

土木工程 材料的本构方程

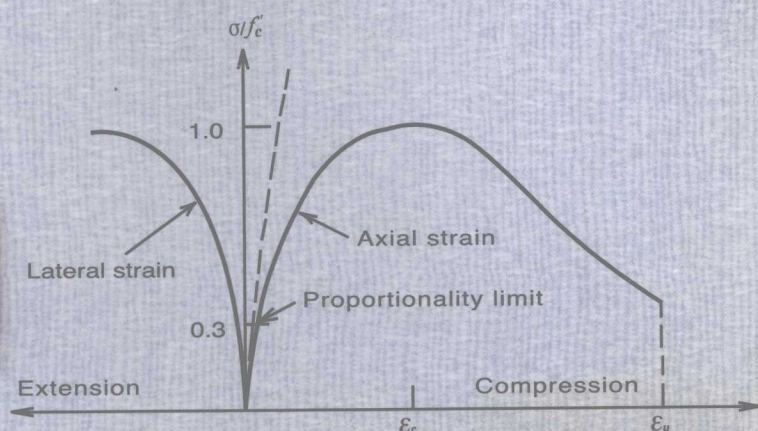
(第二卷 塑性与建模)

[美] 陈惠发 著

余天庆 王勋文 刘再华 译

刘西拉 韩大建 校译

华中科技大学出版社



土木工程 材料的本构方程

(第二卷 塑性与建模)

[美] 陈惠发 著

余天庆 王勋文 刘再华 译

刘西拉 韩大建 校译

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料的本构方程(第二卷 塑性与建模) [美]陈惠发 著
武汉:华中科技大学出版社,2001年5月
ISBN 7-5609-2388-7

I. 土…

II. 陈…

III. 土木工程-工程材料-本构方程

IV. TU5

土木工程材料的本构方程
(第二卷 塑性与建模)

[美]陈惠发 著

责任编辑:佟文珍

封面设计:刘 卉

责任校对:蔡晓瑚

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山

邮编:430074

电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:湖北省新华印刷厂

开本:787×960 1/16

印张:30 插页:2

字数:450 000

版次:2001年5月第1版

印次:2001年5月第1次印刷

印数:1—1 500

ISBN 7-5609-2388-7/TU·22

定价:49.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



作者简介

陈惠发 (W.F.Chen) 1959年获台湾成功大学学士学位, 1963年获里海大学(Lehigh University)结构工程硕士学位, 1966年获布朗大学(Brown University)固体力学博士学位。他在普渡大学工作期间, 曾荣获该校土木工程George E. Goodwin杰出教授头衔并任土木工程学院结构工程系系主任。现任美国夏威夷大学工学院院长。陈教授学识渊博, 多年来他热情、耐心和友好地与他的学生们在每个研究项目中密切合作, 享有很高的声誉。陈教授不仅是一位学术成就卓著的世界知名的科学家, 而且他对推动学术活动和土木工程教育事业更是不遗余力。他在过去的30年中培养了45名博士。他培养的硕士、博士遍及世界各大洲。他曾赴世界各地讲学, 多次应邀来中国访问和讲学。陈教授热爱祖国, 对大陆和台湾的土木工程学术发展给予了极大的关心和支持。他不局限于研究自己擅长的结构力学, 而且把它扩展到岩土工程。他将土的塑性概念非常成功地应用于承载力、地压力和边坡稳定的研究, 对岩土工程也作出了很多贡献。他于20世纪80年代出版的著作《土和混凝土的本构方程》已将塑性理论引进于土木工程的实际应用之中。陈教授的许多专著已译成中文出版, 其中《梁柱分析与设计》(科技图书股份有限公司, 台北, 1994—1995年; 人民交通出版社, 北京, 1996年)堪称稳定理论经典之作, 《混凝土结构工程施工过程安全分析》(1991年)、《钢框架高等分析: 理论、计算机程序及应用》(1993年)、《极限分析与土体塑性》(人民交通出版社, 北京, 1995年)和《钢框架稳定设计》(上海世界图书出版公司, 上海, 1999年)等著作已在中国广泛发行, 对我国的土木工程学科和高等教育事业的发展作出了重要贡献。

陈教授是美国结构稳定研究执行委员会委员, 1997年当选为美国土木工程学会(American Society of Civil Engineers)荣誉会员。他是6种杂志的编委, 也是海洋工程结构委员会、高层钢结构委员会的顾问, 中国大学发展研究会的顾问, 他还是20多部著作和500篇科技论文的作者或合作者。

陈教授获得了很多荣誉和奖励, 其中包括美国土木工程学会Shortridge Hardesty奖, Raymond C. Reese研究奖金和美国钢结构学会T.R.Higgins奖。1995年他当选为美国工程院院士, 1997年当选为ASCE荣誉会员, 1998年当选为台湾科学院院士。

内 容 简 介

《土木工程材料的本构方程》分一、二两卷,第一卷为弹性与建模,第二卷为塑性与建模.本书是一本发展弹塑性基础理论、深入探讨土木工程材料本构方程的理论专著,也是一本把弹塑性理论、有限元计算方法与近代计算机科学结合的著作,还是一本将弹塑性理论与工程实际应用相结合的好书.

第二卷共分四篇:第一篇介绍塑性的基本概念和塑性理论;第二篇讲述金属的塑性理论及应用;第三篇论述混凝土的塑性及应用;第四篇讲述土体塑性及应用,并列举了许多工程应用的实例.近年来,塑性理论及其在混凝土和土力学中的应用方面有了许多新的进展,本书将这些内容写进了第二卷(塑性和建模)的有关章节中.这是首次向教师、研究生、工程师和研究人員介绍建立土木工程材料本构方程的系统知识,以便他们能够跟踪这个领域的最新进展.

本书对力学工作者、土木工程师和研究人員将给予有益的帮助,同时可作为有关专业的研究生的教材.

译者前言

1996年,我赴美访问和讲学,在普渡大学受到了陈惠发教授的热情接待.我的两本著作《损伤理论及其应用》和《张量分析及演算》受到了陈教授的关注,从中发现陈教授和我在学术上的共同兴趣之一是研究材料的本构关系,因而奠定了我们就此书的合作基础.陈教授慷慨、无偿地转让了版权,并促进了 Elsevier 出版社与华中科技大学出版社就此书翻译出版的全面合作.在此,我们向陈教授致以衷心的感谢.

这套书共分两卷,即第一卷《弹性与建模》和第二卷《塑性与建模》.第一卷的第一版 1982 年由纽约 Wiley 科学交流出版社出版,5 年就销售完了.第二卷的编写工作作者经历了 12 年的时间.在此同时,作者还对第一卷的全部内容又进行了审查,并在许多地方作了改进,这些改进基于作者过去 12 年里在普渡大学等地讲课积累的经验,也包含了许多同行和学生提出的建议.

本书第一版的第一卷《弹性与建模》出版后,塑性理论及其在混凝土和土力学中的应用方面有了许多新的进展,作者已将这些内容写进了第二卷《塑性与建模》的有关章节中.本书是首次向教师、研究生、工程师和研究人員介绍建立土木工程材料本构方程的系统知识,以便他们能够跟踪这个领域的最新进展.两卷书于 1994 年出版,在阿姆斯特丹、伦敦、纽约、东京同时发行.美国好几所大学和世界一些发达国家的大学,以及中国清华大学等有关专业都在用此书作为研究生和大学高年级学生的教材,同时还在研究部门和工程技术部门广泛流传.此书的中译本出版表达了作者和译者为促进中国土木工程发展和为中国读者服务的共同心愿.

关于本书的翻译、编辑和出版工作,有两点需要说明:(1)原著采用的单位大部分是英制单位,如果按法定计量单位要求,书中许多计算结果和图表都要重算和更改图的坐标和形状,这样不仅麻烦而且容易出错.因此保留了原著所用的单位;(2)本书采用了原著中矢量、张量和矩阵及其运算的表示方法,其原因还是为了保持原著的准确性,因此书中矢量、张量、矩阵等均未排黑斜体,而保留了 $()$ 、 $[\]$ 、 $\{ \}$,特此说明.

本书的翻译出版过程中,我和陈教授保持着密切联系,及时讨论了原著中的少数勘误问题,并作了更正.陈教授为出版这部中文版译本,提供了经

费资助,在此再一次向陈教授致以敬意和感谢。

本书的翻译和出版工作历时3年。第一卷由华中科技大学刘再华教授校译,第二卷由清华大学土木工程系主讲教授、上海交通大学责任教授刘西拉博士和华南理工大学教授韩大建博士校译。感谢他们对此书的出版给予的热情关注和支持。全书由我审阅和统稿。熊健民教授审阅了部分译稿。王勋文博士翻译了全书的大部分章节,付出了辛勤劳动,研究生程敏、褚利波、谢峻、陈勇、陈月顺、李厚祥、刘智敏、李厚民、王恒武、蒋俊玲和周军文以及青年教师苏骏和毛云等协助我做了部分的翻译、校对和打印工作。特别是刘再华教授自始至终热情地支持我们的翻译工作,他们都为此书付出了艰辛劳动,在此表示诚挚的谢意。译者对所有为此书的录入、编辑和绘图等作了贡献的朋友们一并致以谢意。

华中科技大学出版社的同仁们为之付出了辛勤的劳动,是这部著作顺利出版的重要因素,感谢他们的密切合作和大力支持。

译者水平有限,书中如有不妥之处,恳请广大读者和同行专家指正。

余天庆

2000年12月于武昌

中译本序

我的《Constitutive Equations for Engineering Materials》第一、第二两卷书出版后,受到了美国和世界各国学者和读者的关注,尤其是中国的教授和研究生.为此我高兴地为本书的中译本作序.

中国实行改革开放政策 20 年以来,工程与技术得到了高速发展.21 世纪将把我们带入一个知识与信息为基础的新时代.土木工程在发展国家基础建设中起到了重要作用,基础建设的发展提高了全中国人民的生活质量.同时,土木工程还促进了全世界科学技术的进步.

我深信未来的土木工程的研究和教育的方向是“**土木工程基础结构的综合寿命模拟**”,其中包括设计、建造、保养、退化、修复和破坏.主要的挑战是力学、材料与计算机的综合应用和证明这些结论是可靠的.工程材料的本构方程在“模拟”中起着核心的重要作用.我过去 35 年多的许多研究工作就包含着力学、材料与计算机的综合应用.本书的中译本出版,将会训练许多中国的科学工作者成为高水平的研究人员和实践者,他们将在更复杂的科学模拟领域中起着领先作用,使目前的技术状态提高到先进水平,并在土木工程中得到有效的应用.

余天庆教授从 1983 年起就在法国居里夫妇大学从事工程材料本构关系和损伤理论的研究工作,他的著作《损伤理论及其应用》和《张量分析及演算》,体现了他的数学与力学方面的学术造诣.余教授来美国访问和讲学,融合了我们学术上的共同兴趣.在余教授的主译和主持下,及时将这本力学与材料相结合的书译成中文出版的重要性不可低估.就土木工程界而言,建模和模拟对于设计、建造和评估现有材料和新材料的有效性是一种经济而有效的途径.土木工程材料本构方程这本书的翻译,对中国读者来说,她将帮助大学教师和学生创新专业知识,为在 21 世纪发展土木工程基础结构的综合寿命模拟方面给予基础训练.

余教授根据这两卷书的内容,建议中文版书名为《土木工程材料的本构方程》,我认为中译本的书名充分表达了全书的内容和特征,也说明了译者对此书的深刻理解和他们的学术造诣.感谢余天庆教授和他的合作者为我和中国读者之间架起了一座学术交流和友谊的桥梁,感谢我以前的学生刘

西拉教授和韩大建教授校译第二卷所给予译者的支持和帮助,赞赏华中科技大学出版社为出版此书的优质、高效合作精神,并致谢意.

陈惠发

1999年4月于

普渡大学

美国 印地安那州

西拉菲耶特市

第二版前言

这两卷书中,第一卷的第一版于1982年由纽约 Wiley 科学交流出版社出版,5年就售完了.第二卷的编写经历了12年时间.在此同时,作者又对第一卷的全部内容进行了审查,并在多处作了小的修改,如改正错误、提高一些图形的质量以及在前三章的后面增加了新的习题.这些改进是由于我们过去12年里在普渡大学和别的地方讲课积累了经验,也归功于许多学生和读者提出有益的建议和更正.

自从第一卷《弹性与建模》编写之后,塑性理论及其在混凝土和土力学问题中的应用方面有了许多新的进展,这些内容现在都反映在第二卷《塑性与建模》的后面四章中.现在首次同时出版这两卷书的时机已到来,借此机会通过这两卷书向工程师和研究工作者介绍有关内容和背景材料的基本知识,以便他们能够跟踪这个领域的最新进展.第一卷新版的编排与第一版相同,第二版形式和编排接近第一版.

陈惠发

1993年7月

美国 印地安那州

西拉菲耶特市

前 言

本书是《土木工程材料的本构方程》两卷书中的第二卷. 第一卷阐述了建立在弹性原理基础上的金属、混凝土和土体的应力-应变模型等内容, 同时, 对这些模型如何应用于工程实际的情况进行了说明. 本卷则把基于弹性的应力-应变模型扩展到塑性范围, 并构成了工程应用所需的基于塑性的模型. 同第一卷的叙述方法一样, 先讲述用于土木工程必要的塑性理论知识; 然后再讲用于金属、混凝土和土体的本构模型; 同时还对用计算机进行数值求解时必要的方法进行了说明; 并且给出了结构和岩土工程应用中大量有代表性问题的有限元解.

对于那些在土木工程领域还不够专业化的土木工程师来说, 他们亟须懂得这些数学模型, 并应用这些模型解决工程实际问题, 以适应高速发展的土木工程用计算机求解的需要. 这两卷书就是希望能满足这方面的需要. 本书既可作为并且已经用作为学生的教材, 也可作为自学者的参考书和从业者的工具书和研究人员的参考书.

本卷的编写方法和第一卷一样, 首先介绍有关塑性的基本理论, 然后用这些基本理论所建立的模型模拟工程材料的力学性能. 为此, 本卷分为四个部分: 第一部分讲塑性的基本概念; 第二部分讲金属的塑性及其应用, 其中包括对塑性的经典理论及其在金属结构中的应用进行了全面的、综合的论述. 我们假定读者学习了第一卷弹性的基本概念中描述的基本应力分析概念, 则第一、二部分将适用于每周 3 学时的一个学期的课程. 第一部分和第二部分中的前五章是向第三、四部分更复杂问题的一个过渡, 第三、四部分主要研究混凝土和土工材料.

第三部分主要是讲混凝土的塑性, 第四部分讲土的塑性, 目前对这些课题的研究成果较多, 我们给出了较完整的理论和应用结果, 读者在进行推理及应用上不会有什么困难, 只是在极少的情况下, 一些最后结果的给出没有完整的推导, 但是, 我们通常都给出必要的参考书目和能找到这些推导的论文. 因此, 用于第三、四部分的时间非常灵活, 取决于读者考虑各种问题的背景和兴趣. 在第六章至第九章中, 我们还介绍了另外一些课题的研究情况和参考资料, 这些课题的详细论述有的省略了, 有的只作了极简要介绍.

如同前面第一卷提到的一样, 本书中给出的许多内容引用的资料相当新颖, 因此, 在该领域的标准参考书目中找不到. 实际上, 普渡大学在过去的 12 年进行的工程材料本构方程的研究工作为本书提供了很好的背景, 本书

大量引用了在该项目研究计划的各个阶段研究的技术报告和博士论文. 资助这项工作的有: 国家科学基金会、Exxon 产品研究公司、普渡研究基金会、联邦公路管理局及核防护研究部门.

在本书的撰写过程中, 大量引用了我以前学生的博士学位论文的许多内容. 他们是: 混凝土塑性领域的研究者 S. S. Hsieh(1981), D. J. Han(韩大建)(1984), Y. Ohtani(1987), E. Yamaguchi(1987) 和 M. Aboussalah(1989) 及土的塑性领域的研究者 A. F. Saleeb(1981), E. Mizuno(1981), C. J. Chang(1981), M. F. Chang(1981), W. O. McCarron(1985) 和 T. K. Huang(1990). 他们对本书的贡献功不可抹!

陈惠发

1993 年 7 月

印地安那州

西拉菲耶特市

符 号 表

下表给出的是本书用到的主要符号。所有的符号在第一次出现时都给出了定义。具有多种意义的符号,在使用时我们将会给出明确的定义,并根据上下文通常能看出其正确的意义,以免混淆。

应力和应变

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
σ_{ij}	应力张量
s_{ij}	应力偏张量
σ	正应力
τ	剪应力
$\sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} I_1$	八面正应力
$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2}$	八面剪应力
$\sigma_m = \sigma_{\text{oct}}$	平均正应力(静水应力)
$\tau_m = \sqrt{\frac{2}{5} J_2}$	平均剪应力
s_1, s_2, s_3	主应力偏量
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	主应变
ϵ_{ij}	应变张量
e_{ij}	应变偏张量
ϵ	正应变
γ	工程剪应变
$\epsilon_v = I'_1$	体积应变
$\epsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3} I'_1$	八面正应变
$\gamma_{\text{oct}} = 2 \sqrt{\frac{2}{3} J'_2}$	八面工程剪应变
e_1, e_2, e_3	主应变偏量

不变量

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

应力张量的第一不变量

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \\ = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

应力偏张量的第二不变量

$$J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{jk} s_{ki}$$

应力偏张量的第三不变量

$$\cos 3\theta = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{3}}{J_2^{3/2}} J_3$$

式中的 θ 是图 5.13 中类似定义的角度

$$I'_1 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_v$$

应变张量的第一不变量

$$\rho = \sqrt{2J_2}$$

图 5.12 中定义的偏长度

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1$$

图 5.12 中定义的静水长度

$$J'_2 = \frac{1}{2} e_{ij} e_{ij}$$

$$= \frac{1}{6} [(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2] + \epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2$$

应变偏张量的第二不变量

材料参数

$$f'_c$$

单轴压缩圆柱体的强度 ($f'_c > 0$)

$$f'_t$$

单轴拉伸强度

$$f'_{bc}$$

等双轴压缩强度 ($f'_{bc} > 0$)

$$E$$

杨氏模量

$$\nu$$

泊松比

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

体积模量

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

剪切模量

$$c, \phi$$

Mohr-Coulomb 准则中的内聚力和摩擦角

$$\alpha, \kappa$$

Drucker-Prager 准则中的系数

$$\kappa$$

纯剪切中的屈服(破坏)应力

其他

$\{ \}$

矢量

$[\]$

矩阵

C_{ijkl}

材料刚度张量

D_{ijkl}

材料柔度张量

$f(\)$

破坏准则或屈服函数

x, y, z 或 x_1, x_2, x_3

笛卡尔坐标

δ_{ij}

克朗内克(Kronecker) 符号

$W(\epsilon_{ij})$

应变能量密度

$\Omega(\sigma_{ij})$

余能密度

$l_{ij} = \cos(x'_i, x_j)$

x'_i 和 x_j 轴之间夹角的余弦(见 1.11 节)

ϵ_{ijk}

1.10 节中定义的置换张量

引 言

从一般的形式来讲,一个固体力学问题在每一时刻的求解必须满足:

- (1)平衡或运动方程;
- (2)几何条件或应变和位移的协调;
- (3)材料的本构方程或应力-应变关系.

当考虑平衡(或运动)时,我们可以将一个物体内部的应力与体力和作用在物体表面的外力联系起来.对于一个无限小的单元体,有3个与应力张量的6个分量相关的平衡方程.在线性问题中,这些方程不含应变和位移;在非线性问题中,它们通常含有应变和位移.在动力问题中,平衡方程被运动方程所代替,并含有位移对时间的二阶导数.这些就是第一组方程.

当考虑几何条件或运动学时,我们可以将物体内部的应变与物体的位移联系起来.有6个根据3个位移表示应变张量的6个分量的运动方程;它们是众所周知的应变-位移关系式.这些就是第二组方程.

显然,平衡方程和运动方程与组成物体的特定材料无关.这些材料的影响由第三组方程——本构方程来表示.它们描述了应力-应变关系.在最简单的情况下,它们是用应力分量表示应变分量的6个等式,反之亦然.如果它们是线性的,那就是众所周知的虎克定律.

6个应力分量、6个应变分量和3个位移分量由3个平衡方程、6个运动方程和6个本构方程联系起来.物体内部这15个应力、应变和位移未知量由表示自然规律的15个方程决定.

很久以来,由于虎克定律简单,变形固体力学一直依赖线弹性虎克定律来描述材料的性质.大家知道,绝大多数工程材料,如金属、混凝土、木材、土和岩石,对于实际加载的全过程都不是线弹性的.事实上,这些材料的实际行为是相当复杂的,当加载的条件不同时表现出各种不同的性能.所以为了将简单的数学模型应用于实践,更进一步的理想化是有必要的.

没有一个数学模型能够在所有情况下完全地描述真实材料复杂的行为.每一种材料模型只是针对某种现象,抓住它们必要的性质而忽略实际应用中认为不重要的东西.所以当被忽略的影响因素变得重要时,这种本构模型存在着应用的局限性.例如,虎克定律在结构和岩土工程中成功地描述了结构或地基在短期加载条件下的一般性质,但却不能描述在接近极限强度条件下结构或土与结构相互作用的性质和强度,这是因为在这种荷载水平下,塑性变形影响占主导地位,而弹性变形的重要性很小.

第一卷 弹性与建模

对于某些材料,它们的行为被理想化为与时间无关,即时间效应可以忽略.材料这种与时间无关的性质进一步被理想化为弹性性质和塑性性质.对于弹性材料,存在应力和应变一一对应的关系.所以含有这种材料的物体,当所有应力减小为零时,将恢复其原来的形状.这种可恢复性不适合于塑性材料.土木工程材料以弹性为基础的本构模型是这本书第一卷的主题.本书的第二卷将建立以塑性为基础的本构模型.

从更严格的意义上讲,弹性材料也必须满足热力学的能量方程.具有这种附加要求的弹性材料认为是超弹性.另一方面,在任何情况下,一种材料具有弹性的最低要求是存在应力增量和应变增量之间的一一对应关系.所以含有这种材料的物体,当所有应力增量减小为零时,将恢复其原来的形状.从无限小的意义上讲,对于仅仅满足这个最低要求的弹性材料,这种可恢复性质为亚弹性的应用提供了证据.近年来,这种建立在亚弹性模型基础上的增量本构关系越来越多地被结构和岩土工程师应用于金属、混凝土、木材和土等材料中,因为应力状态通常是当前应变状态以及达到该状态的应力途径的函数.

本书的第一卷提出了亚弹性、弹性、超弹性材料的本构方程,这是增量量度中弹性的标志.第一卷分为三部分,共有七章.第一部分即第一篇,第一至四章,是关于弹性的基本概念.矢量和张量分析必需的概念及指标记法首先在第一章中阐述,因为这些对于土木工程师来说不太熟悉.接下来的两章是关于应力和应变的概念,并在没有假设特殊的本构关系下阐述了平衡和运动的基本方程.弹性应力-应变的基本假设在第四章中作了合理的解释,并采用数学和物理的推理方法从它们中推导出一般的本构方程,首先是以张量的形式得出,然后是以便于工程应用的矩阵形式得出.

第二部分即第二篇,第五和六两章,专门讲述特定的公式和弹性模型在钢筋混凝土中的应用.在钢筋混凝土中有两个非弹性的来源:混凝土的开裂以及钢筋和混凝土压缩的塑性.由开裂导致的非弹性和混凝土的破坏准则在第五章中考虑,而由混凝土压缩导致的非弹性则在第六章中处理.这部分还给出了应用这些本构模型对典型的钢筋混凝土结构进行有限元分析的例子.

第三部分即第三篇,第七章,专门讲述土的弹性和破坏准则.跟第二部分一样,这里也详细阐述了特定的公式和弹性模型在土体中的应用.编写了