

建筑与工程结构 抗倒塌研究新进展

顾祥林 林 峰 主编

中国建筑工业出版社

建筑与工程结构 抗倒塌研究新进展

顾祥林 林 峰 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑与工程结构抗倒塌研究新进展/顾祥林, 林峰

主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-112-15447-0

I. ①建… II. ①顾…②林… III. ①坍塌-防治-建筑结构-防震设计-研究 IV. ①TU352.104②TU746.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 106005 号

本书分三大部分, 内容涉及结构抗倒塌设计、地震作用下结构倒塌分析以及爆炸、冲击和其他偶然作用下结构倒塌分析。论文可供房屋建筑和工程结构科研机构、高等院校、设计公司、施工公司和管理部门的研究和技术人员参考。

责任编辑: 郇锁林 郭雪芳

责任设计: 李志立

责任校对: 姜小莲 赵颖

建筑与工程结构抗倒塌研究新进展

顾祥林 林峰 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

化学工业出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18¼ 字数: 500 千字

2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月第一次印刷

定价: 56.00 元

ISBN 978-7-112-15447-0

(24048)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书学术委员会

主任委员：陈肇元

副主任委员：杨秀敏 崔俊芝 谢礼立 范立础 沈祖炎 江欢成
吕志涛 董石麟 欧进萍 容柏生 茹继平 王亚勇
黄世敏 刘西拉 杜修力 刘春霖 钱稼茹 叶列平

委员：曹万林 陈以一 邸小坛 范 峰 范 重 方东平
方 秦 冯 健 冯 远 傅学怡 顾祥林 郭玉荣
贾 抒 金伟良 李 刚 李爱群 李国强 李宏男
李小军 李英明 李振宝 李忠献 梁兴文 林树枝
刘晶波 娄 宇 陆新征 吕大刚 吕建鸣 吕西林
苗启松 牟在根 潘 鹏 齐伍辉 任庆英 宋 波
苏幼坡 孙景江 孙利民 滕 军 王立军 王元清
吴 斌 吴 波 吴 徽 徐有邻 徐自国 杨庆山
叶继红 叶献国 易伟建 郁银泉 翟长海 张雷明
张微敬 赵世春 赵作周 周 云 张劲泉

前 言

建筑与工程结构在极端荷载或偶然作用下的倒塌会给人民的生命财产造成重大损失。研究结构的倒塌性能和抗倒塌设计方法，可最大限度地保证不出现灾难性的破坏，是结构工程师的重要职责之一。21 世纪以来，在国家各项研究计划的资助下，我国广大科研工作者在结构倒塌过程模拟分析、结构抗倒塌性能试验研究、结构倒塌机理、基于倒塌分析的防灾规划以及建筑与工程结构抗倒塌设计方法等方面做了大量的研究工作，取得了丰硕的成果。其中，一些成果直接用于相关设计规范的改编或编制，为提高我国工程结构的防灾水平提供了技术保障。

2009 年 10 月由中国工程院土木水利与建筑工程学部、中国建筑学会抗震防灾分会建筑结构抗倒塌专业委员会主办，清华大学土木工程系承办的“第一届建筑结构抗倒塌学术交流会”在北京召开并出版了相应的论文集。2012 年 11 月 3 日~4 日，由同济大学土木工程学院建筑工程系承办的“第二届建筑结构抗倒塌学术交流会”在上海召开，来自全国的近百名代表参加了会议。本次会议就我国近年来建筑和其他工程结构抗倒塌领域的新成就、新进展、新问题和新应用等进行了广泛的讨论和交流。经专家对本次会议投稿论文评审，选出 42 篇集成本书。内容涉及结构抗倒塌设计、地震作用下结构倒塌分析以及爆炸、冲击和其他偶然荷载下结构倒塌分析。论文可供房屋建筑和工程结构科研机构、高等院校、设计公司、施工公司和管理部门的研究和技术人员参考。

希望本次会议能够进一步推进我国建筑和工程结构的抗倒塌性能研究，促进结构相关抗倒塌规范和规程的编制，提升我国建筑和工程结构的抗倒塌设计和评估水平。

陈以一

2013 年 3 月 30 日

目 录

第一部分 结构抗倒塌设计

混凝土结构防连续倒塌的设计原则	3
典型单跨 RC 框架减震加固设计及抗倒塌性能研究	10
多层砖房的地震倒塌特征及损伤控制指标	19
某 RC 框架-剪力墙结构抗连续倒塌分析	28
Enhanced Security Protection Approach for High-Profile Commercial Buildings	34
RC 空间框架填充墙结构的抗连续倒塌能力分析与鲁棒性评定	42
考虑压拱效应时钢筋混凝土双跨梁竖向承载力计算	51
关键柱破坏后组合框架抗倒塌分析	52
大跨空间结构连续性倒塌研究方法 with 现状	53

第二部分 地震作用下结构倒塌分析

内藏钢板混凝土剪力墙抗震性能研究	57
考虑土-结构相互作用近断层隔震结构倒塌模拟	65
结构抗地震倒塌破坏的域模型研究	72
高层斜交钢框架三维整体结构的抗水平推覆性能分析	79
排架式单层厂房地震倒塌调查分析	84
自由冰对冰水域桥墩抗倒塌能力的影响研究	90
大跨度斜拉桥辅助墩耗能能力试验研究	100
基于备用荷载路径能力谱方法的 RC 框架结构侧向连续倒塌鲁棒性分析	109
底层强度不规则的 RC 框架结构倒塌易损性分析	116
单层无筋砌体结构模型倒塌过程振动台试验研究	124
砌体倒塌中缺口墙体承载力	130
RC 框架填充墙结构地震倒塌过程中能量变化研究	138
考虑构件重要性的钢筋混凝土地震损伤定量评价	146
地震作用下钢筋混凝土框架结构的连续倒塌极限状态可靠度分析	151

现浇楼板对钢筋混凝土框架结构倒塌模式的影响	152
-----------------------------	-----

第三部分 爆炸、冲击及其他偶然作用下结构倒塌分析

结构连续性倒塌工况下的梁柱节点研究现状	155
连续性倒塌工况下钢框架节点断裂的有限元模拟	162
某厂房 33m 梯形屋架垮塌原因分析	169
建筑物冰雪荷载计算的研究与建议	174
RC 平面框架抗连续倒塌分析	179
张弦结构抗连续倒塌措施研究	185
风荷载作用下风电塔结构的稳定性研究	196
基于拆除构件法的弦支穹顶结构动力连续倒塌分析	203
对围护结构抗风设计的几点建议	210
三起建筑物火灾后检测结果的启示	214
楼板对钢筋混凝土框架抗连续倒塌能力的影响分析	217
建筑物抗连续性倒塌研究概述	223
一种实用船桥碰撞动力荷载时程分析方法	234
防屈曲支撑钢框架抗竖向连续倒塌能力分析	245
基于 DONAP-OpenSeesGUI 的 RC 空间框架填充墙结构连续倒塌可视化模拟	255
爆炸荷载作用下核电厂超大型冷却塔的倒塌模拟分析	264
基于能量流动的杆系结构易损性分析	272
爆炸荷载下钢框架连续倒塌分析中的拆除构件法研究	279

第一部分

结构抗倒塌设计

混凝土结构防连续倒塌的设计原则

徐有邻

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要: 事故和灾害调查表明: 天灾、人祸造成的结构倒塌是最严重的安全问题。在偶然作用下结构的防连续倒塌设计, 属于结构安全的较高层次。本文通过对结构倒塌和未倒塌规律的分析, 提出了结构防连续倒塌设计的基本原则; 考虑整体稳固性的结构方案优化及更深入的结构分析; 重视连接构造问题。文章简介了混凝土结构防连续倒塌的概念设计以及定量设计的基本原则, 可供设计人员参考。

关键词: 混凝土结构; 连续倒塌; 概念设计; 定量设计

1 结构安全的根本问题

1.1 结构倒塌的严重后果

建筑为人类提供了舒适的封闭环境和空间, 而结构作为载体抵御了所有的外界作用。然而当结构塌垮时, 却会引起生命、财产的巨大损失。因此结构设计的首要目标就是安全。20 世纪末以来, 不断发生的天灾(地震、洪水、台风、冰灾……)、人祸(爆炸、撞击、火灾……)引起的房倒屋塌造成了大量的人员伤亡, 结构倒塌的问题受到越来越多的关注。

1.2 防灾性能是安全的根本

与媒体报道和社会舆论的认知不同, 大多专家的结论并不认为结构倒塌的主要原因是“材料”和“强度”问题, 而是结构体系和连接构造的缺陷。这使结构在非常规的偶然作用下, 由于局部破坏而导致连续倒塌。亦即结构的防灾性能不足, 才是造成倒塌的根本原因。传统的混凝土结构理论(包括设计规范)存在许多根本性的缺陷, 下节专门予以论述。

2 传统设计的缺陷

2.1 构件计算而非结构设计

(1) 不重视结构方案:

传统设计不重视结构方案。早期的规范中大量纳入构件(板、梁、柱、墙等)截面设计的内容, 但是对结构体系及构件布置却很少提及, 甚至在规范中完全没有相应的要求。由于结构整体稳固性(Robustness, 鲁棒性、皮实性)不良, 结构往往由于经不起“折腾”而倒塌。其中最根本原因是: 只考虑“单个构件受力”而缺乏“结构整体设计”的概念。

(2) 结构分析欠缺:

传统设计多采用理想化的简图和弹性分析,以“导荷载”的方式计算荷载传递和构件内力。规范中没有(或很少提及)“结构分析”的内容。采用太简单的方法计算性能特别复杂的超静定混凝土结构,所得的内力状态与实际相差甚大,造成了许多不安全因素。

(3) 不重视连接构造:

传统设计不重视连接构造措施,致使许多简图和假定的基本计算条件不符合。特别是许多关键的传力部位和构件之间的连接,没有可靠、有效的措施加以保证。致使在非常规的偶然作用下发生构件脆性的压溃、断裂,引起结构解体而发生倒塌。

2.2 重计算而轻概念

(1) 以“强度问题”确定安全:

传统的混凝土结构设计以截面钢筋屈服、混凝土破碎为条件,标志构件的承载力,以“强度问题”控制结构的安全,实际属于安全的较低层次。因为由于压、弯、剪、扭的强度破坏造成较大的裂缝、破碎,最多成为“塑性铰”,距离断裂、倒塌还有相当的距离。

(2) 重计算而轻概念:

传统设计完全靠截面尺寸和材料强度计算控制结构安全,而对因此引起的后果却缺乏概念的判断。例如,梁端出现塑性铰可以按塑性内力重分布继续承载受力;而柱端出现塑性铰就可能引起结构倒塌。在此影响结构安全的绝不是强度计算而是结构的整体稳固性。

2.3 未考虑破坏形态的影响

(1) 材料延性的作用:

材料的变形性能(延性)对构件的破坏形态有极大的影响。汶川震害调查表明,混凝土往往被脆性“压溃”;强度较高的冷轧带肋钢筋预应力板大量断裂,这些都造成了结构的倒塌。而圈梁中低强的普通钢筋却很少断裂,从而维持了结构的整体性。对构件断裂而言,材料强度未必是主要因素,变形性能(延性)以及相应的耗能能力才是决定的因素。

(2) 破坏形态的影响:

不同形态的破坏对结构安全的影响极大:延性的“屈服”与脆性的“断裂-压溃”会引起完全不同的后果。构件的“屈服”基本不影响结构的整体性,至多造成内力重分布。而混凝土的压溃或钢筋的断裂,则会造成构件分离、解体;导致结构倾覆、倒塌。这才是对结构安全的最大威胁。

2.4 不考虑偶然作用

(1) 规范作用的局限性:

传统结构设计只考虑荷载规范规定的作用,并由此计算内力进行设计。但是自然界的作用并不完全服从基于有限统计而由规范确定的效应。人群的行为也带有任意性,活荷载的不确定性也很大,难以用规范加以限制。因此完全靠规范设计并不能保证结构的安全。

(2) 偶然作用的后果:

近年罕遇天灾(地震、洪水、台风、冰灾、泥石流等)频频发生,这种非常规作用远非荷载规范所能控制。“9.11事件”以来,还增加了恐怖袭击(爆炸、撞击、纵火等)的可能性。以高智能指导打击结构的“死穴”,则以很小的能量足以摧毁很大的建筑。调查分析表明,非常规的偶然作用往往是结构倒塌的主要原因,这是现代结构人员面临的严峻问题。

3 防连续倒塌设计的基本原则

3.1 结构倒塌的特点

常规设计只保证三正常（设计、施工、使用）条件下的结构安全。而结构倒塌原因的调查和分析都表明，其倒塌都是在“三不正常”的条件下发生的。因此，不能按常规方法进行结构防连续倒塌设计。必须转变观念，按新的思路进行设计。

3.2 倒塌结构的调查分析

尽管结构倒塌是非常偶然的现象，但汇总众多事故和灾害倒塌的资料，总能分析、探索其中的规律，并寻求相应的设计方法。这可以从“作用”和“抗力”两方面着手进行。

（1）偶然作用的特点：

偶然作用虽属“偶然”，但也有一定规律可循。地震只能沿地壳断裂带发生且有一定的方向性。洪水、大风、泥石流、滑坡、滚石等也有确定的气象-地质条件；而且这些水平作用还须有较大的受载面。即使是属于恐怖袭击的汽车炸弹，也只能作用于结构底层。此外，多数偶然作用都是“瞬时作用”，只要承受住最初的打击，作用即会很快消失。利用这些特点，就可以采取针对性的措施，将偶然作用效应的影响降低到最低限度。

（2）结构倒塌的教训：

结构设计的顺序为：结构方案、材料选择、作用分析、构件计算、构造措施，其对结构安全的影响依次递减。传统设计忽视前几个重要层次的作用，过分强调构件的配筋计算，还不太重视构件的连接构造问题。倒塌调查中发现的具体问题如下：

结构体系不合理：单独大跨、刚度不匀、头重脚轻、蜂腰瓶颈、体型曲折、端角单薄、侧向不稳、倒塌范围缺乏控制、结构类型匹配不良……

传力途径软弱：传力途径单一、缺乏冗余约束、关键部位细弱、底部构件软弱、传力途径曲折、间接传力不畅、构件间内力分配不明确……

连接构造缺陷：构件连接薄弱、装配节点不良、缺乏围箍约束、构件浮置无可靠连接、钢筋锚固-连接不可靠、连接传力中断、箍筋薄弱约束差、预埋件拉脱……

结构材料脆性：钢筋延性差而脆断、混凝土未受约束而压溃、构件的变形-耗能能力差、构件在偶然作用的冲击下断裂—解体……

施工质量失控：施工质量差、材料强度低、加工钢筋延性差、抽配筋、豆腐渣混凝土……

图1为汶川地震中现浇混凝土框架结构的倒塌情况及原因分析。

（3）结构未倒塌的原因：

总结灾害中未倒塌结构的原因，同样具有很大的参考价值。结构的整体稳固性从根本上决定了结构体系、传力途径和连接构造的合理与否，对建筑物的安全有着决定性的影响。其具体内容可以归纳为“四要”、“四忌”、“四强”、“四宜”的六十四个字要诀。

四要：

要方正规矩——结构体形规则、比例适当、质量—刚度应均匀—连续。

要传力直接——传力途径应简捷明确、竖向构件应连续贯通、直接传力。

要冗余约束——采用超静定结构形式、增加冗余约束、减少悬臂、简支构件。

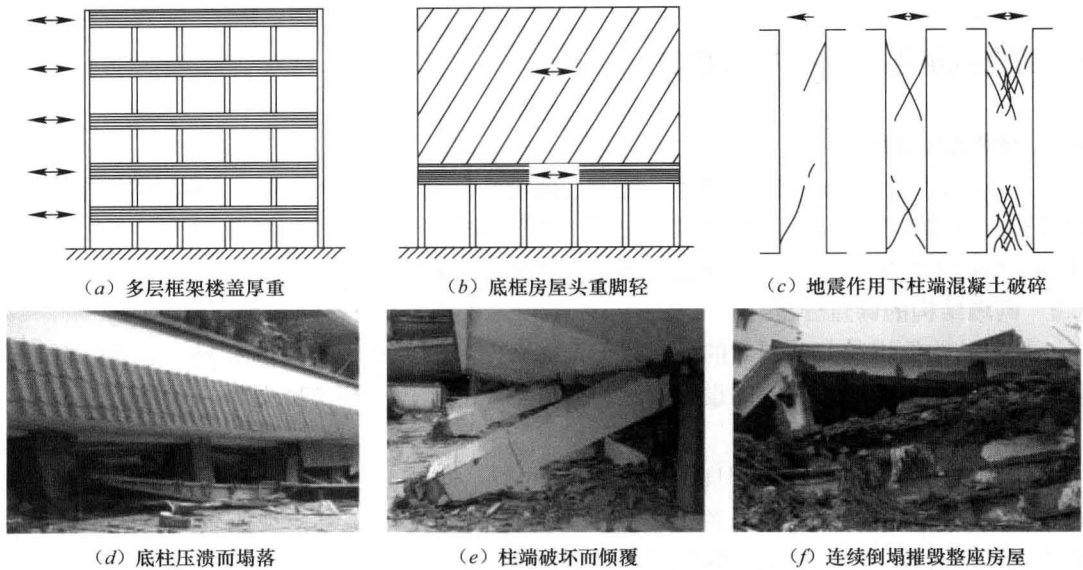


图1 现浇混凝土框架结构的倒塌及原因

要备途径——保持多条传力途径、重要-关键部位增加备用的传力途径。

四忌：

忌头重脚轻——减轻结构上部自重、避免高处重载、采用轻型屋盖。

忌奇形怪状——避免外形奇形怪状、立面不要凹凸曲折、平面减少蜂腰瓶颈。

忌间接传力——传力路线不应曲折、避免间接传力、构件内力分配明确。

忌材料脆性——重要-关键部位不用脆性材料（砌体、素混凝土）、脆性材料须围箍约束。

四强：

应强脚柔腰——加强结构底部构件（柱、墙）、增强竖向构件的变形性能（延性）。

应强柱弱梁——相对加强结构中立柱的承载力、相对减弱横梁的承载力、引导延性破坏。

应强墙轻板——相对加强结构中墙体的承载力、减轻楼层板的自重（空心楼板）。

应强化边角——相对加强结构中边-角部位的构件、避免缺少约束引起的破坏。

四宜：

宜连接可靠——构件间的连接和钢筋锚固能够靠传力、保证装配节点的整体性能。

宜围箍约束——杆件截面（特别是端部）受到箍筋约束、面状构件有周边构件围箍。

宜贯通配筋——水平的楼盖和竖向的柱墙宜作连续-通长的配筋、以保证结构的整体性。

宜以柔克刚——采用柔性材料、考虑构件的延性设计、增加结构的变形-耗能能力。

（4）防连续倒塌设计的内容：

防倒塌设计由于不确定性因素多，设计难度大，而且耗费巨大，因此普通结构可以按一定原则采用概念设计的方式解决。特别重要的结构可作防连续倒塌的定量设计。这里的“防连续倒塌”是因为在偶然作用下，结构达到“抗”倒塌不现实而只能做到“防”；而且

局部倒塌往往难以避免，只要控制倒塌范围，不发生连续的蔓延就可以了。这属于整体稳固性的概念。

4 结构防连续倒塌的概念设计

结构防连续倒塌概念设计的某些内容，实际已经超出了“结构”的范畴，但是由于其在防连续倒塌中的重要作用，仍作简单的介绍。概念设计的内容可用以下七个字表达。

(1) 避——选址规避；

大自然的力量不可抗拒，人类应该敬畏自然。不要企图抵抗大自然的力量，现实的考虑只能是采取“回避”的态度。结构选址应避开地震断裂带、泄洪通道、大风口、地质灾害（泥石流、塌方、滑坡、滚石等）的影响区域……，以躲避大自然不可抗拒的威力。避让原则——这是避免灾害最现实的有效办法。

(2) 泄——作用宣泄；

针对偶然作用的特点，采取有效的办法宣泄其巨大的能量，可以减小作用在结构中的效应。例如，在行洪区建立只有柱而没有墙的“避水楼”，就可以大大减小洪水的冲击。同样，以开敞式建筑可以减小台风的作用；采用轻质隔断的框架房屋可以保护结构避免爆炸的冲击力；厚实墙体加薄钢板屋盖的军火库可以宣泄爆炸的强大瞬间压力……，这些都是宣泄偶然作用的最好设计范例。

(3) 隔——隔离防护；

在重要建筑的外围设置防撞桩、沟壑；在结构的底部布置裙房……，都可以有效阻滞恐怖攻击、防止汽车炸弹接近。用结构缝分割房屋还可以控制连续倒塌蔓延的范围；设置隔震垫以减小地震作用；布置隔离层、防火墙可以阻绝火势蔓延……。这类措施都能够将偶然作用的效应控制在一定范围之内，避免发生多米诺骨牌效应式的连续倒塌。

(4) 备——备用途径；

在结构容易受到攻击的部位和局部塌垮可能引起蔓延的区域，设置备用的传力途径，是防止发生连续倒塌的有效措施。例如，增加结构体系的冗余约束；在教学楼横梁的走廊外侧增设立柱；在框架底层增设交叉斜杆作备用的传力构件；在悬臂构件上增设拉杆或斜撑等。当结构万一发生局部破坏时，这些备用的传力构件就能够形成新的传力途径，从而使结构体系不致发生连续倒塌。

(5) 强——强化保护；

考虑偶然作用可能引起的非常规效应，通过设计手段加强关键构件、重要传力部位、薄弱区域（例如，侧边-底部的墙或柱、生命线及逃生通道等）的抗打击能力，甚至按直接承受偶然作用进行设计。由于只是加强结构有限的局部区域，以不大的代价即可保护结构的整体稳固性，增强其防连续倒塌性能，提升安全能力。

(6) 柔——柔性耗能；

偶然作用往往只是瞬时的局部作用，如果结构具有较好的柔性（变形和耗能能力），则只需挺过这短暂的打击，就能保证不至于倒塌。为此，采用柔性的结构材料（热轧钢材、围箍约束混凝土等）；在关键的受力区域避免使用脆性材料（砌体、冷加工钢筋等）；控制结构的体型、刚度而提高其变形能力（整体的柔性）以及破坏所需的能量……。则这

种柔性较好的结构就可能经受住打击而不容易倒塌。

(7) 躲——躲藏待援；

在房屋的特定部位建立用于避难的“安全区”。除强化结构抗打击的安全设计以外，贮存必要的生存条件（食物、饮水、药品等）。以便万一在结构倒塌的灾难发生时，来不及撤离的人员能够在“避难室”中坚守待援，直至获救。

通过大量调查分析而得出的上述概念设计的原则，对结构的防倒塌设计十分有效。其对安全的重要性远高于一般构件的配筋设计，结构设计人员应该谨记。

5 防连续倒塌的定量设计

混凝土结构设计规范修订曾提出过定量设计的丰富内容，但经慎重考虑仅表达其基本原则，并简介其中三种设计方法。另外再编制推荐标准《结构防连续倒塌设计规程》作专门介绍。当然结构防连续倒塌设计的内容也有继续完善的过程，还具有很大的发展余地。

5.1 定量设计方法

(1) 局部加强法：

加强部位：多条传力途径交汇的关键受力部位；去除后可能引发倒塌蔓延的重要构件；结构侧边-底部的竖向构件柱、墙；失效后会严重影响结构整体稳固性和使用功能的构件。

设计方法：进行局部的强化设计；提高其安全储备（强度）和变形能力（延性）；考虑直接承受偶然作用打击进行设计；用较小代价提高局部抗力而加强了结构的整体稳固性。

(2) 拉结构件法：

考虑结构体系中竖向构件（立柱、墙体等）倒塌失效而退出承载后，梁、板等水平构件跨度改变，按新的计算简图和传力途径进行设计。通过通长水平纵向受力钢筋的有效连接、锚固和拉结受力；形成以梁-拉结模型、悬索-拉结模型、悬臂-拉结模型的计算简图而继续承载受力，从而避免发生结构体系连续倒塌。

图2为汶川地震中未倒塌结构的拉结受力状态及结构防倒塌设计的拉结受力模型。

(3) 拆除构件法：

在偶然作用下，按一定规则拆除结构体系中某区域的主要受力构件（模拟局部垮塌），依靠结构的剩余部分仍能继续承载，从而避免发生连续倒塌。采用非线性全过程动力分析或考虑动力放大系数及内力折减系数的弹性静力分析方法进行防连续倒塌设计，可以验算剩余结构的极限承载能力，亦即结构的防连续倒塌的潜力。

5.2 防倒塌验算原则

(1) 作用效应：

防连续倒塌设计应该按偶然作用的组合计算作用于结构的效应（内力），此时尚应考虑相应结构倒塌部位冲击引起动力系数的影响。

(2) 抗力函数：

防连续倒塌设计应考虑偶然作用造成局部破坏（构件断裂、倒塌等）后，对结构体系计算简图的改变；以及倒塌对结构几何参数变化（倾斜、偏心、削弱等）的影响。

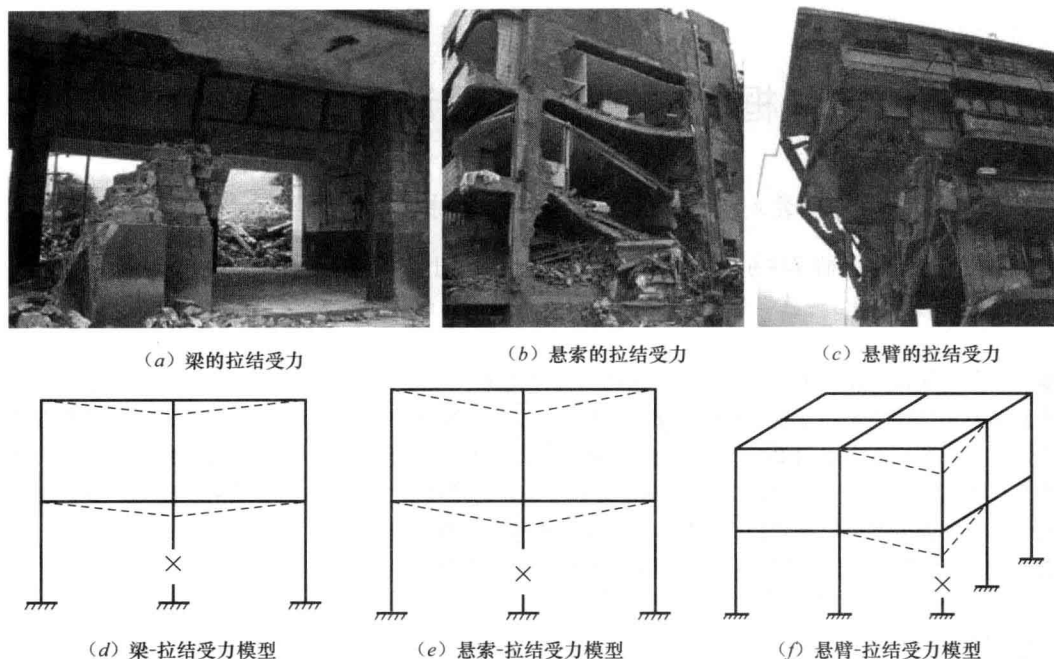


图2 拉结构件法的防倒塌设计模型

(3) 材料强度：

根据构件断裂、结构倒塌的实际情况，考虑发挥混凝土的强度和延性钢筋拉断前的变形（耗能潜力），取混凝土强度的标准值以及钢筋抗拉极限强度（而非屈服强度）的标准值进行计算。必要时还可以考虑偶然作用下的动力特性对材料强化（强度提高）和脆性（极限应变减小）的影响，取相应的强度特征值进行计算。

6 结束语

混凝土结构防倒塌设计是近年迅速发展的热门课题，已成为结构学科的重要方面。本次混凝土结构设计规范修订曾进行过大量工作，最终只简单介绍了设计的基本原则。具体设计方法将由专门的防倒塌设计规程解决。在此提出几点建议：

(1) 鉴于“结构倒塌”与“构件强度”设计方法有本质不同且对结构安全的影响属于更高的层次，《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001 应将其单独列为“连续倒塌极限状态”表达。

(2) 为结构安全计，应大力加强对“结构防倒塌”的研究，包括事故和灾害中倒塌结构的调查；偶然作用的研究；结构的后期加载（倒塌）试验；倒塌模型及模拟计算等。

(3) 协调相关的研究，避免低水平重复。成立专门组织，统一进行系统的试验及研究。及时编制相应的推荐性标准规范，并依靠科研和实践的积累而逐步完善。

以上为个人不成熟的意见，仅供参考。不足之处敬请批评指正。

典型单跨 RC 框架减震加固设计及抗倒塌性能研究

裘赵云¹ 李爱群¹ 缪志伟¹ 苏毅²

(1 东南大学土木工程学院东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096

2 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037)

摘要:单跨框架作为既有中小学教学楼常用的一种结构体系, 由于超静定次数较低, 缺乏冗余约束, 因而容易导致建筑物在大震下发生整体倒塌。《建筑抗震鉴定标准》GB 50023—2009 已明确一些重点设防类建筑(如学校)不应采用单跨框架结构。为此, 介绍了使用防倒塌柱和黏滞阻尼器相结合的教学楼加固方案, 然后基于 IDA 的结构抗倒塌易损性分析方法, 定量评价了结构的抗地震倒塌能力, 分析结果表明这一减震加固方案可以有效提高结构在特大地震作用下抗倒塌的能力。

关键词:单跨框架; 黏滞阻尼器; 抗倒塌能力; 增量动力分析

1 引言

强震作用下结构的抗倒塌性能对于结构的安全性具有极为重要的意义。近年来我国发生的汶川地震和青海玉树地震中, 不少地震区遭遇烈度远超设防烈度, 导致大量建筑倒塌破坏, 特别是大量中小学建筑的倒塌造成了重大人员伤亡。因此, 汶川地震后, 特大地震下校舍建筑抗倒塌能力引起工程抗震领域的高度重视。

我国既有的中小学教学楼由于需要良好的采光条件和较大的空间, 再加上经济条件限制, 较多采用单跨框架体系^[1]。单跨框架结构超静定次数较少、冗余度低, 只要少数柱破坏就会导致整体倒塌, 是严重抗震不利体系。2008 年汶川特大地震中, 外廊式单跨框架震害严重^[2], 因此我国《建筑抗震鉴定标准》GB 50023—2009^[3]第 6.2.1 条第二款规定: 框架结构不宜为单跨框架; 《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010^[4]的 6.1.5 条也规定, “乙类建筑不应采用单跨框架”。2008 年以前的中小学教学楼建筑中, 较多采用了单跨 RC 框架结构体系, 为此有必要对此类结构进行抗震加固。

本文以某小学典型单跨框架教学楼减震加固为例, 介绍了使用防倒塌柱和黏滞阻尼器的相结合的教学楼减震加固方案, 然后基于 IDA 的结构抗倒塌易损性分析方法, 以强震下结构的倒塌率作为评价指标, 研究这种减震加固措施对单跨框架地震倒塌能力的影响, 供工程设计参考。

2 工程概况

该教学楼建于 2001 年, 7 度设防, II 类场地土。结构平面图如图 1 所示。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51008078)。

作者简介: 裘赵云(1989—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生。E-mail: antique2012@gmail.com。