

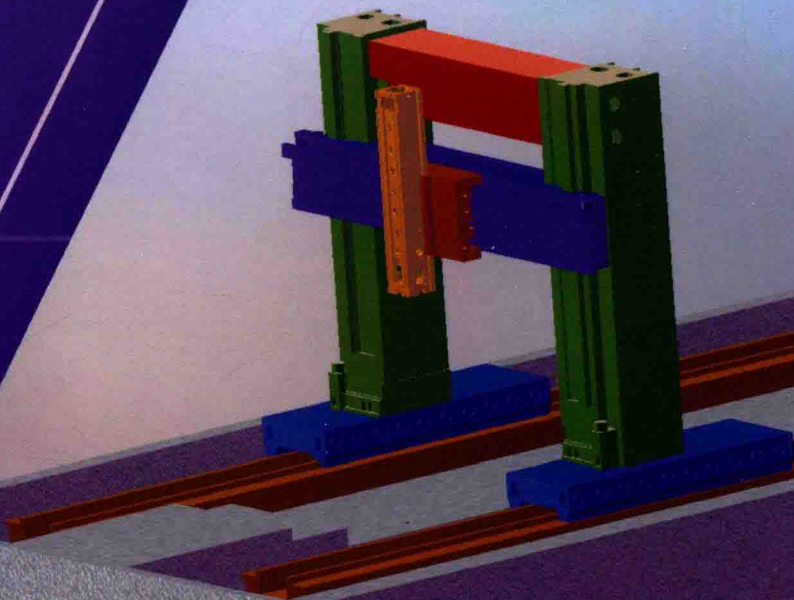
现代制造技术学术著作丛书

# 重型数控机床

## ——地基基础系统建模与实验方法

ZHONGXING SHUKONG JICHUANG—DIJI JICHU XITONG JIANMO YU SHIYAN FANGFA

田 杨 著



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

现代制造技术学术著作丛书

# 重型数控机床-地基基础系统 建模与实验方法

田 杨 著

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

## 内 容 简 介

为了提升重型数控机床加工精度及其保持性,指导面向重型数控机床的地基基础建设,本书采用理论建模、仿真分析和实验验证的技术路线,详细、系统地论述了重型数控机床-地基基础系统模型的建模与实验方法。主要内容包括:复合基础本构模型,地基基础边界条件,重型数控机床-基础沉降建模,重型数控机床-地基基础静力学模型,重型数控机床-地基基础系统几何误差建模,重型数控机床-地基基础系统动态特性研究,重型数控机床-地基基础系统隔振研究。

本书主要面向对象为重型数控机床设计和动力机械基础设计人员。

### 图书在版编目(CIP)数据

重型数控机床-地基基础系统建模与实验方法/田杨著. —北京:  
中国铁道出版社, 2018. 9  
(现代制造技术学术著作丛书)  
ISBN 978-7-113-23052-4

I. ①重… II. ①田… III. ①数控机床—系统建模②  
数控机床—实验方法 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 095387 号

书 名: 重型数控机床-地基基础系统建模与实验方法  
作 者: 田 杨 著

策 划: 曾露平  
责任编辑: 曾露平  
封面设计: 刘 颖  
封面制作: 白 雪  
责任校对: 张玉华  
责任印制: 郭向伟

读者热线: (010)63550836

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

版 次: 2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

开 本: 720 mm×960 mm 1/16 印张: 7 字数: 146千

书 号: ISBN 978-7-113-23052-4

定 价: 29.80元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)63550836  
打击盗版举报电话:(010)63549504

# 前 言

重型数控机床具有大自重、大载荷等特点,其床身、立柱等大型构件的工作精度和寿命均受到地基基础的影响。客户与重型数控机床厂家因基础质量问题“官司”不断,面向重型数控机床基础的相关研究成为了重型数控机床行业的共性技术需求。目前,关于地基基础建设的相关规范在土木工程领域较为成熟,然而土木工程领域关注点为基础的整体沉降,而重型机床行业关注点为基础自身的局部变形与沉降,另外针对重型数控机床-地基基础精度建模的研究相对较少,因此开展重型数控机床-地基基础系统建模与实验方法的研究迫在眉睫。

本书中各章节内容均来源于工程实践,通过本书建立的理论模型可直接指导工程建设。本书内容采用理论建模、仿真分析和实验验证的技术路线,详细、系统地论述了重型数控机床-地基基础系统模型的建模与实验方法。本书将土木工程领域理论植入机械工程领域中,实现了土木工程和机械工程“近距离”的学科交叉,其成果具有理论意义,更具有实用价值。

本书的研究工作得到了“辽宁省教育厅科学研究项目”“辽宁省自然科学基金”和“沈阳理工大学引进高层次人才科研支援计划资金”的支持。本书成稿之际,特此向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。作者还要感谢教育作者多年的导师,感谢所有师长与同事的帮助和支持。书中有部分内容参考了一些文献,已在参考文献中列出,在此一并感谢,最后欢迎各位批评指正。

著 者

2018年3月

# 目 录

<b>第 1 章 复合基础本构模型</b> .....	1
1.1 加筋复合基础模型 .....	1
1.2 复合桩基模型建立 .....	4
1.3 本构模型验证 .....	9
<b>第 2 章 地基基础边界条件</b> .....	11
2.1 混凝土边界条件.....	11
2.2 地基人工边界条件.....	13
2.3 混凝土约束钢箍设计.....	16
<b>第 3 章 重型数控机床-基础沉降建模</b> .....	18
3.1 基础沉降计算方法.....	18
3.2 基础沉降实验.....	20
3.3 算例分析.....	22
3.4 重型数控机床-地基基础系统沉降模型 .....	25
<b>第 4 章 重型数控机床-地基基础静力学模型</b> .....	30
4.1 承载变形许用条件.....	30
4.2 加筋复合基础竖向载荷作用下位移解.....	31
4.3 重型数控机床-地基基础系统承载变形 .....	35
4.4 承载变形测试实验.....	38
4.5 算例分析.....	43
4.6 承载变形影响因素分析.....	45
<b>第 5 章 重型数控机床-地基基础系统几何误差建模</b> .....	48
5.1 基于旋量理论系统几何误差模型.....	48
5.2 重型数控机床误差源分析.....	54
5.3 激光干涉仪简介.....	56
5.4 基于激光干涉仪机床导轨直线度误差测量.....	59
5.5 基于激光干涉仪机床导轨平行度误差测量与评定.....	66

5.6	基于激光干涉仪机床导轨垂直度误差测量方法.....	68
5.7	激光干涉仪测量误差分析.....	72
<b>第6章</b>	<b>重型数控机床-地基基础系统动态特性研究</b> .....	<b>85</b>
6.1	一种简单的系统预估模型.....	85
6.2	多体系统理论模型.....	86
6.3	重型数控机床-地基基础系统仿真分析.....	90
6.4	动态参数测试实验.....	93
6.5	基础形式对整机动态特性的影响.....	97
<b>第7章</b>	<b>重型数控机床-地基基础系统隔振研究</b> .....	<b>100</b>
7.1	隔振沟隔振机理.....	100
7.2	重型数控机床-地基基础隔振系统建模.....	100
7.3	实例分析.....	102
	<b>参考文献</b> .....	<b>105</b>

对于重型数控机床而言,通常采用大块式混凝土基础和桩基作为动力设备的承载基础,因此,为了研究面向重型数控机床-地基基础系统特性,必须掌握各类混凝土基础的本构属性。为了节约混凝土基础计算资源,本书介绍适用于空间加筋大块式基础与桩基复合基础的本构模型。

## 1.1 加筋复合基础模型

混凝土基础中配置钢筋,其目的是协助混凝土承受压力,提高基础的承载变形能力,更需要床身与基础共同作用提高机床刚度,从而保证机床加工精度。本构关系是建立静、动力学模型的基础,如果采用单独考虑混凝土和配筋进行有限元计算,将大大增加有限元网格的数量,从而浪费计算资源,另外对于重型数控机床只需要研究在工况载荷作用下,加筋混凝土基础的物理属性即可,为此需要开展面向重型数控机床加筋混凝土基础的本构关系研究。

### 1.1.1 加筋复合材料材料属性算法

如图 1-1 所示,混凝土基础中加筋层由横纵钢筋搭接构成,由于本书研究目标为重型数控机床-地基基础的工况载荷响应,基础响应均在弹性范围内,区别于建工研究的抗震目标,加筋复合基础模型宏观上可视为复合材料,可将模型如下简化:

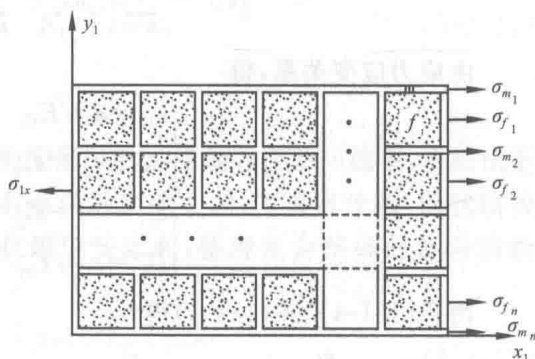


图 1-1 加筋层布筋图

① 假设复合基础中的多项材料属性在复合前后性能没有变化;

② 假设各加筋层具有相同的截面形状和大小,每层横向和纵向布筋在同一平面内;

③ 假设钢筋截面均为方形;

④ 假设多项材料均为线弹性体。

加筋层网状结构中材料弹性模量计算如下:

(1) 弹性模量  $E_{1x}$

综合多项材料的应变关系及力平衡条件,可得

$$E_{1x} = \sum_{n=1}^n (E_f \lambda_{f_n} + E_m \lambda_{m_n} + E_m \lambda_{o_n}) \quad (1-1-1)$$

式中:  $\lambda_m$ ——筋网横向布筋占材料比例,  $\lambda_m = \sum_{n=1}^n \lambda_{m_n}$ ;

$\lambda_o$ ——筋网纵向布筋占材料比例,  $\lambda_o = \lambda_m$ ;

$\lambda_f$ ——混凝土占材料比例,  $\lambda_f = \sum_{n=1}^n \lambda_{f_n}$ 。

因此,式(1-1-1)可表示为

$$E_{1x} = E_f \lambda_f + 2E_m \lambda_m \quad (1-1-2)$$

(2) 弹性模量  $E_{1x} (=E_{1y})$

从力学平衡条件,得

$$\begin{cases} \sigma_{m1} = \sum_{n=1}^n \sigma_{o_n}^n \\ \sigma_{1x} = \sum_{n=1}^n (\sigma_{m_n}^n \lambda_{m_n}^n + \sigma_{f_n}^n \lambda_{f_n}^n) \end{cases} \quad (1-1-3)$$

由几何关系,得

$$\begin{cases} \epsilon_{m_1}^n = \epsilon_{f_1}^n = \dots = \epsilon_{m_n}^n = \epsilon_{f_n}^n = \epsilon' \\ \epsilon_{12} = \sum_{n=1}^n \epsilon_{f_n}^n \lambda_{f_n}^n + \sum_{n=1}^n \epsilon_{o_n}^n \lambda_{o_n}^n \end{cases} \quad (1-1-4)$$

由应力应变关系,得

$$\begin{cases} \epsilon_{12} = \sigma_{12} / E_{12} \\ \epsilon_{m_1}^n = \dots = \epsilon_{m_n}^n = \sigma_{m_n}^n / E_m \\ \epsilon_{f_1}^n = \dots = \epsilon_{f_n}^n = \sigma_{f_n}^n / E_f \\ \epsilon_{o_n}^n = \sigma_{o_n}^n / E_m \end{cases} \quad (1-1-5)$$

由式(1-1-4)、式(1-1-5)得

$$E_{1x} = \frac{\sigma_{1x}}{\epsilon_{1x}} = \frac{\sigma_{1x}}{\sum_{n=1}^n \epsilon_{f_n}^n \lambda_{f_n}^n + \sum_{n=1}^n \epsilon_{o_n}^n \lambda_{o_n}^n} = \frac{\sigma_{1x}}{\sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{f_n}^n \lambda_{f_n}^n}{E_f} + \sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{o_n}^n \lambda_{o_n}^n}{E_m}} \quad (1-1-6)$$

将式(1-1-2)、式(1-1-3)代入式(1-1-6)可得

$$E_{1x} = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{f_n}^n \lambda_{f_n}^n}{\sigma_{m_n}^n \lambda_{m_n}^n + \sigma_{f_n}^n \lambda_{f_n}^n} \cdot \frac{1}{E_f} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{o_n}^n}{E_m}} \quad (1-1-7)$$



将式(1-1-3)、式(1-1-5)代入式(1-1-7)并整理得

$$E_{1x} = E_{1y} = \left( \frac{\lambda_f}{E_m \lambda_m + E_f \lambda_f} + \frac{\lambda_m}{E_m} \right)^{-1} \quad (1-1-8)$$

### 1.1.2 复合材料片状模型材料属性算法

如图 1-2 所示,混凝土基础由多层片状加筋层构成,配筋情况由基础尺寸、土质情况、设备种类、载荷情况等多种因素决定,重型金属切削机床基础混凝土基础配筋形式应符合《动力机器基础设计规范(GB 50040—1996)》相关规定。

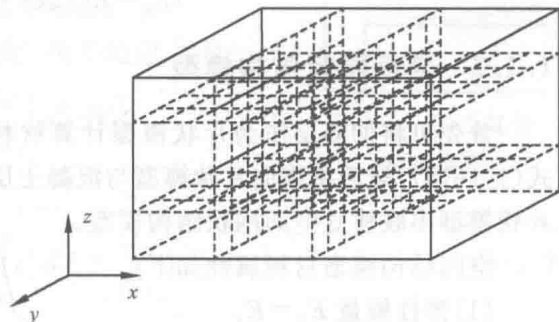


图 1-2 加筋复合基础

纵向多层片状结构复合基础材料属性计算如下:

(1)弹性模量  $E_x$

根据复合材料理论可得

$$E_x = E_{1x} \lambda_p + E_s \lambda_s \quad (1-1-9)$$

(2)弹性模量  $E_y (=E_z)$

并联模型下

$$E_y = E_{1z} \lambda_p + E_s \lambda_s \quad (1-1-10)$$

串联情况下

$$1/E_y = \lambda_p / E_{1z} + \lambda_s / E_s \quad (1-1-11)$$

式中,  $\lambda_p + \lambda_s = 1$ 。

(3)泊松比的计算

在固体力学问题中,尤其是结构的变形、应力、稳定和振动问题中,泊松比不是一个很敏感和很重要的弹性常量,有点误差影响不大,本书将片状、网状结构复合材料收缩应变简化为多相材料收缩应变之和,整理复合基础的各向泊松比为

$$\begin{cases} \mu_{xy} = (\mu_f \lambda_f + \mu_m \lambda_m) \lambda_p + \mu_s \lambda_s \\ \mu_{xz} = (\mu_f \lambda_f + 2\mu_m \lambda_m) \lambda_p + \mu_s \lambda_s \end{cases} \quad (1-1-12)$$

(4)剪切模量的计算

剪切模量的推导过程与弹性模量的推导过程一致,所以其解的形式相同,即并联情况下

$$G_{xz} = \left( \frac{\lambda_f}{G_m \lambda_m + G_f \lambda_f} + \frac{\lambda_m}{G_m} \right)^{-1} \lambda_p + G_f \lambda_s \quad (1-1-13)$$

串联情况下

$$\frac{1}{G_{zx}} = \left( \frac{\lambda_f}{G_m \lambda_m + G_f \lambda_f} + \frac{\lambda_m}{G_m} \right) \lambda_p + \frac{\lambda_s}{G_f} \quad (1-1-14)$$

根据假设复合材料横观各向同性  $G_{zx} = G_{yz}$

$$G_{xy} = E_x / 2(1 + \mu_{xy}) \quad (1-1-15)$$

### 1.1.3 空间网状结构模型

首先可将加筋层作为片状模型计算材料属性,其计算方法如式(1-1-6)~式(1-1-15),然后将横向片状模型与混凝土层做并联,最后将并联模型与纵向的片状模型串联建立空间网状结构模型。

空间结构模型材料属性如下:

(1)弹性模量  $E_x = E_y$

空间网状结构的  $E_x$ 、 $E_y$  可表示为

$$E_x = E_y = E_{2x} \lambda_{2p} + E_s \lambda_{2s} \quad (1-1-16)$$

(2)弹性模量  $E_z$

空间网状结构的  $E_z$  可表示为

$$\frac{1}{E_z} = \frac{\lambda_{2p}}{E_{1z}} + \frac{\lambda_{2s}}{E_{2z}} \quad (1-1-17)$$

式中,  $E_{2z} = E_{2y} = E_{1z} \lambda_{1p} + E_s \lambda_{1s}$ ;  $E_{2x} = E_{1x} \lambda_{1p} + E_s \lambda_{1s}$ 。

横观各向同性材料的弹性矩阵  $\sigma = D\epsilon$  为

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} - 2C_{66} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (1-1-18)$$

式中,  $C_{11} = \frac{1 - \mu_{yz}^2}{E_x E_z \Delta}$ ;  $C_{33} = \frac{1 - \mu_{xy}^2}{E_x^2 \Delta}$ ;  $C_{66} = \frac{E_x}{2(1 - \mu_{xy})}$ ;  $C_{44} = G_{zx}$ ;

$\Delta = (1 - \mu_{xy}^2 - 2\mu_{xz}^2 - 2\mu_{xy}\mu_{xz}^2) / E_x^2 E_z$ 。

## 1.2 复合桩基模型建立

桩基础由基桩和连接于桩顶的承台共同组成。若桩身全部埋于土中,承台底面与土体接触,则称为低承台桩基;若桩身上部露出地面而承台底位于地面上,则称为高承台桩基。为了增加混凝土基础的承载能力,在较软的地质环境下

建设重型数控机床混凝土基础,通常采用的是低承台桩基。

重型数控机床桩基,如图 1-3 所示,在宏观上可视为复合材料。

对重型数控机床复合桩基做如下假设:

(1)假设多相材料均为线弹性体,则平均应力为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \left( \int_{V_p} \sigma_{ij}^p dV + \sum_{n=1}^n \int_{V_{s_n}} \sigma_{ij}^{s_n} dV \right) \quad (1-2-1)$$

平均应变为

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \left( \int_{V_p} \epsilon_{ij}^p dV + \sum_{n=1}^n \int_{V_{s_n}} \epsilon_{ij}^{s_n} dV \right) \quad (1-2-2)$$

式中,  $V$  为总体积;  $V_p$ 、 $V_{s_n}$  分别为 P 相、 $S_n$  相材料所占的体积;  $\sigma_{ij}^p$ 、 $\epsilon_{ij}^p$  为 P 相材料的应力与应变;  $\sigma_{ij}^{s_n}$ 、 $\epsilon_{ij}^{s_n}$  为  $S_n$  相材料的应力与应变,各相材料如图 1-4 所示。

其中两相材料的体积比为

$$\lambda_p = \frac{V_p}{V} \quad (1-2-3a)$$

$$\lambda_{s_n} = \frac{V_{s_n}}{V} \quad (1-2-3b)$$

则  $V = V_p + V_{s_n}$ , 即  $\lambda_p + \sum_{n=1}^n \lambda_{s_n} = 1$ 。

(2)假设多相材料为横观各向同性材料,在  $x-y$  平面内为各向同性,在  $z$  轴方向上为各向异性,近似地认为复合材料  $x-y$  平面内的力学性质相同;

(3)假设多相材料在边界处为连续的,忽略界面的存在,土体与桩基无相互错动,可认为在加桩变形方向多相材料变形协调,即变形相等。

根据假设(2),应力等价条件可表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \sigma_x^p = \sigma_x^{s_n} \\ \bar{\sigma}_y &= \sigma_y^p = \sigma_y^{s_n} \\ \bar{\tau}_{xy} &= \tau_{xy}^p = \tau_{xy}^{s_n} \\ \bar{\tau}_{yz} &= \tau_{yz}^p = \tau_{yz}^{s_n} \\ \bar{\tau}_{xz} &= \tau_{xz}^p = \tau_{xz}^{s_n} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-4a)$$

式中,  $n = (1, \dots, n)$ 。

根据假设(3),应变协调条件为

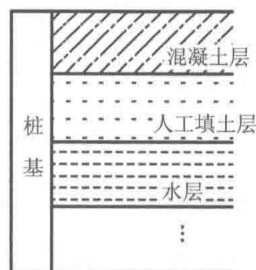


图 1-3 桩-土复合地基模型

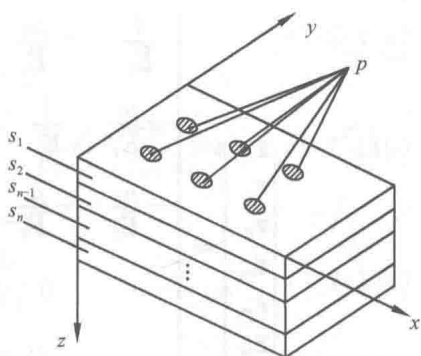


图 1-4 桩基材料属性

$$\left. \begin{aligned}
 \epsilon_x^P &= \frac{1}{E_P} \sigma_x^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_y^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_z^P \\
 \epsilon_{x^n}^{S_n} &= \frac{1}{E_{S_n}} \sigma_{x^n}^{S_n} - \frac{\mu_P}{E_{S_n}} \sigma_{y^n}^{S_n} - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{z^n}^{S_n} \\
 \epsilon_z^P &= -\frac{\mu_P}{E_P} \sigma_x^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_y^P + \frac{1}{E_P} \sigma_z^P \\
 \epsilon_{z^n}^{S_n} &= -\frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{x^n}^{S_n} - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{y^n}^{S_n} + \frac{1}{E_{S_n}} \sigma_{z^n}^{S_n} \\
 \epsilon_{z^n}^{S_n} &= \epsilon_z^P
 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-4b)$$

横观各向同性地基的各向同性面水平时,复合地基总体本构方程为

$$\bar{\epsilon} = A \bar{\sigma} \quad (1-2-5)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  为平均应力矩阵;  $\bar{\epsilon}$  为应变矩阵;  $A$  为柔度矩阵。写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \bar{\epsilon}_x \\ \bar{\epsilon}_y \\ \bar{\epsilon}_z \\ \bar{\epsilon}_{xy} \\ \bar{\epsilon}_{yz} \\ \bar{\epsilon}_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\bar{E}_1} & -\frac{\mu_1}{\bar{E}_1} & -\frac{\mu_2}{\bar{E}_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{\bar{E}_1} & \frac{1}{\bar{E}_1} & -\frac{\mu_2}{\bar{E}_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_2}{\bar{E}_2} & -\frac{\mu_2}{\bar{E}_2} & \frac{1}{\bar{E}_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu_1)}{\bar{E}_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\sigma}_z \\ \bar{\sigma}_{xy} \\ \bar{\sigma}_{yz} \\ \bar{\sigma}_{xz} \end{pmatrix} \quad (1-2-6)$$

式中共有 5 个独立的弹性常数,其中  $\bar{E}_1, \mu_1$  为各向同性面内的多相材料平均杨氏模量和泊松比;  $\bar{E}_2, \mu_2$  为各向同性面法线方向多相材料平均杨氏模量和泊松比;  $\bar{G}_2$  为与各向同性面垂直平面的多相材料平均剪切模量。

由式(1-2-2)可得

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{1}{V} \left( \int_{\dot{V}_P} \epsilon_x^P dV + \sum_{n=1}^n \int_{\dot{V}_P} \epsilon_{x^n}^{S_n} dV \right) \quad (1-2-7a)$$

经整理得

$$\bar{\epsilon}_x = \lambda_P \epsilon_x^P + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \epsilon_{x^n}^{S_n} \quad (1-2-7b)$$

根据式(1-2-4b),对于 P 相材料有

$$\epsilon_x^P = \frac{1}{E_P} \sigma_x^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_y^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_z^P \quad (1-2-8a)$$

对于  $S_n$  相材料有

$$\epsilon_{z^n}^{S_n} = \frac{1}{E_{S_n}} \sigma_{z^n}^{S_n} - \frac{\mu_P}{E_{S_n}} \sigma_{y^n}^{S_n} - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_x^{S_n} \quad (1-2-8b)$$

根据式(1-2-6)有

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{1}{E_1} \bar{\sigma}_x - \frac{\mu_1}{E_1} \bar{\sigma}_y - \frac{\mu_2}{E_2} \bar{\sigma}_z \quad (1-2-9)$$

将式(1-2-8)代入(1-2-7b)得

$$\bar{\epsilon}_x = \lambda_P \left( \frac{1}{E_P} \sigma_x^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_y^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_z^P \right) + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \left( \frac{1}{E_{S_n}} \sigma_{x^n}^{S_n} - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{y^n}^{S_n} - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{z^n}^{S_n} \right) \quad (1-2-10)$$

将(1-2-4a)式代入(1-2-10)得

$$\bar{\epsilon}_x = \lambda_P \left( \frac{1}{E_P} \bar{\sigma}_x - \frac{\mu_P}{E_P} \bar{\sigma}_y - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_z^P \right) + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \left( \frac{1}{E_{S_n}} \bar{\sigma}_x - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \bar{\sigma}_y - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{z^n}^{S_n} \right) \quad (1-2-11a)$$

整理得

$$\bar{\epsilon}_x = \left( \frac{\lambda_P}{E_P} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n}}{E_{S_n}} \right) \bar{\sigma}_x - \left( \frac{\lambda_P \mu_P}{E_P} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n} \mu_{S_n}}{E_{S_n}} \right) \bar{\sigma}_y - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_z^P - \sum_{n=1}^n \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{z^n}^{S_n} \quad (1-2-11b)$$

对比式(1-2-9)和式(1-2-11b)得

$$\frac{1}{E_1} = \frac{\lambda_P}{E_P} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n}}{E_{S_n}} \quad (1-2-12a)$$

$$\frac{\mu_1}{E_1} = \frac{\lambda_P \mu_P}{E_P} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n} \mu_{S_n}}{E_{S_n}} \quad (1-2-12b)$$

解方程(1-2-12a)和(1-2-12b)得

$$\bar{E}_1 = \frac{E_P}{\lambda_P + E_P \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n}}{E_{S_n}}} \quad (1-2-13a)$$

$$\mu_1 = \frac{\lambda_P \mu_P \sum_{n=1}^n E_{S_n} + E_P \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \mu_{S_n}}{\lambda_P \sum_{n=1}^n E_{S_n} + E_P \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n}} \quad (1-2-13b)$$

由式(1-2-4b)中的  $\epsilon_{z^n}^{S_n} = \epsilon_z^P$  可知

$$\frac{\sigma_z^P}{E_P} = \sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{z^n}^{S_n}}{E_{S_n}} \quad (1-2-14)$$

根据式(1-2-1)有

$$\bar{\sigma}_z = \lambda_P \sigma_z^P + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \sigma_{z^n}^{S_n} \quad (1-2-15)$$

将式(1-2-14)代入(1-2-15),整理可得

$$\bar{\sigma}_z = \left( \lambda_P + \frac{\sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} E_{S_n}}{E_P} \right) \sigma_z^P \quad (1-2-16)$$

根据式(1-2-4b),对于P相材料有

$$\epsilon_z^P = -\frac{\mu_P}{E_P} \sigma_x^P - \frac{\mu_P}{E_P} \sigma_y^P + \frac{1}{E_P} \sigma_z^P \quad (1-2-17a)$$

对于 $S_n$ 相材料有

$$\sum_{n=1}^n \epsilon_z^{S_n} = \sum_{n=1}^n \left( -\frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_x^{S_n} - \frac{\mu_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_y^{S_n} + \frac{1}{E_{S_n}} \sigma_z^{S_n} \right) \quad (1-2-17b)$$

由式(1-2-6)可得

$$\bar{\epsilon}_z = -\frac{\mu_2}{E_2} \bar{\sigma}_x - \frac{\mu_2}{E_2} \bar{\sigma}_y + \frac{1}{E_2} \bar{\sigma}_z \quad (1-2-18)$$

将式(1-2-17)代入式(1-2-18)中并作变换得

$$\bar{\epsilon}_z = -\left( \frac{\lambda_P \mu_P}{E_P} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n} \mu_{S_n}}{E_{S_n}} \right) (\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y) + \frac{\lambda_P}{E_P} \sigma_z^P + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n}}{E_{S_n}} \sigma_{S_n}^P \quad (1-2-19)$$

将式(1-2-14)、式(1-2-15)代入式(1-2-19)并整理得

$$\bar{\epsilon}_z = -\left( \frac{\lambda_P \mu_P}{E_P} + \sum_{n=1}^n \frac{\lambda_{S_n} \mu_{S_n}}{E_{S_n}} \right) (\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y) + \frac{1}{\lambda_P E_P + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} E_{S_n}} \bar{\sigma}_z \quad (1-2-20)$$

对比式(1-2-20)和式(1-2-18)可得

$$\bar{E}_2 = \lambda_P E_P + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} E_{S_n} \quad (1-2-21a)$$

$$\mu_2 = \left( \frac{\lambda_P \mu_P}{E_P} + \frac{\sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \mu_{S_n}}{E_{S_n}} \right) (\lambda_P E_P + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} E_{S_n}) \quad (1-2-21b)$$

对P相、 $S_n$ 相材料分别有

$$\epsilon_{yz}^P = \frac{\sigma_{yz}^P}{G_P} \quad (1-2-22a)$$

$$\epsilon_{yz}^{S_n} = \frac{\sigma_{yz}^{S_n}}{G_{S_n}} \quad (1-2-22b)$$

根据式(1-2-2)有

$$\bar{\epsilon}_{yz} = \lambda_P \sigma_{yz}^P + \sum_{n=1}^n \lambda_{S_n} \sigma_{yz}^{S_n} \quad (1-2-23)$$

将式(1-2-4)代入式(1-2-23)整理得

$$\bar{\epsilon}_{yz} = \left( \frac{\lambda_P}{G_P} + \frac{\lambda_{S_n}}{G_{S_n}} \right) \bar{\sigma}_{yz} \quad (1-2-24)$$

根据式(1-2-6)有

$$\bar{\epsilon}_{yz} = \frac{1}{\bar{G}_2} \bar{\sigma}_{yz} \quad (1-2-25)$$

与式(1-2-24)对比得

$$\bar{G}_2 = \frac{G_P G_{S_n}}{\lambda_P G_{S_n} + \lambda_{S_n} G_P} \quad (1-2-26)$$

当桩基材料全部由 P 相材料构成,也就是  $\lambda_P = 1, \lambda_{S_n} = 0$  时,此时  $E_1 = E_P$ 、 $\mu_1 = \mu_P$ 、 $\bar{E}_2 = E_P$ 、 $\mu_2 = \mu_P$ 、 $\bar{G}_2 = G_P$ ,这说明复合材料弹性常量全部是 P 相材料弹性常量,也说明了此时的复合材料退化成各向同性均质材料的块式混凝土基础。

### 1.3 本构模型验证

为了验证本构模型的正确性,本书通过对加筋层数不同的混凝土试块进行单轴压缩实验,获取了相应的本构曲线。为了提高实验效果,本书在混凝土基础中通过玻璃棒布置了多组应变片,由于玻璃棒的抗压强度远远高于混凝土的抗压强度,这样在混凝土破坏之前能保证应变计的位置不会发生变化,另外玻璃棒相对于混凝土来说弹性模量较小,这样分担的力也会比较小,对混凝土的变形不会造成大的影响。为了让玻璃棒更好地与混凝土贴合,将玻璃棒作分段处理,然后在玻璃棒凸起的部分贴应变片以测量局部应变值。

#### 1.3.1 实验分析

由于素混凝土材料属性相对具有不确定性,本书首先对素混凝土进行了单轴实验分析,然后以同批次混凝土作为钢筋混凝土复合材料的基材,对比加两层筋、四层筋混凝土基础的  $z$  方向上的弹性模量,用以验证了理论解的正确性。由于本书只讨论重型数控机床在正常工况下基础的力学响应情况,所以本构关系只取到塑性阶段之前,本构模型验证实验如图 1-5 所示。



图 1-5 本构模型验证实验

### 1.3.2 加钢筋混凝土试块仿真分析

可以采用整体式、分离式、组合式等几种方法来模拟钢筋和混凝土的组合方式。采用整体式的时候,是将钢筋分布于整个单元中,假定钢筋和混凝土黏结很好,并把单元视为连续均匀材料。它求出的是综合了钢筋和混凝土的刚度矩阵。分离式模型,是把钢筋和混凝土作为不同的单元来处理,即将钢筋和混凝土各自划分成足够小的单元来处理,两者的刚度矩阵是分开求解的。将钢筋作为线单元处理。钢筋和混凝土之间可以插入黏结单元模拟钢筋和混凝土之间的黏结和滑移,这种模型应用最为广泛。组合式模型,一种方法是分层组合;另一种方法是考虑带钢筋膜的等参单元。

Solid65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。在混凝土的应用方面,如用单元的实体性能来模拟混凝土而用加筋性能来模拟钢筋的作用。当然该单元也可用于其他方面,如加筋复合材料(如玻璃纤维)及地质材料(如岩石)。该单元具有 8 个节点,每个节点有三个自由度, $x, y, z$  三个方向的线位移;还可对三个方向的含筋情况进行定义。

为最大程度、真实地模拟实际构件的几何尺寸、各材料的空间位置,建议采用钢筋与混凝土分离式建模方法,其中混凝土采用 Solid65 单元(见图 1-6),Solid65 是在三维 8 节点等单元 Solid45 的基础上增加了针对于混凝土的材性参数和组合式钢筋模型,可通过定义三个方向的配筋率考虑三个方向的钢筋,同时 Solid65 单元可以模拟混凝土受拉过程中混凝土产生的裂缝,以及在受压过程中产生的压碎现象,钢筋采用 Pipe20 单元模拟。如图 1-7 所示为应用理论值进行的有限元分析结果和采用分离法计算结果的对比。

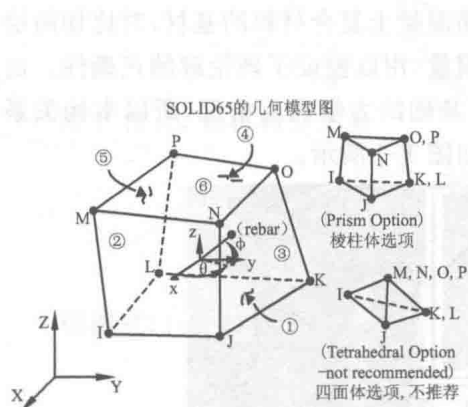


图 1-6 Solid65 单元

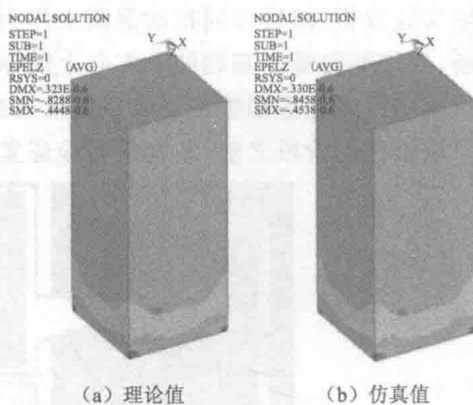


图 1-7 理论值与仿真值对比



## 第 2 章

# 地基基础边界条件

地基基础边界条件是建立重型数控机床-地基基础系统模型的基本条件,其边界条件的精度也决定着系统模型的精度,在分析重型数控机床-地基基础系统特性过程中,受计算资源的限制,有些需要考虑地基的边界,有些只考虑基础的边界条件即可满足需求,因此需要针对不同需要确定地基基础边界条件。

### 2.1 混凝土边界条件

如果将基础与土连接处的混凝土边界条件考虑成固接,这种解法虽然比较实用,但各部分接触面不满足变形协调条件,忽略土对结构的影响,混凝土在上部载荷作用下,由材料力学知识可知,随着基础尺寸的变大,基础的承载能力反而降低,本书采用常集总参数法,这种方法通过采用施加弹簧和阻尼的方法来模拟土体与基础的接触,并且通过弹簧和阻尼的参数的改变来模拟不同土体的特性。为了使分析问题的过程得到简化,且能在一定程度上模拟土的动力特性,在研究过程中,以前的学者们提出了不少简化的计算方法,如日本的田治见提出的计算方法、Newmark 和 Rosenbluth 对前人的理论进行总结而得出的方法以及简化的常集总参数法等。

#### 2.1.1 田治见计算方法

田治见建立了一个考虑地基土附加质量的质阻弹体系。他所计算的在水平和转动两方向的地动力刚度和阻尼见表 2-1,考虑了半无限弹性地基上圆形基础时的地基刚度和阻尼。

表 2-1 田治见相互作用弹簧刚度、阻尼

参数 方向	刚度 $k_0$	阻尼 $c(\omega)$
水平	$\frac{2\pi}{2-\nu}Ga$	$\frac{2\pi}{2-\nu}\frac{\Gamma_2}{2}\rho V_s a^2$
转动	$\frac{\pi Ga^3}{2(1-\nu)}$	$\frac{\pi}{2}\frac{G}{2-\nu}\frac{\Gamma_1^3}{2}\frac{a^6\omega^2}{V_s^3}$

注:圆形基础的阻抗为  $k(\omega) = k_0 - \omega^2 m_0 + i\omega \cdot c(\omega)$ ,  $\nu = 7/16 \rightarrow \Gamma_1 = 1.227, \Gamma_2 = 0.886 (\omega a/V = 1)$ , 旋转振动的  $c(\omega)$  中  $\omega$  表示建筑结构和地基耦合体系的圆频率。