



交通中等专业学校统编教材

土力学地基与基础

(公路与桥梁工程专业用)

王经羲 主编

王长青 主审



人民交通出版社

交通中等专业学校统编教材

Tulixue Diji Yu Jichu

土力学地基与基础

(公路与桥梁工程专业用)

王经羲 主编

王长青 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分十章,内容包括:土中应力;基础沉降量的计算;土的强度和地基承载力;土压力;地基与基础概述;天然地基上刚性浅基础;人工地基;桩基础;沉井基础;土的力学性质试验指导。各章均附复习思考题,有些章还有例题和习题,以便读者复习和练习。

本书为交通系统中等专业学校公路与桥梁专业统编教材,也可供有关技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土力学地基与基础/王经羲主编.-修订版.-北京:
人民交通出版社,1998
ISBN 7-114-02872-5

I. 土… II. 王… III. ①土力学-专业学校-教材②地
基-基础(工程)-专业学校-教材 IV. TU4
中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 29690 号

交通中等专业学校统编教材

土力学地基与基础

(公路与桥梁工程专业用)

王经羲 主编

王长青 主审

责任印制:张 恺 版式设计:刘晓方 责任校对:王静红

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:288 千

1998 年 6 月 第 1 版

2004 年 2 月 第 1 版 第 9 次印刷

印数:44001—47000 册 定价:15.00 元

ISBN 7-114-02872-5

U · 02045

前 言

1995年8月交通中专路桥专业委员会太原会议对第二轮路桥专业的教学计划和课程教学大纲作了修订。本教材是根据新修订的公路与桥梁工程专业《土力学地基与基础》教学大纲（见交通部教育司1996年所编的《交通普通中等专业学校教学文件》），并以第二轮教材（王经羲编）为基础修订编写的。根据中专学生的培养目标和当前国内的工程实际状况，修订本主要删去了原教材桩基础中多排桩的受力计算、桩基础整体承载力验算和沉井基础的设计计算内容，对人工地基内容也作了一些调整和补充；全书还参照近年来有关专业规范经过修订颁布的新版本（见主要参考书目）作了修改，以期在原有基础上进一步提高教材的质量，力求更好地符合中专教学要求，体现中专教材的特点，并适当反映科技新成就。

本书定稿前，由路桥工程学科委员会组织召开了审稿会，与会代表对书稿提出了很多宝贵意见，在此谨向代表们表示深切的感谢。但限于编者水平，书中难免存在不足之处，敬请批评指正。

本书由安徽交通学校王经羲主编，河北交通学校王长青主审，河南交通学校周东久参加编写，具体分工为：王经羲编写绪论、一、二、五～十章，周东久编写三、四章，并绘制全书插图。

本书计量单位采用法定计量单位，书中常用的计量单位与米制单位间的换算关系见附录。

编 者
1997年1月

目 录

绪论	1
第一章 土中应力	3
第一节 概述	3
第二节 自重应力计算	3
第三节 基础底面的压力分布	5
第四节 附加应力计算	7
复习思考题	21
习题	22
第二章 基础沉降量的计算	24
第一节 概述	24
第二节 固结试验	24
第三节 荷载试验	27
第四节 分层总和法计算沉降	29
第五节 饱和土体渗透固结的概念	33
复习思考题	34
习题	35
第三章 土的强度与地基承载力	36
第一节 概述	36
第二节 直接剪切试验测定土的强度指标	36
第三节 极限平衡条件与三轴剪切试验	38
第四节 地基容许承载力	41
复习思考题	49
习题	50
第四章 土压力	51
第一节 概述	51
第二节 静止土压力计算	52
第三节 朗金土压力理论	54
第四节 库伦土压力理论	59
第五节 填土面上有荷载时库伦公式的应用	63
第六节 库伦理论在复杂情况下的近似应用	67
复习思考题	69
习题	69
第五章 地基与基础概述	71
第一节 基础设计原则	71

第二节	地基与桥梁基础的分类	72
第三节	作用于基础上的荷载	73
第四节	基础埋置深度的选择	74
复习思考题	.....	77
第六章	天然地基上刚性浅基础	78
第一节	概述	78
第二节	基础尺寸的拟定	78
第三节	地基与基础的验算	80
第四节	天然地基上浅基础的施工	89
复习思考题	.....	100
习题	.....	101
第七章	人工地基	103
第一节	概述.....	103
第二节	砂砾垫层.....	103
第三节	砂桩与生石灰桩.....	106
第四节	加固地基的其它方法.....	107
第五节	湿陷性黄土地基的处理.....	109
复习思考题	.....	110
第八章	桩基础	111
第一节	概述.....	111
第二节	桩和桩基础的主要类型和构造.....	111
第三节	单桩轴向容许承载力.....	113
第四节	桩的内力和变位计算.....	123
第五节	单排桩基础设计计算步骤.....	135
第六节	桩基础的施工.....	136
复习思考题	.....	152
习题	.....	152
第九章	沉井基础	154
第一节	概述.....	154
第二节	沉井的类型与构造.....	154
第三节	沉井的施工.....	157
复习思考题	.....	164
第十章	土的力学性质试验指导	165
第一节	固结试验.....	165
第二节	直接剪切试验.....	167
附录	本书常用的计量单位及其换算关系	170
主要参考书目	.....	171

绪 论

一、本课程的任务和作用

所有建筑物都必须支承在地层上。一般把承托建筑物的地层称为地基，而把建筑物底部与地基相接触的那部分构造物称为基础，如图 0-1 所示。基础起着“承上启下”的作用，也就是说作用于建筑物上的所有荷载要通过基础传到地基上去。地基在承受这些荷载后，必须保证建筑物的稳定、可靠，并符合使用要求。

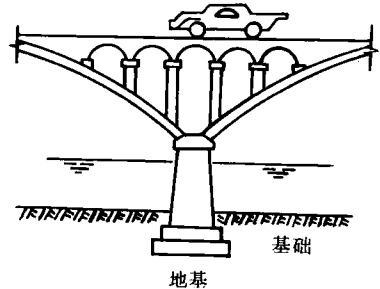


图 0-1 地基与基础

我们已经知道，地壳表层分布着岩石或比较松软的分散土，而地下经常遇到的则往往是具有相当厚度的分散土覆盖层。所以很多建筑物常支承在较松软的土层上。由于分散土是岩石经过长期激烈风化后的产物，其性质比岩石要复杂得多。就力学性质而言，它的强度远小于一般的建筑材料，且压缩性较大，特别是某些土，在含水量很高的情况下，承受荷载的能力很低。因此，人们需要对分散土加以专门研究，这就出现了“土力学”这门学科。

“土力学地基与基础”这门课，实际上包括土力学及地基与基础两部分。土力学部分的内容，概括地说就是研究各种常见的分散土体由荷载作用所引起的力学方面的变化规律；而地基与基础部分的内容，则主要是研究常见的桥梁涵洞基础和地基的类型、设计计算和施工方法。由于一般建筑物材料强度高于地基土，所以基础的设计，既要考虑上部结构的情况，更要考虑地基土的特性。对本专业来说，土力学属技术基础课，地基与基础属专业课，但由于前者是后者的理论基础，两部分关系十分密切，所以合并为一门课。

实践证明，建筑工程的成败，很大程度上取决于地基和基础的设计和施工质量。例如：苏州名胜虎丘塔，高 47.5m，底层直径 13.7m，全为砖砌，在建筑艺术上的确是个创造。但该塔的地基是在倾斜基岩上的覆盖层，基础下一边土深，另一边土浅，加之 1000 多年前建造该塔时，没有采取特殊措施，因此塔基产生很大的不均匀沉降，使塔身严重倾斜，现塔顶离中心线距离已达 2.3m，危及塔的安全。现存的国内外现代和近代建筑物都有不少类似的例子，或因不均匀沉降，或因地基强度不够而引起上部结构发生严重裂缝或整个建筑物严重倾斜，甚至倒塌。由于地基基础一旦出现问题，往往补救相当困难，因此，要搞好公路和桥梁建设，必须很好掌握本课程的知识。

二、本课程的特点和学习方法

本课程的内容和性质，决定了它的特点是：**既有理论，又有实验；既有设计，又有施工。**例如土力学部分，除了必须具有数学、理论力学、材料力学、结构力学及地质与土质学等课程的基础知识外，还要涉及到弹性理论方面的知识。而弹性理论是我们尚未学过的，因此在有关内容中，一般只直接应用其结论，指出其物理意义，而不作理论上的推导和证明。所以

在学习这部分内容时，应着重于了解物理概念，学会计算方法，不宜把注意力放到数学演算上去。在学习过程中，还要特别注意土的特性，重视土力学试验。在地基与基础部分，则要注意掌握设计和计算原理，学会一般的设计方法，熟悉地基基础主要的施工内容。此外，本课程还与施工机电、桥梁工程等课程有一定关系，在学习时要注意相互间的联系。

由于土力学要直接运用土质学的知识，所以在学习本课程前，要很好复习和熟悉一下有关土的各种物理性质和物理指标的含义和计算方法，以利于教学。

三、本学科发展情况简介

18世纪产业革命以后的欧洲，为了满足土建工程日益发展的需要，先是出现了土力学方面的个别理论，如1773年法国的库伦创立了砂土抗剪强度公式和土压力理论；19世纪英国朗金又以不同假定，提出了新的土压力理论；1885年法国布辛奈斯克求得了半无限弹性体在竖向集中力作用下应力和变形的理论解答等等。这些理论至今仍被广泛应用。1925年美国太沙基发表了专著《土力学》，标志着土力学开始成为一门独立的学科。随着近代建筑工程规模的日益扩大，对土的力学性质要求有更深入的了解，促使近几十年来加强了这方面的研究，涌现出不少有价值的专著。自从1936年以来，已先后召开了十一届国际土力学和基础工程学术会议，不少学者对土力学理论做出了宝贵贡献。

在地基和基础方面，我国古代早就有很高的技术水平。不少有名的古代建筑物和土建工程能完整地保留到今天，充分说明我们的祖先在解决极其复杂的地基和基础方面，早已具有丰富的经验。如1000多年前修筑的杭州大海塘，因造在软土上，很多地方都打了桩；距今1300多年修建的河北赵县赵州桥，是一座主拱跨度37.4m的大石拱桥，至今仍在在使用。其它如万里长城、南北大运河及分布在全国举不胜举的宫殿和桥梁建筑等，无不反映出我国劳动人民在这方面所显示出来的卓越才能，也证明我国人民在长期建筑实践中积累的土力学地基基础知识是很宝贵的。近年来，我国对地基的变形和强度，作了进一步的研究，在软土地基的人工加固方面也取得了很大成就；在桥梁墩台基础方面，同样涌现出大批新的基础结构形式和先进的施工方法，像钻孔灌注桩已被广泛采用，最大桩径达2.6m，钻孔深度已超过100m，在多座的长江大桥和其它巨大工程中，采用了管柱基础、气筒浮运沉井基础和沉井套管柱基础等，还采用了泥浆润滑套和气幕法下沉井等深水施工新工艺。对世界各国来说，随着高层建筑、核电站等巨型工程的兴建，也大大促进了本学科的进一步发展；而电子计算机的应用和实验测试技术的自动化，又标志着本学科进入一个崭新的时期。

当然，由于土的性质的复杂性，到如今很多土力学理论虽已有很大的发展，但与其它较成熟的学科比较，还相当年轻和不完善，应用于实践时多带有近似性。在地基基础方面，现在设计方法的整套理论还不足，施工机械化和自动化程度还不高。这些均有待于从事这一方面的科技人员不断实践、探索和研究，从而提出新的理论和方法，以期在该领域取得更大的突破。

第一章 土中应力

第一节 概 述

为了保证建筑物稳固、可靠，建筑物地基一般需要满足两个基本要求，即地基变形在容许范围以内和地基具有足够的强度和稳定性。这两个问题，一方面与土的物理力学性质有关；另一方面与土中应力状态的变化情况有关。而土中应力的变化，则与作用在地基上的荷载情况有关。

本章将研究土中应力问题，也就是要搞清楚作用于地基上的荷载与土中应力之间的关系。土中应力按其产生原因和作用效果的不同，可分为自重应力和附加应力两部分。

自重应力是由土的自重所引起的应力。对长期形成的天然土层而言，土在自重应力作用下，其沉降早已稳定，不会引起新的变形。在地基变形计算中，自重应力的作用效果多属这一种。所以自重应力又被称为常驻应力或原存应力。但当土层的自然状态遭到破坏时，土体将失去原来的平衡状态，这时在自重应力作用下，土体有可能出现变形或丧失稳定性；还有在人工填土中，自重应力也有促使土体变形和丧失稳定性的作用，这是需要注意的。

附加应力是指建筑物荷载或其它外荷载作用于土体上时，在土中引起的应力增量。显然，附加应力将使地基产生新的变形。附加应力过大，地基还可能因强度不够而丧失稳定性，使土体遭到破坏。

因此，土中任意点上的地基应力等于自重应力和附加应力之和。

在实际应用中，地基应力用得较多的是竖向正应力，下面将主要介绍竖向正应力的计算。

第二节 自重应力计算

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，这样，土中某点的自重应力将只与该点的深度有关。如图 1-1 所示，设土中某点 M 距离地面的深度为 z ，土的容重为 γ ，求解作用于 M 点上竖向自重应力 σ_{cz} 。可在 M 点平面上取一截面积 ΔA ，然后以 ΔA 为底，截取高为 z 的土柱。由于土体为半无限体，土柱的 4 个竖直面都是对称面，对称面上无剪应力作用，因此作用在 ΔA 的压力就等于该土柱的重力，即 $\gamma z \Delta A$ ，于是 M 点的竖向自重应力为：

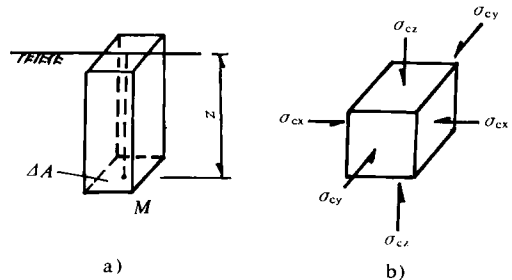


图 1-1 自重应力
a) 土柱；b) 应力单元体

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

式中： γ ——土的容重， kN/m^3 ；

z ——计算点的深度， m 。

M 点的水平向自重应力为：

$$\sigma_{cx} = \sigma_{cy} = \xi \sigma_{cz} = \xi \gamma z, \text{ kPa} \quad (1-2)$$

式中： ξ ——土的侧压力系数，与土的类别和状态有关。

由式(1-1)、式(1-2)可见，在匀质土中，自重应力均与深度 z 成正比。

实际计算中，竖向正应力用得较多，所以，随后章节中如没有特别说明，自重应力均指竖向正应力，且用 σ_c 表示。

一般地基常为非匀质成层土，即由容重不同的多层土组成，计算时应考虑不同土层的影响，如图1-2所示，各土层底面上的竖向自重应力为：

$$\sigma_{c1} = \gamma_1 h_1$$

$$\sigma_{c2} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2$$

$$\sigma_{c3} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3$$

式中： γ_1 、 γ_2 、 γ_3 ——分别为第1、2、3层土的容重；

h_1 、 h_2 、 h_3 ——分别为第1、2、3层土层的厚度。

为书写方便，任意 i 层底面的竖向自重应力可用下式表示：

$$\sigma_{ci} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1-3)$$

可见，一般地基的自重应力应当用自上而下逐层累计的方法进行计算。

计算自重应力时，对于地面水或地下水位以下的土层，若土为透水性的（如砂、碎石类土及液性指数 $I_L \geq 1$ 的粘性土等），应考虑水的浮力作用，即式中 γ 要用浮容重 γ' ；若土为非透水性的（如 $I_L < 1$ 的粘土、 $I_L < 0.5$ 的亚粘土和亚砂土及致密的岩石等），可不考虑水的浮力作用，即采用天然容重。但土的透水性问题比较复杂，有些粘性土的透水性不大，但又不能完全肯定为非透水性土，遇到这种土是否计入水的浮力，通常要按不利情况考虑。这个问题将在后面的地基基础计算中再作进一步介绍。

自重应力随深度变化的分布情况，可用图1-2所示的应力分布线表示，纵坐标表示计算点的深度，横坐标表示自重应力值。从图中可以看出，同一土层中自重应力分布线为直线，而成层地基中自重应力分布线则为折线，折点在土层分界面上，地面处的自重应力为零。总之，自重应力分布规律是随深度的增大而增大。

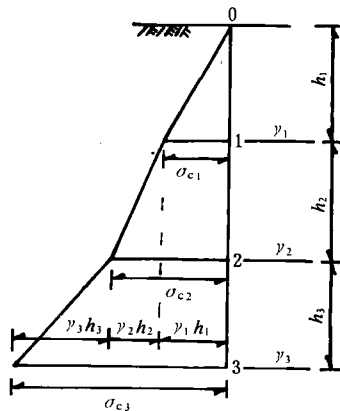


图1-2 成层土的自重应力分布线

在土层分界面上，地面处的自重应力为零。总之，自重应力分布规律是随深度的增大而增大。

例题 1-1 图1-3所示的土层，上层为透水性土，下层为非透水性土，求河底处及点1、2、3、4、5、6处的竖向自重应力，并绘出应力分布线。

解：竖向自重应力按式(1-3)计算，其中水下透水性土用浮容重 γ' ，非透水性土则用 γ 计算。

河底处自重应力为零，其它各点为：

$$\text{点 1 } \sigma_{c1} = \gamma' h_1 = 9.3 \times 3.5 = 32.6 \text{ kPa}$$

$$\text{点 2 } \sigma_{c2} = \gamma' (h_1 + h_2) = 9.3 \times 5.3 = 49.3 \text{ kPa}$$

$$\text{点 3 } \sigma_{c3} = \gamma' (h_1 + h_2 + h_3) = 9.3 \times 7.1 = 66.0 \text{ kPa}$$

$$\text{点 4 } \sigma_{c4} = \gamma' (h_1 + h_2 + h_3) + \gamma h_4 = 66.0 + 18.6 \times 2.4 =$$

110.6 kPa

$$\text{点 5 } \sigma_{c5} = 66.0 + 18.6 \times 4.8 = 155.3 \text{ kPa}$$

$$\text{点 6 } \sigma_{c6} = 66.0 + 18.6 \times 7.2 = 199.9 \text{ kPa}$$

$$\text{点 7 } \sigma_{c7} = 66.0 + 18.6 \times 9.6 = 244.6 \text{ kPa}$$

由各点的计算结果，按一定比例可绘出应力分布线，见

图 1-3。

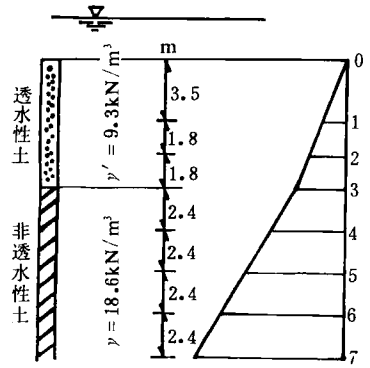


图 1-3 例题 1-1

第三节 基础底面的压力分布

作用于地基上的外荷载，通常是通过建筑物基础传递的，基础底面压力分布情况如何，将会影响土中附加应力的分布，所以为了计算土中附加应力，必须首先搞清在荷载作用下基础底面具体的压力分布情况。研究证明，这种压力分布情况与很多因素有关，例如：基础刚度、基础底面形状和尺寸、基础埋置深度、荷载合力大小和作用点位置以及土的性质等。在理论求解时，要考虑上述各种因素是很困难的，下面主要介绍刚性基础底面压力分布的概念，及其在实际应用中的简化计算公式。

一、刚性基础底面的压力分布

所谓刚性基础是指本身刚度相对地基土来说很大，在受力后底面不发生挠曲变形的基础。一般桥梁中采用的圬工基础就属这一类。

当基础底面为对称形状（如矩形、圆形）时，刚性基础在中心荷载作用下，一般基础底面压力分布呈马鞍形，如图 1-4a) 所示。随着荷载大小、土的性质及基础埋置深度的不同，其分布图形还可能变化。如荷载较大或基础埋置深度较小，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，基底压力分布将呈抛物线形，如图 1-4b) 所示。随着荷载的继续增大，基底压力分布可发展成倒钟形，如图 1-4c) 所示。

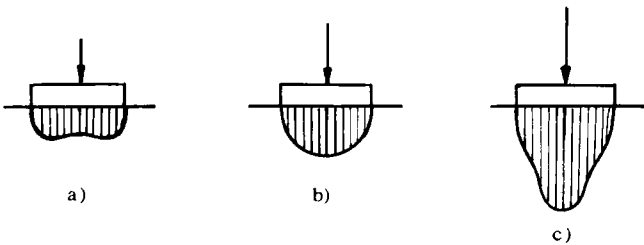


图 1-4 中心荷载下刚性基础底面的压力分布

上述情况将使土中附加应力计算变得十分复杂。但理论和实验都已证明：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。因此，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，基础底面压应力分布图形如图 1-5 所示，可用下列公式计算基底压应力值。

中心荷载作用时:

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

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 ——基础底面积, m^2 。

偏心荷载作用时, 当合力作用点不超过基底截面核心时, 可按材料力学的偏心受压公式计算:

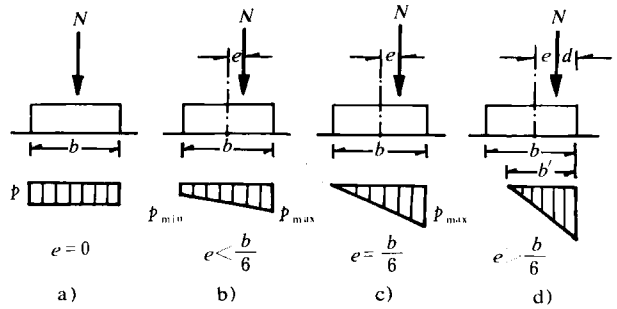


图 1-5 简化的基底压力分布

$$\left. \begin{matrix} p_{\max} \\ p_{\min} \end{matrix} \right\} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{N}{A} \pm \frac{Ne}{W} \quad (1-5)$$

式中: p_{\max} 、 p_{\min} ——基底边缘处压应力, kPa;

N 、 A ——同前;

M ——偏心荷载对基底形心的力矩, $kN \cdot m$;

e ——荷载偏心距, $e = \frac{M}{N}$, m;

W ——基础底面的截面抵抗矩, m^3 。

对长度为 a 、宽度为 b 的矩形底面, $A=ab$, $W=\frac{ab^2}{6}$, 故当 $e \leq \rho = \frac{b}{6}$ 时, 基底边缘应力也可写成:

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

对矩形截面当合力偏心距 $e > \frac{b}{6}$ 时, 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承受拉应力, 于是基底应力势必重新分布, 就不能再按式 (1-5) 或式 (1-6) 计算。这种情况下, 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 1-5d) 所示, 根据静力平衡条件应有以下关系:

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

这里 N 应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:

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

二、柔性基础底面的压力分布

刚度极小的基础, 称为柔性基础。如在地面上用分散土填筑而成的土坝和路堤, 本身不具有抵抗弯曲的刚度, 可随地面的变形而变形, 其底面的压力分布将与荷载分布图形相同。土

坝或路堤的重力,对地面来说是外荷载,一般路堤呈梯形,当填土容重为 γ ,路堤高度为 h 时,路堤底面压力分布图也呈梯形,其最大压应力为 γh ,如图1-6所示。

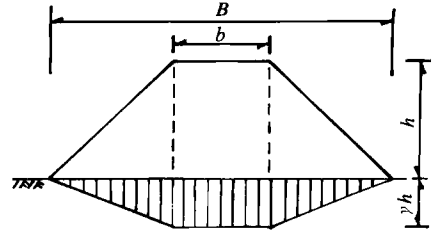


图 1-6 路堤底面压力分布

当基础刚度较小,如由钢筋混凝土筑成的基础,在外荷载作用下基础底面将发生挠曲变形,这时基础底面的压力分布将不同于前面两种情况,应考虑基础的实际刚度,一般按弹性地基上的梁和板的方法计算。这种基础有时也被称为柔性基础,实际上是一种有限刚度的基础。

第四节 附加应力计算

土中附加应力的计算,目前直接运用弹性理论的研究对象是均匀的、各向同性的弹性体。弹性体的主要特征是受力后应力和应变呈直线变化关系,荷载一旦消失,应力和应变都随之消失。地基土虽然并不是均匀的弹性体,但当地基上受力不大时,其荷载与变形之间近似地呈直线关系。所以在加载过程中,基本上符合弹性体关于应力与应变间的线性关系。但当荷载消失时,土体变形却不能完全恢复。因此,对土体可有条件地假定它为“直线变形体”,近似地运用弹性理论公式来计算土中应力。实验证明,当土中应力不太大时,直接用弹性理论成果,具有足够的准确度。

一、集中荷载作用下的应力——布辛奈斯克公式

当一个集中力垂直作用于均匀的、各向同性的半无限弹性体的表面时,弹性体内任意点 M 的应力计算公式,在弹性理论中已经解得,称布辛奈斯克公式。其中竖向正应力 σ_z 为:

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5}, \text{ kPa} \quad (1-8a)$$

式中: P ——集中荷载, kN;

z —— M 点距弹性体表面的深度, m;

R —— M 点到力 P 的作用点 O 的距离, m。

如图1-7所示, xoy 平面为地面, M 点的坐标为 (x, y, z) ,从图1-7中可以看出 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $R = \sqrt{r^2 + z^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。为计算方便通常把上式改写成:

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{[1 + (\frac{r}{z})^2]^{5/2}} \times \frac{P}{z^2} = \alpha \frac{P}{z^2} \quad (1-8b)$$

式中: α ——应力系数,可由 r/z 值查表1-1。

此外,还有两个水平向正应力(σ_x 、 σ_y)及6个剪应力($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$)公式,因用得较少,这里从略。

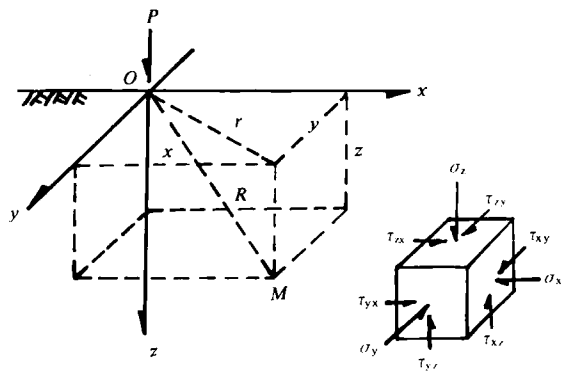


图 1-7 半无限体表面受集中力作用时的应力

集中力作用下的竖向应力系数

表 1-1

$\frac{r}{z}$	α	$\frac{r}{z}$	α	$\frac{r}{z}$	α	$\frac{r}{z}$	α
0	0.478	0.9	0.108	1.8	0.013	2.7	0.002
0.1	0.466	1.0	0.084	1.9	0.010	2.8	0.002
0.2	0.433	1.1	0.066	2.0	0.008	2.9	0.002
0.3	0.385	1.2	0.051	2.1	0.007	3.0	0.001
0.4	0.329	1.3	0.040	2.2	0.006	3.2	0.001
0.5	0.273	1.4	0.032	2.3	0.005	3.5	0.0007
0.6	0.221	1.5	0.025	2.4	0.004	4.0	0.0003
0.7	0.176	1.6	0.020	2.5	0.003	5.0	0.0001
0.8	0.139	1.7	0.016	2.6	0.003		

例题 1-2 作用在地面上的集中荷载 $P=30\text{kN}$ ，试求：

1. P 的作用线中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 各点的竖向附加应力；
 2. 深度为 $z=0.2\text{m}$ 的 a 、 b 、 c 、 d 、 e 各点的竖向附加应力；
 3. 距荷载作用线为 $r=0.1\text{m}$ 竖直线上 1、2、3、4、5、6 各点的竖向附加应力。
- 以上各点的位置见表 1-2、表 1-3 及表 1-4。

表 1-2

所求点	A	B	C	D	E
距地面深度 z, cm	1	7	14	28	56

表 1-3

所求点	a	b	c	d	e
距力作用线的水平 距离 r, cm	0	10	20	40	60

表 1-4

所求点	1	2	3	4	5	6
距地面深度 z, cm	0	2	5	10	20	40

解： 1. 荷载作用线中各点应力

因为荷载作用线上各点的 $r=0$ ， $\frac{r}{z}=0$ ，查表 1-1 得 $\alpha=0.478$ 。A 点的应力 $\sigma_z = \alpha \frac{P}{z^2} = 0.478 \times \frac{30}{0.01^2} = 143400\text{kPa}$ ，其余各点应力列于表 1-5 计算如下：

表 1-5

所求点	A	B	C	D	E
z, m	0.01	0.07	0.14	0.28	0.56
z^2, m^2	0.0001	0.0049	0.0196	0.0784	0.3136
$\sigma_z = \frac{14.34}{z^2}, \text{kPa}$	143400	2927	732	183	46

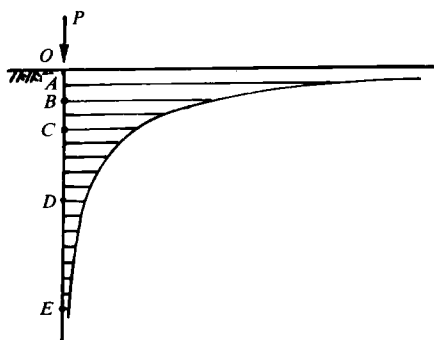
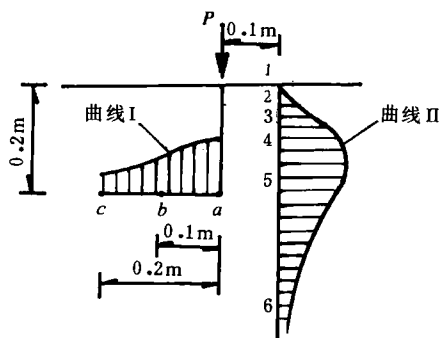
由表 1-5 所得结果可绘出力作用线下的 σ_z 分布线，如图 1-8 所示。

2. 深度为 $z=0.2\text{m}$ 的各点应力： $\sigma_z = \alpha \frac{P}{z^2} = \alpha \frac{30}{0.2^2} = 750\alpha \text{ kPa}$ ，由上式，各点应力列表计算如下（表 1-6）：

由表 1-6 结果可绘出同一深度上距力作用线不同距离的各点的 σ_z 分布线，如图 1-9 曲线 I 所示。

表 1-6

所求点	a	b	c	d	e
r, m	0	0.1	0.2	0.4	0.6
$\frac{r}{z}$	0	0.5	1.0	2.0	3.0
α	0.478	0.273	0.084	0.008	0.001
$\sigma_z = 750\alpha \text{ kPa}$	358	205	63	6	0.75

图 1-8 附加应力 σ_z 的分布线图 1-9 附加应力 σ_z 的分布曲线3. $r=0.1\text{m}$ 竖线上各点的应力:

对点 1, 由于 $z=0$, 不能用式 (1-8b), 应直接用式 (1-8a), 可得 $\sigma_z=0$ 。

其余各点用式 (1-8b), 列表计算如下 (表 1-7):

表 1-7

所求点	2	3	4	5	6
r, m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
z, m	0.02	0.05	0.1	0.2	0.4
r/z	5	2	1	0.5	0.25
α	0.0001	0.008	0.084	0.273	0.409
z^2, m^2	0.0004	0.0025	0.01	0.04	0.16
$\sigma_z = a \frac{P}{z^2} = \frac{30\alpha}{z^2}, \text{ kPa}$	7.5	96	252	205	76.7

按表 1-7 结果, 也可绘出在 $r=0.1\text{m}$ 竖线上随深度变化的 σ_z 分布线, 如图 1-9 曲线 II 所示。

由本例计算结果, 可归纳出集中荷载作用下附加应力的分布规律:

1. 力作用线上, σ_z 值随深度增加而急剧减小;
2. 同一水平线上, 距力的作用线愈远, σ_z 值愈小;
3. 在不通过力作用线的竖线上, σ_z 值随深度增加而变化的情况是: 先由零开始增加, 到某一深度达到最大值, 然后又减小。

为了更形象地理解这种分布规律, 可近似地设想地基土粒是由直径相同的短圆柱分层整

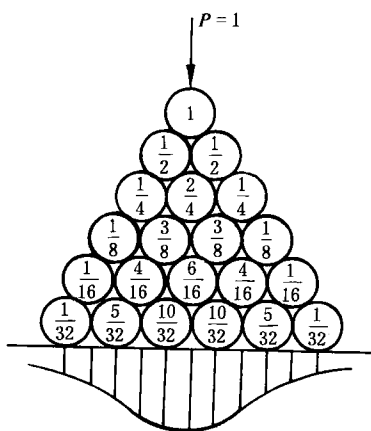


图 1-10 附加应力扩散现象示意图

齐地堆叠而成，如图 1-10 所示。当地面上作用集中力 $P=1$ 时，第一层只有 1 个短圆柱受力， $P=1$ ；第二层就有 2 个小柱受力，各为 $\frac{1}{2}$ ；第三层受力小柱为 3 个，两侧小柱受力 $\frac{1}{4}$ ，中间为 $\frac{2}{4} = \frac{1}{2}$ ；余类推。这样，传布愈深，受力的小柱数愈多，每个小柱受力值愈小，这叫附加应力的扩散现象。将最下层小柱受力大小按比例画出，可以看出这个图像与图 1-9 曲线 I 的 σ_z 分布曲线很相似。

必须注意，布辛奈斯克公式不适用于 $R=0$ 这一点（即集中力作用点），因为当 $R=0$ 时，按式 (1-8a)，该点应力将为无限大。实际上在集中力作用点附近区域内，应力已远远超过土的应力与应变直线关系的比例极限了。此外，理论上的

集中力实际上是不存在的，因为实际荷载总要通过一定的接触面积，由一个物体传递给另一物体。但当荷载作用面积相对作用物体来说为很小时，只要 R 不等于零，式 (1-8) 仍是有意义的。还需要指出，这里列出该公式的更重要意义在于：当作用外荷载是具有一定面积的分布荷载，且外荷载分布具有一定规律时，可以根据该公式用积分法求得相应的计算公式，这在实践中常要用到。另外，如果荷载分布范围和大小变化都不规则时，只要将荷载在分布范围内分成若干单元小面积上的集中力，仍可利用式 (1-8)，结合叠加原理求得土中任意点的附加应力。

下面主要介绍实用的分布荷载作用下土中附加应力的计算公式，一般只列出结果，不进行具体推导。要求学会计算，并了解土中附加应力分布的一般规律。

二、条形荷载下的附加应力

理论上条形荷载是指：作用于具有一定宽度 b ，而长度 a 为无限大的受力面积上的荷载，其荷载强度在长度方向保持不变。实际应用中，当 $a/b \geq 10$ 时即可视为条形荷载，如挡土墙和房屋的墙基础等作用荷载均属这一类。由于荷载沿长度方向都相同，且长度为无限大，因此土中某点的应力只与该点在横截面内的平面坐标有关，与该点在长度方向的坐标位置无关，即沿长度方向任意截面上的附加应力分布规律都相同。对这类问题理论上称为平面问题。

1. 均匀分布荷载

图 1-11 表示条形荷载的任意截面，当荷载强度 p 沿宽度 b 方向为均匀分布时，土中任意点 M （坐标为 x, z ）上的竖向正应力为：

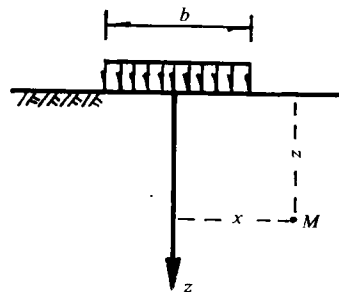


图 1-11 条形均布荷载下 M 点的应力

$$\sigma_z = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \frac{1-2n}{2m} + \arctg \frac{1+2n}{m} - \frac{4m(4n^2-4m^2-1)}{(4n^2+4m^2-1)^2+16m^2} \right] p \quad (1-9)$$

或 $\sigma_z = \alpha_s p$

$$\alpha_s = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \frac{1-2n}{2m} + \arctg \frac{1+2n}{2m} - \frac{4m(4n^2-4m^2-1)}{(4n^2+4m^2-1)^2+16m^2} \right]$$

式中： p ——荷载强度，kPa； $n = \frac{x}{b}$ 、 $m = \frac{z}{b}$ ；

α_s ——应力系数，由 $\frac{x}{b}$ 、 $\frac{z}{b}$ 值可查表 1-8。

表 1-8

x/b	0	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	x/b	0	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0
z/b							z/b						
0	1.00	1.00	0.50	0	0	0	1.75	0.35	0.34	0.30	0.21	0.13	0.07
0.25	0.96	0.90	0.50	0.02	0	0	2.00	0.31	0.31	0.28	0.20	0.13	0.08
0.50	0.82	0.74	0.48	0.08	0.02	0	3.00	0.21	0.21	0.20	0.17	0.135	0.10
0.75	0.67	0.61	0.45	0.15	0.04	0.02	4.00	0.16	0.16	0.15	0.14	0.12	0.10
1.00	0.55	0.51	0.41	0.19	0.07	0.03	5.00	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.09
1.25	0.46	0.44	0.37	0.20	0.10	0.04	6.00	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	—
1.50	0.40	0.38	0.33	0.21	0.11	0.06							

下面介绍一下由布辛奈斯克公式导得式 (1-9) 的简要过程：

先由式 (1-8) 导得均匀分布线荷载下的应力公式：

如图 1-12 所示，无限长的均布线荷载 q (kN/m) 作用于地面上，在 dy 段上的荷载为 qdy ，可视为集中力，它在土中任意点 M 所产生的竖应力按式 (1-8a) 应为：

$$d\sigma_z = \frac{3z^3}{2\pi(x^2+y^2+z^2)^{5/2}} qdy$$

上式积分后即得均布线荷载 q 所产生的竖应力：

$$\sigma_z = \frac{3z^3}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{qdy}{(x^2+y^2+z^2)^{5/2}} = \frac{2qz^3}{\pi(x^2+z^2)^2}$$

当地面上作用均布条形荷载 p 时，如图 1-13 所示，取 $d\xi$ 段上的荷载，可将 $pd\xi$ 视为均布线荷载 q ， M 点到线荷载的水平距离为 $(x-\xi)$ ，代入上式得：

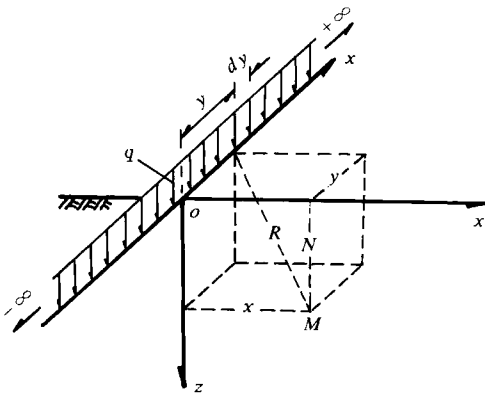


图 1-12 均布线荷载下的应力公式推导

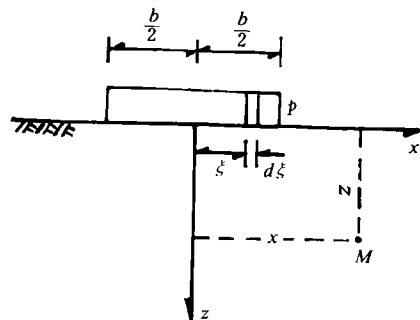


图 1-13 均布条形荷载下应力公式推导

$$d\sigma_z = \frac{2pd\xi z^3}{\pi[(x-\xi)^2+z^2]^2}$$