



国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400)  
湖南省重点出版物专项资金资助项目  
湖南大学出版社图书出版基金资助项目

# 混凝土结构防连续倒塌 设计理论与方法

张望喜 编著

湖南大学出版社



国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400)  
湖南省重点出版物专项资金资助项目  
湖南大学出版社图书出版基金资助项目

# 混凝土结构防连续倒塌 设计理论与方法

张望喜 编著

湖南大学出版社·长沙

## 内 容 简 介

本书是在国家重点研发计划专项项目“装配式混凝土工业化建筑技术基础理论(2016YFC0701400)”的基础上完成的,围绕传统现浇混凝土(RC)结构和装配式混凝土(PC)结构的防连续倒塌问题,系统整理了建筑结构防连续倒塌现状、连续倒塌试验技术和数值模拟技术、结构整体稳固性评价与分析方法,从框架结构,到框架剪力墙结构,再到剪力墙结构,最后到墙板结构;从试验,到理论,再到算例,给出了混凝土结构防连续倒塌的设计理论和设计方法以及性能改善和提升的工程构造措施。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构防连续倒塌设计理论与方法/张望喜编著. —长沙:  
湖南大学出版社, 2020. 11  
ISBN 978-7-5667-1793-1

I. ①混… II. ①张… III. ①混凝土结构—坍塌—防治—结构设计 IV. ①TU370.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第216728号

---

## 混凝土结构防连续倒塌设计理论与方法

HUNNINGTU JIEGOU FANG LIANXU DAOTA SHEJI LILUN YU FANGFA

编 著: 张望喜  
责任编辑: 张建平 金红艳  
印 装: 北京虎彩文化传播有限公司  
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 11.5 字数: 300 千  
版 次: 2020年11月第1版 印次: 2020年11月第1次印刷  
书 号: ISBN 978-7-5667-1793-1  
定 价: 48.00 元

---

出 版 人: 李文邦  
出版发行: 湖南大学出版社  
社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082  
电 话: 0731-88822559(营销部), 88821315(编辑室), 88821006(出版部)  
传 真: 0731-88822264(总编室)  
网 址: <http://www.hnupress.com>  
电子邮箱: 549334729@qq.com

---

版权所有, 盗版必究  
图书凡有印装差错, 请与营销部联系

# 序 言

在建筑工程和桥梁工程中,结构连续倒塌事故时有发生,造成了大量的人员伤亡和巨大的经济损失。自 20 世纪 60 年代末以来,结构的连续倒塌问题及其研究就引起了工程界的关注,尤其是在 2001 年美国“9·11”事件发生以后,工程界更加重视对结构连续倒塌问题的研究。近年来,装配式混凝土结构得到快速发展,由于这类结构自身施工工艺和连接的特点,其连续倒塌问题更需注意,相应的结构分析理论、试验方法、数值模拟技术和设计方法也具有新的挑战。因此,研究装配式混凝土结构防连续倒塌性能并提高其抗连续倒塌能力,是工程界迫切需要解决的重要问题。

本书针对传统现浇混凝土结构和装配式混凝土结构,系统总结了防连续倒塌现状、试验技术和数值模拟技术、结构整体稳固性评价和分析方法,并对框架结构、框架剪力墙结构、剪力墙结构等多种类型结构的防连续倒塌性能进行了研究。作者在防连续倒塌性能试验研究的基础上,对常用混凝土结构体系的防连续倒塌性能进行了数值模拟和参数拓展分析,取得了丰硕的创新性研究成果。作者所给出的混凝土结构防连续倒塌试验与数值模拟方法、结构整体稳固性评价指标和方法、防连续倒塌性能提升技术与工程构造措施等均对研究人员和工程技术人员具有重要的参考价值。

本书是国家重点研发计划专项项目“装配式混凝土结构防连续倒塌设计理论(2016YFC0701405)”部分研究成果的总结,作者团队来自湖南大学、上海交通大学、南京航空航天大学 and 北京工业大学等院校的教学与科研一线,具有较高的学术水平和工程实践能力。最难能可贵的是,作者能够在研究工作完成后,及时梳理并出版研究成果,为教学、科研和工程应用提供最新参考。全书内容丰富、全面系统,具有较强的理论性和实用性,对装配式混凝土结构的研发和工程应用具有推动作用。

中国工程院院士 周绪红

2020 年 2 月 16 日于岳麓山

# 前 言

一般而言,连续倒塌是指结构因偶然荷载造成结构局部破坏失效,继而引起失效破坏构件相连的构件连续破坏,最终导致相对于初始局部破坏更大范围的倒塌破坏。连续倒塌涉及结构和构件的大变形力学行为,突破了小变形或传统变形的范畴。从20世纪60年代开始,连续倒塌事故时有发生,每次重大的连续倒塌事故均催生出一批规范或指南。在这个推陈出新的时期,工程界人士关于防连续倒塌,即控制渐次倒塌的最切合的方法几乎没有统一的意见,他们不断完善设计方法和指导手册,并不断从台风及地震等自然灾害中吸取经验教训。

装配式混凝土结构(prefabricated concrete structure,简称PC结构)是由预制混凝土构件通过可靠的连接方式装配而成的,包括装配整体式混凝土结构、全装配混凝土结构等。预制装配式混凝土结构承载力、使用寿命与传统现浇混凝土结构(reinforced concrete structure,简称RC结构)相当,且具有施工周期短、节能环保等优点,更加适合于中国国情,在中国具有较好的发展潜力。与传统现浇混凝土结构相比,装配式混凝土结构中节点或连接的引入,使结构性能产生了一些不可忽视的改变。

围绕RC结构和PC结构的防连续倒塌问题,本书系统整理了建筑结构防连续倒塌现状、防连续倒塌试验技术和数值模拟技术、结构整体稳固性评价与分析方法,从框架结构,到框架剪力墙结构,再到剪力墙结构,最后到墙板结构;从试验,到理论,再到算例,给出了混凝土结构防连续倒塌的设计理论和设计方法,以及性能改善和提升的工程构造措施。

本书中的部分内容超出本科教学大纲的要求,可供研究生教学和科研及工程实践参考。

本书由张望喜(湖南大学)、李易(北京工业大学)、黄远(湖南大学)、何庆锋(湖南大学)、周云(湖南大学)、潘建武(南京航空航天大学)和杨健(上海交通大学)共同撰写,由张望喜负责统稿编著。其中第1章介绍了建筑结构防连续倒塌设计研究现状,由张望喜负责完成;第2章说明了钢筋混凝土框架防连续倒塌试验技术及数值模拟方法,由李易负责完成;第3章分析了RC和PC结构整体稳固性,由黄远负责完成;第4章分析了RC和PC框架结构防连续倒塌,由何庆锋负责完成;第5章分析了RC和PC框架剪力墙结构防连续倒塌,由周云负责完成;第6章分析了RC和PC剪力墙结构防连续倒塌,由潘建武负责完成;第7章

分析了 RC 和 PC 墙板结构防连续倒塌,由杨健负责完成。日常管理与付梓协调工作由胡小惠、王嘉完成,插图完善工作由研究生吴昊、李勃、邓俊杰、杨雪峰、王嘉、胡帅、胡彬彬、王冠杰、解圆聪、周彪等完成。

本书的工作是在国家重点研发计划专项项目“装配式混凝土工业化建筑技术基础理论(2016YFC0701400)”的资助下完成的,特此致谢。

非常感谢国家重点研发专项项目“装配式混凝土结构防连续倒塌设计理论(2016YFC0701405)”课题组成员的努力与付出,尤其感谢湖南大学本领域“中国高被引学者”易伟建教授,因为课题规划、执行、总结和验收等各个环节,无处不体现易教授的贡献。

同时感谢东南大学土木工程学院的领导和同事,尤其是国家重点研发计划专项项目负责人吴刚教授和项目管理专员王春林教授。在项目执行和本书撰写过程中,他们给了大力的支持和无私的帮助,他们是作者完成本书的坚强后盾。

在本书的编写过程中,作者参考了近年来国内出版的相关教材和专著,引用了学术论文中与防连续倒塌试验及研究相关的内容,特此表示感谢。

由于编者的水平与实践经验有限,书中若有不当和遗漏之处,敬请读者批评指正。

**编 者**

2020年2月15日于长沙岳麓山

# 目 次

<b>第 1 章</b>	<b>建筑结构防连续倒塌设计研究现状</b>	1
1.1	引 言	1
1.2	混凝土框架结构防连续倒塌基本性能	2
1.3	现有的设计方法及规范	7
1.4	与现浇混凝土结构的区别	12
1.5	研究思路和重点	15
<b>第 2 章</b>	<b>钢筋混凝土框架防连续倒塌数值模拟方法</b>	17
2.1	引 言	17
2.2	精细化有限元模型	17
2.3	简化有限元模型	23
<b>第 3 章</b>	<b>RC 和 PC 结构整体稳固性评价与分析</b>	33
3.1	概 述	33
3.2	有限元模型建立	38
3.3	压拱及悬链线受力机制分析	47
3.4	装配整体式框架整体稳固性评估	59
<b>第 4 章</b>	<b>RC 和 PC 框架结构防连续倒塌分析</b>	72
4.1	概 述	72
4.2	试验与模拟	72
4.3	评估方法	91
4.4	算 例	93
<b>第 5 章</b>	<b>RC 和 PC 框架剪力墙结构防连续倒塌分析</b>	94
5.1	概 述	94

5.2	现有的设计方法及规范	94
5.3	钢筋混凝土装配式剪力墙结构平面外抗冲击性能	99
5.4	算 例	108
5.5	界定倒塌范围评定标准	112
<b>第 6 章</b>	<b>RC 和 PC 剪力墙结构防连续倒塌分析</b>	<b>118</b>
6.1	引 言	118
6.2	抗震倒塌设计流程	125
6.3	防连续倒塌设计流程	126
6.4	算 例	133
<b>第 7 章</b>	<b>RC 和 PC 墙板结构防连续倒塌分析</b>	<b>160</b>
7.1	引 言	160
7.2	倒塌评定标准	161
7.3	荷载组合	163
7.4	试验与模拟	163
7.5	算 例	171
<b>参考文献</b>		<b>172</b>

# 第 1 章 建筑结构防连续倒塌设计研究现状

## 1.1 引言

装配式建筑是指在工厂中预制生产所需的结构维护构件、建筑部件、设备体系等，运输到施工现场后进行拼接安装而成的建筑。装配式建筑是建筑工业化的需要，可以实现以标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装饰和信息化管理等为主要特征的工业化生产方式建造。在质量控制、节能环保、施工工期及管理等方面都具有较大的优势。按照所采用的结构材料划分，装配式建筑可划分为木结构、钢结构和装配式混凝土结构<sup>[1]</sup>。装配式混凝土结构(prefabricated concrete structure, 简称 PC 结构)是由预制混凝土构件通过可靠的连接方式装配而成的混凝土结构, 包括装配整体式混凝土结构、全装配混凝土结构等<sup>[2]</sup>。

预制装配式混凝土结构承载力、使用寿命与传统现浇钢筋混凝土结构相当, 且具有施工周期短、节能环保等优点, 更加适合于中国国情, 在中国具有较好的发展潜力<sup>[1]</sup>。图 1-1 为典型装配整体式混凝土框架预制件分布示意图。

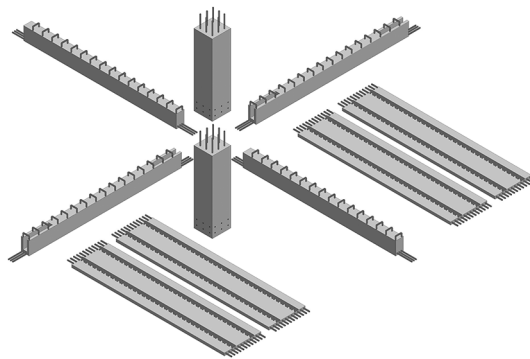


图 1-1 典型装配整体式混凝土框架

与现浇混凝土结构相比, 装配式混凝土结构中节点或连接的引入, 使结构性能产生了一些不可忽视的改变。

1968 年英国伦敦 Ronan Point 公寓连续倒塌事件发生后, 人们开始关注结构的完整性和防止结构发生连续倒塌的问题。一般而言, 连续倒塌是指结构因偶然荷载造成局部结构破坏失效, 继而引起失效破坏构件相连的构件连续破坏, 最终导致相对于初始局部破坏更大范围的倒塌破坏。《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392—2014)将连续倒塌描述为由初始的局部破坏, 从构件到构件扩展, 最终导致一部分结构倒塌或整体结构倒塌。国内外关于连续倒塌方面的研究主要集中在以下方面:

- ①研究并论证制定防连续倒塌规范条文的可行性与意义, 指出防连续倒塌的研究方向;
- ②研究结构遭遇初始破坏后的倒塌机理, 如火灾、碰击等;

- ③研究防止结构连续倒塌的工程构造措施和方法；
- ④对子结构或结构物倒塌过程进行试验验证和数值模拟等<sup>[3-10]</sup>。

本书结合国家重点研发计划重点专项课题“装配式混凝土结构防连续倒塌设计理论”(2016YFC0701405)，就装配式混凝土框架结构防连续倒塌的几个值得注意的问题展开探讨，以抛砖引玉。

## 1.2 混凝土框架结构防连续倒塌基本性能

从20世纪60年代开始，连续倒塌事故时有发生，每次重大的连续倒塌事故均催生出一批规范或指南，详见图1-2。在这个日新月异的时代，工程界人士关于防连续倒塌，即控制渐次倒塌的最切合的方法几乎没有统一的意见，他们不断完善设计方法和指导手册，并不断从台风及地震等灾害中吸取经验教训<sup>[11]</sup>。连续倒塌涉及结构和构件的大变形力学行为，突破了小变形或传统变形的范畴，需要认识结构一些新的性能和特征。

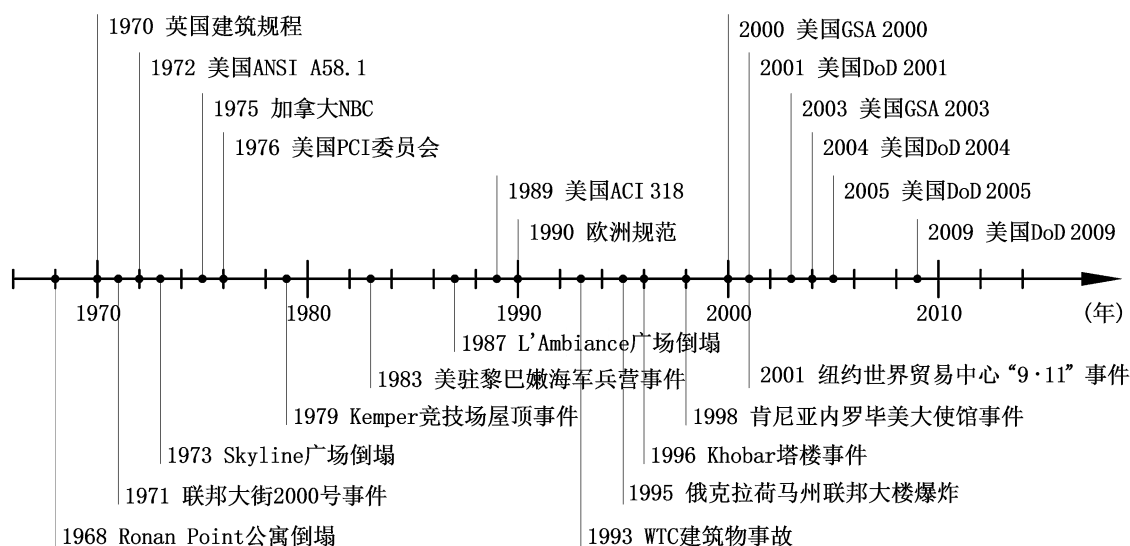
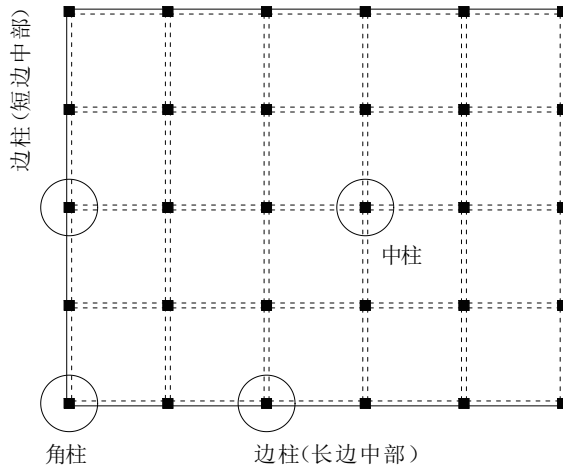


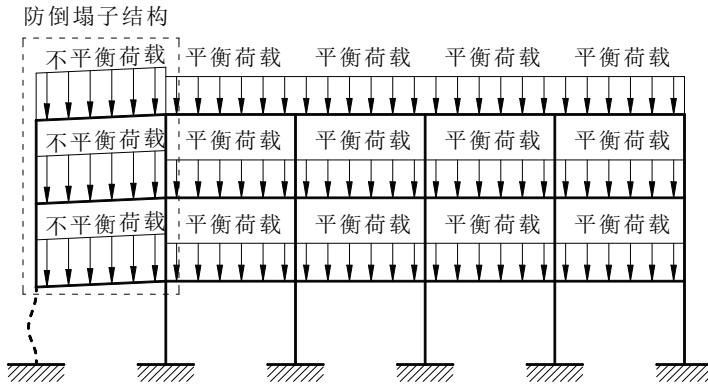
图 1-2 “连续倒塌”事故和国外规范时程图

### 1.2.1 连续倒塌中的受力机制

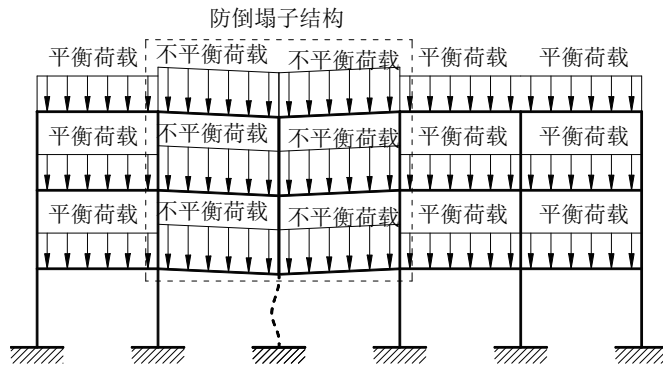
依据《建筑抗连续倒塌设计》(DoD 2005)，《联邦政府办公楼以及大型现代建筑连续倒塌分析和设计指南》(GSA 2003)，《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392—2014)，原始框架结构中初始破坏柱，即拟被移除柱包括角柱、各边中柱及中柱(或内部柱)，具体如图1-3所示。采用平面框架分析剩余结构时，与被移除角柱相连的梁的承载力靠梁机制维系，如图1-4(a)所示；当被移除柱为边柱或中柱时，与被移除柱相连的梁的承载力靠拱机制、梁机制、悬链线机制来维系，如图1-4(b)(c)(d)所示<sup>[12-13]</sup>。



(a)平面图

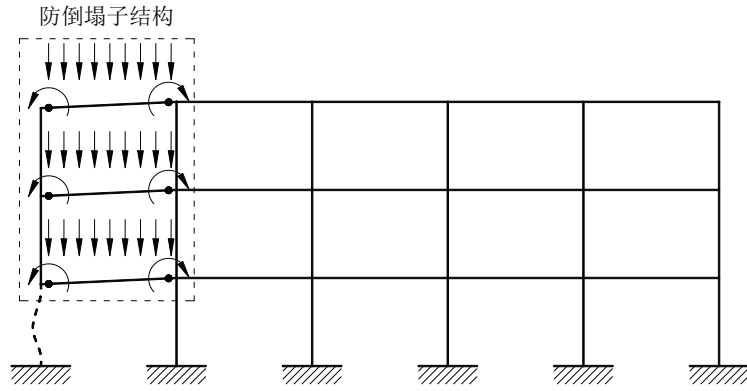


(b)角柱移除平面框架

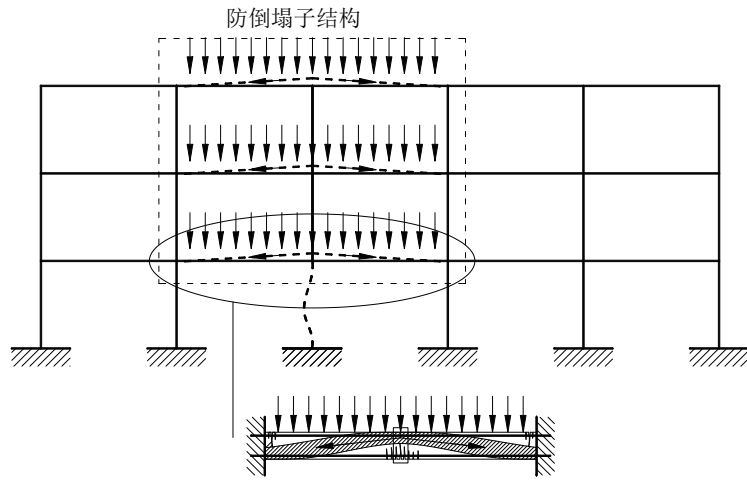


(c)边柱或中柱移除平面框架

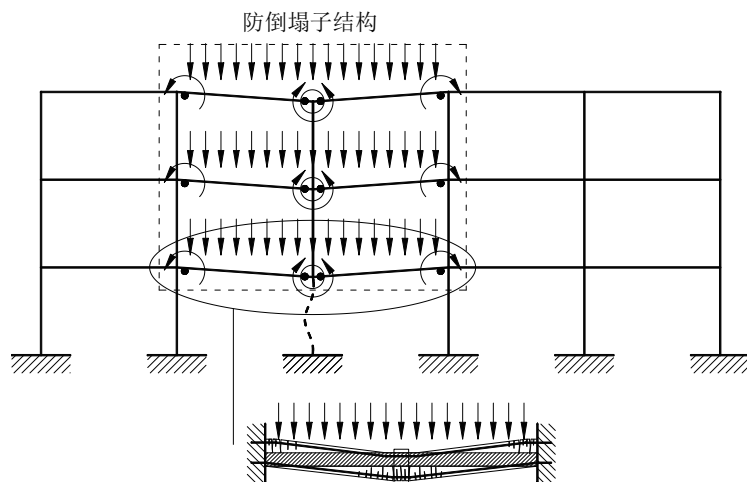
图 1-3 拟被移除柱位置示意图



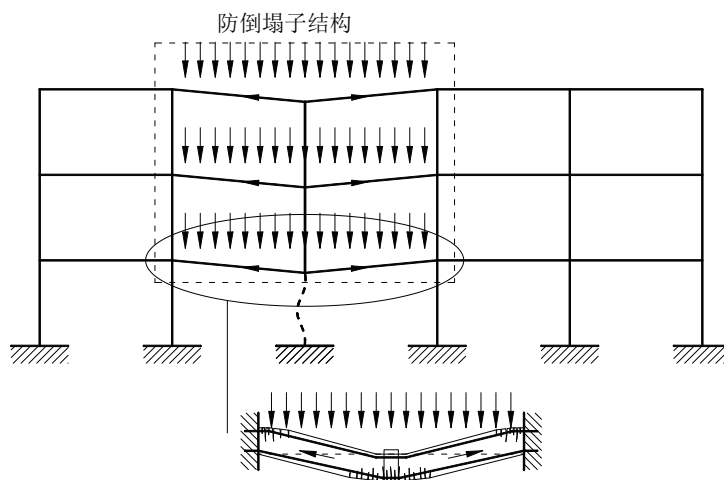
(a) 移除角柱后剩余结构梁机制



(b) 移除边柱或中柱后剩余结构拱机制



(c) 移除边柱或中柱后剩余结构梁机制



(d) 移除边柱或中柱后剩余结构悬链线机制

图 1-4 剩余结构承载机制

### 1.2.2 受力机制的复合与转换

被移除柱失效后，剩余结构防连续倒塌子结构存在拱机制、梁机制和悬链线机制。通常认为先是拱机制，然后是梁机制，最后是悬链线机制。事实上各受力机制存在复合与转换问题，细分下来，大体包括拱-梁机制(压弯作用)、梁机制(弯矩作用)、梁-悬链线机制(拉弯作用)和悬链线机制(受拉作用)，详见图 1-5<sup>[12],[13]</sup>。

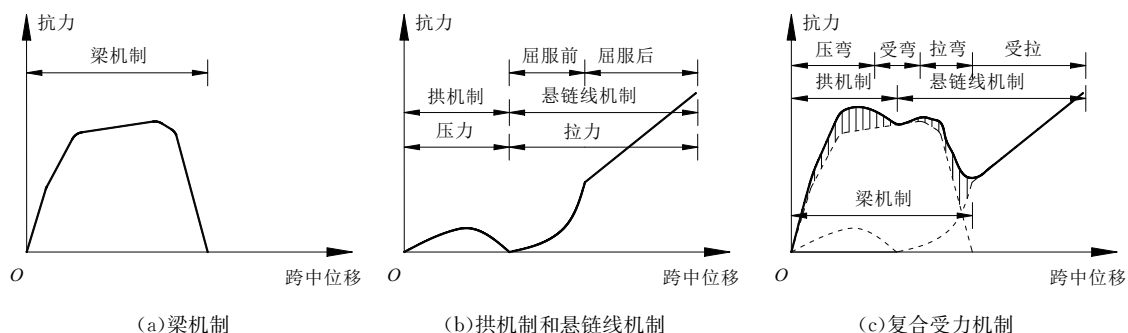


图 1-5 剩余结构全抗力曲线图

可以看出，框架剩余结构主要通过复合受力机制进行工作和转换，实际全抗力曲线受梁截面尺寸、跨度、配筋、混凝土强度、构造以及框架柱对防连续倒塌子结构的侧向约束刚度等因素的影响；剩余结构三种基本机制和复合情况各有不同，使全抗力曲线表现出不同的形状。如当梁高较低或框架柱的侧向刚度较小时，拱机制不明显，实际全抗力曲线主要表现为梁机制和悬链线机制的叠加。

与普通受弯结构相比，轴力的出现使截面和构件的受力产生根本性改变，使原来普通的梁转换为偏拉构件(拉弯作用)或偏压构件(压弯作用)，构件的受力性能可能产生转换。轴力有两方面的作用：一方面是直接通过拱的悬链线机制提供抗力，即竖向力分量(用以承受竖向不平衡荷载)；另一方面是轴力对梁正截面承载力产生影响，即影响梁机制的性能。

### 1.2.3 空间受力和楼板的影响

钢筋混凝土框架结构防连续倒塌试验中所用的子结构分为平面空框架、空间空框架、平

面带板框架和空间带板框架，如图 1-6 所示。楼板对防连续倒塌的贡献表现在两个方面：

①框架中，板参与梁机制的受力，与梁一起，形成 T 形截面，共同承担楼面荷载，有效提高梁机制的峰值承载力；

②楼板在悬链线机制下自身能提供防连续倒塌承载力，有效提高悬链线机制的峰值承载力<sup>[14]</sup>。

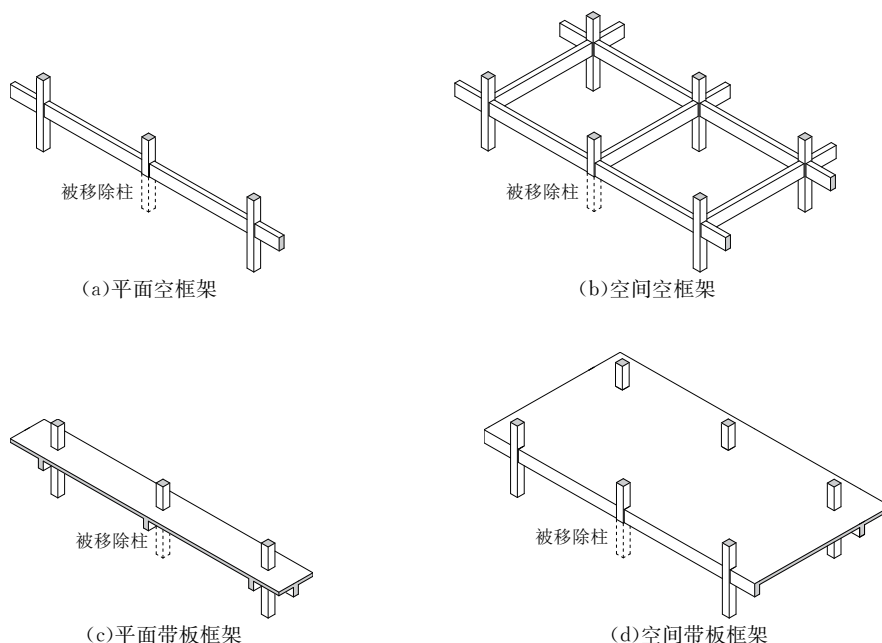


图 1-6 框架子结构

在空间条件下，纵横向框架和楼板形成空间受力作用，板还可以形成塑性铰线参与梁机制和悬链线机制的受力，框架整体防连续倒塌性能比平面框架表现得更优秀<sup>[14-15]</sup>。在空间情况下，剩余结构中与被移除柱相连的框架梁处于空间受力状态，除平面框架中的弯矩、轴力、剪力以外，还会有扭矩的存在<sup>[16]</sup>，即连续倒塌时，空间框架结构中梁处于大变形复杂受力状态。

#### 1.2.4 防连续倒塌和抗地震倒塌的差异

同样都是结构倒塌，但连续倒塌和地震倒塌之间存在差异。连续倒塌是初始破坏发生后造成不成比例的破坏，需考虑的荷载有恒荷载、活荷载、风荷载、雪荷载、偶然荷载等，初始缺陷或初始破坏发生的力学特征和位置均具有随机性；而地震倒塌，只需考虑重力荷载代表值(即恒荷载和部分活荷载)以及地震作用(主要是水平地震作用，特殊情况下考虑竖向地震作用)。两者对应的荷载、分析方法和目标均存在一定的差异，这种差异使我们认识到：结构防连续倒塌性能和抗地震倒塌性能两个目标不完全一致。防连续倒塌性能优良的房屋抗震性能不一定满足要求；反之，抗地震性能优良的房屋防连续倒塌性能不一定满足要求。更有甚者，为了提高结构的防连续倒塌性能进行的局部调整可能导致结构的抗震性能降低，如钢筋混凝土框架结构的防连续倒塌设计可能会导致不利破坏模式“强梁弱柱”的产生。这使得工程师在进行结构防连续倒塌设计和抗地震设计时需两者兼顾。虽然防连续倒塌的能力随着设防等级的提高而提高，但是防连续倒塌设计不能够完全替代抗地震设计<sup>[17]</sup>。

## 1.3 现有的设计方法及规范

### 1.3.1 设计方法

目前，结构防连续倒塌的设计方法主要包括概念设计法、拉结强度法、拆除构件法和关键构件法。

#### (1) 概念设计法。

国内外规范防连续倒塌的概念设计，主要从结构体系的备用路径、整体性、延性、连接构造和关键构件的判别等方面进行结构方案和结构布置设计，避免存在易导致结构连续倒塌的薄弱环节。具体内容包括，但不限于以下方面：

- ①增加结构的冗余度，使结构体系具有足够的备用荷载传递路径；
- ②设置整体性加强构件或设置结构缝，以阻隔连续倒塌的扩展；
- ③加强结构构件的连接构造，保证结构的整体性；
- ④加强结构延性构造措施，保证剩余结构的延性；
- ⑤可能遭受爆炸作用的结构构件，应具备一定的反向荷载承载能力；
- ⑥连接的承载力不应小于被连接构件的承载力，连接应具有允许构件大变形的能力。

#### (2) 拉结强度法。

拉结强度设计通过已有构件和连接进行拉结，提供结构的整体牢固性以及荷载的多传递路径。根据英国《混凝土结构设计规范》(BS 8110)中的设计条文，可以总结出拉结强度法的设计思想：

- ①结构在初始破坏发生后各楼层产生的不平衡荷载由其本层框架梁承担，当每层框架梁能够有效防止本层不平衡荷载引起的倒塌时，整体结构的连续倒塌就被有效地防止；
- ②每个楼层内，结构发生倒塌的极限状态为悬链线破坏机制，当楼层的构件拉结能力能够满足该临界状态的抗力需求时，即能保障本层不倒塌。

在目前的规范当中，很多都提及拉结强度法，但细节上存在差异。我国规范《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392—2014)按照拉结的位置和作用分为周边水平构件拉结、内部水平构件拉结、内部水平构件对同边竖向构件拉结和竖向构件的竖向拉结，详见图 1-7。

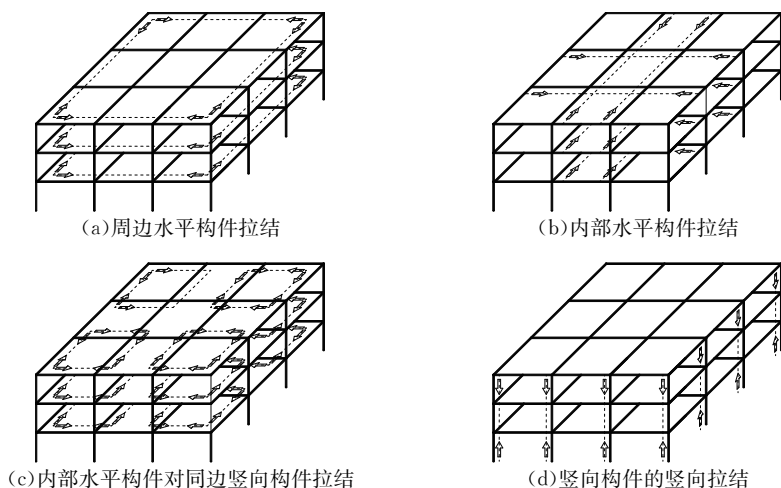


图 1-7 构件拉结示意图

### (3)拆除构件法。

拆除构件法也称替代荷载路径法，是模拟结构遭遇初始破坏并进行防连续倒塌能力分析的常用方法，具有直观形象的特点。应用拆除构件法可以验证结构是否具有跨越某关键构件的能力，以预测结构发生连续倒塌的可能性。采用该方法时，可以选择四种分析方法：线性静力分析方法、线性动力分析方法、非线性静力分析方法和非线性动力分析方法。四种分析方法有各自的优劣性及适用的条件。线性静力分析方法是最简单和最基本的分析方法，主要特点是在对结构加载分析前，先从结构移除柱，对结构静态地施加乘以动力系数的静荷载后选用线性方法进行分析计算。

### (4)关键构件法。

关键构件法也称局部加强法，对某一构件破坏后容易引发结构的连续倒塌，需单独对该承重构件进行设计与加强。对于无法满足拆除构件法(连续倒塌验收标准)要求的结构构件，设计成关键构件，使其具有足够的强度能在一定程度上抵御意外荷载作用，减轻局部破坏发生的程度，从而降低连续倒塌发生的可能。设计中，该方法通常与拆除构件法结合，既能有效改善结构抵御连续倒塌的能力，也能减少建造成本。

### (5)各设计法的比较。

概念设计法是对结构防连续倒塌进行定性设计的方法，依赖工程构造措施，实行起来相对简单，可以取得良好效果，且不会过多地增加建筑造价，相对于其他设计方法而言，设计效果更依赖于设计人员的水平和经验。拉结强度法是一种被量化的间接设计法，只需对构件与构件的连接进行受力分析，设置专门的拉结钢筋。在拉结强度、荷载组合、层数、接续跨度、材料参数等方面，不同规范的做法不一样，拉结强度法的设计参数经验性成分较多。相对其他方法而言，它更加适合工程应用。拆除构件法能对结构的防连续倒塌进行定量分析，计算分析的工作量较大，分析方法也较复杂，涉及非线性、动力和大变形等环节，设计过程相对烦琐，但精度较高，还可以模拟倒塌过程。其设计过程依赖于意外荷载，适用于任何意外事件下的结构破坏，因此多用于重要性较高的建筑。关键构件法注重偶然荷载对局部构件的破坏，多用于有具体针对荷载作用(大小、方向，甚至性质)的防连续倒塌设计。

## 1.3.2 国外规范

在重大连续倒塌事故之后，国外规范出现时间进程见图 1-2，规范数量较大。下面就国外主要规范在界定倒塌范围、荷载组合和验收标准等方面进行讨论。

### (1)界定倒塌范围。

房屋建筑防连续倒塌设计的目的在于局部破坏不至于导致与偶然作用或偶然荷载不相匹配的大范围破坏或倒塌，使结构发生连续性倒塌的危险程度减小到一个可接受的水平。目前规范中的分析大多基于备用荷载路径法，结构在单根承重构件移除后引起的倒塌破坏范围应控制在一定范围，超出这个范围就认为发生了连续性倒塌。各国规范对界定这个倒塌破坏范围存在一定的差异，见表 1-1<sup>[18-20]</sup>。

### (2)荷载组合。

各规范提出的防连续倒塌设计和验算均属于直接计算方法，包括备用荷载路径法和局部抵抗特殊偶然荷载法。备用荷载路径法的荷载组合以及局部抵抗特殊偶然荷载法中作用于关键构件的压力值，即需要考虑的荷载类型及组合，各国规范之间也存在一定差异，见表 1-2<sup>[19-21]</sup>。

表 1-1 国外各规范界定连续倒塌破坏的倒塌范围比较<sup>[18-20]</sup>

规范	水平传递	竖向传递
BS 5950-1: 2000	小于楼板或屋面面积的 15%或小于 100 m <sup>2</sup>	初期破坏程度叠加, 相邻破坏程度可高可低
Canada-NBCC 1977	桁架、梁、楼带或楼板的初期破坏叠加在同一侧或不同侧, 一个开间或两个开间的板会变成一个悬挑结构(如果板一端的支撑移去)	初期破坏程度叠加, 相邻破坏程度可高可低
NYC 1998, NYC 2003	小于楼板或屋面面积的 20%或小于 100 m <sup>2</sup>	大于或等于 3 层
DoD 2005 (UFC 4-023-03)	外部: 楼板上方的破坏不小于 70 m <sup>2</sup> 或楼板总面积的 15%; 内部: 破坏不小于 140 m <sup>2</sup> 或楼板总面积的 30%, 破坏不能沿附属结构向失效单元、楼板或移除单元传递	破坏单元正下方的楼板不能破坏
GSA 2003	与移除单元相关联的结构性板	在移除外部柱上方 167 m <sup>2</sup> 的楼板或在移除内部柱上方 334 m <sup>2</sup> 的楼板

表 1-2 国外各规范连续性倒塌分析荷载组合比较<sup>[19-21]</sup>

规范	构件被移除后的荷载组合	偶然荷载
BS 5950-1: 2000	$(1 \pm 0.5)D + L/3 + W_n/3$	34 kPa
Eurocode 2003	—	20 kPa
Canada-NBCC 1977	$D + L/3 + W_n/3$	—
ASCE 7-98, 02, 05	$(0.9 \text{ 或 } 1.2)D + (0.5L \text{ 或 } 0.2S) + 0.2W_n$ (当构件移除时); $1.2D + A_k + (0.5L \text{ 或 } 0.2S)$ (局部偶然作用); $(0.9 \text{ 或 } 1.2)D + A_k + 0.2W_n$ (局部偶然作用)	$A_k$
DoD 2013 (UFC 4-010-01)	$D + 0.5L$	—
DoD 2005 (UFC 4-023-03)	$D + 0.5L$ ; $(0.9 \text{ 或 } 1.2)D + (0.5L \text{ 或 } 0.2S) + 0.2W_n$ ; $2.0[(0.9 \text{ 或 } 1.2)D + (0.5L \text{ 或 } 0.2S)] + 0.2W_n$	—
NYC 1998, NYC 2003	$2D + 0.25L + 0.2W_n$	—
GSA 2003	$2.0(D + 0.25L)$ ; $D + 0.25L$	—

表中,  $D$ ,  $L$ ,  $W_n$ ,  $S$  分别为恒荷载、活荷载、风荷载和雪荷载,  $A_k$ 为偶然荷载。

### (3) 验收标准。

依照各规范给出的荷载组合, 采用拆除构件法进行线性或非线性、静力或动力分析所得