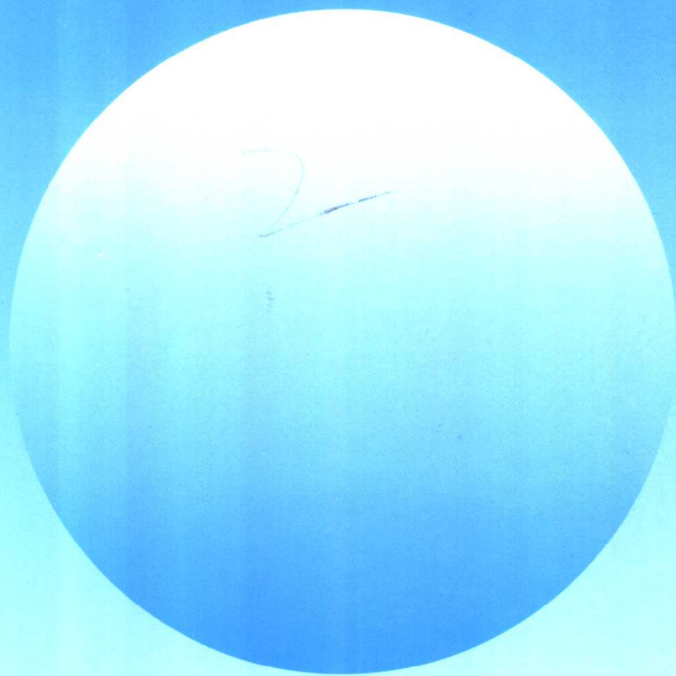


● 研 究 生 用 书 ●

REINFORCED CONCRETE
NONLINEAR FINITE ELEMENT
AND OPTIMAL DESIGN

华中科技大学出版社



宋天霞 黄荣杰 杜太生

钢筋混凝土非线性 有限元及其优化设计

钢筋混凝土非线性有限元 及其优化设计

宋天霞 黄荣杰 杜太生

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土非线性有限元
及其优化设计/宋天霞 黄荣杰 杜太生
武汉:华中科技大学出版社, 2003年12月
ISBN 7-5609-3045-X

- I. 钢…
II. ①宋… ②黄… ③杜…
III. 钢筋混凝土-设计
IV. TU528.571

钢筋混凝土非线性有限元
及其优化设计

宋天霞 黄荣杰 杜太生

责任编辑:谢燕群
责任校对:章 红

封面设计:刘 卉
责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:11.125 插页:2

字数:258 000

版次:2003年12月第1版

印次:2003年12月第1次印刷

定价:18.50元

ISBN 7-5609-3045-X/TU·26

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书结合各类具体问题对“钢筋混凝土非线性有限元及其优化设计”的理论与方法进行了系统论述。

首先,介绍了钢筋混凝土材料各类本构关系矩阵及其工程显式。

其次,对钢筋混凝土各类组合单元刚阵进行了系统深入的理论分析,进而推导出相应的工程显式。

最后,对钢筋混凝土结构在有限元分析基础上的优化设计,提出了分别适用于连续变量和离散变量的 8 种直接搜索法。其中 4 种搜索法是最新的研究成果。

本书是为土木工程结构和工程力学等专业硕士和博士研究生学习“钢筋混凝土有限元及其优化设计”课程而编写的教材,亦可作为相关工程结构研究人员的学习参考书。

Abstract

This book systematically discusses the reinforced Concrete nonlinear finite element and optimal design of various specific problems.

In the first part, we discuss the constitutive relations of the reinforced concrete materials and its engineering equations.

In the second part, we discuss the constitutional element stiffness matrices of the reinforcement-concrete and its engineering equations.

In the third part, we discuss continuous variable optimization, discrete variable optimization problems of the reinforced concrete structures and we introduce eight direct calculation methods, within four methods are research results recently.

This book is written for the postgraduates and the doctoral candidates in civil engineering structures, engineering mechanics, etc. It can be used as reference for engineers who are engaged in nonlinear finite element and optimal design analyses of various reinforced concrete structures.

写在“研究生用书”出版 15 周年前岁

“接天莲叶无穷碧，映日荷花别样红。”今天，我国的教育正处在一个大发展的崭新时期，而高等教育即将跨入“大众化”的阶段，蓬蓬勃勃，生机无限。在高等教育中，研究生教育的发展尤为迅速。在盛夏已临，面对池塘中亭亭玉立的荷花，风来舞举的莲叶，我深深感到，我国研究生教育就似夏季映日的红莲，别样多姿。

党的十六大报告以空前的力度强调了“科教兴国”的发展战略，强调了教育的重大作用，强调了教育的基础性全局性先导性，强调了在社会主义建设中教育的优先发展的战略地位。从报告中，我们可以清楚看到，对高等教育而言，不仅赋予了重大的历史任务，而且更明确提出了要培养一大批拔尖创新人才。不言而喻，培养一大批拔尖创新人才的历史任务主要落在研究生教育肩上。“百年大计，教育为本；国家兴亡，人才为基。”国家之间的激烈竞争，在今天，归根结底，最关键的就是高级专门人才，特别是拔尖创新人才的竞争。由此观之，研究生教育的任务可谓重矣！重如泰山！

前事不忘，后事之师。历史经验已一而再，再而三地证明：一个国家的富强，一个民族的繁荣，最根本的是要依靠自己，要以“自力更生”为主。《国际歌》讲得十分深刻，世界上从来就没有什么救世主，只有依靠自己救自己。寄希望于别人，期美好于外力，只能是一种幼稚的幻

想。内因是发展的决定性的因素。当然,我们决不应该也决不可能“闭关锁国”,自我封闭,固步自封,而谋求发展,重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。正因为如此,我们清醒看到了,“自助者人助”,只有“自信、自尊、自主、自强”,只有独立自主,自强不息,走以“自力更生”为主的发展道路,才有可能在向世界开放中,争取到更多的朋友,争取到更多的支持,充分利用好外部的各种有利条件,来扎扎实实地而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于,我们要有数量与质量足够的高级专门人才,特别是拔尖创新人才。何况,在科技高速发展与高度发达,而知识经济已初见端倪的今天,更加如此。人才,高级专门人才,拔尖创新人才,是我们一切事业发展的基础。基础不牢,地动山摇;基础坚牢,大厦凌霄;基础不固,木凋树枯;基础深固,硕茂葱绿!

“工欲善其事,必先利其器。”自古凡事皆然,教育也不例外。教学用书是“传道授业解惑”培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊”。特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多及越快,人才的知识基础及其要求越来越广及越高,因此,我一贯赞成与支持出版“研究生用书”,供研究生自己主动地选用。早在1990年,本套用书中的第一本即《机械工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他能在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面

知识的参考；如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面，他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书，寻觅主要学习线索，并缘此展开，博览群书。这就是我赞成要为研究生编写系列的“研究生用书”的原因。今天，我仍然如此来看。

还应提及一点，在教育界有人讲，要教学生“做中学”，这有道理；但须补充一句，“学中做”。既要在实践中学习，又要在学习中实践，学习与实践紧密结合，方为全面；重要的是，结合的关键在于引导学生思考，学生积极主动思考。当然，学生的层次不同，结合的方式与程度就应不同，思考的深度也应同。对研究生特别是对博士研究生，就必须是而且也应该是“研中学，学中研”，在研究这一实践中，开动脑筋，努力学习，在学习这一过程中，开动脑筋，努力研究；甚至可以讲，研与学通过思考就是一回事了。正因为如此，“研究生用书”就大有英雄用武之地，供学习之用，供研究之用，供思考之用。

在此，还应进一步讲明一点。作为一个研究生，来读“研究生用书”中的某书或其他有关的书，有的书要精读，有的书可泛读。记住了书上的知识，明白了书上的知识，当然重要；如果能照着用，当然更重要。因为知识是基础。有知识不一定有力量，没有知识就一定没有力量，千千万万不要轻视知识。对研究生特别是博士研究生而言，最为重要的还不是知识本身这个形而下，而是以知识作为基础，努力通过某种实践，同时深入独立思考而体悟到的形而上，即《老子》所讲的不可道的“常道”，即思维能力的提高，即精神境界的升华。《周易·系辞》讲了：“形而上谓之

道,形而下谓之器。”我们的研究生要有器,要有具体的知识,要读书,这是基础;但更要有“道”,更要一般,要体悟出的形而上。《庄子·天道》讲得多么好:“书不过语。语之所贵者意也,意有所随。意之所随者,不可以言传也。”这个“意”,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上。它比语、比书,重要多了。要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可缺的基础,一定要在读书去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要,钩其玄”,以达到南宋张孝祥所讲的“悠然心会,妙处难与君说”的体悟,化知识为己之素质,为“活水源头”。这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识所驾驭,为知识所奴役,成为计算机的存储装置。

这套“研究生用书”从第一本于1990年问世以来,到明年,就经历了不平凡的15个春秋。从研究生教育开始以来,我校历届领导都十分关心研究生教育,高度重视研究生用书建设,亲自抓研究生用书建设;饮水思源,实难忘怀!“逝者如斯夫,不舍昼夜。”截至今天,“研究生用书”的出版已成了规模,蓬勃发展。目前已出版了用书69种,有的书发行了数万册,有22种分别获得了国家级、省部级教材奖、图书奖,有数种已为教育部列入研究生教材,有20种一印再印,久销不衰。采用此书的一些兄弟院校教师纷纷来信,称赞此书为研究生培养与学科建设作出了贡献。我们深深感激这些鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”没有读者与专家的关爱,就没有我们“研究生用书”

的发展。

唐代大文豪李白讲得十分正确：“人非尧舜，谁能尽善？”我始终认为，金无足赤，物无足纯，人无完人，文无完文，书无完书。“完”全了，就没有发展了，也就“完”蛋了。江泽民同志在党的十六大报告中讲得多么深刻：“实践没有止境，创新也没有止境。”他又指出，坚持“三个代表”重要思想的关键是与时俱进。这套“研究生用书”更不会例外。这套书如何？某本书如何？这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足，必然会有。但是，我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进，与时俱进，奋发前进。我们衷心希望读者与专家不吝指教，及时批评。当局者迷，兼听则明；“嚶其鸣矣，求其友声。”这就是我们肺腑之言。

我们真挚祝愿，在我们举国上下，万众一心，在“三个代表”重要思想指引下，努力全面建设小康社会，加速推进社会主义现代化，为实现中华民族伟大复兴，“芙蓉国里尽朝晖”，这一壮丽事业中，让我们共同努力，为培养数以千万计高级专门人才、特别是一大批拔尖创新人才，完成历史赋予研究生教育的重大任务而作出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士

华中科技大学学术委员会主任

杨叔子

2003年7月于瑜园

前 言

本书主要是为工程力学和土木工程结构等专业的硕士和博士研究生学习这类课程而撰写的. 是作者近年来在钢筋混凝土结构非线性有限元分析及其优化设计的科研与教学方面的成果总结.

编写这本书的目的是使研究生能比较系统地掌握“钢筋混凝土非线性有限元及其优化设计”所涉及的基础理论和相应的计算过程与技术, 了解它在当今钢筋混凝土结构设计中的地位和作用以及已有研究成果的应用现状和当前尚待进一步研究的课题. 在电子计算机数值计算(简称电算)高度发展的今天, 土木工程结构和工程力学工作者, 较全面地掌握书中所涉及的理论与方法, 是解决现代非线性结构设计问题所必不可少的. 为了使有关专业学生在学习了《钢筋混凝土非线性有限元及其优化设计》后, 不仅能开阔眼界、启迪思路, 而且更主要的是能在提高理论水平的同时, 增强实际动手能力, 全书在叙述过程中, 始终注意了理论的来龙去脉和实用中的工程显式等. 这也是本书与其他各种同类书的不同之处. 事实上, 仅从理论上叙述非线性有限元与优化设计是比较简便易行的, 但若是注意工程显式, 那就麻烦、困难多了. 因为它涉及繁杂的推导和实际动手的经验. 但要积累这方面的经验, 并非“一朝一夕”之事, 而是一个较长期从事计算实践的过程. 这次之所以贸然动笔, 一方面是因研究生教材之需要, 另一方面是因为经过多年的计算实践, 已初步积累了一些经验.

全书共分 3 篇 8 章: 第一篇包括弹性、弹塑性、弹性断裂、弹塑性断裂等方面的本构关系矩阵及其工程显式; 第二篇包括弹性单元、弹塑性单元、弹性断裂单元和弹塑性断裂单元等的刚度矩阵及其工程显式; 第三篇主要介绍了钢筋混凝土结构优化设计, 对连续

变量和离散变量的直接搜索法进行了较详细的论述.从计算实践来看,对复杂结构在有限元分析基础上的优化设计,用4种直接搜索法是比较稳妥可靠的,而且计算简便,这也正是近3年来的新研究成果.

诚然,由于作者水平和条件的限制,错误与不妥之处在所难免,敬希读者批评指正.

作 者

2003年7月

“研究生用书”可供书目

书 名	作 者
机械工程测试·信息·信号分析(第二版)(教育部推荐教材,获国家级 优秀教材奖、获部委优秀教材奖、省科技进步奖)	卢文祥等
粘弹性力学	杨挺青
现代数字设计	陈耀奎
应用泛函简明教程(第三版)	李大华
协同学原理和应用	吴大进
时间序列分析与工程应用(上)(下)(获中国图书奖、国家图书奖)	杨叔子等
偏微分方程数值解法(第二版)	徐长发
数字语音处理(获部委优秀教材奖、省科技进步奖)	姚天任
辩证法史论稿	阳作华等
机械振动系统——分析、测试、建模与对策(上)(下)(教育部推荐教 材,获部委优秀教材奖)	师汉民等
薄膜生长理论(获部委优秀教材奖)	王敬义
高等弹性力学	钟伟芳等
硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用	徐辉碧等
水电系统最优控制	张勇传
高等工程数学(第三版)	于 实
并行分布式程序设计	刘 健
磁性理论及其应用	宛德福
损伤力学(获中国图书奖)	沈 为
非线性分析——理论与方法	胡适耕
模糊专家系统	李 凡
现代数字信号处理	姚天任等
动态传热学	郭方中
内燃机工作过程模拟	刘永长
半鞅序列理论及应用	胡必锦
化学计量学	陆晓华等

书 名	作 者
自然辩证法新编(第二版)	李思孟等
机电动力系统分析	辜承林
并行程序设计方法学	刘 键
加工过程数控(教育部推荐教材)	宾鸿赞
光纤通信原理和新技术	董天临
近代数学基础	于 寅
气体电子学	丘军林
工程噪声控制学	黄其柏
最优化原理	胡迺耕
随机过程(第二版)	刘次华
信息存储技术原理	张江陵
应用群论导引	张端明
高等教育管理学	姚启和
稳定性的理论方法和应用	廖晓昕
动力工程现代测试技术	黄秉逸
行政学原理	徐晓林
中国传统文化十二讲	王炯华
实用小波方法	徐长发
建筑结构诊断鉴定与加固修复	李惠强
国际经济学	方齐云
遗传算法及其在电力系统中的应用	熊信银等
英语科技学术论文——撰写与投稿	朱月珍
非线性固体计算力学	宋天霞
现代制造系统的监控与故障诊断	周祖德
制造系统性能分析建模——理论与方法	李培根
快速成形技术	王运赣

书 名	作 者
智能系统非经典数学方法	朱剑英
面向对象程序设计及其应用	刘正林
激光先进制造技术	郑启光
断裂力学及断裂物理	赵建生
水力发电过程控制	叶鲁卿
科学社会主义理论与实践	华中科技大学 科学社会主义 与国际关系 教研室
现代实用光学系统	陈海清
矩阵论	杨明 刘光忠
微观经济的数理分析	胡适耕
矩阵论学习辅导与典型题解析	林升旭
数值分析	李 红
钢筋混凝土非线性有限元及其优化设计	宋天霞等

目 录

第 1 篇 钢筋混凝土材料本构关系矩阵及其工程显式	(1)
第 1 章 钢筋混凝土材料弹性本构关系矩阵及其工程显式	(3)
1.1 线弹性应力-应变关系矩阵与工程显式	(3)
1.2 本构方程的能量显式	(10)
1.3 本构方程的矩阵显式	(11)
1.4 双向受力切线模量和泊松比的确定	(17)
1.5 弹性矩阵中的坐标变换	(21)
第 2 章 钢筋混凝土材料弹塑性本构关系矩阵及其工程显式	(25)
2.1 弹塑性基本理论	(26)
2.2 弹塑性应力-应变关系矩阵	(38)
2.3 弹塑性矩阵的工程显式	(42)
第 3 章 钢筋混凝土材料断裂本构关系矩阵及其工程显式	(60)
3.1 理想断裂本构关系矩阵	(60)
3.2 塑性断裂本构关系矩阵及其工程显式	(65)
3.3 模糊裂缝本构关系矩阵及其工程显式	(71)
3.4 开裂应变软化模量 E_{cr} 的计算	(76)

第 2 篇 钢筋混凝土有限元分析	(79)
第 4 章 钢筋混凝土结构弹性有限元分析	(81)
4.1 分离类单元刚阵	(81)
4.2 平面组合单元刚阵	(91)
4.3 空间组合单元刚阵	(110)
4.4 钢筋混凝土梁单元刚阵	(131)
4.5 均匀单元刚阵	(138)
4.6 钢筋混凝土板单元刚阵	(140)
第 5 章 钢筋混凝土弹塑性有限元分析	(150)
5.1 钢筋混凝土弹塑性全量有限元分析	(150)
5.2 弹塑性问题增量有限元分析	(181)
第 6 章 钢筋混凝土断裂有限元分析	(205)
6.1 理想断裂有限元分析	(205)
6.2 弹塑性断裂有限元分析	(212)
6.3 弹塑性断裂组合单元刚阵的工程显式	(219)
第 3 篇 钢筋混凝土结构优化设计	(231)
第 7 章 连续变量直接搜索法	(233)
7.1 坐标轮换法	(233)
7.2 模式搜索法	(234)
7.3 转轴法	(241)
7.4 单纯形法	(248)
7.5 复合形法	(253)

第 8 章 离散变量直接搜索法	(261)
8.1 离散变量模式搜索法	(262)
8.2 离散变量转轴法	(270)
8.3 离散变量复形法	(282)
8.4 离散变量直接网格法	(292)
8.5 离散变量虚-实网格法	(294)
8.6 离散变量拟几率——网格搜索法	(311)
8.7 钢筋混凝土框架结构优化设计	(324)
参考文献	(335)