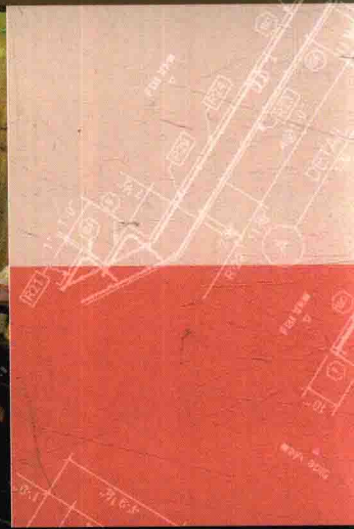
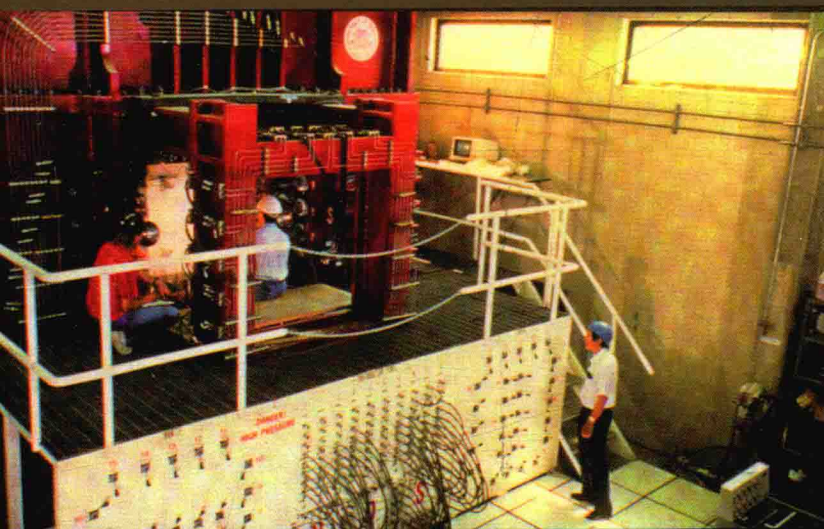


unified theory of **CONCRETE STRUCTURES**

混凝土结构统一理论

〔美〕徐增全 莫怡隆 著
王凤来 张孝存 朱 飞 译
杨 华 审校



科学出版社

UNIFIED THEORY OF CONCRETE
STRUCTURES

混凝土结构统一理论

〔美〕徐增全 莫怡隆 著
王凤来 张孝存 朱 飞 译
杨 华 审校

科学出版社

北 京

图字: 01-2016-0186

内 容 简 介

本书共 10 章, 主要内容包括绪论、平衡(塑性)桁架模型、弯矩和轴向荷载共同作用、剪切的基本原理、转角剪切理论、固定角剪切理论、扭转、受剪梁、框架和剪力墙的有限元建模、SCS 程序在剪力墙结构中的应用。

本书可供从事土木工程领域研究的科技人员及高等院校相关专业的研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构统一理论/(美)徐增全,(美)莫怡隆著;王凤来,张孝存,朱飞译. —北京:科学出版社,2016

书名原文: Unified theory of concrete structures

ISBN 978-7-03-048019-4

I. ①混… II. ①徐…②莫…③王…④张…⑤朱… III. ①混凝土结构 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 069538 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 陶丽荣

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2016 年 5 月第 一 版 * 开本: B5 (720×1000)

2016 年 5 月第一次印刷 印张: 30 1/2

字数: 590 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

译 者 的 话

钢筋混凝土结构用脆性混凝土与柔性钢筋的完美结合，充分体现了刚柔相济的哲学，缔造了人类改造自然、创造发展的历史，提升了人类抵御灾害、保护生命财产的能力，发展了几乎无限的生产与生活空间。

从钢筋混凝土结构技术的应用开始，科学家和科研工作者们就从未停止过探究更准确设计理论、总结更适用设计方法的努力。在杰出的成果中，休斯敦大学著名教授、哈尔滨工业大学杰出校友徐增全教授的研究成果，无疑是标志性成果之一。

初识徐教授的学术著作，是1995年在读研究生期间，拜读了“混凝土统一理论”——教研室内部用的中文资料，懵懵懂懂间在用、学、研上难求平衡。2011年再识时，作品已升级为《混凝土结构统一理论》，理论进一步升华，应用更加广泛，影响也更大。此时，更能理解作者精益求精的科学精神和理论框架的精髓，可以作为帮助科研工作者和工程师们更准确理解自己工作价值的一本必读好书。

2013年，有幸接受任务完成中译本，以飨技术追求者们，因担心不能准确反映作者的原意与思想，倍感压力。期间，感谢徐增全教授和莫怡隆教授亲自审阅中文译稿，对完成译著和科学、准确地反映学术思想和技术内容，起到了重要作用。感谢哈尔滨工业大学杨华教授对全书的审校，感谢张孝存博士、朱飞博士和参加上述工作的博士研究生徐伟帆、池斌、周强、栾帅、杨旭、赵艳，硕士研究生何玉乐、项阳，相信大家深刻体会到技术研究的乐趣，学到了适用的方法。

受译者技术水平和英语水平的限制，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

王凤来

2015年春于哈尔滨

关于作者

徐增全 (Thomas T. C. Hsu) 为美国德克萨斯州休斯敦大学 (约翰和丽贝卡) 教授。在康奈尔大学取得硕士和博士学位后, 徐增全于 1962 年加入伊利诺伊州斯科基市波特兰水泥协会, 从事研究工作。1968~1979 年, 在佛罗里达州迈阿密大学土木工程系任教, 获任终身教授, 曾任系主任。在加入休斯敦大学后, 1980~1984 年担任土木与环境工程系系主任, 1982~2003 年以徐教授为核心建立了一支卓越的师资队伍, 创建了结构研究实验室; 2002 年后, 该实验室被命名为“徐增全结构研究实验室”。2005 年, 徐增全教授暨夫人共同为休斯敦大学设立了“工程领域徐增全-林慧年杰出教师奖励基金”。

徐教授的研究领域分为建筑材料方向和结构工程方向。由于在材料研究领域的贡献, 徐教授于 1965 年获得了美国混凝土协会 (ACI) 的 Wason 奖章; 由于在混凝土结构领域的贡献, 徐教授分别于 1990 年和 2007 年被授予 Arthur R. Anderson 研究奖和 Arthur J. Boase 奖。此外, 徐教授还分别于 1969 年和 1974 年获得了美国工程教育协会 (ASEE) 颁发的研究奖和 Huber 土木工程研究奖两项国家级奖项。2009 年, ACI 和 ASCE 联合主办 ACI 秋季大会“徐增全学术讨论会: 混凝土结构剪切和扭转”, 徐教授成为获奖人。在休斯敦大学, 徐增全教授还获得了许多其他奖项, 包括: 1998 年休斯敦大学的 Fluor-Daniel 杰出教学奖、1998 年的 Abraham E. Dukler 工程教员研究奖、1996 年的杰出研究奖, 1992 年的高级教员研究奖、1990 年的 Halliburton 杰出教师奖, 以及 1989 年的优秀教学奖。

徐教授在钢筋混凝土的剪切和扭转方向发表了多篇学术论文, 出版了《钢筋混凝土统一理论》(*Unifide Theory of Reinforced Concrete*) (1993) 和《钢筋混凝土结构的扭转》(*Torsion of Reinforced Concrete*) (1984 年) 两本专著。《混凝土结构统一理论》(*Unified Theory of Concrete Structures*) 是徐教授于 2010 年完成的第三本专著, 书中完整阐述了在轴向作用、弯曲、剪切、扭转各种受力状态下的多维设计方法, 并最终形成了设计钢筋混凝土结构建筑和基础设施的统一理论, 徐教授的一部分重要研究成果已编入美国混凝土协会建筑规范, 指导美国建筑界, 同时可在全球范围内共享。

徐教授研究工作的两个重要创新点是: ①提出了混凝土结构整体性能可通过整合单元体和平面性能的研究得到; ②在休斯敦大学设计、建造并使用了世界上唯一的、价值百万美元的、获得 NSF 认证的万能平板测试仪, 可在世界范围内为钢筋混凝土结构研究提供最准确的数据, 有效地保证数据模型与真实结构间的一致性。

在建筑材料领域,徐教授率先观测了混凝土内部微裂缝,并论述了这种现象与混凝土性能的相关性。他通过对普通混凝土和纤维增强混凝土疲劳性能的研究,实现了用微观力学机理来解释这些结构材料的性能。

在为工程建设提供技术服务的过程中,从创新与节约成本的角度出发,徐教授为佛罗里达州戴德县快速交通系统设计了双 T 形截面导轨,为佛罗里达州迈阿密海滩的西奈山医疗中心设计了曲线悬臂梁,并为伊利诺伊州芝加哥的美国医院协会办公楼设计了大型转换梁,这些都是远近闻名的作品。目前,他仍担任着美国核管理委员会(NRC)的顾问一职。

徐教授是美国土木工程师学会和美国混凝土学会资深会员。他是美国混凝土协会疲劳技术委员会(215),美国混凝土协会-美国工程教育协会的联合委员会混凝土桥设计委员会(343)和剪扭技术委员会(445)的委员。同时,他还为美国混凝土协会混凝土导轨技术委员会(358)、美国混凝土协会的出版物和新委员提名等方面做着不懈努力。

莫怡隆(Y. L. Mo)教授就职于美国休斯敦大学土木与环境工程系,现任徐增全结构实验室主任。莫教授在台湾大学获得硕士学位,并于1982年在德国汉诺威大学获得博士学位;1984年至1991年,莫教授就职于芝加哥萨金特和伦迪工程公司,担任结构工程师,专门从事核电厂的设计工作;之后,在台湾成功大学担任教授,并于2000年加入休斯敦大学。

莫教授在静载、反复加载和动载作用下钢筋混凝土和预应力混凝土结构的研究方面有超过27年的经验。另外,他还是混凝土结构抗震设计、复合结构和组合结构方面的专家。他的突出成果是结构工程、地震工程与计算机应用的融合。

莫教授以其在核电厂设计方面的创新能力而为人所知,并且目前还担任着美国核管理委员会的顾问一职。他的主要贡献包括采用数据挖掘概念研发了结构智能监控系统,以及利用有限元方法和人工智能开发了小口径管道设计专家系统。最近,莫教授专注于采用以压电陶瓷为基础的智能聚合物来观测混凝土结构的健康状况的研究工作。此外,他还开发了具有更好导电性能的碳纳米纤维混凝土材料,用于可实现自我健康监测和损伤评估的基础设施建设。莫教授在很多领域都有过深入的研究,包括剪力墙抗震性能的研究、蒸气养护的优化分析、混凝土坍落度和浇筑对钢筋混凝土梁延性的影响、焊接对钢筋延性的影响、钢筋混凝土板早期拆模的影响等。1999年中国台湾集集地震后,受“台湾科学委员会”(NSC)指派,莫教授领导一个由20名教授组成的团队共同研究钢筋混凝土结构的损伤特征和原因,为震后的结构修复和未来的研究提供了资料。

莫教授于1994年出版了专著《混凝土结构动力特性》(*Dynamic Behavior of Concrete Structures*),此外还主编和合编了四本著作,在国内和国际杂志上发表了100多篇学术论文。鉴于其在研究和教学领域的贡献,莫教授于1995年获得了德国 Alexander von Humboldt 研究员奖;1999年获得“台湾行政院”颁发的“国家

科学委员会科技进步奖”；并分别在台湾成功大学和休斯敦大学获得“杰出教师奖”。

莫教授是美国混凝土协会的会员，同时也是美国混凝土协会复合结构和组合结构技术委员会（335）、地震修复与加固技术委员会（369）、混凝土结构性态设计技术委员会（374）、混凝土结构试验分析技术委员会（444）的委员，并加入了美国混凝土协会-美国工程教育协会联合委员会，是剪扭技术委员会（445）和钢筋混凝土结构有限元分析技术委员会（447）的委员。

序 言

混凝土结构要承受各种应力和应变，四种基本作用分别是弯曲、轴向作用、剪切和扭转。在不同条件下，四种基本作用会以单独或组合的形式作用在结构上，并对结构产生截然不同的影响。在四种基本作用中，轴向作用和弯曲属于一维问题，这一问题在 20 世纪 60 年代前研究较多，至 1963 年极限强度设计方法写入美国混凝土协会（American Concrete Institute, ACI）建筑规范时，这一问题已经基本得到解决。剪切和扭转是二维和三维问题，20 世纪 50 年代至 21 世纪初期，这两类复杂问题得到了深入研究。

1993 年，徐增全教授出版了《钢筋混凝土统一理论》一书，书中阐述了混凝土统一理论的五种模型：①用于局部区域设计的拉-压杆模型；②用于预测四种受力形态下构件极限承载力的平衡（塑性）桁架模型；③基于线性和非线性理论用于分析弯曲和轴向作用的伯努利协调桁架模型；④基于线性理论用于分析剪切和扭转作用的莫尔协调桁架模型；⑤基于非线性理论用于分析剪切和扭转作用的软化桁架模型。

1993 年首次提出的统一理论对钢筋混凝土基本单元体的分析模型发展具有里程碑意义。但软化桁架分析模型无法完全适用于整体结构有限元分析，因而其阻碍了对混凝土结构整体力学性能进行科学预测的最终目标。1995 年，通过在休斯敦大学的万能平板测试仪上安装 10 通道电液伺服控制系统，实现了试验过程的位移控制，为建立更先进的材料本构模型奠定了坚实基础，推进了剪切和扭转作用下非线性理论的发展。

试验能力的提升开辟了全新的研究领域。首先，加深了对开裂混凝土泊松比影响以及单、双轴受力性能差异的理解。这套试验设备真正实现了位移控制加载，使得休斯敦大学的研究者根据混凝土弥散开裂理论提出了两个徐朱比系数，为软化膜模型奠定了理论基础，并发展成为混凝土统一理论中用来分析剪切和扭转作用的第六个非线性分析模型。

其次，试验能力的提升推动了固定角剪切理论的发展，该理论可预测混凝土材料对受剪承载力的贡献（ V_c ），因而要好于转角剪切理论。从 1995 年开始，根据弥散开裂理论和混凝土软化系数，提出了更为合理的剪切模量，使得固定角剪切理论逐渐发展成为一个相对成熟的分析方法。尽管“固定角”一词未能成为该模型的用语，但并不能改变软化膜模型是基于新的固定角剪切理论这一事实。

最后，试验能力的提升使我们获得了剪切作用下应力-应变曲线的下降段，以及反复剪切荷载作用下的滞回曲线，由此建立了循环荷载作用下开裂钢筋混凝土

的本构关系。由这些本构关系,构建了循环软化膜模型,开启了通过膜单元预测地震和其他动荷载作用下结构力学性能的大门。

混凝土结构可简化为承受弯矩或轴力的一维纤维单元及承受平面内剪应力和正应力的平面膜单元,整体结构受力性能的预测可以通过整合一维和平面结构单元的性能来实现。当然,这种分析方法要依赖于现今计算机的超级计算能力和诸如非线性有限元仿真分析方法等解析及数值工具的快速发展。

在过去的 10 年里,混凝土结构等非线性结构性能预测的有限元分析方法得到了快速发展。OpenSees 作为一款在过去 10 年中发展起来的非线性有限元分析程序,其应用十分便捷。通过在 OpenSees 分析平台上构建混凝土单元的循环软化膜本构模型(CSMM),休斯敦大学开发了混凝土结构的有限元模拟程序 SCS。该程序可以分析静载、循环荷载和动荷载作用下,由一维框架单元和平面墙单元组成的钢筋混凝土结构力学性能。

本书中所阐述的混凝土结构统一理论不仅包含钢筋混凝土在弯矩、轴力、剪力和扭矩作用下的统一设计方法,而且包含集成的一维和平面单元模型,用以揭示由框架和剪力墙组成的整体结构真实力学性能。这也是本书书名《混凝土结构统一理论》的真正内涵,是推动钢筋混凝土统一理论向前迈出实质性的一大步。本书中许多极富挑战性的任务是由两位作者共同完成的。本书前八章由徐增全教授撰写,后两章由莫怡隆教授撰写。

最后,本书给出了科学严谨的统一理论,用于设计钢筋混凝土结构和基础设施,实现安全性与经济性的最佳平衡。仅在美国,混凝土建设领域的投资即达一年两千亿美元。准确地说,这项工作减轻了地震、飓风和其他自然或人为灾害对人类所造成损害方面的价值是不可估量的。

在本书完成之际,作者向所有为统一理论发展做出杰出贡献的同事、实验室员工、研究生和本科生表示深深的谢意!还要特别感谢格雷戈里教授(Gregory L. Fenves)和他的团队为我们提供了 OpenSees 开放平台。

徐增全 莫怡隆

休斯敦大学

2009 年 10 月 7 日

Thomas T. C. Hsu and Y. L. Mo

University of Houston

October 7, 2009

教学指导

《混凝土结构统一理论》是一本可以用于混凝土结构工程教学和研究使用的综合性教科书，该书的前几章可以当做一门本科生程度教学水平的 3 学分课程，后几章可以当做两门研究生程度教学水平的 3 学分课程。对于研究人员和想提高当前知识水平来设计非常规或复杂混凝土结构的结构工程师来说，该书也具有较高的参考价值。

本科生课程包括本书的第 1、2、3 章，可以命名为“混凝土结构统一理论 I ——梁与柱”。该课程可以首先介绍第 3 章和伯努利协调桁架模型的内容，以此来引出梁受弯及柱在轴力和弯矩共同作用下的线性和非线性理论。衍生过程应当遵守纳维叶弯曲三定律，即一维平衡条件、伯努利线性协调和不考虑软化的材料本构关系。然后讲授第 2 章内容，介绍应用平衡（塑性）桁架模型求解四种作用及其组合下的极限承载力理论，这些理论对美国混凝土协会建筑规范中受弯、受剪和受扭构件所做规定的背景作了解释，使得学生在掌握混凝土受弯梁设计方法的同时，也掌握了受剪和受扭梁的设计方法。学生们接触到的最后一部分内容是第 1 章，这部分内容介绍结构中主体区域和局部区域的概念和拉压杆模型，使得学生们可以理解用于分析承受变号和不规则应力与应变作用的局部区域的平衡方法。由于第 1、第 2 和第 3 章是以简洁、“不提供不必要内容”的方式编写的，因此负责这门课的教师可适当补充一些附加习题和梁中钢筋与混凝土粘结的相关知识。

第一门研究生课程可以称为“混凝土结构统一理论 II ——剪切和扭转”，内容包括本书的第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章和第 7 章。这门研究生课程的重点是剪切和扭转，主要应用统一理论的后三种模型——莫尔协调桁架模型、软化桁架模型和软化膜模型来进行研究。这些模型应该按照教学法和历史顺序分类进行讲述，强调平面平衡、莫尔圆协调和材料软化本构关系的基本原则。休斯敦大学 2008 年春季学期以及香港科技大学 2008 年秋季学期都以这种方式开设了一门 3 学分的研究生课程。

第二门研究生课程可以称为“混凝土结构统一理论 III ——框架和墙的有限单元建模”，内容包括本书的第 8 章、第 9 章和第 10 章。学过第一门“剪切和扭转”研究生课程和有限单元法课程的学生们，将在第 9 章中学习使用有限单元结构分析软件 OpenSees 和休斯敦大学的计算机分析程序 SCS。他们首先可以应用这些计算机程序来分析第 8 章中梁的力学性能，然后把应用扩展到第 10 章中各种形式的混凝土结构。最终，学生们可以用来研究迄今为止未曾出现的各种新型混凝土结构。

目 录

译者的话

关于作者

序言

教学指导

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 结构工程	2
1.2.1 结构分析	2
1.2.2 主体区域与局部区域	3
1.2.3 构件和连接设计	4
1.3 统一理论的六个模型	5
1.3.1 六个模型的原则和应用	5
1.3.2 钢筋混凝土理论的发展历程	6
1.4 拉压杆模型	12
1.4.1 简述	12
1.4.2 梁的拉压杆模型	13
1.4.3 框架节点的拉压杆模型	13
1.4.4 小结	18
2 平衡(塑性)桁架模型	19
2.1 基本平衡方程	19
2.1.1 弯曲平衡	19
2.1.2 单元剪切平衡	20
2.1.3 梁剪切平衡	28
2.1.4 扭转平衡	29
2.1.5 基本平衡方程小结	31
2.2 相互作用关系	32
2.2.1 弯剪相互作用	32
2.2.2 弯扭相互作用	35
2.2.3 弯剪扭相互作用	38
2.2.4 弯剪轴拉相互作用	44

2.3	ACI 规范中的剪扭规定	45
2.3.1	受扭钢筋设计	45
2.3.2	受剪钢筋设计	48
2.3.3	最大受剪和受扭承载力	49
2.3.4	设计需要考虑的其他因素	50
2.3.5	设计实例	52
2.4	平衡(塑性)桁架模型小结	60
3	弯矩和轴向荷载共同作用	62
3.1	线性弯曲理论	62
3.1.1	伯努利协调桁架模型	62
3.1.2	钢筋的等效面积	67
3.1.3	开裂截面的弯曲刚度	68
3.1.4	未开裂截面的弯曲刚度	71
3.1.5	钢筋混凝土构件的弯曲变形	74
3.2	非线性弯曲理论	77
3.2.1	伯努利协调桁架模型	77
3.2.2	单筋矩形截面梁	81
3.2.3	双筋矩形截面梁	89
3.2.4	带翼缘的梁	93
3.2.5	弯矩-曲率($M-\phi$)关系	95
3.3	轴力与弯矩共同作用	99
3.3.1	物理中心和偏心荷载	99
3.3.2	界限状态	102
3.3.3	受拉破坏	103
3.3.4	受压破坏	104
3.3.5	弯矩-轴力相关性	107
3.3.6	弯矩-轴力-曲率($M-N-\phi$)关系	109
4	剪切的基本原理	111
4.1	平面单元的应力	111
4.1.1	应力变换	111
4.1.2	莫尔应力圆	112
4.1.3	主应力	116
4.2	平面单元的应变	117
4.2.1	应变变换	117

4.2.2 几何关系	119
4.2.3 莫尔应变圆	120
4.2.4 主应变	121
4.3 钢筋混凝土平面单元	122
4.3.1 钢筋混凝土平面单元的应力状态与开裂模式	122
4.3.2 固定角理论	124
4.3.3 转动角理论	126
4.3.4 混凝土的受剪承载力 (V_c)	127
4.3.5 钢筋混凝土剪切单元的莫尔应力圆	129
5 转角剪切理论	131
5.1 钢筋混凝土平面单元的应力平衡	131
5.1.1 平衡方程的变换类型	131
5.1.2 第一类平衡方程	132
5.1.3 第二类平衡方程	134
5.1.4 基于倍角的平衡方程	135
5.1.5 例题 5.1 平衡 (塑性) 桁架模型的应用	136
5.2 钢筋混凝土平面单元的应变协调	139
5.2.1 协调方程的变换类型	139
5.2.2 第一类协调方程	140
5.2.3 第二类协调方程	141
5.2.4 裂缝控制	142
5.3 莫尔协调桁架模型 (MCTM)	146
5.3.1 基本原理	146
5.3.2 基本方程	147
5.3.3 计算方法	148
5.3.4 例题 5.2 莫尔协调桁架模型的应用	150
5.3.5 钢筋混凝土平面单元的容许应力设计法	153
5.4 转角软化桁架模型 (RA-STM)	154
5.4.1 基本原理	154
5.4.2 基本方程	155
5.4.3 计算方法	158
5.4.4 例题 5.3 连续加载问题	161
5.4.5 比例加载下的平面单元	167
5.4.6 例题 5.4 的比例加载问题	173
5.4.7 钢筋混凝土平面单元的失效模式	180
5.5 本章小结	187

6 固定角剪切理论	188
6.1 软化膜模型 (SMM)	188
6.1.1 基本原理	188
6.1.2 钢筋混凝土平面单元的研究	190
6.1.3 钢筋混凝土的泊松效应	192
6.1.4 徐朱比 ν_{12} 和 ν_{21}	195
6.1.5 试验应力-应变曲线	199
6.1.6 混凝土受压时的软化应力-应变关系	201
6.1.7 软化系数 ζ	202
6.1.8 混凝土受拉时的弥散应力-应变关系	206
6.1.9 混凝土中钢筋的弥散应力-应变关系	209
6.1.10 混凝土受剪时的弥散应力-应变关系	218
6.1.11 计算方法	218
6.1.12 例题 6.1	221
6.2 固定角软化桁架模型 (FA-STM)	229
6.2.1 基本原理	229
6.2.2 计算方法	230
6.2.3 例题 6.2	232
6.3 循环软化膜模型 (CSMM)	238
6.3.1 基本原理	238
6.3.2 混凝土的循环应力-应变曲线	239
6.3.3 钢筋的循环应力-应变曲线	243
6.3.4 徐朱比 ν_{TC} 和 ν_{CT}	245
6.3.5 求解步骤	245
6.3.6 滞回曲线	247
6.3.7 循环剪切作用下的捏缩效应和失效机理	251
6.3.8 八块试验板	254
6.3.9 剪切刚度	256
6.3.10 剪切延性	257
6.3.11 剪切耗能	258
7 扭转	262
7.1 扭转分析	262
7.1.1 平衡方程	262
7.1.2 协调方程	264
7.1.3 混凝土的本构关系	268
7.1.4 扭转控制方程	273

7.1.5 求解方法	274
7.1.6 例题 7.1	279
7.2 扭转设计	285
7.2.1 扭转和弯曲的相似性	285
7.2.2 力臂面积 A_0 的多种定义	286
7.2.3 设计取用的剪力流区厚度 t_d	288
7.2.4 厚度 t_d 的简化计算公式	290
7.2.5 边梁的协调扭转	292
7.2.6 最小纵向受扭钢筋配筋率	299
7.2.7 例题 7.2	301
8 受剪梁	305
8.1 梁的塑性桁架分析模型	305
8.1.1 跨中集中荷载作用下的梁	305
8.1.2 均布荷载作用下的梁	307
8.2 梁的协调桁架分析模型	311
8.2.1 均布荷载作用下梁的受力分析	311
8.2.2 箍筋内力和三角形剪力图	312
8.2.3 纵向钢筋内力	315
8.2.4 沿斜裂缝方向的钢筋应力	315
8.3 工字形截面预应力混凝土梁的受剪设计	316
8.3.1 研究背景	316
8.3.2 休斯敦大学的工字形截面预应力混凝土梁试验	318
8.3.3 休斯敦大学提出的受剪承载力公式	324
8.3.4 最大受剪承载力	327
8.3.5 最小配箍量	330
8.3.6 受剪设计方法与试验结果的对比	332
8.3.7 受剪设计案例	334
8.3.8 三个受剪设计实例	338
9 框架和剪力墙的有限元建模	340
9.1 概述	340
9.1.1 有限元分析 (FEA)	340
9.1.2 OpenSees——面向对象的有限元分析平台	342
9.1.3 材料模型	342
9.1.4 一维和平面模型的有限元分析公式	343

9.2 混凝土结构的材料模型	343
9.2.1 OpenSees 中的材料模型	344
9.2.2 休斯敦大学提出的材料模型	346
9.3 适用于框架分析的一维纤维模型	350
9.4 适用于墙体分析的平面循环软化膜模型	351
9.4.1 混凝土结构的坐标系统	351
9.4.2 应用	352
9.4.3 分析过程	353
9.5 地震作用下的运动方程	355
9.5.1 单自由度与多自由度问题	355
9.5.2 空间三维建筑	356
9.5.3 阻尼	358
9.6 非线性分析算法	358
9.6.1 荷载控制迭代过程	359
9.6.2 位移控制迭代方程	359
9.6.3 动力分析迭代方程	360
9.7 非线性有限元分析程序 SCS	362
10 SCS 程序在剪力墙结构中的应用	366
10.1 静载作用下的钢筋混凝土板	366
10.2 静载作用下的预应力混凝土梁	367
10.3 往复循环荷载作用下的框架剪力墙	369
10.3.1 休斯敦大学的框架剪力墙试验	369
10.3.2 NCREE 的低矮框架剪力墙试验	371
10.3.3 NCREE 的中高框架剪力墙试验	373
10.4 往复循环荷载作用下的后张预制桥墩	375
10.5 框架剪力墙的振动台试验	378
10.6 7 层剪力墙结构的振动台试验	382
附录	384
例 1 预应力混凝土工字形简支梁	384
例 2 往复循环荷载作用下的后张预应力桥墩	393
例 3 往复循环荷载作用下的混凝土框架剪力墙	405
例 4 振动台激励下的剪力墙	415
参考文献	428
索引	437

1 绪 论

1.1 概 述

钢筋混凝土结构可能承受弯矩、轴力、剪力和扭矩四种外部作用。根据材料力学理论中应力平衡、应变协调、钢筋和混凝土材料的本构关系这三个基本条件,采用统一理论首次实现了对钢筋混凝土结构在单一受力和复合受力情况下的分析与设计。与其他理论不同,统一理论更好地反映了各种作用下的协调性,因此能更可靠地计算结构的承载力和变形。

近年来,利用各类桁架模型理论研究剪切作用下钢筋混凝土结构性能的方法得到了快速发展。从最新研究成果来看,桁架剪切理论可以严格满足平面应力平衡方程、莫尔应变协调方程和混凝土的双轴软化本构方程。在工程上,这一剪切理论可用来计算包括工字形截面梁、桥墩和低矮剪力墙等钢筋混凝土构件的受剪承载力和剪切变形,而对于普通梁、桥梁中的主梁和剪跨比较大的剪力墙等钢筋混凝土构件,则应考虑剪切和弯曲的相关作用。

在平面状态下,当同时作用有剪力和双向轴力时,将产生一种被称作“薄膜应力”的重要应力状态。被称作“膜单元”的平面单元可作为由墙和壳组成的众多结构形式的基本单元,如剪力墙结构、水下结构、海洋平台和核安全壳(上述墙体厚度可厚达几英尺, $1\text{ft}=3.048\times 10^{-1}\text{m}$)。本书将根据平面应力-应变状态下材料力学的三大基本原理,提出一种适用于分析上述由墙和壳所组成结构的合理方法。

在梁、柱、桥墩、沉箱等构件中,弯矩和轴力的同时作用是另一种重要的应力状态。本书以全新的视角介绍了分析和设计这些基本构件的方法,强调了在平行力系中材料力学的三大基本原理,即平行力系的应力平衡、伯努利线性应变协调和材料的单轴本构关系。

要分析三维应力状态下的受扭构件,则需要考虑平面情况下受剪区的剪力流分布,以及由受剪区翘曲引起的混凝土压杆弯曲。既然平面剪切和弯曲作用下的结构可以用莫尔协调方程和伯努利协调方程进行分析,类似地,我们将首次用科学的方法来解决扭转作用下构件的分析问题。本书给出了解决扭转问题的详细推导过程和分析方法。以材料力学的基本原理为基础,混凝土结构统一理论可以解决在弯矩、轴力、剪力和扭矩作用下,钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的分析与设计问题。书中系统地归纳了各种应力状态下的单一理论,用实用的全新方法来实现受剪、受扭和膜受力状态下计算方法的统一,以代替现阶段仍普遍采用