

基础工程

设计原理

袁聚云
李镜培
楼晓明等 编著

同济大学出版社



土
木
工
程
系
列
书

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

朱百里 主审

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基础工程设计原理/袁聚云等编著. —上海: 同济大学出版社, 2001. 1

(土木工程系列丛书)

ISBN 7 - 5608 - 2216 - 9

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

基础工程设计原理

作 者 袁聚云 李境培 楼晓明等编著 朱百里主审

责任编辑 方 芳 责任校对 徐春莲 装帧设计 沈恬

出 版
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021 - 65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 望亭电厂印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.5

字 数 499 200

版 次 2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7 - 5608 - 2216 - 9/TU · 380

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

前 言

近几年来,全国各地高等学校正在进行扩大专业面的改革,以拓宽学生的专业知识面。许多专业,如工民建、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,本书正是为了配合合并后的土木工程专业的基础工程课程学习而编写的。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,以适应和满足合并后的土木工程专业的教学要求。

根据基础工程学科的特点,本书在系统介绍基础工程设计原理和方法的同时,强调理论联系实际,尽可能地反映经过工程实践考验又符合教学要求的内容。为了便于学生复习和自学,本书各章还安排了大量的例题、习题和思考题。

本书共分为九章,其具体编写人员为:绪论——袁聚云,第一、二章——董建国、袁聚云,第三章——李镜培,第四、五章——楼晓明,第六章——陈光敬,第七、八章——胡中雄、袁聚云,第九章——李镜培。

全书由朱百里教授主审。

本书在策划和编写过程中得到了洪毓康等教授的指导和帮助,在编写过程中,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。由于篇幅有限,文献目录未能一一列出。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵的意见和建议,以便再版时得以改正。

编 者

2000年8月

目 录

绪 论	(1)
一、基础工程的重要性	(1)
二、基础工程的发展概况	(1)
三、课程内容及学习要求	(2)
第一章 地基模型及其参数的确定	(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 地基模型参数的确定	(13)
第六节 地基模型的选择	(19)
思考题	(20)
习 题	(20)
第二章 浅基础设计的基本原理	(22)
第一节 概述	(22)
第二节 浅基础的类型	(23)
第三节 基础的埋置深度	(27)
第四节 地基承载力的确定及验算	(31)
第五节 基础底面尺寸的确定	(45)
第六节 地基的变形验算	(47)
第七节 地基的稳定性验算	(51)
第八节 地基基础与上部结构共同作用的概念	(52)
第九节 减轻不均匀沉降危害的措施	(53)
思考题	(58)
习 题	(58)
第三章 浅基础结构设计	(61)
第一节 概述	(61)
第二节 刚性基础	(62)
第三节 墙下条形基础	(65)

第四节	柱下独立基础	(68)
第五节	柱下条形基础	(72)
第六节	十字交叉条形基础	(88)
第七节	筏板基础	(90)
第八节	箱形基础	(95)
思考题		(100)
习 题		(100)
第四章	桩基础	(102)
第一节	概述	(102)
第二节	桩的类型及施工工艺	(103)
第三节	竖向荷载下的桩基础	(108)
第四节	水平荷载下的桩基础	(135)
第五节	桩基础设计	(153)
思考题		(160)
习 题		(161)
第五章	沉井基础	(163)
第一节	概述	(163)
第二节	沉井的构造及施工工艺	(163)
第三节	沉井的设计与计算	(167)
思考题		(179)
习 题		(180)
第六章	基坑围护	(181)
第一节	概述	(181)
第二节	支护结构的类型及特点	(182)
第三节	基坑围护工程设计的依据	(188)
第四节	重力式水泥土挡墙设计	(190)
第五节	排桩或地下连续墙式支护结构设计	(195)
第六节	土钉墙设计	(208)
第七节	井点降水及土方开挖	(212)
第八节	基坑监测与环境监护	(214)
思考题		(217)
习 题		(217)
第七章	地基处理	(219)
第一节	概述	(219)
第二节	换填法	(221)
第三节	排水固结法	(227)

第四节 密实法·····	(233)
第五节 化学加固法·····	(237)
思考题·····	(241)
第八章 特殊性土地基·····	(243)
第一节 概述·····	(243)
第二节 黄土地基·····	(244)
第三节 膨胀土地基·····	(252)
第四节 红粘土地基·····	(256)
第五节 盐渍土地基·····	(260)
第六节 冻土地基·····	(265)
思考题·····	(270)
第九章 动力机器基础·····	(272)
第一节 概述·····	(272)
第二节 大块式基础的振动计算理论·····	(276)
第三节 地基土动力参数及其应用·····	(279)
第四节 锻锤基础设计·····	(284)
第五节 曲柄连杆机器基础设计·····	(290)
第六节 旋转式机器基础设计·····	(293)
第七节 动力机器基础的减振与隔振·····	(296)
思考题·····	(301)
习 题·····	(301)
主要参考文献·····	(303)

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,须将基础埋置于较深的好土层上,且需要借助于特殊的施工方法,则称为深基础。当选定合适的基础形式后,若地基不加以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,则需对地基进行处理,经过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,然而彼此却是相互影响、共同作用的,它们之间互为条件,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,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。追本溯源,我们的祖先早在史前的建筑活动中就创造了自己的基础工程工艺,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,方能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经验,主要体现在能工巧匠的高超技艺上,由于受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地扩大,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)归纳了以往主要在土力学方面的成就,分别发表了《土力学》和《工程土质学》等专著,从而也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。

近几十年来,由于土木工程建设的需要,特别是电子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、树根桩法、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,还出现了盾构、顶管、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,其内容包括地基模型的选择与参数确定、浅基础的地基承载力计算和地基变形验算、基础的底面尺寸确定、浅基础的结构设计与计算、桩基础的设计与计算、沉井基础的设计与计算、基坑围护的设计与计算、动力机器基础的设计与计算、地基的处理方法以及各种特殊土地基的判别等。

近几年来,全国各地高校的专业调整工作正在逐步进行,有许多专业,如工民建、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,毕业后更能适应土木工程中各个行业技术工作的需要,从而避免了以往专业设置面过窄的弊端。本书正是在此背景下而编写的,在编写过程中,尽量考虑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,以适应和满足合并后的土木工程专业的教学要求。

本课程具有多方面的内容,因而要求有较广泛的先修课知识,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地掌握。

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 地基模型及其参数的确定

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。常用的地基模型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。当地基模型确定后,地基模型参数的确定也是非常重要的,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是介于柔性基础和绝对刚性基础两种极端情况之间的,故这些基础底下的地基反力分布是复杂的。通过上部结构与地基基础共同作用分析可以求得比较复杂的地基反力分布。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:

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

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

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

$[D_e]$ ——弹性矩阵。

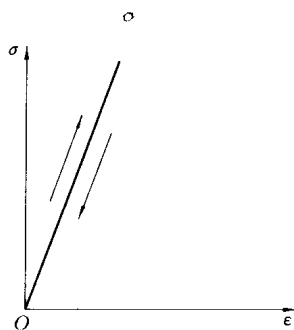


图 1-1 线性弹性地基模型

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

式中 E ——材料的弹性模量；

ν ——材料的泊松比。

最简单的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。董建国等著《高层建筑地基基础》以及加拿大作者塞尔瓦杜雷(Selvadurai)著的《土与基础相互作用的弹性分析》中就有各种线性弹性地基模型的介绍。

一、文克勒地基模型

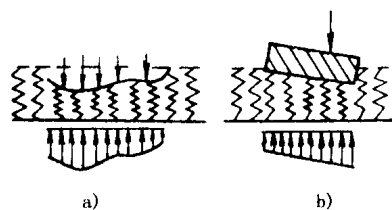
文克勒地基模型假定地基是由许多独立的且互不影响的弹簧组成，即假定地基任一点所受的压强强度 p 只与该点的地基变形 s 成正比，而 p 不影响该点以外的变形(图 1-2)。这种关系的表达式为

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

式中 k ——地基基床系数，表示产生单位变形所需的压强强度(kN/m^3)；

p ——地基上任一点所受的压强强度(kPa)；

s —— p 作用点位置上的地基变形(m)。



a) 弹簧模型； b) 绝对刚性基础

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(参见本章第五节)。

表 1-1

基床系数 k 值

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	黄土及黄土类粉质粘土	4.0~5.0
软弱粘性土	0.5~1.0	紧密砾石	4.0~10
粘土及粉质粘土	1.0~2.0	硬粘土或人工夯实粉质粘土	10~20
软塑	2.0~4.0	软质岩石和中、强风化的坚硬岩石	20~100
可塑	4.0~10	完好的坚硬岩石	100~1500
硬塑	1.0~1.5	砖	400~500
松砂	1.5~2.5	块石砌体	500~600
中密砂或松散砾石	2.5~4.0	混凝土与钢筋混凝土	800~1500
密砂或中密砾石			

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

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

式中, E, ν 为地基土的弹性模量(kPa)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(见图 1-4),可对式(1-4)进行积分求得:

$$s_0 = 2 \int_0^{\frac{a}{2}} \int_0^{\frac{b}{2}} \frac{\frac{P}{ab} d\zeta d\eta (1 - \nu^2)}{\pi E \sqrt{\zeta^2 + \eta^2}} = \frac{P(1 - \nu^2)}{\pi E a} F_{ii} \quad (1-5)$$

式中 P ——在矩形面积 ab 上均布荷载 p 的合力(kN);

E, ν ——地基土的模量(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,这样,既达到精度要求,又计算简便。

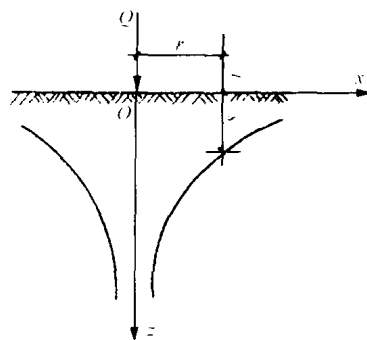


图 1-3 集中荷载 Q 作用在弹性半空间体表面上 i 点的竖向位移

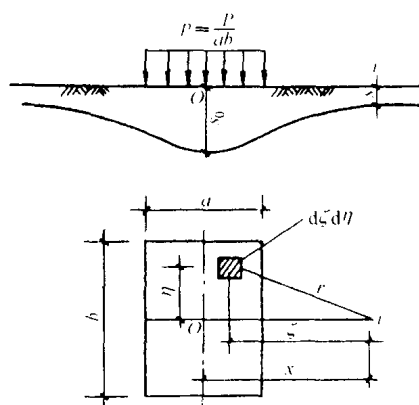


图 1-4 矩形均布荷载 p 作用下矩形面积中点 O 的竖向位移

弹性半空间地基模型虽然具有能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,而且即使是同一种土层组成的地基,其变形模量也随深度而增加,因而而是非均匀的。

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,这个假定仅在基础对称轴交点下的情况是合理的。分层总和法的算式如下:

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

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。

这一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层的分层。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。

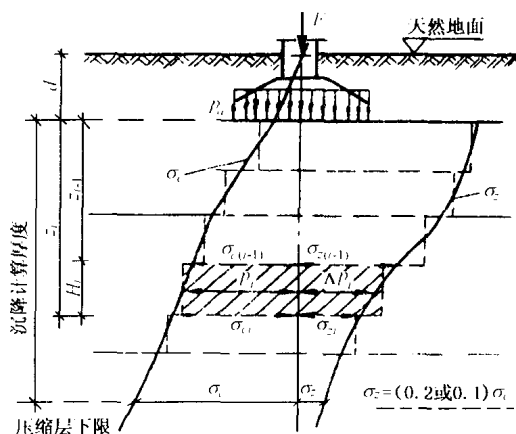


图 1-5 分层总和法计算地基最终沉降量

第三节 非线性弹性地基模型

地基土在荷载作用下的应力-应变关系假设为线性关系显然与实测结果是不一致的,这是因为地基土的加载应力-应变关系呈非线性(见图 1-6)。1963 年,康德尔(Konder)提出土的应力-应变关系为曲线型,邓肯(Duncan)和张(Chang)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,所以,该模型被称为邓肯-张模型。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。可以下式表达:

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

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, 常规三轴试验中通常先在土样三个方向施加 σ_3 ;

a 和 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。

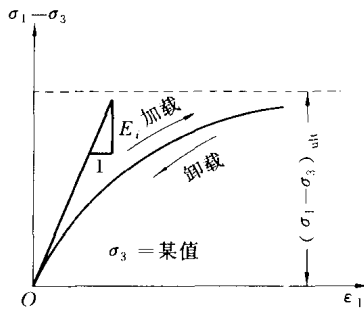


图 1-6 土的应力-应变关系

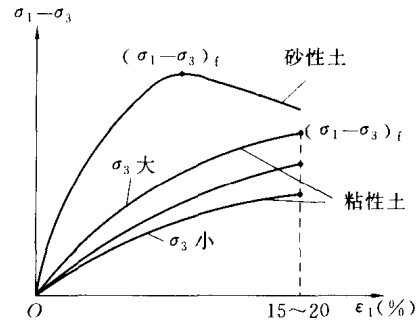


图 1-7 破坏时的偏应力值

邓肯-张通过分析计算, 得到用来计算地基中任一点的切线模量 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:
$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (1-12)$$

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; 粘性土取 $\epsilon_1 = 15\% \sim 20\%$ 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内摩擦角 φ 和粘聚力 c 的函数, 即

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

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 $E_i = \frac{1}{a}$ 的关系可得到:

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

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, 其确定方法详见本章第

五节；

p_a ——单位与 σ_3 相同的大气压力。

同理，邓肯-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

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

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：

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

通过计算，消去式(1-17)的 ϵ_1 ，把式(1-18)代入式(1-17)，得到切线泊松比 ν_t ：

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

式(1-19)中的 A 为

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

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)。表 1-2 列出上海土邓肯-张模型的试验常数。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_t 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 为定值；而当周围应力 $\sigma_3 > 0.8 \text{ MPa}$ 时， φ 值降低。所以，用低应力水平测得的 c 和 φ 来确定切线模量 E_t 是不合适的。

邓肯-张模型是非线性弹性地基模型，因此，在计算中要采用增量法。该模型能用于上部结构与地基基础共同作用的分析研究，并获得与实际相符的结果，该模型的主要缺点是忽略了应力途径和剪胀性的影响。

最后必须指出，把土的应力应变曲线视作非线性弹性是不合理的。事实上，土的卸载路线与加载路线是不重合的，即使邓肯和张在有限元分析计算中，也另外考虑卸载再加载情况，并且用卸载再加载模量 E_{ur} 来反映：

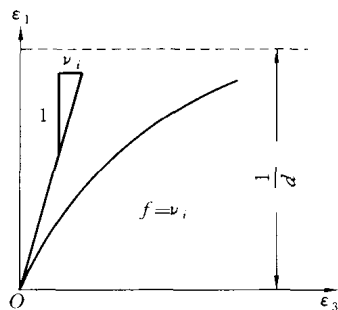


图 1-8 轴向应变 ϵ_1 与侧向应变 ϵ_3 的关系(邓肯-张模型)

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}} \quad (1-21)$$

式中, K_{ur}, n_{ur} 为卸载再加载的两个试验常数。上海的粉砂土 K_{ur} 和 n_{ur} 见表 1-2。

邓肯和张本人在有限元分析中也不用式(1-19)来求泊松比, 通常用定值泊松比来分析。

表 1-2 非线性弹性地基模型(邓肯-张模型)试验常数

土 名	取土深度 (m)	R_f	K	n	c (kPa)	φ (°)	G	F	d	K_{ur}	n_{ur}	试验 方法
粉 砂	5.5~11.0	0.67	246	0.42	28.5	40.8				650	0.533	CD
粘 土	5.0~10.5	0.69	47	0.90	1	34						CU
粘土夹薄层粉砂	5.0~10.5	0.71	37	0.75	2	30						CU
粉质粘土	4.0~6.0	0.82	125	0.79	8	25						CU
粘 土	8.0~8.2	0.89	105	0.30	14	19						CU
粘 土	6.0~8.0	0.62	34	0.17	14	23						CD
粉质粘土	1.1~1.35	0.77	46	0.78	0	33				212		CU
粉质粘土夹薄层粉砂	2.1~3.3	0.66	51	0.23	0	37	-0.16	-0.127	8.48	178		CU
粉质粘土夹薄层粉砂	7.0~13.0	0.68	125	0.52	0	39				368		CD
粘 土	15.1~17.3	0.87	125	0.68	4	33				127		CU
粘土夹薄层粉砂	6.2~6.5	0.63	59	0.54	12	35						CU
粘土夹薄层粉砂	11.7~12.0	0.81	41	0.74	0	27						CU
砂质粉土	29.0~29.3	0.71	132	0.97	16	37						CU

第四节 地基的柔度矩阵和刚度矩阵

在进行土与结构物共同作用分析时, 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:

$$\{s\} = [f]\{R\} \quad (1-22a)$$

或

$$[K_s]\{s\} = \{R\} \quad (1-23a)$$

式中 $[f]$ ——地基柔度矩阵;

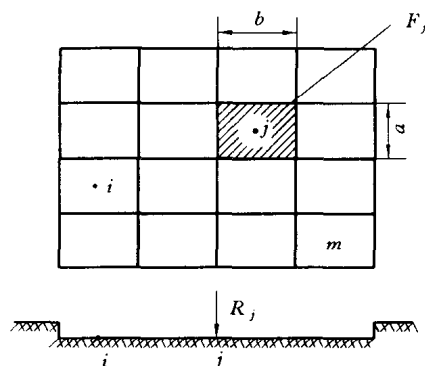


图 1-9 地基网格的划分

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

式(1-22)和式(1-23)可详细写成:

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

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

式中,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。

一、文克勒地基模型的柔度矩阵

文克勒地基模型系弹簧模型,其表达式为

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

如图 1-9 所示的地基上作用着矩形均布荷载,其值为 p ,把荷载面积划分成 m 个矩形网格,若在 j 网格中点作用集中为 R_j ,则在 j 网络,即当 $i = j$ 时,式(1-3)成立, $s_{ij} \neq 0$;而当 $i \neq j$ 时,则 $s_{ij} = 0$ 。

因此,式(1-3)可写成

$$p_{ii} = k_{ii} s_{ii}$$

或

$$s_{ii} = \frac{1}{k_{ii}} p_{ii} = \frac{1}{k_{ii}} \cdot \frac{R_i}{ab}$$

即

$$s_{ii} = \frac{1}{k_i} \cdot \frac{R_i}{ab} \quad (1-24a)$$