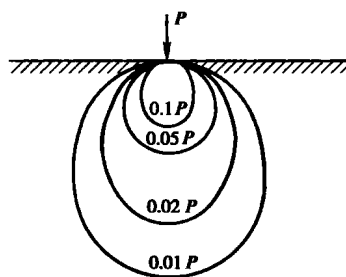
(1) 在集中荷载作用线上 ( $r=0$ ), 附加应力随深度的增加而减小; 当  $z=0$  时,  $\sigma_z = \infty$ , 这是由于将集中力作用面积看作零所致, 它一方面说明该解不适用集中力作用点处及其附近, 另一方面也说明在集中力作用点处  $\sigma_z$  很大。

(2) 在  $r>0$  的竖直线上, 附加应力从零随深度的增加而先增加, 至一定深度后达到最大, 而后随深度增加而减小。

(3) 在同一水平面上 ( $z = \text{常数}$ ), 竖直集中力作用线上的附加应力最大, 并随着  $r$  的增加逐渐减小。随着  $z$  的增加, 集中力作用线上的  $\sigma_z$  减小, 而水平面上应力的分布趋于均匀, 如图 1-11 所示。

如果将空间  $\sigma_z$  相同的点连接成曲面, 便得到  $\sigma_z$  等值线, 其空间曲面的形状如泡状, 是向下、向四周无限扩散的应力泡, 如图 1-12 所示。

**【例题 1-3】** 地面上作用集中力  $P = 200\text{kPa}$ , 计算深度  $z = 3\text{m}$  处水平面上的竖向附加应力, 以及距  $P$  的作用点  $r = 1\text{m}$  处竖直面上竖向附加应力, 并画分布图。

图 1-11 集中力作用下土中应力  $\sigma_z$  的分布图 1-12 集中力作用下土中  $\sigma_z$  分布等值线

解:

各点的竖应力可按公式(1-8)计算, 并列于表 1-2 及表 1-3 中, 同时可绘出  $\sigma_z$  的分布图 (图 1-13)。  $\sigma_z$  的分布曲线表明, 在半无限土体内任一水平面上, 随着与集中作用力点距离的增大,  $\sigma_z$  值迅速减小。在不通过集中力作用点的任一竖向剖面上, 在土体表面处, 随着深度的增加,  $\sigma_z$  逐渐增大, 在某一深度处达到最大值, 此后又逐渐减小。