

基础工程

设计原理

■ 袁聚云 李镜培 楼晓明 等编著
■ 高大钊 主审



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



工
木
工
程
系
列
从
书

土木工程系列丛书

TU47/18=2

2007

基础工程设计原理

袁聚云 李镜培 楼晓明等 编著
高大钊 主审



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书系统地介绍了基础工程的设计原理和方法,其内容包括地基模型、浅基础设计的基本原理、浅基础结构设计、桩基础、沉井基础、支挡结构、地基处理、特殊性土地基、动力机器基础,共九章,每章均安排了大量的例题、习题和思考题。

本书可作为高等学校土木工程专业本科用教学用书,亦可供其他专业师生以及从事基础工程设计和施工的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基础工程设计原理/袁聚云等编著. —2版. —上海:
同济大学出版社, 2007. 12
(土木工程系列丛书)
ISBN 978-7-5608-2216-7

I. 基… II. 袁… III. ①基础(工程)—建筑
设计 ②地基处理 IV. TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 75155 号

土木工程系列丛书

基础工程设计原理

袁聚云 李镜培 楼晓明等 编著

责任编辑 荆 华 责任校对 谢惠云 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 18.75

印 数 1—4100

字 数 468000

版 次 2007 年 12 月第 2 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-2216-7/TU·380

定 价 32.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

本书是在2001年出版的《基础工程设计原理》的基础上编写而成的。本书由从事该课程教学并使用该教材多年的教师编写,在编写过程中吸取了近几年来本学科科学技术的新进展,补充了一些新的或有利于扩大学生知识面的内容,删去了一些不适宜于教学或比较陈旧的材料,并采用了国家及有关行业关于基础工程的最新规范和规程,同时,还采纳有关院校应用该教材的经验和提出的要求。

土木工程专业涉及工民建、桥梁、道路、地下建筑、岩土工程等学科门类,范围很广,本书在编写时,尽量考虑并兼顾到土木工程中各个行业技术工作的共同需要,选择最基本和最必需的内容,使学生能尽快适应土木工程专业中不同行业的需求,有利于学生综合能力的培养。同时,根据基础工程学科的特点,本书充分强调理论联系实际,尽可能地反映既经过工程实践考验又符合教学要求的内容,以更好地满足土木工程专业的教学需要。为了便于学生复习和自学,本书各章均安排了大量例题、习题和思考题。

本书系统地介绍了基础工程的设计原理和方法,其内容包括地基模型、浅基础设计的基本原理、浅基础结构设计、桩基础、沉井基础、支挡结构、地基处理、特殊性土地基、动力机器基础,共九章。

本书编写人员为:绪论——袁聚云,第一章——钱建固、袁聚云,第二章——梁发云、袁聚云,第三章——梁发云、李镜培,第四、五章——楼晓明,第六章——姚笑青、熊巨华,第七、八章——贾敏才、袁聚云,第九章——李镜培。

全书由袁聚云、李镜培、楼晓明主编,由高大钊教授主审。

本书在编写过程中得到了朱百里、洪毓康、胡中雄、董建国等教授的指导和帮助,同时还引用了许多专家、学者在教学、科研、设计和施工中积累的资料,在此一并表示感谢。

恳请读者提出批评和建议。

编者
2007年10月

目 录

前言

绪论	(1)
第一章 地基模型	(3)
第一节 概述	(3)
第二节 线性弹性地基模型	(3)
第三节 非线性弹性地基模型	(6)
第四节 地基模型参数的确定	(9)
第五节 地基的柔度矩阵和刚度矩阵	(12)
第六节 地基模型的选择	(14)
习题	(15)
思考题	(16)
第二章 浅基础设计的基本原理	(17)
第一节 概述	(17)
第二节 浅基础的类型	(18)
第三节 基础的埋置深度	(21)
第四节 地基承载力的确定及验算	(28)
第五节 基础底面尺寸的确定	(42)
第六节 地基的变形验算	(45)
第七节 地基基础的稳定性验算	(47)
第八节 减轻不均匀沉降危害的措施	(48)
习题	(53)
思考题	(54)
第三章 浅基础结构设计	(55)
第一节 概述	(55)
第二节 无筋扩展基础	(55)
第三节 墙下条形基础	(58)
第四节 柱下独立基础	(61)
第五节 柱下条形基础	(65)
第六节 十字交叉条形基础	(82)
第七节 筏板基础	(85)
习题	(89)
思考题	(91)
第四章 桩基础	(92)
第一节 概述	(92)

第二节 桩的类型及施工工艺	(93)
第三节 竖向荷载下的桩基础	(98)
第四节 水平荷载下的桩基础	(124)
第五节 桩基础设计	(142)
习题	(150)
思考题	(153)
第五章 沉井基础	(154)
第一节 概述	(154)
第二节 沉井基础的构造及施工工艺	(154)
第三节 沉井的设计与计算	(158)
习题	(170)
思考题	(170)
第六章 支挡结构	(171)
第一节 概述	(171)
第二节 挡土墙	(172)
第三节 基坑支护的型式及特点	(178)
第四节 基坑支护的设计与施工	(182)
习题	(199)
思考题	(200)
第七章 地基处理	(201)
第一节 概述	(201)
第二节 复合地基概论	(204)
第三节 换填垫层法	(208)
第四节 排水固结法	(213)
第五节 密实法	(221)
第六节 化学加固法	(224)
第七节 土工合成材料	(228)
习题	(231)
思考题	(231)
第八章 特殊性土地基	(232)
第一节 概述	(232)
第二节 黄土地基	(233)
第三节 膨胀土地基	(241)
第四节 红黏土地基	(246)
第五节 盐渍土地基	(250)
第六节 冻土地基	(255)
思考题	(261)
第九章 动力机器基础	(262)
第一节 概述	(262)
第二节 大块式基础的振动计算理论	(266)

第三节	地基土动力参数及其应用.....	(269)
第四节	锻锤基础设计.....	(274)
第五节	曲柄连杆机器基础设计.....	(280)
第六节	旋转式机器基础设计.....	(283)
第七节	动力机器基础的减振与隔振.....	(286)
习题.....		(291)
思考题.....		(291)
参考文献.....		(292)

绪 论

一、基础工程的重要性

任何建筑物都是建造在一定的地层上的,这里所指的建筑物不仅包括住宅楼、办公楼、厂房等,而且还包括桥梁、码头、水电站、高速公路等结构物。承受建筑物荷载的地层称为地基,而建筑物向地基传递荷载的下部结构则称为基础。

基础的结构形式很多,设计时应选择既能适应建筑物上部结构要求,同时也能适合场地工程地质条件,并在技术和经济上合理可行的基础结构方案。通常把埋置深度较浅,且施工简单的基础称为浅基础;反之,若浅层土质不良,须将基础埋置在较深的好土层上,且需要借助于特殊施工方法的基础,则称为深基础。当选定合适的基础形式后,若地基不加处理就可以满足设计要求的,称为天然地基;反之,当地基强度不足或压缩性很大而不能满足设计要求时,则需要对地基进行处理,经过人工处理后的地基则称为人工地基。

基础工程是隐蔽工程,影响因素很多,稍有不慎就有可能给工程留下隐患。大量工程实践表明,整个建筑物工程的成败,在很大程度上取决于基础工程的质量和水平。建筑物事故的发生,很多与基础工程问题有关。由此可见,基础工程设计与施工质量的优劣,直接关系到建筑物的安危。此外,基础工程的造价通常在整个工程造价中占有相当大的比例,尤其是在地质条件复杂的地区更是如此,其节省建设资金的潜力很大。因此,基础工程在整个建筑物工程中的重要性是显而易见的。

建筑物通常是由上部结构、基础和地基三部分所组成,这三部分虽然各自功能不同,但却是彼此相互影响、共同作用的,这三者之间互为条件,相互依存。因此,在进行基础工程设计和施工时,应该从上部结构与地基基础共同作用的整体概念出发,并全面地加以考虑,如此才能收到比较理想的效果。

二、基础工程的发展概况

基础工程是土木工程学科的一个重要分支,是人类在长期的生产实践中发展起来的一门应用学科。我们的祖先早在史前的建筑活动中就创造了许多基础工程成就,如宏伟的宫殿寺院和巍巍耸立的高塔,正是基础牢固,方能历经无数次大风强震考验而安然无恙,并度过千百年而留存至今。但是,古代劳动人民的大量基础工程实践活动,主要体现在能工巧匠的高超技艺上,由于当时生产力水平的限制,还未能提出系统的科学理论。

18世纪欧洲工业革命开始以后,随着资本主义工业化的发展,城建、水利、道路等建筑规模也在不断扩大,从而促使人们对基础工程加以重视并开展研究。当时在作为本学科理论基础的土力学方面,砂土抗剪强度公式、土压力理论等相继提出,基础工程也随之得到了发展。到了20世纪20年代,太沙基(Terzaghi)归纳了以往在土力学方面的成就,分别出版了《土力学》和《工程土质学》等专著,从而带动了各国学者对基础工程各方面进行研究和探索,并取得不断进展。

近几十年以来,由于土木工程建设的需要,特别是计算机和计算技术的引入,使基础工程,

无论在设计理论上,还是在施工技术上,都得到了迅速的发展,出现了如补偿式基础、桩-筏基础、桩-箱基础、巨型钢筋混凝土浮运沉井等基础形式。与此同时,在地基处理技术方面,如强夯法、砂井预压法、真空预压法、振冲法、旋喷法、深层搅拌法、树根桩、压力注浆法等都是近几十年来创造和完善的方法。另外,由于深基坑开挖支护工程的需要,还出现了地下连续墙、深层搅拌水泥土挡墙、锚杆支护及加筋土等支护结构形式。

但是,由于基础工程是地下隐蔽工程,再加上工程地质条件又极其复杂且差异巨大,因此使得基础工程这一领域变得十分复杂,虽然目前基础工程设计理论和施工技术比几十年前有突飞猛进的发展,但仍还有许多问题值得研究和探讨。

三、课程内容及学习要求

基础工程是土木工程专业的一门重要的技术基础课,本课程主要向读者系统地介绍基础工程的设计原理和方法,其内容包括常用地基模型选择与参数确定、浅基础的地基承载力计算和基础底面尺寸确定、地基变形验算、浅基础结构设计与计算、桩基础设计与计算、沉井基础设计与计算、支挡结构设计与计算、动力机器基础设计与计算、地基处理方法以及各种特殊土地基的判别等。

近几年来,在全国各地许多高校中,工民建、桥梁、道路、地下建筑、岩土工程等专业均先后合并为统一的土木工程专业,这要求学生必须有更宽的知识面,毕业后能尽快适应土木工程中各个行业技术工作的需要。本课程具有多方面的内容,因而要求有较广泛的必修课知识,如材料力学、土力学、土质学等,特别是土力学,是本课程的重要理论基础,必须先行学习并予以很好掌握。

基础工程是一门实践性很强的学科,在学习本课程时,必须紧密联系和结合工程实践。与此同时,由于各地自然地质条件的巨大差异,基础工程技术的地区性比较强,因此,在使用本教材时,可根据实际情况,有重点地选择适合教学需要的内容。

第一章 地基模型

第一节 概 述

当土体受到外力作用时,土体内部就会产生应力和应变,地基模型就是描述地基土应力和应变关系的数学表达式。

合理地选择地基模型是基础工程设计中的一个重要问题,要根据建筑物荷载的大小、地基性质以及地基承载力的大小合理地选择地基模型。所选用的地基模型应尽可能准确地反映土体在受到外力作用时的主要力学性状,同时还要便于利用已有的数学方法和计算手段进行分析。随着人们认识的发展,曾先后提出过不少地基模型,包括线性弹性地基模型、非线性弹性地基模型和弹塑性地基模型等,然而,由于土体性状的复杂性,想要用一个普遍都能适用的数学模型来描述地基土工作状态的全貌是很困难的,各种地基模型实际上都具有一定的局限性。

在基础工程设计中,通常采用较为简单的弹性地基模型,弹性地基模型可分为线性弹性地基模型和非线性弹性地基模型。线性弹性地基模型是最简单的地基模型,主要有文克勒地基模型、弹性半空间地基模型和分层地基模型,本章主要介绍弹性地基模型。当地基模型确定后,地基模型参数的确定是非常重要的。所以,本章还简要介绍一些地基模型参数的确定方法。

第二节 线性弹性地基模型

实际的基础刚度大多介于柔性基础和绝对刚性基础两种极端情况之间,故基础底面下的地基反力分布是复杂的。但是当建筑物的荷载较小,而地基承载力较大时,地基土的应力应变关系可采用线性弹性地基模型进行分析。线性弹性地基模型认为地基土在荷载作用下,其应力应变的关系为直线关系(图 1-1),可用广义虎克定律表示:

$$\{\sigma\} = [D_c] \{\epsilon\} \quad (1-1)$$

式中 $\{\sigma\} = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}\}^T$;

$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\}^T$;

$[D_c]$ ——弹性矩阵。

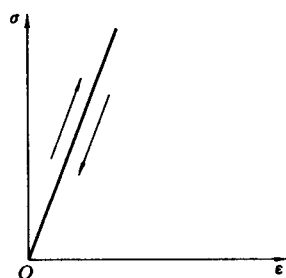


图 1-1 线性弹性地基模型

$$[D_c] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \text{对称} \quad (1-2)$$

式中 E ——材料的弹性模量;
 ν ——材料的泊松比。

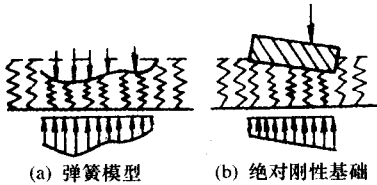
最简单和常用的三种线性弹性地基模型为:

- (1) 文克勒(Winkler)地基模型;
- (2) 弹性半空间地基模型;
- (3) 分层地基模型。

文克勒地基模型和弹性半空间地基模型正好代表线性弹性地基模型的两个极端情况,分层地基模型也属于线性弹性地基模型。

一、文克勒地基模型

文克勒地基模型假定地基是由许多独立的且互不影响的弹簧组成,即假定地基任一点所受的压力强度 p 只与该点的地基变形 s 成正比,而 p 不影响该点以外的变形(图 1-2)。这种关系的表达式为



$p=ks$ (1-3)

式中 k ——地基基床系数,表示产生单位变形所需的压力强度, kN/m^3 ;
 p ——地基上任一点所受的压力强度, kPa ;
 s —— p 作用点位置上的地基变形, m 。

图 1-2 文克勒地基模型

这个假定是文克勒于 1867 年提出的,故称文克勒地基模型。该模型计算简便,只要 k 值选择得当,可获得较为满意的结果。地基土越软弱,土的抗剪强度越低,该模型就越接近实际情况。但是,文克勒地基模型忽略了地基中的剪应力,按这一模型,地基变形只发生在基底范围内,而在基底范围外没有地基变形,这与实际情况是不符的,使用不当会造成不良后果。

表 1-1 所示的是不同地基土的基床系数 k 参考值。基床系数 k 可根据不同地基分别采用现场载荷板试验、室内三轴试验或室内固结试验成果获得(见本章第四节)。

表 1-1 基床系数 k 参考值

地基土种类与特征	$k/(\text{10}^4 \text{ kN/m}^3)$	地基土种类与特征	$k/(\text{10}^4 \text{ kN/m}^3)$
淤泥质土、有机质土或新填土	0.1~0.5	黄土及黄土类粉质黏土	4.0~5.0
软弱黏性土	0.5~1.0	紧密砾石	4.0~10
黏土及粉质黏土 软塑	1.0~2.0	硬黏土或人工夯实粉质黏土	10~20
可塑	2.0~4.0	软质岩石和中、强风化的坚硬岩石	20~100
硬塑	4.0~10.0	完好的坚硬岩石	100~150
松砂	1.0~1.5	砖	400~500
中密砂或松散砾石	1.5~2.5	块石砌体	500~600
密砂或中密砾石	2.5~4.0	混凝土与钢筋混凝土	800~1500

二、弹性半空间地基模型

弹性半空间地基模型是将地基视作均匀的、各向同性的弹性半空间体。当集中荷载 Q 作

用在弹性半空间体表面上时(图 1-3),根据布西奈斯克(Boussinesq)公式可求得位于距离荷载作用点 O 为 r 的点 i 的竖向位移为

$$s = \frac{Q(1-\nu^2)}{\pi E_0 r} \quad (1-4)$$

式中 E_0, ν ——地基土的变形模量(kPa)和泊松比。

从式(1-4)可知,当 r 趋于零时,会得到竖向位移 s 为无穷大的结果,这显然与实际是不符的。对于在均布荷载作用下矩形面积的中点竖向位移(图 1-4),可对式(1-4)进行积分求得:

$$\begin{aligned} s &= 2 \int_0^{\frac{a}{2}} 2 \int_0^{\frac{b}{2}} \frac{\frac{P}{ab} d\zeta d\eta (1-\nu^2)}{\pi E_0 \sqrt{\zeta^2 + \eta^2}} \\ &= \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E_0 a} F_{ii} \end{aligned} \quad (1-5)$$

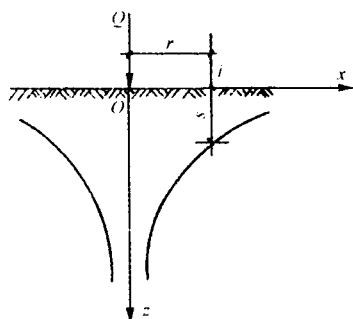


图 1-3 集中荷载 Q 作用在弹性半空间体表面上 i 点的竖向位移

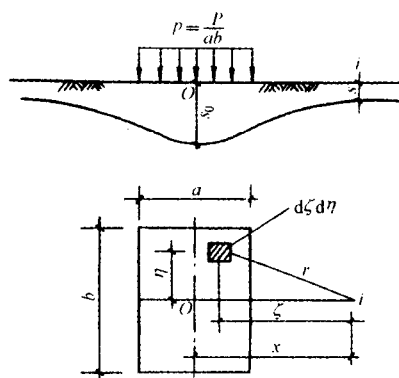


图 1-4 矩形均布荷载 p 作用下矩形面积中点 O 的竖向位移

式中 P ——在矩形面积 $a \times b$ 上均布荷载 p 的合力, kN;

E_0, ν ——地基土的变形模量(kPa)和泊松比。

$$F_{ii} = 2 \frac{a}{b} \left\{ \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} \ln\left[\frac{a}{b} + \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1}\right] + \ln\left[1 + \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1}\right] \right\} \quad (1-6)$$

对于荷载面积以外任意点的变形,同样可以利用布西奈斯克公式通过积分求得,不过计算繁琐,此时可按式(1-4)以集中荷载计算。

弹性半空间地基模型虽然具有扩散应力和变形的优点,比文克勒地基模型合理些,但是它的扩散能力往往超过地基的实际情况,造成计算的沉降量和地表沉降范围都较实测结果为大,同时也未能反映地基土的分层特性。一般认为造成这些差异的主要原因是地基的压缩层厚度是有限的,而且即使是由同一种土层组成的地基,其模量也随深度而增加,因而是非均匀的。

三、分层地基模型

分层地基模型即是我国地基基础规范中用以计算基础最终沉降量的分层总和法(图 1-5)。按照分层总和法,地基最终沉降 s 等于压缩层范围内各计算分层在完全侧限条件下的压缩量之和。分层总和法的算式如下:

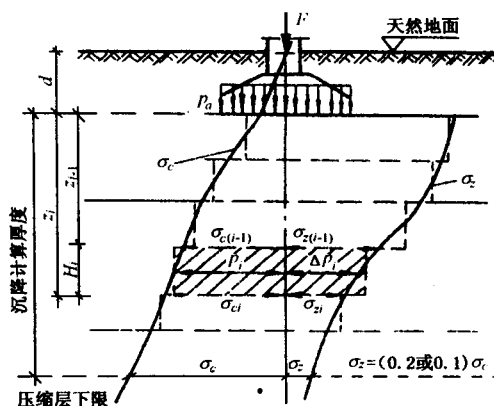


图 1-5 分层总和法计算地基最终沉降量

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}} H_i \quad (1-7)$$

式中 H_i ——基底下第 i 分层土的厚度；
 E_{si} ——基底下第 i 分层土的对应于 $p_{1i} \sim p_{2i}$ 段的压缩模量；
 $\bar{\sigma}_{zi}$ ——基底下第 i 分层土的平均附加应力；
 n ——压缩层范围内的分层数。

分层地基模型能较好地反映地基土扩散应力和变形的能力，能较容易地考虑土层非均质性沿深度的变化和土的分层，通过计算表明，分层地基模型的计算结果比较符合实际情况。但是，这个模型仍系弹性模型，未能考虑土的非线性和过大的地基反力引起地基土的塑性变形。

第三节 非线性弹性地基模型

线弹性模型是假设土的应力和应变为线性比例，这显然与实测结果是不吻合的。一般来说，土的线弹性模型只适用于计算地基中的竖向应力分布，得到的结果比较符合实际。而在计算地基的位移和沉降时，线弹性模型只适用于不排水加荷的情况，并且对于破坏要有较大的安全系数，不能产生明显的屈服。但实际上土体在加载过程中很容易产生屈服，屈服后除了产生弹性变形以外，还有不可恢复的塑性变形，土体的应力应变关系通常总是表现为非线性的。

室内三轴试验测得的正常固结黏土和中密砂的应力应变关系曲线通常所图 1-6 所示。

若从初始状态 O 点加载，得到加载曲线 OAC 。其中 OA 为直线阶段，在此阶段可认为土的变形是线弹性的；而在 A 点以上，土体将产生部分不可恢复的塑性变形。

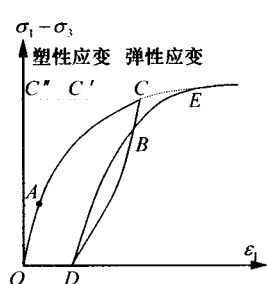


图 1-6 土体非线性变形特性

若加载至 C 点，然后完全卸载至 D 点，则试验得到的卸载曲线为 CBD ，再从 D 点加载，得到再加载曲线 DBE 。再加载曲线最终将与初始加载曲线 OAC 的延长线重合。因此，从 O 点加载至 C 点，引起的轴向应变可分为可恢复的弹性应变 $C'C$ 和不可恢复的塑性应变 $C''C'$ 。

图 1-6 表明，土体的应力应变关系通常总是表现为非线性、非弹性的。此外，从图中还可以看出，土体的变形还与加载的应力路径密切相关，加荷时与卸荷时变形的特性有很大差

异。一般说来,土体的这些复杂变形特性用弹塑性地基模型模拟较好,但是弹塑性模型运用到工程实际较为复杂,而较为常用的是采用非线性弹性地基模型,它能够模拟发生屈服后的非线性变形的形状,但是非线性弹性地基模型忽略了应力路径等重要因素的影响。尽管如此,非线性弹性地基模型还是被广泛用于土工问题的有限元分析中,并得到较为满意的结果。非线性弹性模型与线弹性模型的区别主要在于前者的弹性模量与泊松比是随着应力变化的,而后者则不变。

非线性弹性地基模型一般是通过拟合三轴压缩试验所得到的应力应变曲线而得到的。应用较为普遍的是邓肯(Duncan)和张(Chang)等人 1970 提出的方法,通常称为邓肯-张模型。

1963 年,康德尔(Konder)提出土的应力-应变关系为曲线型,邓肯和张根据这个关系并利用摩尔-库仑强度理论导出了非线性弹性地基模型的切线模量公式,该模型认为在常规三轴试验条件下土的加载和卸载应力-应变曲线均为双曲线。可用下式表达:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (1-8)$$

式中 $\sigma_1 - \sigma_3$ ——偏应力(σ_1 和 σ_3 分别为土中某点的最大和最小主应力),常规三轴试验中为轴向压力;

ϵ_1 ——常规三轴试验中的轴向主应变;

σ_3 ——周围应力;

a, b ——均为试验参数。对于确定的周围应力 σ_3 ,其值为常数。

$$a = \frac{1}{E_i} \quad (1-9)$$

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (1-10)$$

式中 E_i ——初始切线模量;

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ——偏应力的极限值,即当 $\epsilon_1 \rightarrow \infty$ 时的偏应力值。

邓肯和张通过分析推导,得到用来计算地基中任一点的切线模量 E_i 的公式为:

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \epsilon_1} = E_i [1 - b(\sigma_1 - \sigma_3)]^2 \\ &= E_i \left[1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \right]^2 \end{aligned} \quad (1-11)$$

$$\text{定义破坏比: } R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (1-12)$$

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏时的偏应力,砂性土为 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线的峰值;黏性土取 $\epsilon_1 = 15\% \sim 20\%$ 对应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 值,见图 1-7。

对于破坏时的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$,根据摩尔-库仑破坏准则可表示为黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的函数,即

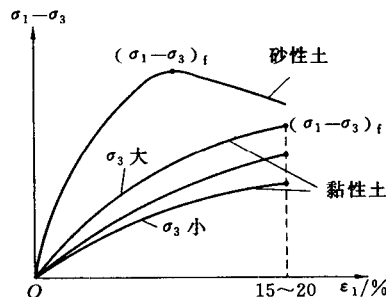


图 1-7 破坏时的偏应力值

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_t = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1-13)$$

同时,根据不同的周围应力 σ_3 可以得到一系列的 a 和 b 值,分析 σ_3 和 $E_t = \frac{1}{a}$ 的关系可得到:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (1-14)$$

把式(1-12)、式(1-13)和式(1-14)代入式(1-11),得:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (1-15)$$

式中 K, n, c, φ, R_f ——为确定切线模量 E_t 的五个试验参数;

p_a ——单位与 σ_3 相同的大气压力。

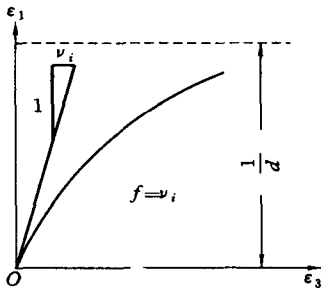


图 1-8 轴向应变 ϵ_1 与侧向应变 ϵ_3 的关系(邓肯-张模型)

同理,邓肯和张还建立了在室内常规试验条件下轴向应变 ϵ_1 与侧向应变 ϵ_3 (图 1-8)的关系:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_3}{f + d\epsilon_3} \quad (1-16)$$

式中, f, d 为试验参数。

于是得到切线泊松比为

$$\nu_t = \frac{\partial \epsilon_3}{\partial \epsilon_1} = \frac{f}{(1 - \epsilon_1 \cdot d)^2} = \frac{\nu_i}{(1 - \epsilon_1 \cdot d)^2} \quad (1-17)$$

式中, ν_i 为初始切线泊松比, $\nu_i = f$ 。

初始切线泊松比可用下式表示:

$$\nu_i = G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (1-18)$$

通过式(1-15),可消去式(1-17)中的 ϵ_1 ,并将式(1-18)代入式(1-17),从而得到切线泊松比 ν_t 为

$$\nu_t = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{(1 - A)^2} \quad (1-19)$$

式(1-19)中的 A 为:

$$A = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot d}{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]} \quad (1-20)$$

因此,确定切线泊松比 ν_t 还需要增加 G, F, d 这三个试验参数。

非线性弹性地基模型归纳起来集中反映在式(1-15)和式(1-19)。在计算时,切线模量 E_t 所需的五个试验常数 K, n, c, φ 和 R_f 可用常规三轴试验获得。

实践表明,该模型在荷载不太大的条件下(即不太接近破坏的条件下)可以有效地模拟土

的应力应变的非线性。这是因为当土中应力水平不高,即周围应力 $\sigma_3 \leq 0.8\text{MPa}$ 时, c 和 φ 近似为定值;而当周围应力 $\sigma_3 > 0.8\text{MPa}$ 时, φ 值随着周围应力的增加而降低,此时如果仍然采用低应力水平下测得的 c 和 φ 来确定切线模量 E_t 就不太合适了。

最后必须指出,非线性弹性地基模型虽然使用较为方便,但是该模型忽略了土体的应力途径和剪胀性的影响,它把总变形中的塑性变形也当着弹性变形处理,通过调整弹性参数来近似地考虑塑性变形。当加载条件较为复杂时,非线性弹性地基模型的计算结果往往与实际情况不符。为此,国外从 20 世纪 60 年代起开始重视具有普遍意义的弹塑性模型研究,并提出了许多种弹塑性模型,其中最重要的有适合黏性土的剑桥(Cambridge)模型、适合砂性土的拉德-邓肯(Lade-Duncan)模型等。然而,限于弹塑性模型的复杂性,本教材不对弹塑性模型作专门的介绍。

第四节 地基模型参数的确定

当建筑场地和建筑物的形式确定以后,人们可以通过荷载的大小、建筑物的基础类型和埋深、场地的地质条件等因素确定合适的地基模型。合适的地基模型确定后,地基模型参数的确定方法便成为设计人员首先需要考虑的问题。这是因为,无论所选择的地基模型是如何的合理,如果模型中参数的测定方法不合理或无法准确获得,则以此设计的基础工程质量及精度也难以得到保证。因此,地基模型参数的确定在地基基础的设计中是极其重要的,它不仅仅是岩土体测试的直接结果,同时还要考虑理论与实测性状的一致性,并根据实践经验予以综合确定。弹性半空间地基模型的参数 E_0 为土的变形模量,分层地基模型的参数 E_s 为土的压缩模量,其确定方法均已在“土力学”课程中介绍过。土的泊松比 ν 目前还较难准确测定,一般可依据经验取 $0.2 \sim 0.4$,对于饱和土的瞬时变形,泊松比 ν 可取 0.5 。下面主要介绍文克勒地基模型中基床系数 k 的确定。

对于文克勒地基模型中的参数基床系数 k ,在没有试验条件的情况下,可参照表 1-1 对同地基土进行取值。此外,基床系数也可根据现场载荷板试验、室内三轴试验或室内固结试验成果获得,下面将分别加以介绍。

(一) 载荷板试验结果

由宽度 B_1 的正方形载荷板试验结果,可得到荷载 p 沉降 s 的曲线(图 1-9),从而可得到荷载板下的基床系数 k_p 为

$$k_p = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} \quad (1-21)$$

式中 p_2, p_1 ——基础底面计算压力和土的自重压力;

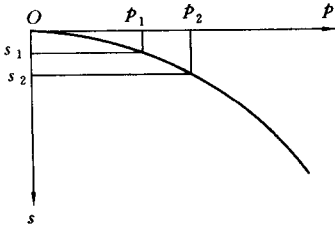
s_2, s_1 ——与 p_2, p_1 相应的沉降量。

式(1-21)的 k_p 一般不能直接用于实际计算,应作修正(若 $B_1 \geq 707\text{mm}$ 时也可不做修正直接用于计算),可按太沙基(Terzaghi, 1955)建议的方法进行如下修正:

1. 基础大小的影响

砂土 $k = k_p \left(\frac{B+B_1}{2B} \right)$

(1-22) 图 1-9 荷载 p 沉降 s 关系曲线



黏土

$$k = k_p \frac{B_1}{B} \quad (1-23)$$

式中, B 为基础宽度, m。

2. 基础形状的影响

对同一种土和 B 相同的基础, k 随基础长度 L 而变化:

$$k = k_p \left(\frac{1 + 0.5B/L}{1.5} \right) = k_p \left(\frac{2L + B}{3L} \right) \quad (1-24)$$

3. 基础埋深 D 的影响

实测表明, 砂土的平均模量 E 随着深度成正比增加, 即

$$E = C\gamma z \quad (1-25)$$

式中 C ——取决于砂土性质的比例常数;

γ ——砂土的重度;

z ——深度。

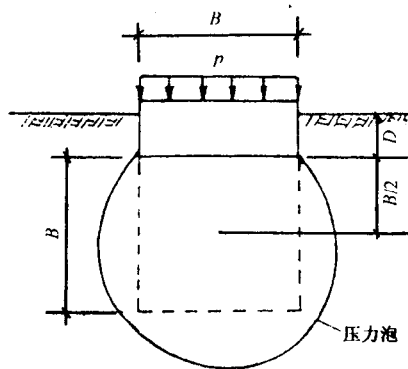


图 1-10 土中应力影响范围

如图 1-10 所示, 取土中平均应力为 $p/2$, 其影响深度相应为 B , 则基底下 $B/2$ 处的平均模量为

$$E_p = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{p/2}{s/B} = C\gamma \left(D + \frac{B}{2} \right)$$

得

$$s = \frac{Bp}{C\gamma(2D+B)}$$

则

$$k = \frac{p}{s} = C\gamma \left(1 + 2 \frac{D}{B} \right) \quad (1-26)$$

式(1-26)表明地基基床系数 k 值随着基础埋深 D 的增大而增大。但当 $D \geq \frac{B}{2}$ 时, 从式(1-26)求得的 k 值就值得怀疑了。此时

$$k \geq 2C\gamma \quad (D \geq \frac{B}{2} \text{ 时}) \quad (1-27)$$

对于黏土, 埋深 D 对地基表面基床系数 k 值的修正可按式(1-28)进行, 令 k_s 为表面基床系数, 则

$$\begin{cases} k = k_s \left(1 + \frac{D}{\sqrt{F}} \right) \\ k = k_s \left(1 + \frac{2D}{B} \right) \end{cases} \quad (1-28)$$

式中 F ——基础的基底面积。

B ——基础的基底宽度

需要指出的是, 由于试验使用的载荷板的宽度(或直径)尺寸通常要小于基础的宽度尺寸, 试验结果只能反映浅层地基土的受荷变形特性。因此, 当基础宽度较大时, 地基基床系数不宜采用载荷试验方法加以确定, 此时须寻求其他适用方法。