

土木工程系列

高等学校“十一五”规划教材

高层建筑结构 地基基础设计

王幼青 编著

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材土木工程系列

高层建筑结构地基基础设计

王幼青 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了高层建筑结构各类地基基础的设计与计算方法。主要包括地基计算模型及基础类型的选取、柱下条形基础、十字交叉条形基础、筏板基础、箱形基础、桩基础及沉井基础的设计与计算方法等。为了便于读者学习应用,书中还给出了相应表格、例题和计算机源程序。

本书可作为高等工科院校土木工程专业高年级本科生和研究生教学用书,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构地基基础设计/王幼青编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2007.4
(高等学校“十一五”规划教材土木工程系列)
ISBN 987-7-5603-2483-8

I. 高… II. 王… III. 高层建筑-建筑结构-地基
基础工程-高等学校-教材 IV. TU47 TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 028048 号

责任编辑 郝庆多
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 380 千字
版 次 2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 987-7-5603-2483-8
印 数 1~3 000 册
定 价 29.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

地基基础在高层建筑物中占有重要地位。由于基础结构受力复杂,并且经常遇到复杂的地质条件,因此如何经济合理地进行高层建筑物地基基础的设计与计算,是实际工程中需要解决的问题。

本书是作者在多年为土木工程专业高年级本科生讲授高层建筑物地基基础设计课程的教学实践基础上编著而成的。书中第1章概要介绍了常用的地基土计算模型及其参数的取值方法,并介绍了基础结构类型的选取和国内一些高层建筑基础选型的工程实例。第2章至第4章对天然地基上经常采用的基础类型(如柱下条形基础、十字交叉条形基础、筏形基础和箱形基础等)的多种求解方法做了系统的介绍,各种方法都配有计算例题和计算机源程序。第5章对桩基础的计算理论和设计方法做了详细介绍,主要内容包括桩的分类、桩的荷载传递机理、桩基承载力计算、桩基沉降计算方法和桩基设计例题等。第6章详细介绍了沉井基础的设计方法和计算例题。

全书力求系统性与实用性相统一。书中除了介绍各种地基基础结构的设计方法和计算理论外,还列有许多规范表格,以便于在实际工程中应用。这样,该书就兼有了手册之功效。本书不仅可以作为土木工程专业本科生或研究生的教材或参考书,也可供工程技术人员和研究人员参考。

由于作者水平所限,书中难免有不当之处,恳请各位专家和广大读者指正。

作 者

2006年12月

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 地基基础计算理论简介	(1)
1.1.1 引言	(1)
1.1.2 地基计算模型	(1)
1.2 地基土计算参数的选取	(7)
1.2.1 基床系数的确定	(7)
1.2.2 土的波桑比和变形模量的确定	(10)
1.3 基础类型及国内高层建筑基础选型实例	(13)
第2章 柱下条形基础	(16)
2.1 概述	(16)
2.2 结构与构造	(17)
2.3 简化算法	(18)
2.3.1 基础底面尺寸的确定	(18)
2.3.2 翼板的计算	(18)
2.3.3 基础内力分析	(19)
2.4 文克尔地基上的梁	(23)
2.4.1 弹性地基梁的挠曲微分方程	(23)
2.4.2 无限长梁和半无限长梁的解	(25)
2.4.3 有限长梁	(31)
2.5 美国混凝土学会(ACI)算法	(33)
2.5.1 总的原则	(33)
2.5.2 基底反力和基础内力计算	(34)
2.5.3 美国混凝土学会(ACI)法程序	(39)
2.6 链杆法	(41)
2.6.1 基本原理	(41)
2.6.2 链杆法程序	(46)
2.7 有限差分法	(50)
2.7.1 有限差分方程	(50)
2.7.2 文克尔地基上梁的有限差分法	(51)
2.7.3 弹性半空间地基上梁的有限差分法	(54)
2.7.4 有限差分法程序	(56)
2.8 有限单元法	(60)

2.8.1	梁的刚度矩阵	(61)
2.8.2	地基的刚度矩阵	(62)
2.8.3	总刚度矩阵	(63)
2.8.4	弹性地基梁有限单元法程序	(64)
2.9	十字交叉条形基础	(69)
2.9.1	节点荷载分配法	(69)
2.9.2	节点荷载分配的简化法	(70)
2.9.3	节点荷载分配的调整	(72)
2.9.4	交叉条形基础柱荷载分配计算程序	(75)
第3章	片筏基础	(81)
3.1	概述	(81)
3.2	片筏基础的设计原则和构造要求	(82)
3.2.1	基础底面积的确定	(82)
3.2.2	筏板厚度的确定	(82)
3.2.3	片筏基础配筋的确定	(82)
3.2.4	混凝土强度等级的确定	(83)
3.2.5	基础的沉降	(83)
3.3	刚性板条法	(83)
3.4	美国混凝土学会计算法	(86)
3.4.1	刚性方法	(87)
3.4.2	柔性方法	(87)
3.4.3	柔性方法(一般情况)程序	(96)
3.5	有限差分法	(100)
3.5.1	板的弹性挠曲微分方程和板的内力	(100)
3.5.2	差分公式和板内力的差分表示	(101)
3.5.3	基础板的差分方程	(103)
3.6	有限单元法	(106)
3.6.1	基础板的应力矩阵和刚度矩阵	(106)
3.6.2	地基刚度矩阵	(111)
3.6.3	总刚度矩阵	(111)
3.6.4	弹性地基板有限单元法程序	(112)
第4章	箱形基础	(123)
4.1	概述	(123)
4.2	构造要求	(124)
4.3	地基计算	(125)
4.3.1	地基强度验算	(125)
4.3.2	地基变形计算	(126)
4.3.3	整体倾斜	(127)

4.4 基底反力	(128)
4.5 箱形基础的内力分析	(130)
4.5.1 当上部结构为现浇剪力墙体系时	(130)
4.5.2 当上部结构为框架体系时	(130)
4.6 基础强度计算	(131)
4.6.1 顶板与底板	(131)
4.6.2 内墙与外墙	(132)
4.6.3 洞口	(132)
4.7 箱形基础设计实例	(134)
4.7.1 荷载计算	(135)
4.7.2 地基承载力验算	(135)
4.7.3 基础沉降计算	(135)
4.7.4 基础横向倾斜计算	(136)
4.7.5 基底反力计算	(137)
4.7.6 箱基内力计算	(137)
4.7.7 底板配筋计算	(140)
4.7.8 底板强度验算	(141)
第5章 桩基础	(143)
5.1 概述	(143)
5.1.1 引言	(143)
5.1.2 桩的分类	(143)
5.1.3 对桩基的基本要求	(146)
5.1.4 桩基的两种极限状态	(147)
5.2 桩的荷载传递机理	(148)
5.2.1 竖向荷载下单桩的荷载传递	(148)
5.2.2 桩侧负摩阻力	(152)
5.2.3 关于群桩的荷载传递	(154)
5.3 桩的承载力	(156)
5.3.1 单桩承载力	(156)
5.3.2 群桩极限承载力	(171)
5.3.3 群桩软弱下卧层承载力验算	(175)
5.4 桩基础的沉降	(177)
5.4.1 单桩沉降	(177)
5.4.2 群桩基础沉降	(182)
5.4.3 桩基变形允许值	(205)
5.5 桩基设计	(207)
5.5.1 桩基设计原则、设计内容和步骤	(207)
5.5.2 桩型和持力层的选择	(209)

5.5.3 桩数和布置	(213)
5.5.4 桩身结构设计和计算	(214)
5.5.5 承台设计和计算	(219)
5.6 桩基设计实例	(225)
5.6.1 桩基持力层、桩型、承台埋深和桩长的确定	(225)
5.6.2 桩基承载力	(226)
5.6.3 桩数、布置和承台尺寸	(226)
5.6.4 复合基桩荷载验算	(227)
5.6.5 群桩承载力验算	(229)
5.6.6 方案选择及桩身结构和承台尺寸确定	(230)
5.6.7 桩基变形验算	(231)
5.6.8 承台设计和计算	(232)
第6章 沉井基础	(236)
6.1 概述	(236)
6.1.1 沉井基础作用	(236)
6.1.2 沉井基础分类	(236)
6.1.3 沉井基础构造	(238)
6.2 沉井施工	(240)
6.2.1 旱地沉井施工	(240)
6.2.2 水中沉井施工	(242)
6.2.3 泥浆套和空气幕下沉沉井施工	(243)
6.2.4 沉井下沉过程中遇到的问题及处理方法	(244)
6.3 沉井的设计与计算	(245)
6.3.1 沉井作为整体深基础的计算	(245)
6.3.2 沉井施工过程中的结构计算	(250)
6.3.3 浮运沉井计算要点	(255)
6.4 沉井基础设计实例	(256)
6.4.1 设计资料	(256)
6.4.2 沉井高度及各部分尺寸	(256)
6.4.3 荷载计算	(257)
6.4.4 基底应力验算	(258)
6.4.5 基础侧向水平压应力验算	(259)
6.4.6 沉井自重下沉验算	(259)
6.4.7 刃脚受力验算	(259)
6.4.8 井壁受力验算	(262)
参考文献	(264)

第 1 章 概 论

1.1 地基基础计算理论简介

1.1.1 引言

高层建筑结构的地基基础大多采用以下类型:一种是天然地基上梁、板式连续基础;另一种是深基础(各种类型桩及沉井)。在软土地区也有采用二者结合的基础类型,如箱-桩、筏-桩等形式。天然地基上连续基础或深基础是以地基与结构共同工作的假设为前提,来确定基础与地基之间接触应力的分布,从而较精确地求得基础结构的内力,以供设计之用。此外通过分析,还可以确定基础的沉降、挠曲和倾斜,以便判定基础的工作性状是否满足设计要求。

在对地基基础结构进行计算分析时,首先必须建立某种理想化的地基计算模型。这种模型应尽可能准确地模拟地基与基础共同工作时所表现的主要力学性状,同时又要便于利用已有的数学方法进行分析。随着人们认识的发展,曾经提出过不少地基模型,然而,由于问题的复杂性,不管哪一种模型都难以反映地基工作性状的全貌,因而各具有一定的局限性。此外,计算结果的精确性很大程度上还决定于土参数的确定。本章介绍几种常用的地基模型及其土参数的确定方法。

1.1.2 地基计算模型

1.1.2.1 文克尔地基模型

文克尔提出土体表面任一点的压力强度与该点的沉降成正比的假设,即

$$p = ks \quad (1.1)$$

式中, p 为土体表面某点单位面积上的压力, kN/m^2 ; s 为相应于某点的竖向位移, m ; k 为基床系数, kN/m^3 。

文克尔假设的实质是将地基看成许多互不联系的弹簧,弹簧的刚度即基床系数 k 。图 1.1 表示几种不同荷载和不同基础刚度的文克尔地基的变形情况。可见,假设基底反力为直线分布的计算方法就是文克尔地基上绝对刚性基础的情况。

以后深入的研究指出文克尔假设的缺点,首先,文克尔假设忽略了地基中的剪应力,因而无法考虑地基中的应力扩散,从而地基的变形只发生在基础荷载作用的范围以内,这显然与实际不符。其次,试验研究指出,在同一压力作用下,基床系数 k 不是常数,它不仅与土的性质、类别有关,还与基础底面积的大小、形状以及基础的埋置深度等因素有关。

由于文克尔地基模型在计算分析中比较简便,故目前在实际应用上被广泛采用,一般认为,当地基土较软弱(例如淤泥、软黏土地基),或当地基的压缩层较薄,与基础最大的水

平尺寸相比成为很薄的“垫层”时,宜采用文克尔地基模型进行计算。

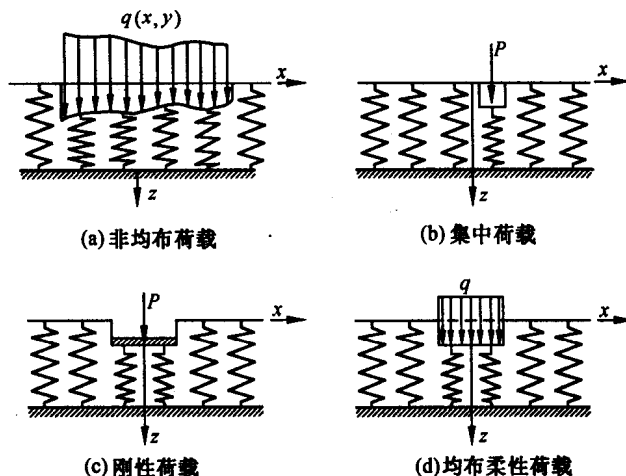


图 1.1 文克尔地基模型

1.1.2.2 弹性半空间地基模型

当弹性半空间体表面作用一集中力 P 时(图 1.2),由布辛奈斯克(Boussinesq)解,可得弹性半空间体表面任一点的竖向位移(沉降)为

$$y = \frac{P(1-\mu^2)}{\pi Er} \quad (1.2)$$

式中, r 为集中力到计算点的距离; E 为弹性材料的弹性模量; μ 为弹性材料的波桑比。

当弹性半空间体表面作用任意分布荷载 $p(\xi, \eta)$ 时(图 1.3(a)),地基表面任一点 $M(x, z)$ 的竖向位移可以由式(1.2)积分而得,即

$$y(x, z) = \frac{1-\mu^2}{\pi E} \iint \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-z)^2}} \quad (1.3)$$

设矩形荷载面积 $b \times c$ 上作用均布荷载 p (图 1.3(b)),将坐标轴的原点置于矩形面积的中心点 j ,利用式(1.2)对整个矩形面积的积分,可以求得在 x 轴上 i 点的竖向变位为

$$y_{ij} = 2p \int_{\xi=x-\frac{c}{2}}^{\xi=x+\frac{c}{2}} \int_{\eta=0}^{\eta=\frac{b}{2}} \frac{(1-\mu^2)}{\pi E} \cdot \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} = \frac{1-\mu^2}{\pi E} \cdot pbF_{ij} \quad (1.4)$$

式中, p 为均布荷载; b 为矩形面积的宽度; F_{ij} 为系数,其表达式为

$$F_{ij} = \frac{c}{b} \left\{ 2 \ln \frac{b}{c} - \ln \left[\left(2 \frac{x}{c} \right)^2 - 1 \right] - 2 \frac{x}{c} \ln \frac{2 \frac{x}{c} + 1}{2 \frac{x}{c} - 1} + \right. \\ \left. \frac{b}{c} \ln \frac{\left(2 \frac{x}{b} + \frac{c}{b} \right) + \sqrt{\left(2 \frac{x}{b} + \frac{c}{b} \right)^2 + 1}}{\left(2 \frac{x}{b} - \frac{c}{b} \right) + \sqrt{\left(2 \frac{x}{b} - \frac{c}{b} \right)^2 + 1}} + \right.$$

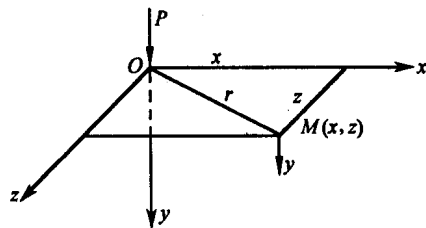
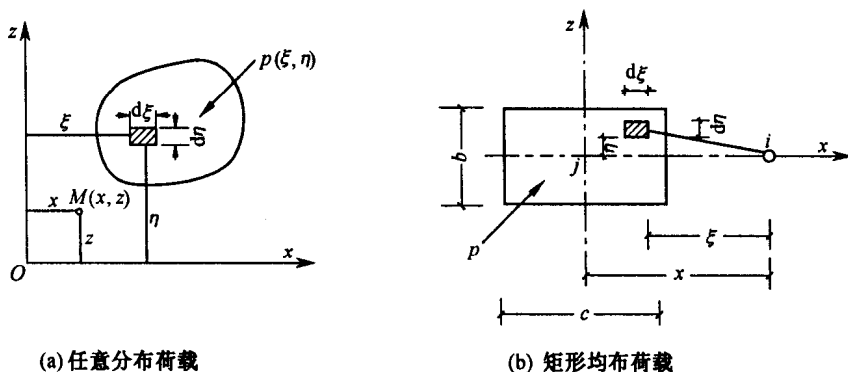


图 1.2 弹性半空间表面受集中力

$$2 \frac{x}{c} \ln \frac{1 + \sqrt{(2 \frac{x}{b} + \frac{c}{b})^2 + 1}}{1 + \sqrt{(2 \frac{x}{b} - \frac{c}{b})^2 + 1}} + \ln \left[1 + \sqrt{(2 \frac{x}{b} + \frac{c}{b})^2 + 1} \right] \left[1 + \sqrt{(2 \frac{x}{b} - \frac{c}{b})^2 + 1} \right] \quad (1.5)$$



(a) 任意分布荷载

(b) 矩形均布荷载

图 1.3 弹性半空间体表面的位移计算

当 i 点位于矩形荷载面积中点 j 时, 其竖向变位应为

$$y_{ii} = 4p \int_{\xi=0}^{\xi=\frac{c}{2}} \int_{\eta=0}^{\eta=\frac{b}{2}} \frac{1 - \mu^2}{\pi E} \cdot \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}$$

积分的结果同样可以写成如式(1.4)的形式, 即

$$y_{ii} = \frac{1 - \mu^2}{\pi E} pb F_{ii} \quad (1.6)$$

式中, 系数 F_{ii} 的表达式为

$$F_{ii} = 2 \frac{c}{b} \left\{ \ln\left(\frac{b}{c}\right) + \frac{b}{c} \ln \left[\frac{c}{b} + \sqrt{\left(\frac{c}{b}\right)^2 + 1} \right] + \ln \left[1 + \sqrt{\left(\frac{c}{b}\right)^2 + 1} \right] \right\} \quad (1.7)$$

由式(1.5)可见, F_{ij} 与 $\frac{x}{c}$ 、 $\frac{b}{c}$ 有关, 编制成表 1.1。

表 1.1 F_{ij} 表

$\frac{x}{c}$	$\frac{c}{x}$	F_{ij}					
		$\frac{b}{c} = \frac{2}{3}$	$\frac{b}{c} = 1$	$\frac{b}{c} = 2$	$\frac{b}{c} = 3$	$\frac{b}{c} = 4$	$\frac{b}{c} = 5$
0	∞	4.265	3.525	2.406	1.867	1.543	1.322
1	1.000	1.069	1.038	0.929	0.829	0.746	0.678
2	0.500	0.508	0.505	0.490	0.469	0.446	0.424
3	0.333	0.336	0.335	0.330	0.323	0.315	0.305
4	0.250	0.251	0.251	0.249	0.246	0.242	0.237

续表 1.1

$\frac{x}{c}$	$\frac{c}{x}$	F_{ij}					
		$\frac{b}{c} = \frac{2}{3}$	$\frac{b}{c} = 1$	$\frac{b}{c} = 2$	$\frac{b}{c} = 3$	$\frac{b}{c} = 4$	$\frac{b}{c} = 5$
5	0.200	0.200	0.200	0.199	0.197	0.196	0.193
6	0.167	0.167	0.167	0.166	0.165	0.164	0.163
7	0.143	0.143	0.143	0.143	0.142	0.141	0.140
8	0.125	0.125	0.125	0.125	0.124	0.124	0.123
9	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.110
10	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.099

对于弹性半空间地基上的基础,为了求得各点基底反力与沉降之间关系,将基底划分成 n 个网格(图 1.4),每个网格平面尺寸为 $b \times c$,基底集中反力分别为 $P_1, P_2, \dots, P_n$,每个网格的分布力 $p = P/bc$,近似地认为是均布的。如果以 f_{ij} 表示由于 j 网格上作用单位集中力 $P_j = 1$ 在 i 网格的中点产生的沉降,按叠加原理, i 网格中点的沉降 s_i 应为所有 n 个网格基底压力分别引起该网格中点的沉降之和,即

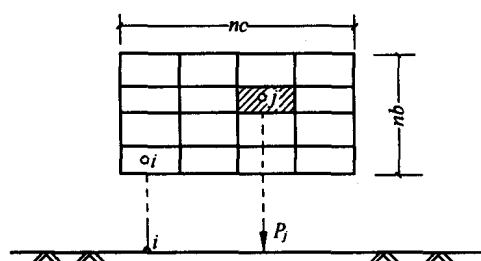


图 1.4 基底网格划分

$$s_i = f_{i1}P_1 + f_{i2}P_2 + \dots + f_{in}P_n = \sum_{j=1}^n f_{ij}P_j \quad (1.8)$$

对整个基础,各网格的基底集中力与沉降之间的关系可表达为

$$\begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_i \\ \vdots \\ s_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdots & f_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

或写成

$$\{s\} = [f]\{P\} \quad (1.10)$$

式中, $\{s\}$ 为基底各网格中点沉降列向量; $\{P\}$ 为基底各网格集中力列向量; $[f]$ 为地基的柔度矩阵。

对于地基柔度矩阵 $[f]$ 中的各元素 f_{ij} , 当 $i \neq j$ 时, 可近似地按式(1.2)计算, 当 $i = j$ 时, 即计算某网格集中力作用下对其本网格中心点产生的沉降, 应按式(1.6)计算。

弹性半空间地基模型考虑到基底各点的沉降不仅与该点的压力大小有关, 而且还与其他各点有关, 因而它比文克尔地基模型进了一步。但是, 由于地基土不是理想的、均质

的、各向同性的弹性体,地基压缩层的厚度是有限的,因而导致这种地基模型的应力扩散能力往往超过地基的实际情况。实践表明,按弹性半空间地基模型计算结果,基础的位移和基础内力都偏大。

1.1.2.3 分层地基模型

考虑到地基土具有天然土层分层的特点,并考虑到土的压缩特性以及地基的有限压缩层深度,近几十年来,在土与基础的共同作用分析中广泛应用了分层地基模型,或称为有限压缩地基模型。该模型在分析时用弹性理论的方法计算地基中的应力,而地基的变形则应用土力学中的分层总和法,使其结果更符合实际。

根据土力学的基本理论,用分层总和法计算基础沉降时,一般的表达式为

$$s = \sum_{i=1}^m \frac{\bar{\sigma}_{zi} \Delta H_i}{E_{si}} \quad (1.11)$$

式中, $\bar{\sigma}_{zi}$ 为第 i 土层的平均附加应力, kN/m^2 ; ΔH_i 为第 i 土层的厚度, m ; E_{si} 为第 i 土层的压缩模量, kN/m^2 ; m 为压缩层深度范围内的土层数。

按分层地基模型分析时,可先将地基与基础的接触面划分成 n 个单元(见图 1.5),设基底 j 单元作用集中附加压力 $P_j = 1$,由弹性理论的布辛奈斯克公式可以求得由于 $P_j = 1$ 的作用在 i 单元中点下第 k 土层中点产生的附加应力 σ_{kij} ,由式(1.11)可得 i 单元中点沉降计算的表达式为

$$f_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{\sigma_{kij} \cdot \Delta H_{ki}}{E_{ski}} \quad (1.12)$$

式中, ΔH_{ki} 为 i 单元下第 k 土层的厚度, m ; E_{ski} 为 i 单元下第 k 土层的压缩模量, kN/m^2 ; m 为 i 单元下的土层数。

当 $j = i$ 时,应将 $P_i = 1$ 均布在 i 单元上,求得 σ_{kij} 后,按式(1.12)计算 f_{ij} 。

根据叠加原理, i 单元中点的沉降 s_i 为基底各单元压力分别在该单元引起的沉降之和,其表达式与式(1.8)同,即

$$s_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} P_j \quad (1.8)$$

整个基础各单元的基底压力与沉降之间关系也可写成式(1.10)的形式,但式中柔度矩阵 $[f]$ 中的元素 f_{ij} 按式(1.12)计算。

研究结果表明,分层地基模型的计算结果更符合实际,一般界于文克尔地基与弹性半空间地基之间,因而在工程中被广泛应用。

1.1.2.4 非线性弹性地基模型

非线性弹性模型中应力 - 应变关系如图 1.6(a)所示,它与线性弹性模型的根本区别

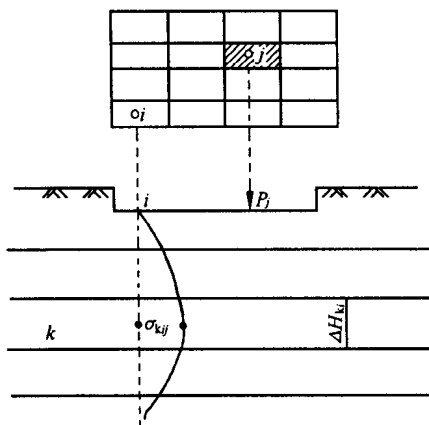


图 1.5 分层地基模型的计算

在于土的弹性模量和波桑比都随应力而变化。

在非线弹性模型中,应用得较多的是邓肯-张(Duncan - Cheung)模型。根据康德纳(Kondner)的建议,在三轴试验中,当 σ_3 不变时,其应力-应变关系可近似地用以下曲线函数表示(图 1.6(b))

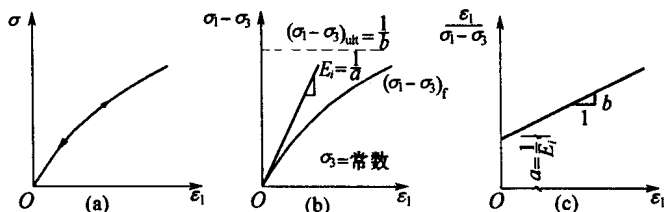


图 1.6 非线性弹性模型的应力-应变关系

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (1.13)$$

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为主应力差; ϵ_1 为轴向应变; a 为初始切线模量 E_i 的倒数; b 为主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数。

如果将图 1.6(b)的纵坐标改为 $\epsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$, 则双曲线变为直线, 如图 1.6(c)所示, 该直线方程为

$$\frac{\epsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b\epsilon_1 \quad (1.14)$$

可见, 由图 1.6(c)的直线很容易确定 a 、 b 的数值, 从而得到在某 σ_3 作用下的 E_i 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 。

由图 1.6(b)可见, 双曲线总是低于渐近线, 因此, 试样破坏时的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 总是小于 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$, 两者之比值称为破坏比 R_f , 即

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (1.15)$$

对于各种不同的土, R_f 值在 0.75 ~ 1.0 之间, 基本上与侧压力无关。式(1.13)可以改写成

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{\frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon_1 R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad (1.16)$$

对式(1.13)求导, 得应力-应变曲线任一点的切线模量为

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon_1} = \frac{\frac{1}{E_i}}{\left[\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \epsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2} \quad (1.17)$$

上式切线模量 E_t 的表达式与主应力差和轴向应变都有关, 为在式(1.17)中消除轴向应变 ϵ_1 , 将式(1.16)改写为 ϵ_1 的形式, 然后代入式(1.17), 则得切线模量的表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \cdot E_i \quad (1.18)$$

根据简布(Janbu)的试验研究,得出初始切线模量 E_i 与固结压力 σ_3 之间的关系为

$$E_i = kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (1.19)$$

式中, k 、 n 为由试验确定的参数,按 $\log E_i - \log \sigma_3$ 之间的关系直线确定,如图 1.7 所示; p_a 为大气压力,单位与 E_i 相同,以便使 k 成为无因次数。

根据摩尔-库伦破坏标准

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1.20)$$

将式(1.19)和式(1.20)代入式(1.18),得切线模量的表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (1.21)$$

式中, c 为土的粘聚力, φ 为土的内摩擦角, 5 个参数 R_f 、 c 、 φ 、 k 和 n 都由三轴试验确定。

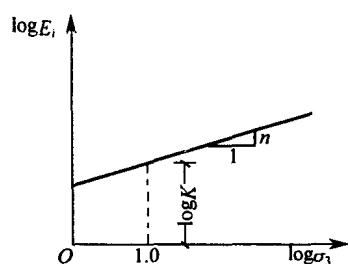


图 1.7 K 、 n 的确定

1.2 地基土计算参数的选取

1.2.1 基床系数的确定

根据文克尔假设,基床系数 k 为单位面积地表面上引起单位下沉所需施加的力。它的大小除了与土的类型有关外,还与基础底面积的大小与形状、基础的埋置深度、基础的刚度以及荷载作用的时间等因素有关。试验表明,在相同压力作用下, k 值随基础宽度的增加而减小,在基底压力和基底面积相同的情况下,矩形基础下土的 k 值比正方形的小,而圆形基础下土的 k 值比正方形大。对于同一基础,土的 k 值随埋置深度的增加而增大。试验还表明,黏性土的 k 值随荷载作用时间的增长而减小。因此, k 值不是一个常量,它的确定是一个复杂的问题,一般有以下几种方法。

1.2.1.1 按静荷载试验结果确定

静荷载试验是现场的一种原位试验,常用以确定土的变形模量、地基承载力等。试验时用千斤顶或其他重物对荷载板分级施加荷载,测出在各级荷载 p 作用下载荷板的稳定沉降量 s ,然后绘制荷载-沉降曲线($p-s$ 曲线),如图 1.8 所示。

在 $p-s$ 曲线的近似直线段,取 p_1 、 p_2 ,得相应的沉降值 s_1 、 s_2 ,按下式计算 k 值

$$k = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} \quad (1.22)$$

式中, p_2 、 p_1 分别为基底的接触压力和土自重压力, kN/m^2 ; s_2 、 s_1 分别为相应于 p_2 和 p_1 的稳定沉降量, m 。

将静荷载试验确定的 k 值应用到实际工程中的一个问题是载荷载板的底面积一般比较小,通常采用 0.25 m^2 或 0.5 m^2 ,而实际工程中基础的底面积比载荷载板面积大得多,因

此, k 值应考虑底面积的因素予以折减。

太沙基对基床系数作了深入的研究后指出, k 值随基础宽度 b 的增加而减少, 可以按下式修正
对砂性土

$$k = k_1 \left(\frac{b + 0.305}{2b} \right)^2 \quad (1.23)$$

对黏性土

$$k = k_1 \frac{0.305}{b} \quad (1.24)$$

式中, k_1 为宽度为 0.305 m 的长板或边长为 0.305 m 的方板的基床系数; b 为基础宽度。

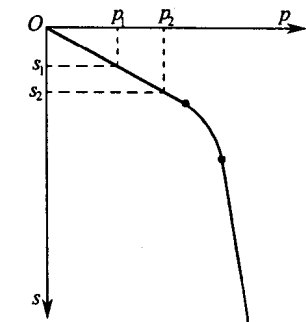


图 1.8 载荷试验的 $p-s$ 曲线

太沙基指出, 只有当基底的接触压力小于土的极限承载力的一半时, 式(1.24)才是有效的。

对于矩形基础, 当基础的长度 l 与宽度 b 的比值为 m 时,

$$k = k_1 \frac{m + 0.5}{1.5 m} \quad (1.25)$$

式中, $m = \frac{l}{b}$; k_1 为方形板的基床系数。

对于条形基础

$$k = 0.67 k_1 \quad (1.26)$$

1.2.1.2 由土的变形模量和波桑比换算

多年来, 许多国内外学者对土的基床系数 k 与土的变形模量 E_0 和波桑比 μ_0 之间的关系进行了研究, 得出许多相关公式, 现介绍几种主要方法。

Vesic(1963 年)考虑到基础的刚度, 提出按下式计算

$$k = \frac{0.65 E_0}{b(1 - \mu_0^2)} \left[\frac{E_0 b^4}{EI} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (1.27)$$

式中, E 、 I 分别为基础材料的弹性模量和基础截面的惯性矩, 其余符号同前。

式(1.27)中的 $0.65 \left[\frac{E_0 b^4}{EI} \right]^{\frac{1}{12}}$ 约在 0.9 ~ 1.5 之间, 平均值可采用 1.2, 于是式(1.27)可简化为

$$k = 1.2 \frac{E_0}{(1 - \mu_0^2) b} \quad (1.28)$$

Vesic 公式在西欧国家应用得较多, Bolues(1997 年)认为只要土的参数 E_0 、 μ_0 选用恰当, 该公式可以得到较满意的结果。

Biot(1937 年)对于无限长梁受集中荷载的情况, 将文克尔地基和弹性半空间地基上梁的最大弯矩进行比较, 得到

$$k = \frac{1.23 E_0}{(1 - \mu_0^2) b} \left[\frac{E_0 b^4}{16 c(1 - \mu_0^2) EI} \right]^{0.11} \quad (1.29)$$

式中, c 为系数, 若沿梁的宽度压力分布均匀时, $c = 1$; 若沿梁宽度挠度均匀时, $c = 1 \sim 1.13$, 其余符号同前。

国内曾用过的一种方法是根据弹性力学推导的地基沉降计算公式转换成如下基床系数的表达式

$$k = \frac{E_0}{(1 - \mu_0^2)\omega\sqrt{A}} \tag{1.30}$$

式中, A 为基础底面积, m^2 ; ω 为沉降影响系数, 按表 1.2 确定。

表 1.2 ω 值

$l:b$	1	1.5	2	3	4	5	10	圆形
ω	0.88	1.08	1.22	1.44	1.61	1.72	2.10	0.79

注: 表中 l 为基础底面长边; b 为短边。

1.2.1.3 按压缩试验资料确定

Yong(1960 年)建议由压缩试验结果按下式计算 k 值

$$k = \frac{1}{m_v H} \tag{1.31}$$

式中, m_v 为土的体积压缩系数, kPa^{-1} ; H 为土层厚度, 取 $0.5b \sim b$, b 为基础宽度, m 。

土的体积压缩系数可按下式计算

$$m_v = \frac{a}{1 + e_1} = \frac{1}{E_s} \tag{1.32}$$

式中, a 为土的压缩系数, kPa^{-1} ; e_1 为土的天然孔隙比; E_s 为土的压缩模量, kPa 。

1.2.1.4 按经验确定

对于基床系数的确定, 国内外的学者和工程技术人员根据试验资料和工程实践都积累了不少经验, 如表 1.3、表 1.4 所示, 供参考。

表 1.3 基床系数 k 的经验值

土 的 类 别	基床系数 $k/(\text{10}^4 \text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
弱淤泥质或有机土	0.5~1.0
黏性土	
软弱状态	1.0~2.0
可塑状态	2.0~4.0
硬塑状态	4.0~10.0
砂 土	
松散状态	1.0~1.5
中密状态	1.5~2.5
密实状态	2.5~4.0
中密的砾石土	2.5~4.0
黄土及黄土状粉质黏土	4.0~5.0

注: 本表适用于建筑物面积大于 10 m^2 。