



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校土木工程专业规划教材

基础工程设计原理

Design Principles of Foundation Engineering

袁聚云 楼晓明 姚笑青 熊巨华 李镜培 编 著
高大钊 龚 剑 主 审



人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校土木工程专业规划教材

基础工程设计原理

袁聚云 楼晓明 姚笑青 熊巨华 李镜培 编著
高大钊 龚 剑 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,系统介绍了基础工程的设计原理和方法。其内容包括地基模型、浅基础地基计算、浅基础结构设计、桩基础、沉井基础、基坑支护结构、地基处理、特殊性土地基、动力机器基础与地基基础抗震等,共计九章,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的教学用书,也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. —北京:人民交通出版社,2011.5
ISBN 978-7-114-08853-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 004524 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校土木工程专业规划教材

书 名:基础工程设计原理

著 作 者:袁聚云 楼晓明 姚笑青 熊巨华 李镜培

责任编辑:曲 乐 丁润铎

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:北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:20

字 数:496 千

版 次:2011 年 5 月 第 1 版

印 次:2011 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08853-7

定 价:36.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书由从事《基础工程设计原理》课程教学多年的教师编写,并参照全国高等学校土木工程专业指导委员会对该课程的设置及教学大纲要求而组织编写。在编写过程中,本书充分采纳了教学经验丰富的教师的意见,结合了工程最新技术,采用了国家及有关行业的最新规范。

土木工程专业涉及工民建、桥梁、道路、地下建筑、岩土工程等方面,范围很广。本书在编写时,尽量考虑并兼顾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,尽可能地反映经过工程实践考验且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。

本书系统介绍了基础工程的设计原理与方法,其内容包括地基模型、浅基础地基计算、浅基础结构设计、桩基础、沉井基础、基坑支护结构、地基处理、特殊土地基、动力机器基础与地基基础抗震等,共计九章。本书每章还安排了大量的例题、习题和思考题,以便学生复习和自学。

本书由袁聚云、楼晓明、姚笑青、熊巨华、李镜培编著,其中,绪论由袁聚云编写,第一章由钱建固、袁聚云编写,第二章、第三章由姚笑青编写,第四章、第五章由楼晓明编写,第六章由熊巨华编写,第七章由熊巨华、贾敏才编写,第八章由楼晓明、贾敏才编写,第九章由李镜培、楼晓明、袁聚云编写。全书最后由袁聚云和楼晓明统稿。

全书由同济大学高大钊教授和上海建工集团总工程师龚剑教授级高工主审。

本书在编写过程中得到了高大钊、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,在此一并表示衷心感谢。

本书可作为高等学校土木工程专业的教学用书,也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。

恳请读者提出批评和建议。

编 者

2010 年 12 月于同济大学

目 录

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 地基的柔度矩阵和刚度矩阵	9
第五节 地基模型的选择	10
习题	11
思考题	11
第二章 浅基础地基计算	12
第一节 概述	12
第二节 基础工程设计基本原理	13
第三节 浅基础的类型	20
第四节 基础的埋置深度	23
第五节 地基承载力的确定	30
第六节 地基承载力的验算及基础底面尺寸的确定	35
第七节 地基的变形验算	41
第八节 地基基础的稳定性验算	44
第九节 减轻不均匀沉降危害的措施	46
习题	50
思考题	51
第三章 浅基础结构设计	52
第一节 概述	52
第二节 地基基础与上部结构共同作用概念	53
第三节 无筋扩展基础	57
第四节 墙下条形基础	61
第五节 柱下独立基础	64
第六节 柱下条形基础	68
第七节 十字交叉条形基础	83
第八节 筏形基础	86
第九节 箱形基础	91
习题	93

思考题	94
第四章 桩基础	95
第一节 概述	95
第二节 桩的类型及施工工艺	96
第三节 竖向荷载下的桩基础	101
第四节 水平荷载下的桩基础	126
第五节 桩基础设计	143
习题	150
思考题	152
第五章 沉井基础	153
第一节 概述	153
第二节 沉井基础的构造及施工工艺	153
第三节 沉井的设计与计算	157
习题	168
思考题	169
第六章 基坑支护结构	170
第一节 概述	170
第二节 支护结构上的土压力计算	179
第三节 水泥土墙支护结构设计	185
第四节 排桩、地下连续墙支护结构设计	189
第五节 土钉墙支护结构设计	198
习题	204
思考题	205
第七章 地基处理	206
第一节 概述	206
第二节 换填法	209
第三节 密实法	214
第四节 排水固结法	219
第五节 复合地基设计原理	227
第六节 振冲置换法	232
第七节 化学加固法	234
第八节 土工合成材料在加筋法中的应用	242
习题	245
思考题	245
第八章 特殊性土地基	247
第一节 概述	247
第二节 黄土地基	248
第三节 膨胀土地基	255

第四节 红黏土地基..... 260
 第五节 盐渍土地基..... 264
 第六节 冻土地基..... 269
 思考题..... 273
 第九章 动力机器基础与地基基础抗震..... 275
 第一节 概述..... 275
 第二节 大块式基础的振动计算理论..... 279
 第三节 地基土动力参数及其应用..... 282
 第四节 锻锤基础设计..... 286
 第五节 曲柄连杆机器基础设计..... 292
 第六节 旋转式机器基础设计..... 295
 第七节 动力机器基础的减振与隔振..... 298
 第八节 地基基础抗震..... 302
 习题..... 308
 思考题..... 309
 参考文献..... 310

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,整个建筑物工程的质量,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、工期通常在整个工程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、工期的潜力很大。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的。这三部分虽然各自功能不同,但彼此相互影响、共同作用,三者之间互为条件,相互依存;同时,基础工程施工、受力变形会对周围土层产生影响,邻近工程之间会产生相互影响。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和环境岩土工程的整体概念出发,全面加以考虑,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的成就,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,并经千百年而留存至今。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,还未能提炼成系统的科学理论。

18世纪欧洲工业革命开始以后,随着资本主义工业化的发展,城建、水利、道路等建筑规模也在不断扩大,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研究,分别发表了《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的研究和探索,并不断取

得进展。

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、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并完善的方法。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,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

为满足“宽口径、复合型”土木工程专业人才的需要,学生必须有更宽的知识面,毕业后才能适应土木工程中各个行业技术工作,因此,本书在编写时也相应地扩大了其相关内容。

基础工程是土木工程专业的一门重要的技术基础课,要求有较广泛的先修课知识,如材料力学、土力学、土质学、结构力学、钢筋混凝土结构等。特别是土力学,它是本课程的重要理论基础,必须对此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,还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(亦称土的本构定律)就是描述地基土在受力状态下应力和应变之间关系的数学表达式。从广义上说,地基模型是土体在受力状态下的应力、应变、应力水平、应力历史、加载率、加载途径以及时间、温度等之间的函数关系。

合理地选择地基模型是基础工程分析与设计中一个非常重要的问题,它不仅直接影响基底反力(接触应力)的分布,而且还影响着基础和上部结构内力的分布。因此,在选择地基模型时,首先必须了解每种地基模型的适用条件,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选择地基模型,并考察所选择模型是否符合或比较接近所建场地的具体地基特性。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,各国学者曾先后提出过不少地基模型,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。

在基础工程分析与设计中,通常采用线性弹性地基模型、非线性弹性地基模型和弹塑性地基模型等,本章主要介绍前两类地基模型;此外,还简要介绍地基的柔度矩阵和刚度矩阵,以及地基模型选择时需要考虑的因素。

第二节 线性弹性地基模型

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。

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

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

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

$[D_e]$ ——弹性矩阵。

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

对称

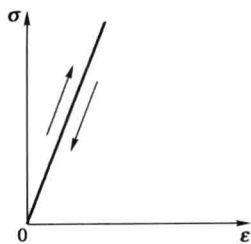


图 1-1 线性弹性地基模型

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分别为：

(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分别代表线性弹性地基模型的两个极端情况，而常用的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所组成，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)。其表达式为：

$$p = ks \quad (1-3)$$

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 。

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，即可获得较为满意的结果，故在地基梁和板以及桩的分析中，文克勒地基模型仍被广泛地采用。台北 101 大楼设计采用的就是发展的文克勒地基模型。但是，文克勒地基模型在理论上不够严格，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。

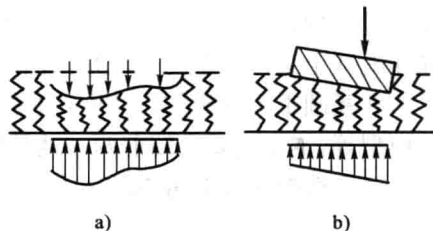


图 1-2 文克勒地基模型

a) 弹簧模型；b) 绝对刚性基础

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 可采用现场荷载板试验方法获得。

基床系数 k 参考值

表 1-1

地基土种类与特征		$k(\times 10^4 \text{ kN/m}^3)$	地基土种类与特征	$k(\times 10^4 \text{ kN/m}^3)$
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	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 P 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 P 距离 r 的点 i 的竖向变形为:

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

式中: E_0 、 ν ——分别为地基土的变形模量和泊松比。

从上式可知,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。

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

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

E_0 、 ν ——分别为地基土的变形模量和泊松比。

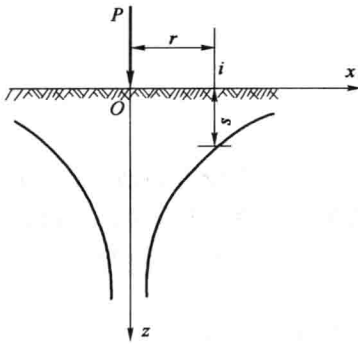


图 1-3 集中荷载 P 作用在弹性半空间体表面上点 i 的竖向位移

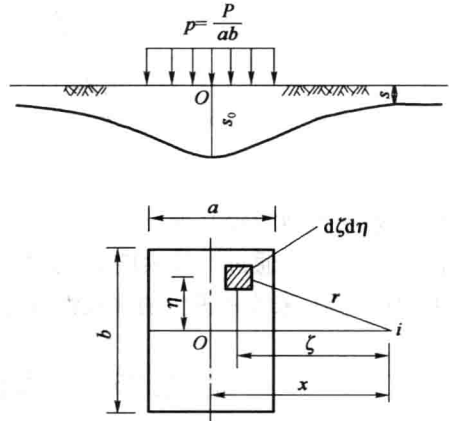


图 1-4 矩形均布荷载 p 作用下矩形面积中点 O 的竖向位移

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

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,但计算繁琐,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,但是其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地基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。分层总和法的计算式如下。

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

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。

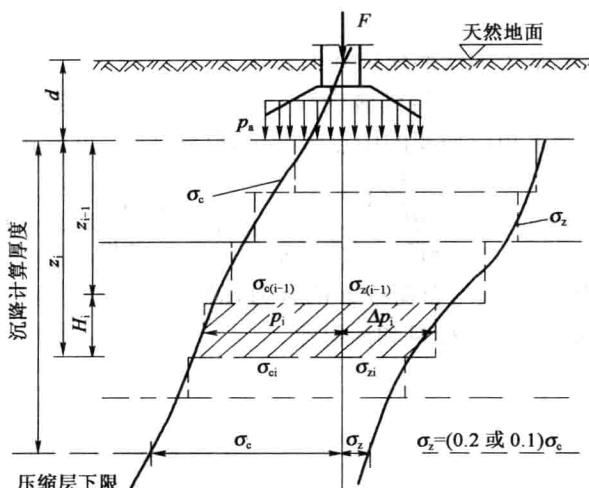


图 1-5 分层总和法计算地基最终沉降量

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。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,这个模型仍为弹性模型,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。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如图 1-6 所示。

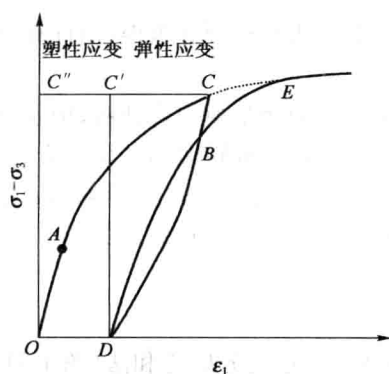


图 1-6 土体非线性变形特性

从图 1-6 中可以看到,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。若加载至 C 点,然后完全卸载至 D 点,则得到的卸载曲线为 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。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基础工程分析与设计中,并可得到较为满意的结果。非线性弹性模型与线弹性模型的主要区别在于,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 年提出的方法,通常称为邓肯—张模型。

1963 年,康德尔(Konder)提出土的应力—应变关系为曲线形。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);

ϵ_1 ——轴向应变;

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切线模量 E_t 的公式为:

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

定义破坏比 R_f 为:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (1-12)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ——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:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2ccos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (1-13)$$

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 $E_i = \frac{1}{a}$ 的关系可得到:

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

把式(1-12)、式(1-13)和式(1-14)代入式(1-11),得:

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

式中: K, n, c, φ, R_f ——确定切线模量 E_t 的试验参数;

p_a ——单位与 σ_3 相同的大气压强。

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 的关系(图 1-8)。

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

式中: f, d ——试验参数。

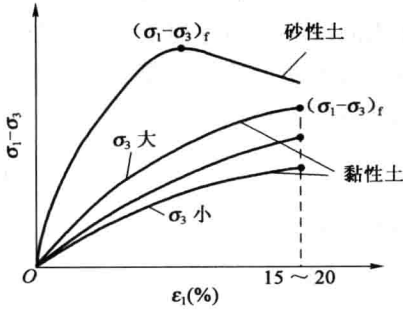


图 1-7 破坏时的偏应力值

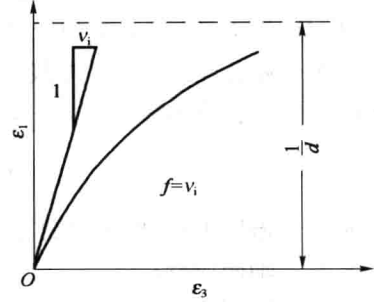


图 1-8 轴向应变 ϵ_1 与侧向应变 ϵ_3 的关系(邓肯—张模型)

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 ——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为式(1-15)和式(1-19)。在计算时,切线模量 E_t 所需的 5 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非线性应力应变。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作弹性变形处理,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的研究,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(Cam-bridge)模型和适合砂性土的拉德—邓肯(Lade-Duncan)模型等。

第四节 地基的柔度矩阵和刚度矩阵

在对地基基础进行分析时,需要建立地基的柔度矩阵或刚度矩阵,下面叙述地基柔度矩阵和刚度矩阵的概念。

把整个地基上的荷载面积划分为 m 个矩形网格(图 1-9),任意网格 j 的面积为 F_j ,分割时注意不要使网格面积 F_j 相差太大。在任意网格 j 的中点作用着集中荷载 R_j ,整个荷载面积反力列向量记作 $\{R\}$:

$$\{R\} = \{R_1 \ R_2 \cdots R_i \cdots R_j \cdots R_m\}^T$$

各网格中点的竖向位移记作位移列向量 $\{s\}$:

$$\{s\} = \{s_1 \ s_2 \cdots s_i \cdots s_j \cdots s_m\}^T$$

反力列向量 $\{R\}$ 和位移列向量 $\{s\}$ 的关系如下:

$$\{s\} = [f]\{R\} \quad (1-21)$$

或:

$$[K_s] \cdot \{s\} = \{R\} \quad (1-22)$$

式中: $[f]$ ——地基柔度矩阵;

$[K_s]$ ——地基刚度矩阵, $[K_s] = [f]^{-1}$ 。

式(1-21)和式(1-22)可写成:

$$\begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_i \\ \vdots \\ s_j \\ \vdots \\ s_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1i} & \cdots & f_{1j} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2i} & \cdots & f_{2j} & \cdots & f_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdots & f_{ii} & \cdots & f_{ij} & \cdots & f_{im} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{j1} & f_{j2} & \cdots & f_{ji} & \cdots & f_{jj} & \cdots & f_{jm} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mi} & \cdots & f_{mj} & \cdots & f_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_j \\ \vdots \\ R_m \end{Bmatrix} \quad (1-23)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1i} & \cdots & k_{1j} & \cdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2i} & \cdots & k_{2j} & \cdots & k_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \cdots & k_{ii} & \cdots & k_{ij} & \cdots & k_{im} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ k_{j1} & k_{j2} & \cdots & k_{ji} & \cdots & k_{jj} & \cdots & k_{jm} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \cdots & k_{mi} & \cdots & k_{mj} & \cdots & k_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_i \\ \vdots \\ s_j \\ \vdots \\ s_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_j \\ \vdots \\ R_m \end{Bmatrix} \quad (1-24)$$

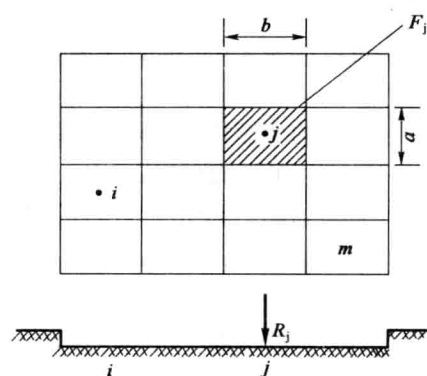


图 1-9 地基网格的划分

其中,柔度系数 f_{ij} 是指在网格 j 处作用单位集中力,而在网格 i 的中点引起的变形;当 $i=j$ 时,其为单位集中力在本网格中点产生的变形。

地基模型不同,结点分布位置不同,则柔度系数 f_{ij} 的计算方法和结果也不同。因此,地基柔度矩阵 $[f]$ 和地基刚度矩阵 $[K_s]$ 反映了不同的地基模型在外力作用下界面的位移特征。

第五节 地基模型的选择

在地基基础设计计算中,如何选择相适应的地基模型是一个比较困难的问题。这涉及材料性质、荷载施加、整体几何关系和环境影响等诸多方面,甚至对于同一个工程,从不同角度分析时,也可能要采用不同的地基模型。从工程应用出发,在选择地基模型时,需考虑的因素主要有:

- (1)土的变形特征和外荷载在地基中引起的应力水平;
- (2)土层的分布情况;
- (3)基础和上部结构的刚度及其形成过程;
- (4)基础的埋置深度;
- (5)荷载的种类和施加方式;
- (6)时效的考虑;
- (7)施工过程(开挖、回填、降水、施工速度等)。

当基础位于无黏性土上时,采用文克勒地基模型还是比较适当的,特别是当基础比较柔软,又受有局部(集中)荷载时。应指出的是,一般认为文克勒地基模型与实际情况不符,但文克勒地基模型比较简单,计算方便,并得到一系列可直接使用的解析解。例如,对于位于软弱黏性土上的建筑物,当上部结构和基础的刚度不是很大(框架结构等),仍可采用文克勒地基模型;但对于剪力墙结构等上部结构,其基础刚度大大增加,文克勒地基模型就未必适用了;即使是框架结构,若后砌填充墙刚度很大,也可能影响到地基模型的选择。

当基础位于黏性土上时,一般应采用弹性空间地基模型或分层地基模型,特别是对有一定刚度的基础,基底平均反力适中、地基土中应力水平不高、塑性区开展不大时。当地基土呈明显层状分布、各层之间性质差异较大时,则必须采用分层地基模型。但当塑性区开展较大,或是薄压缩层地基时,文克勒地基模型又可适用。总的说来,若能采用考虑非线性影响的地基模型可以认为是较好的选择。

当高层建筑位于压缩性较高的深厚黏土层上时,还应考虑到土的固结与蠕变的影响,此时应选择能反映时效的地基模型,特别是重要建筑物,应引起注意。

岩土의 应力—应变关系是非常复杂的,想要用一个普遍都能适用的数学模型来全面描述岩土工作性状的全貌是很困难的。在选择地基模型时,可参考下列几条原则进行:

(1)任何一个地基模型,只有通过实践的验证,也就是通过计算值与实测值的比较,才能确定它的可靠性。例如,地基模型是通过某种试验的结果提出来的,可以进行其他种类的试验来验证它的可靠性,也可以通过对具体工程的计算值与实测值的比较来进行验证。

(2)所选用的地基模型应尽量简单,最有用的地基模型其实是能解决实际问题的最简单的模型。例如,如果采用布西奈斯克解答和压缩模量估算出来的地基沉降的精度,已能满足某项工程的需要,就无需采用复杂的弹塑性模型来求得更精确的解答。