

# 钢筋混凝土框架抗连续倒塌 计算结构力学

龙旭 姚尧 著



科学出版社

# 钢筋混凝土框架抗连续倒塌 计算结构力学

龙旭 姚尧 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了结构工程领域最新研究进展,提出了连续倒塌情况下钢筋混凝土框架结构变形行为的分析及预测方法。在预测结构承载力和描述材料破坏机理基础上,提出相应理论模型和有限元计算方法。针对钢筋混凝土结构主导受力机制,从本质上探究钢筋混凝土结构变形性和承载性能,揭示不同尺度结构抗连续倒塌变形特征和破坏类型,阐明不同变形状态下受力机制衍化规律,推进我国现行建筑结构规范抗连续倒塌能力设计思路及分析方法的发展。

本书可以为相关工程人员提供基本的分析方法及数值仿真基础,也可作为高年级本科生和研究生的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土框架抗连续倒塌计算结构力学/龙旭,姚尧著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053244-2

I. ①钢… II. ①龙…②姚… III. ①钢筋混凝土框架-坍塌-防治-计算力学-结构力学 IV. ①TU375.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 126163 号

责任编辑:于海云/责任校对:桂伟利

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:264 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

结构工程是一个拥有悠久历史积累的应用科学,是土木工程学科重要学科分支之一。结构安全与人民生命财产安全息息相关,尽管近年来已丰富了部分设计内容并推广了更为先进的分析方法,但结构工程所涉及的本质内涵更多的需要依据实践验证和工程经验,以形成可靠而实用的设计规范和分析方法。随着全世界各类突发灾害极为频繁地发生,即便在工程实践相对发达的国家,每年由于各种突发灾害而造成的损失额也多达数十亿美元,所造成的连锁反应危害性较强。因此,结构工程的教学、研究与工程实践必须与时俱进,才能更好地保障建筑结构在复杂极端荷载下的安全性。针对防灾减灾这项常抓不懈、警钟长鸣的工程问题,本书致力于深化我国极端荷载下钢筋混凝土框架结构行为的基础研究内容,为推进我国建筑结构规范抗连续倒塌性能分析设计方法的发展提供理论依据。

必须指出的是,连续倒塌下钢筋混凝土框架结构力学行为是一个耦合了工程材料及结构变形和破坏的综合性问题,对其进行合理解决是结构工程领域亟待解决的复杂问题。目前我国这方面的研究还相对匮乏,与国际先进水平仍有较大差距,因此本书出版可为钢筋混凝土框架结构在极端突发荷载下复杂力学行为和多样破坏模式的研究提供更多的参考内容与借鉴价值。虽然与实际工程问题密切相关,但本书书写格式和论证内容均以最理性的科学研究方法的形式进行表述,兼顾本书科学内涵和应用价值,既能帮助工程实践人员解决国家重要的实际工程需求,也能面向大学结构工程学科所涉及的国际前沿学术基础问题。相比同类著作,本书更加强调数值仿真在工程领域的潜在应用,并揭示复杂工程问题中的实质内涵,这也为今后我国结构工程领域采用更多的分析手段提供了可行的理论基础。

本书主要内容源于本书第一作者在新加坡南洋理工大学攻读博士期间的研究成果,在此编辑成书是希望同国内各方面同仁分享最新结构工程领域的研究思路和方法。在作者编写本书过程中,力求内容客观准确、写作重点突出、章节思路清晰、观点明晰正确、阐释问题详尽、语言朴实流畅,在保证较为严谨的学术内容基础上,本书也尽量兼顾了较强的教育内涵和实际应用价值。最后感谢郭红村、李震、陆宇、周柏承、曹家宝、蔚雪梅和李博峰在本书编写以及校对过程中付出的宝贵时间,是你们的热情帮助和积极参与使得本书更快地出版面世。本书内容几经易稿,但受限于作者学术水平能力,书中内容难免偶有纰漏,诚恳希望广大读者批评指正。

作 者

2016年11月

# 目 录

## 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 本书概要                 | 1  |
| 1.1 问题背景                 | 1  |
| 1.2 数值模拟                 | 3  |
| 1.2.1 梁-柱构件模拟            | 3  |
| 1.2.2 二维梁-柱节点模拟          | 4  |
| 1.3 本书内容布局               | 5  |
| 第2章 文献综述                 | 7  |
| 2.1 混凝土模型                | 7  |
| 2.2 梁有限单元                | 9  |
| 2.3 基于组件的钢筋混凝土梁-柱节点力学模型  | 10 |
| 2.3.1 黏结-滑移组件            | 13 |
| 2.3.2 剪切板组件              | 16 |
| 2.3.3 界面剪切组件             | 19 |
| 2.4 超单元                  | 20 |
| 2.5 小结                   | 22 |
| 第3章 钢筋混凝土梁单元中混凝土模型       | 24 |
| 3.1 概述                   | 24 |
| 3.2 协同转动梁有限元模型           | 24 |
| 3.2.1 修正的 Kent 和 Park 模型 | 24 |
| 3.2.2 Mander 模型          | 26 |
| 3.2.3 剪切模型               | 28 |
| 3.3 统一塑性混凝土模型            | 29 |
| 3.3.1 三维实体单元的混凝土模型       | 29 |
| 3.3.2 三维纤维梁单元的统一塑性混凝土模型  | 34 |
| 3.4 小结                   | 38 |
| 第4章 三维协同转动梁单元            | 39 |
| 4.1 概述                   | 39 |
| 4.2 协同转动梁单元构型            | 39 |
| 4.3 纤维模型                 | 44 |
| 4.4 材料非线性                | 45 |
| 4.4.1 钢筋                 | 46 |
| 4.4.2 混凝土                | 48 |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 4.5   | 验证三维协同转动梁单元          | 48  |
| 4.5.1 | 受端点集中力作用的悬臂梁         | 49  |
| 4.5.2 | 两端固定的工字形截面梁          | 50  |
| 4.5.3 | 含有弹塑性材料和不同截面形状的空间框架  | 51  |
| 4.5.4 | 材料层面上对统一塑性混凝土模型的验证   | 52  |
| 4.5.5 | 受轴心或偏心荷载作用的钢筋混凝土柱    | 55  |
| 4.5.6 | 钢筋混凝土剪切梁系列试验         | 56  |
| 4.6   | 小结                   | 60  |
| 第5章   | 基于组件的钢筋混凝土梁柱二维节点     | 62  |
| 5.1   | 概述                   | 62  |
| 5.2   | 梁柱节点单元公式推导           | 62  |
| 5.3   | 节点模型中校准组件性质的理论分析模型   | 66  |
| 5.3.1 | 钢筋黏结-滑移组件            | 66  |
| 5.3.2 | 钢筋混凝土梁柱节点剪切板组件       | 88  |
| 5.3.3 | 节点-梁柱界面抗剪组件          | 108 |
| 5.4   | 梁柱节点中节点组件内力-变形状态     | 109 |
| 5.5   | 小结                   | 111 |
| 第6章   | 混凝土梁柱框架结构体系研究        | 113 |
| 6.1   | 简介                   | 113 |
| 6.2   | 梁柱组合件                | 114 |
| 6.2.1 | 梁柱角节点                | 114 |
| 6.2.2 | 梁柱外节点                | 118 |
| 6.2.3 | 梁柱内节点                | 121 |
| 6.3   | 三层框架结构及试验结果          | 127 |
| 6.4   | 系统层面数值鲁棒性研究          | 132 |
| 6.4.1 | 三层框架结构               | 132 |
| 6.4.2 | 五层框架结构               | 134 |
| 6.5   | 小结                   | 141 |
| 第7章   | 连续倒塌分析中基于超单元的高效率结构分析 | 142 |
| 7.1   | 概述                   | 142 |
| 7.2   | 超单元方法的基本概念           | 142 |
| 7.3   | 超单元变形计算              | 144 |
| 7.4   | 超单元的数值算例             | 149 |
| 7.5   | 小结                   | 160 |
| 第8章   | 结论与展望                | 161 |
| 8.1   | 概述                   | 161 |
| 8.2   | 梁柱框架结构分析中的混凝土模型      | 161 |
| 8.3   | 钢筋混凝土梁柱构件分析          | 162 |

---

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 8.4 钢筋混凝土梁柱节点组件校对·····   | 163 |
| 8.5 二维钢筋混凝土框架结构体系研究····· | 163 |
| 8.6 基于超单元的高效率分析方法·····   | 164 |
| 8.7 未来展望·····            | 165 |
| 附录 1 内力向量推导·····         | 166 |
| 附录 2 刚度矩阵推导·····         | 167 |
| 附录 3 中英文词汇对照表·····       | 168 |
| 参考文献·····                | 170 |

# 第1章 本书概要

## 1.1 问题背景

连续倒塌被定义为由结构较小部分的失效或损坏,通过内力重分布以及损伤的演化,进而导致结构更大面积乃至整体坍塌的极端破坏情况。针对连续倒塌现象, GSA (2003) 给出的具体描述如下: 主要结构构件局部失效导致相邻部分坍塌, 如多米诺骨牌似的造成了进一步坍塌。

关于连续倒塌的记录始于历史上知名的 1968 年 5 月 16 日 Ronan Point 公寓大厦倒塌事件(Wikipedia, 2012)。如图 1.1 所示, 这起倒塌事故是由公寓内部天然气爆炸破坏了其一个角柱上的承重预制混凝土板所引发的。自此, 工程以及科研领域开始关注和研究连续倒塌方面的技术细节。



图 1.1 1968 年 5 月局部坍塌后的 Ronan Point 公寓大厦(Wikipedia, 2012)

另一起导致严重后果而广泛被研究人员关注的连续倒塌悲剧, 发生于 1995 年 4 月 19 日俄克拉荷马的 Alfred P. Murrah 联邦办公大楼。这是由炸弹爆炸所导致的典型连续倒塌事件(Lew, 2002)。4000 磅 TNT 炸弹在距离大楼 15.6 英尺( $1 \text{ 英尺}=3.048 \times 10^{-1} \text{ m}$ )的卡车上爆炸, 摧毁了 G16、G20 和 G24 这三个支撑柱(图 1.2), 致使 G16 和 G24 周围传力构件的完整性遭到灾难性破坏, 进而导致了 Alfred P. Murrah 联邦办公大楼严重毁

坏，7 秒的倒塌过程造成包括大楼内幼儿园多名儿童在内的 168 人遇难。

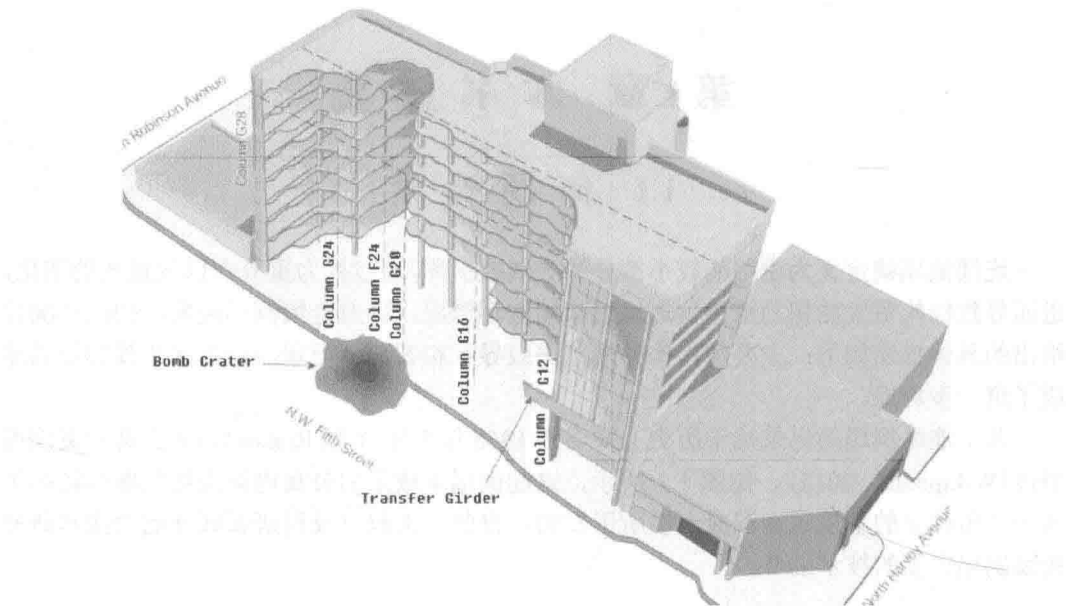


图 1.2 1995 年爆炸案后局部坍塌的 Alfred P. Murrah 联邦办公大楼 (Lew, 2002)

近年来恐怖袭击事件频发，最著名的连续倒塌事件莫过于 9·11 事件，即 2001 年 9 月 11 日两架波音 767 客机高速撞击世贸大厦(WTC)双子塔 1 号和 2 号楼致使它们整体倒塌，如图 1.3 所示 (Thierry, 2002)。飞机撞击不仅造成了建筑物结构的初始局部破坏，还在撞击点附近引燃了大火，这使得撞击点附近的结构丧失承重能力，从而导致双子塔上部坍塌造成的影响进一步向下延伸，最终结构整体坍塌至地面。



图 1.3 世贸大厦双子塔 1 号楼北侧撞击局部 (Thierry, 2002)

这三次灾难性连续倒塌事件具有相似成因：意外极端荷载破坏了建筑物关键传力或者承载力构件，导致建筑物整体承重能力渐进式地显著下降，最终破坏范围远大于初始破坏尺度。但事实上，直到 9·11 事件后，连续倒塌才受到了工程学术界的广泛关注。在此之前，全世界只有极少工程项目的技术评估报告涉及建筑物抗连续倒塌能力。

近来，GSA (2003) 和 DoD (2009) 制定了更为详尽的抗连续倒塌建筑结构设计分析方法。与此同时，GSA (2003) 和 DoD (2009) 建议按照一定的流程，按照问题复杂程度，依次可选用线性静态分析、静态分析和非线性动态分析来分析钢筋混凝土结构连续倒塌的可能性。值得注意的是，当重要垂直承力构件（以一根柱子为例）从大型建筑中移除时，他们建议使用非线性分析计算程序。

在计算分析中被广泛应用的瞬间去柱法，是由实际工程情况中因为意外极端荷载致使承重柱完全失效的现象而简化得到的折中方案。为了模拟上述情景，一般建议采用拆除构件法，此方法具有操作分析简便、面向问题直接和独立于意外荷载具体形式三大优势。作为一种用于模拟连续倒塌初期阶段的基本方案，瞬间去柱法被广泛应用于连续倒塌方面的数值模拟和试验研究。对于梁-柱框架结构，瞬间去柱法被认为是评估连续倒塌潜在可能性的直接设计方法。尽管如此，每次只移除一根承重柱，存在移除的不是在现实生活中最关键承力柱的可能性，因此需要不断试算各种移柱可能性，这也是瞬间去柱法的烦琐之处。因此，实践工程师迫切需要一种能够用于钢筋混凝土框架结构非线性分析的准确、稳定和高效的有限元分析工具。

除此之外，用于工程分析的有限元程序有必要考虑到尽可能切合实际情况的结构行为，利用已发表的试验研究对计算程序进行广泛验证，以确保程序的准确性和可靠性。因为大规模结构的数值模拟需要很长时间，很可能会阻碍实际工程中设计进度并增大机构运营的人工成本，所以有限元软件的计算效率同样值得关注。

## 1.2 数值模拟

由数值模拟可知，具有足够延展性的关键结构构件，在所受荷载逐渐增大至彻底失效之前，经历了小变形、材料失效和大变形三个主要阶段。这意味着，结构构件的变形过程受材料非线性、几何非线性以及两者耦合作用的影响。此外，在常规分析中，框架结构节点通常被认为是刚性节点，而实际情况中所有结构部位都具备一定的变形能力。因此，以梁-柱节点作为一个独立构件是模拟梁-柱框架刚度和强度必不可少的一部分。事实上，对节点实际力学行为的恰当模拟可以显著提高框架分析的准确性。

### 1.2.1 梁-柱构件模拟

对于正在经历连续倒塌的钢筋混凝土框架结构的模拟试验，几何非线性意味着梁柱结构构件的大位移和大转动，而材料非线性意味着混凝土材料的开裂、压碎和钢筋的屈服、断裂。因此，为了开展钢筋混凝土框架结构在连续倒塌下的结构行为的研究，一般使用具有大变形、大转动分析能力的高效率梁-柱单元用于模拟框架结构的梁-柱构件。常用的梁-柱单元的构型可以分为三种类型，即完全拉格朗日列式 (Bathe 和 Bolourchi,

1979; Schulz 和 Filippou, 2001; Nanakorn 和 Vu, 2006)、修正拉格朗日列式(Bathe 和 Bolourchi, 1979; Cardona 和 Geradin, 1988; Teh 和 Clarke, 1999)和协同转动列式(Hsiao 等, 1987; Crisfield, 1990; Felippa 和 Haugen, 2005; Li, 2007; Battini, 2008)。在材料非线性研究方面,有几种涉及数值模拟和试验方面的论文文献,以及 Hinton 和 Owen 于 1984 年出版的一本关于钢非线性行为的综述性书籍。对于混凝土材料,现有多种不同类型的混凝土模型用于强调钢筋混凝土梁-柱构件的不同失效模式,如弯曲失效和剪切失效。为了准确获得梁截面上应力和应变分布,纤维模型是一种不错的处理方法,具有较高的计算效率且便于建模和后处理分析。最后,应该指出的是,在材料层面上,钢筋和混凝土的本构关系需要合理构建,以便植入于梁-柱单元构型。

已有研究中,有大量可用的先进计算方法来模拟钢筋混凝土框架结构变形及破坏行为。不同混凝土模型和梁-柱单元需要在多方面进行详细对比和精心挑选,以准确预测连续倒塌下钢筋混凝土框架结构非线性行为。这也是本书撰写初衷和目标。

### 1.2.2 二维梁-柱节点模拟

为了更好地数值分析钢筋混凝土梁-柱框架节点力学行为,基于组件的节点模型是一种确定节点强度和刚度的标准方法,能够考虑到节点所承受的弯曲力矩、剪切力和拉/压轴向力。即按照一定规则可以人为地将整个梁-柱节点分离成节点的几个组件,以便对梁-柱节点中可能存在的各种失效模式和荷载抵抗机制进行独立研究。黏结-滑移失效、剪切板失效和梁柱-节点交接界面剪切失效已被广泛认同是主导二维钢筋混凝土梁-柱框架节点的主要失效模式(Alath 和 Kunnath, 1995; Youssef 和 Ghobarah, 2001; Lowes 和 Altoontash, 2003; Altoontash, 2004; Bao 等, 2008)。黏结-滑移组件主要用于模拟在节点区域内嵌的纵筋锚固失效所导致节点刚度和强度失效,剪切板组件用于模拟节点区域剪切失效所造成的强度和刚度失效,界面剪切组件主要用于模拟在梁柱-节点交接界面剪切传递失效所造成的节点界面剪切失效。

为了准确校准节点模型中三种类型的组件,有必要使用适当的分析方法进行以理论分析为基础的预测。但此类理论分析模型必须通过相关试验结果的验证,或者采用基于一系列全面试验研究的经验模型。对于黏结-滑移组件和剪切板组件已经有了广泛而深入的研究。然而,由于钢筋混凝土梁-柱节点在典型尺寸、材料性能及钢筋布置方面有着自己的特点,仅有少数的研究适用于钢筋混凝土梁-柱节点。对于黏结-滑移组件,之前发表的黏结应力-滑移关系都是由钢筋从混凝土基体中沿单一轴向拔出试验测试得出,但需要修改和改进才能用于梁-柱节点中钢筋滑移梁-柱的预测分析。此外,尽作者所知,目前为止已发表的钢筋混凝土梁-柱节点剪切板组件的理论分析模型,没有可以完整预测梁-柱节点区域纯剪切失效全过程,也没有考虑到节点中所有重要的结构参数。因此,连续倒塌极端情况下钢筋混凝土梁-柱节点的结构力学行为仍有待进一步的深入研究。

### 1.3 本书内容布局

根据数值模拟连续倒塌下的钢筋混凝土框架结构的变形性能和失效模式的计算需求,本书所涉及的主要内容和布局如下。

在第2章中,将对以前发表的有关混凝土模型、梁有限元单元及构型、基于组件的力学节点模型和提升计算效率的超单元的文献进行综述。结合钢筋混凝土框架结构的结构行为预测,本书将对既有研究内容的可改进之处进行讨论。本书将在余下章节中围绕以往研究有待改进的技术内容进行讨论并以其为基础开展后续研究工作。

在第3章中,本书将研究适合用于梁单元的混凝土模型。除了可以有效预测弯曲破坏的单轴混凝土模型,本书还对基于塑性理论的混凝土模型进行详细比照和综述,进而提出简洁方便的基于塑性损伤理论的混凝土模型用于预测梁-柱混凝土构件中的混凝土剪切失效。

在第4章中,本书详细推导三维三节点协同转动梁单元构型,并对其进行修正以满足几何非线性的要求。在此单元构型基础上,本书推导并完成了适用于梁-柱截面分布的纤维模型以及基于弹塑性理论的非线性材料模型,准确地预测梁-柱截面上应力-应变状态和梁-柱损失失效的发展过程。此外,本书将在预测精度和计算效率方面对广泛应用的两种不同梁构型,即完全拉格朗日列式和协同转动列式进行比较,明确其各自的优劣之处,并在实际应用中加以注意。

针对钢筋混凝土节点模拟中影响数值稳定性和计算精度性的最关键因素,本书第5章分别提出钢筋滑移组件和剪切板组件的理论分析模型。相应地,本书对所提出的理论分析模型在各自的组件层面上,通过与在文献中发表的试验结果进行比较来加以验证。此外,本书针对界面剪切组件提出了一个基于经验公式的经验模型。以上三个组件的理论分析模型均被囊括到本书后面所提出的梁-柱二维节点模型中。最后,由于变形和破坏发生后整体结构上荷载会发生重分布,本书为了考虑节点区域所受内力的增大和减小而提出节点内力加卸载方法,详细描述论述每个组件的不同抗力-变形状态和定义方法,并将其纳入数值算法。

在第6章中,将前面所提出的混凝土模型、协同转动梁单元构型、基于组件的节点力学模型集成为一个完整的计算模型系统,并开展整体计算模型层面上钢筋混凝土梁柱框架结构的研究。算例中所涉及的梁-柱组合件类型包括三种主要类型的二维节点,即顶层外节点(L型)、中间层外节点(K型)和中间层内节点(X型)。此外,本章还包括两个整体结构分析算例,即考虑不同瞬间去柱方案的两层框架结构和五层框架结构。本章的主要目的是验证本书前面章节所提出的各个分析部分所集成的计算分析系统的预测精度、计算效率及其数值稳定性。同时,本章也介绍所提出的连续倒塌下钢筋混凝土框架结构计算模拟方法的优点,并讨论所提出分析方法的适用条件或假设条件。

在第7章中,在保证没有任何损失精度前提下,为了进一步提高计算效率,提出一种新的超单元计算方法,通过一系列纯钢框架以及钢筋混凝土框架的算例对比,验证所

提出的超单元构型的优势所在。除了在预测精度上的比较,本章也对比了使用以及不使用超单元的数值模型所需要的 CPU 计算时间,证实了所提出的超单元算法确实可以大幅度提升计算效率,尤其适用于连续倒塌中仅局部非线性分析的情况。

最后,第 8 章总结本书中所有具有借鉴意义的结论,提出几个具有研究前景的研究方向并予以简要讨论。

总之,本书所论述工作的独特之处是提出一种集成的、稳定的数值计算方法,可以准确、可靠、高效地分析不同连续倒塌情况下钢筋混凝土框架结构力学性能,并作为钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌的实际工程分析工具。

## 第2章 文献综述

本章综述文献中以往和钢筋混凝土框架结构相关的研究工作，如混凝土模型、梁有限单元构型、钢筋混凝土框架结构节点模型等。2.1 节着重论述现有描述混凝土非线性行为的理论模型。2.2 节综述现有主要类型的梁单元构型，对其模拟大位移和大旋转所引起几何非线性特征的能力进行比较。2.3 节强调基于组件的节点力学模型的构建方法并对其各组件属性进行校准研究。2.4 节讨论能够显著提高三维多层框架结构计算分析效率的超单元方法。同时，基于在以往的研究中发现的不足，本章最后着重论述本书撰写的出发点和所囊括工作的原创性，并将本书涉及内容作以简要介绍。

### 2.1 混凝土模型

如果在数值分析中用于描述混凝土的抗压强度和拉伸性能塑性断裂模型足够准确，那么从理论上来说，使用三维实体单元的数值模拟能够准确预测钢筋混凝土梁-柱构件的变形和破坏行为。在现实生活中，任何材料的应力-应变状态均是三维的。然而，为了数值模拟的简化和高效，已有研究中提出了各种简化单元用以处理各类几何构型中特定的应力或应变状态计算。例如，当所研究对象的一个特征尺寸（一般称为长度）比另外两个特征尺寸（截面的宽度和深度）大得多时，这样一个研究对象就可以在数学上进行简化并用梁单元来近似地进行数值分析。相似地，当所研究对象的一个特征尺寸（一般称为厚度）比横向和纵向的特征尺寸小得多时，这样一个研究对象就可以在数学上进行简化处理并用板壳单元来近似分析。因此，理想化的单元中的应力和应变状态也会被相应地进行基于数学假设下的简化处理。例如，如图 2.1 所示，梁单元中的应力状态由三个分量来进行描述，即一个沿梁轴线的正应力与分别沿着截面强轴和弱轴方向的两个正交剪应力。

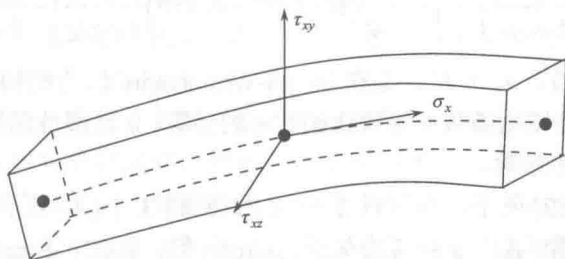


图 2.1 梁单元中的三个应力分量

在实际应用中，为了模拟钢筋混凝土梁-柱构件的变形行为，三维纤维梁单元构型是最佳选择，具有较令人满意的精度和可接受的计算成本(de Felice, 2009; Shi 等, 2012)。纤维积分方法被广泛应用于梁横截面层面，以便模拟更为准确的应力和应变细节。在每

根纤维的横截面上,定义了一个沿纤维纵向轴的正应力分量和两个正交的沿强弱轴的剪切应力分量。简单来说,正应力和剪切应力与相应应变之间的本构关系通常被简化为相互独立的。现有文献中,应用最广泛且经过试验验证的混凝土本构模型中,大多为单轴压缩条件下的本构关系,如 Modified Kent and Park 模型(Park 等, 1982)、Mander 模型(Chang 和 Mander, 1994; Waugh, 2009)和其他近来发表的一些模型(Binici, 2005; Samani 和 Attard, 2012)。这种类型的一维混凝土模型通常被称为单轴混凝土模型(uniaxial concrete models)。关于梁单元中剪切应力的文献相对较少,因此混凝土剪切行为在数值模拟中一般近似为弹性关系,或是遵循于从试验研究获得的经验性剪切模型(Patwardhan, 2005)。值得注意的是,被广泛用于钢筋混凝土结构学术研究的有限元软件中,混凝土模型一般也仅考虑了混凝土单轴拉伸行为,并将此类单轴模型用于纤维梁单元的计算,如由东京大学开发的混凝土非线性有限元软件(Engineer's Studio User's Help 1.00.01, 2009)和由加州大学伯克利分校开发的有限元软件 OpenSees (Mazzoni 等, 2009)。

需要注意的是,对于基于单轴混凝土模型的梁单元,即使所有的应力分量均被考虑于破坏标准,但正应力分量和剪切应力分量之间的相互作用常常被忽略。因此,这样的构型更适用于高剪跨比下梁弯曲行为的预测。在本章中,为了强调可能的剪切破坏区,剪跨比的概念被定义为横向集中荷载到相邻边界的距离与梁横截面的深度之比。然而,对于较小到中等剪跨度比的钢筋混凝土梁,其剪切行为将会显著影响变形过程和破坏模式(Park 和 Paulay, 1975; Imam 等, 1997; Xia 等, 2011)。因此,本章提出一个基于塑性理论的混凝土模型,同时更新计算正应力分量和剪应力分量,更加适用于预测剪切行为占主导地位的梁单元结构的变形行为和破坏模式。

文献中已有一些被发表的以塑性理论为基础的混凝土模型,如 Grassl 等(2002)和 Papanikolaou 与 Kappos(2007)所提出的混凝土本构关系。一般来说,他们的塑性势函数被定义为如下形式:

$$g = -A \left( \frac{\rho}{\sqrt{q}} \right)^2 - B \frac{\rho}{\sqrt{q}} + \frac{\xi}{\sqrt{q}} \quad (2.1)$$

$$g = -A \left( \frac{\rho}{k\sqrt{c}f_c} \right)^n + \left[ C + \frac{1}{2}(B-C)(1-\cos 3\theta) \frac{\rho}{k\sqrt{c}f_c} \right] + \frac{\xi}{k\sqrt{c}f_c} - a \quad (2.2)$$

式中,  $g$  是塑性势函数;  $\rho$ 、 $\theta$  和  $\xi$  是在 Haigh-Westergaard 应力空间下的坐标;  $f_c$  是混凝土单轴抗压强度;  $q$  是硬化函数  $k$  和软化函数  $c$  的函数;  $a$  是塑性函数中所定义的引力参数;  $n$  是塑性势函数的指数。

如式(2.1)和式(2.2)所示,分别有 2 个( $A$  和  $B$ )和 3 个( $A$ 、 $B$  和  $C$ )参数被用于描述塑性函数及其流动规律(其中  $g$  是应力矢量)(Grassl 等, 2002; Papanikolaou 和 Kappos, 2007),但它们并没有明确的物理意义。除此之外,这些参数必须在单轴、双轴和三轴压缩的应力状态下才能被校准,这些试验很具有挑战性而难以实施。事实上,目前没有特别可靠的测试数据可用于数值模拟分析。因此,与以往复杂混凝土模型相比,基于塑性理论的混凝土模型更具有优势,但应含有尽可能少的待校准参数,并可用相对容易实施的校准试验方法确定参数取值。为了实现这一目标, Bao 等(2012)提出了只有一个参数

需要校准的流动法则, 相比以前的流动法则, 此法则更加简明且更方便校准。

除此之外, 基于塑性理论的混凝土模型除了需要能够准确描述混凝土受压变形特性, 还需要将断裂模型纳入混凝土模型中, 以便模拟钢筋混凝土梁中混凝土受拉力学性能 (Cervenka 等, 1998)。为了避免混凝土本构关系使得梁单元构型推导更为复杂, Hinton 和 Owen (1983, 1984) 提出了最为经典的混凝土断裂模型, 可以从增加裂纹张开和关闭规则的方面开展进一步改进。

应注意的是, 所得到的塑性-断裂 (plastic-fracture) 混凝土模型可用来描述三维应力空间中混凝土压缩和拉伸行为。本书的主要目标之一是提出一种高效的梁有限元法, 能够模拟连续倒塌下钢筋混凝土框架结构的力学性能。而正如本节开始部分所讨论的, 在梁单元构型中通常只包含一个正应力分量和两个剪切应力分量, 因此一般假定仅这三个应力分量占主导地位, 其他未涉及的应力分量近似为零。但先前所提出的塑性-断裂混凝土模型 (Grassl 等, 2002; Papanikolaou 和 Kappos, 2007) 均表明混凝土材料变形行为只有在三维应力空间中才能够被准确描述。因此, 本书第3章将提出一种塑性-断裂的混凝土模型, 改进应力分量方面的缺失, 并证明在简化梁单元时被简化为零的应力分量是应考虑在混凝土模型中的。

## 2.2 梁有限单元

当框架结构遭受地震或爆炸事件等极端荷载作用时, 破坏最初会发生在一些关键的结构构件上, 如梁、柱和节点, 然后局部损伤破坏才会逐渐蔓延到结构的其他部位。在构件尺度上, 有限元分析方法能够准确预测材料的屈服特性和结构的几何非线性, 是开展连续倒塌过程模拟的重要基础。此外, 由于结构处于倒塌发生的临界状态, 有限元分析方法需要准确模拟所涉及材料的硬化属性以及结构整体的软化趋势。

在几何非线性方面, 用于模拟梁-柱结构大变形特性的高效率梁有限单元一般可分为三种类型, 即完全拉格朗日 (total Lagrangian, TL) 构型 (Bathe 和 Bolourchi, 1979; Schulz 和 Filippou, 2001; Nanakorn 和 Vu, 2006)、修正拉格朗日 (updated Lagrangian, UL) 构型 (Bathe 和 Bolourchi, 1979; Cardona 和 Geradin, 1988; Teh 和 Clarke, 1999) 以及协同转动 (co-rotational, CR) 构型 (Hsiao 等, 1987; Crisfield, 1990; Felippa 和 Haugen, 2005; Li, 2007; Battini, 2008)。

在连续倒塌背景下, 由于计算变形结构中应变和应力精度的问题, 模拟大变形和材料破坏的耦合影响作用极具挑战性。然而, 基于协同转动体系内对于单元局部变形定义的特性, 所有用来确定材料应力状态的信息均可从单元上所定义的局部系统中获得, 因此可以排除单元变形过程中的刚体位移。这是协同转动构型最具吸引力的独特优势。这使得与其他构型相比, 基于协同转动的有限单元计算应变和应力时更为准确和高效。因此, 协同转动构型被选为本书梁有限单元推导的基础。然而, 协同转动构型的优越性目前存在于理论讨论范畴 (Hsiao 等, 1987; Felippa 和 Haugen, 2005; Li, 2007), 本书将会通过与其他构型单元的比较, 如 TL 构型 (Dvorkin 等, 1988), 从数值计算精度和效率的角度确认协同转动构型的优越性。

在文献中已有许多关于协同转动构型的研究(Hsiao 等, 1987; Crisfield, 1990; Felippa 和 Haugen, 2005; Li, 2007; Battini, 2008), 即使它们在协同转动体系定义方面具有共同的特点, 但依旧不尽相同。相比其他协同转动构型, 由 Li(2007) 提出的协同转动构型有两个主要优势。在他的方法中, 定义了一组矢量旋转变量(法向量的三个正交分量)用来描述三维空间复杂旋转。通过选择合适的矢量旋转变量, 在增量求解过程中所有变量被视为矢量, 且满足常规加法交换律的计算法则, 即具有可加性。因此, 这种协同转动构型在局部和全局坐标系中均可获得对称的刚度矩阵。此外, 与使用绕坐标轴的绝对旋转用来定义旋转自由度的传统方法相比, 这种协同转动构型在增量荷载的同时可以很容易地更新矢量旋转变量。因此, 相比其他协同转动构型, 由 Li(2007) 所提出的协同转动构型的整体思路更为便利而具备优势。

然而, 这种协同转动构型最初被提出和推导用于线性弹性材料, 这不适合连续倒塌中材料屈服并接近失效的几何大变形模拟。对于材料非线性, 在数值和试验方面存有大量著作。Hinton 和 Owen(1984) 全面综述了材料非线性的相关理论基础和数值方法。但目前还没有可以直接应用于由 Li(2007) 提出的协同转动框架的材料非线性理论公式。因此, 如果 Li(2007) 所提出的协同转动构型被用来预测钢筋混凝土梁-柱构件的几何非线性, 必须在此协同转动构型的框架内, 重新推导在纤维尺度上钢和混凝土材料的非线性特征。本书第 4 章将对这项工作更为详细的论述。

为了更加精确地模拟结构的几何大变形和材料非线性, 钢结构和钢筋混凝土结构的几何非线性和材料非线性的耦合效应被纳入所提出的三维协同转动梁有限单元。这是研究极限状态下结构构件力学行为的重要前提。因此, 基于协同转动体系对材料非线性的推导拓展, 应通过包括独立钢筋混凝土构件和钢筋混凝土梁-柱组合件的实例进行试验验证。

除了有限单元列式的推导和多种材料的非线性特性, 当处理大型结构有限元分析时, 梁有限单元计算效率也至关重要。从理论上讲, 相比完全拉格朗日构型和修正拉格朗日构型, 协同转动构型具有将变形分解为刚体运动和纯变形的固有优势。此外, 纯变形和相应的应变在局部坐标系中被假设为很小, 可以进行高效率的迭代计算。但应该指出的是, 尽管协同转动梁构型一直被声称计算效率很高, 且 Li(2007) 提出了具备特定优势的协同转动梁构型, 但目前还没有通过直接比较协同转动构型与其他构型在计算效率方面优劣的研究。为了确保绝对公平, 计算效率必须基于同一材料模型和求解技术, 而这需要大量的工作基础。例如, 本书将由 Dvorkin 等(1988) 所提出的梁单元作为典型的完全拉格朗日构型, 在计算精度和效率方面与协同转动构型进行比较和验证。本书的主要目的是建立一种可以合理模拟钢筋混凝土框架结构在连续倒塌中非线性力学行为的分析方法, 因此将围绕着几何和材料非线性的结构问题, 对所提出方法开展相应的试验验证。

## 2.3 基于组件的钢筋混凝土梁-柱节点力学模型

框架结构分析中所常用的刚性连接不能考虑节点处的转动变形能力, 这与实际情况不符。基于组件而建立的节点分析方法是一个能够很好地描述节点刚度和强度的力学模型, 可以明确反映弯矩、剪力以及轴向拉压力等荷载对节点刚度和强度的贡献。基于组