

裴强,郭航,丁彧. 2022. 国内外抗连续倒塌设计规范研究及对比[J]. 地震研究, 45(1): 26–35, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0004.

Pei Q, Guo H, Ding Y. 2022. Research and comparison of domestic and foreign design codes for the resistance to progressive collapse [J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 26–35, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0004.

国内外抗连续倒塌设计规范研究及对比*

裴 强, 郭 航, 丁 彧

(大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 结构的连续性倒塌一直是土木工程领域关注的焦点, 现阶段各个国家关于连续倒塌的规范在设计方法以及具体规定上均有所差异。回顾了抗连续倒塌研究的发展历史, 梳理了国内外抗连续倒塌设计规范中的不同规定, 对国内外抗连续倒塌规范的设计方法进行了归纳总结, 比较了各国规范安全等级划分方式以及验算时荷载组合的异同, 并对破坏发生范围的界定做了详细对比, 为将来形成统一的规范提供一定参考。

关键词: 建筑结构; 抗连续倒塌; 倒塌设计规范; 荷载组合

中图分类号: P315.922 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)01-0026-10
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0004

0 引言

各国结构设计规范形成之初, 抗连续倒塌的问题并没有引起工程师们的足够重视, 规范存在设计步骤流程不够完善、大多仅凭借工程实际经验进行设计等问题。虽然超设计基准地震发生的概率极低, 但是一旦发生并引起结构的连续倒塌, 将造成巨大损失。国内外多起典型连续倒塌事故的发生, 不仅给社会带来了极为严重的影响, 也给整个工程界敲响警钟。建筑结构的抗震性能是抗震防灾系统中首要的环节, 其中抗倒塌能力是抗震性能的表现指标, 其强弱对结构的稳定性起到了决定性的作用(李奉阁, 杨晓健, 2016)。

近年来, 工程上对建(构)筑物的安全性要求越来越高。对连续倒塌也有了明确定义: 建筑物在规定的使用年限中, 可能会遭受到偶然荷载作用, 倘若设计过程中没有充分考虑该作用, 结构便可能出现局部边界条件破坏从而引起内力发生变化, 如果结构其它部分无法承担因为局部破坏增加的内力则会发生连续性破坏, 最终导致建

筑物全部倒塌。结构的连续倒塌有两个特点: 一是局部开始的连锁反应, 二是最终破坏程度与初始破坏不成比例(Starossek, 2007)。

对此, 近50年来国内外工程界发行了多个抗连续倒塌相关规范。然而, 各规范所使用的设计方法有所不同, 安全等级划分方式以及对应的设计要求有所差异, 验算时采用的等效静荷载组合也存在差别。现阶段我国核电厂的抗倒塌设计仅参考国家现行有关抗震规范, 仅对与核安全密切相关的Ⅰ类物项额外进行极限安全地震动的抗震设计, 对于此类重要结构在强震乃至超设计基准地震作用下能否保证其安全性, 还有待考究。因此, 总结并梳理各国抗连续倒塌研究的方法对于在实际工程中确定结构的重要性, 针对不同结构提出不同的设计方法和保护方式具有重要的现实意义。本文主要从抗连续倒塌研究的发展历史、各国不同规范中安全等级的划分与对应设计要求的比较、验算时等效静荷载组合的异同以及界定的连续倒塌时的破坏范围差异等方面对各国抗连续倒塌设计规范进行梳理归纳, 为现阶段国内工程以及将来全面而统一的规范的形成提供一定的参考。

* 收稿日期: 2021-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878108、52032011)、辽宁省重点研发计划指导计划项目(2019JH8/10100091)和辽宁省教育厅科学研究面上项目(LJKZ1177)联合资助。

第一作者简介: 裴 强(1974-), 教授, 主要从事结构抗震研究. E-mail: pqiem@163.com.

1 抗连续倒塌研究发展简史

在抗连续倒塌研究的发展过程中,结构抗连续倒塌研究与重大连续倒塌案例息息相关,对抗连续倒塌设计方法的建立影响重大。伴随着这些事故的发生,各国开始深入研究,与抗连续倒塌相关的技术标准也在不断革新。可以说正是这些典型倒塌案例为结构连续倒塌研究提供了丰富的一手资料(陆新征等,2011)。

1968年5月6日英国 Ronan Point 公寓(22层装配式结构)因18层转角处某间房屋煤气泄露发生爆炸,冲击力破坏了邻近的外墙墙板和楼板,致使整栋大楼发生连续倒塌。后续调查发现,当时煤气爆炸的冲击荷载并不是很大,但是却引发了严重的后果。究其原因,主要是因为大楼在进行结构设计时并未全面考虑偶然荷载的作用,而预制装配体系的整体性较差,18层转角处发生爆炸后邻近构件发生破坏,整个体系未能形成新的荷载传递路径,导致建筑物的边角处发生连续倒塌。学者们开始意识到初始发生在局部的破坏有可能导致整个结构大范围破坏。这次事件的发生引起了国内外工程界的广泛关注与重视,促进了连续倒塌相关理论研究的开展,并推动了相关规范的修改编纂(李全旺,张望喜,2020)。英国研究人员开始重视结构连续倒塌的问题,并对现有规范做了相应的修正,1970年在建筑规程中最早出台了抗连续倒塌的相关规定(MCGUIRE, 1974);1972年出版的美国国家标准学会(ANSI) A58.1标准中也加入了连续倒塌控制的相关规定;《美国混凝土结构设计规范》(简称ACI规范)(ACI 318M-89, 1989)指出,结构应具有一定的整体性来提高抗连续倒塌的能力;欧洲的设计规范也紧随其后进行了调整。

1995年,美国 Alfred P. Murrah 联邦政府大楼(钢筋混凝土结构)发生爆炸倒塌事故。恐怖分子在距大厦4.75 m处引爆炸药,底层柱子首先被炸断,接着上面的转换梁发生断裂导致转换梁上的柱子失效,最终这栋9层大楼在竖直方向发生连续倒塌。这次事故致使100多人死亡,800多人受伤,造成了巨大的经济损失以及社会恐慌。因此美国在建筑规范中完善了有关抗连续倒塌的相关条文,并于1999年实行了ATFP标准(DoD 暂行

标准),2000年又在《结构抗连续倒塌备用荷载路径法分析及设计指南》中推出防连续倒塌标准。

2001年“9·11”事件发生前,美国世贸中心双塔大厦是世界上最高的建筑,属于筒中筒的结构体系。设计师在结构设计时已经考虑了强风以及飞机撞击等偶然荷载。但是恐怖袭击的飞机发生燃烧时,结构主要受力的钢构件过热发生软化,致使结构顶部承载力不足,最终引起整个大楼体系发生连续倒塌。这次事故再次给工程界一个警示,使得美国对现行设计标准进行了一定优化,美国公共事务管理局编制的《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)和美国国防部编制的《建筑抗连续倒塌设计》(DoD. UFC 4-023-03, 2005)对结构抗连续性倒塌的设计方法及具体过程作了较详细的介绍。

我国也多次发生类似的连续倒塌事故。1990年辽宁盘锦发生的天然气爆炸事故导致5层砖混房屋发生连续倒塌;2001年河北石家庄棉纺织厂宿舍发生局部爆炸最终导致整个楼房坍塌;2012年浙江宁波一栋6层公寓由于长期被雨水浸泡,结构的承重柱局部承载力降低,引起整体的连续倒塌。与国外相比,我国在抗连续倒塌规范以及体系方面虽然建立得晚一些,但一直处于不断完善与发展中,针对连续倒塌问题进行分析研究,取得了大量的研究成果。《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)等规范中均提出对结构抗连续倒塌设计的要求,并于2021年颁布了针对抗连续倒塌的最新设计规范《建筑结构抗倒塌设计标准》(CECS 392: 2020),规定了具体的设计方法及措施。

2 规范中设计方法的发展及对比

上述规范主要是从结构与构件两个层次进行研究,结构层次主要考虑的是结构体系在连续倒塌过程中是否具备足够的整体冗余度和鲁棒性,以避免可能出现的连续失效机制;构件层次则主要考虑各类节点及梁柱构件在连续倒塌过程中的内力发展变化及破坏模式等(潘珠峰等,2020)。

2.1 英国相关规范

2.1.1 英国《建筑规范》

1976 年英国首次在《建筑规范》中做了基本规定：在遭遇偶然荷载时结构不应出现大规模且范围与初始破坏不成比例的倒塌。2010 年英国修改了原本的规范条令，并编写了新的规范——The Building Regulations 2010 - Approved Document A: Structure (2013)。英国政府根据《建筑法》将此条例制定为法律条令，这是英国建筑行业的第一个关卡，规定了英国政府在建设工程管理方面的职责，以及可适当放宽执行条件的情况等有关规定，此文件具有比较普遍的约束性和使用范围。Approved Document A（结构部分）规范给出的 3 种设计方法为拉接强度设计法、构件跨越能力设计法和关键构件设计法。

英国在规范出台以后的 40 多年中，一系列建筑物遭受突发事件时结构物表现出的抗倒塌性能足以体现出该部准则的有效性。

2.1.2 英国《混凝土规范》（简称 BS 8110 规范）

英国在《混凝土规范》（Structural Use of Concrete, BS 8110 - 1: 1997）中最先提出了拉结构件法，并对该方法做了详细规定。该规范将结构在极限状态下发生破坏时结构模式假定为“悬链线模式”（图 1），即发生大变形时，由于竖向构件失效无法承担原有承载力，所以框架梁所需承担的力由梁内纵筋产生的轴向力在竖直方向的分力来承担，从而有效防止了该层构件发生破坏掉落。规范还给出了不同拉结类型所对应的拉结强度及拉结位置。同时也规定了保证结构抗连续倒塌的设计流程，提出鲁棒性的概念，用于衡量建筑物的抗连续倒塌能力的强弱。该规范介绍了提高结构性能的 5 个设计方法：①拉结强度设计法；②关键构件设计法以及拆除构件设计法；③检验结构的整体性的方法；④进行结构水平拉结设计；⑤设置防护措施。

其中方法①和②是在英国《建筑规范》基础上对构造和设计更为详细的规定，其余是此规范区别于英国《建筑规范》的附加内容。该规范对建筑结构的内部做了规定，主要通过提高结构本身承担荷载的能力、加强构件的延性及构件与构件相互的拉接来增强建筑结构的抗连续倒塌性能。

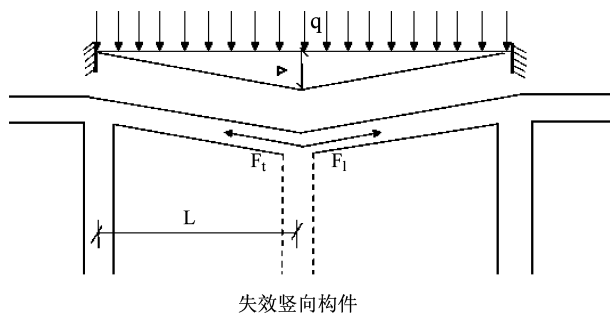


图 1 英国《混凝土规范》（BS 8110 - 1: 1997）
拉结机制

Fig. 1 The tying mechanism of British Structural Use of Concrete (BS 8110 - 1: 1997)

2.2 欧洲 Eurocode 1/2 规范

1991 年欧洲出台 Eurocode 1: Actions on Structures - part 1.7: General Actions - Accidental Actions (EN 1991 - 1 - 7)，此规范从意外和人为因素两个方面定义了偶然荷载，并规定在遭遇偶然荷载时，结构必须具有足够的抵抗能力。规范对拉结构件法也做了详细规定，在计算公式以及模型上基本沿用了英国 BS 8110 规范的方法，仅在荷载取值上有略微不同。针对具体意外事件，规范提出 3 种方式进行设计：①从源头控制，减少偶然事件发生的概率；②采取有效措施，在偶然事件发生时尽可能减小结构的破坏；③提高结构的稳定性，在偶然事件发生时增强结构的抵御能力。规范还对撞击和爆炸等偶然事件作用做了详细的规定。

1998 年欧洲针对 Eurocode 1 规范（EN 1991 - 1 - 7）做了修改与补充，出版了新版规范 Eurocode 2: Design of Concrete Structures European Standard (EN 1998 - 3: 2005)，该版规范主要对前一版中的拉结构件法做了补充说明，提出了结构构造的具体内容如受拉钢筋锚入长度等。该规范从两个方面对结构抗连续倒塌进行设计：①考虑意外荷载的具体作用；②仅研究结构自身的抗连续倒塌性能。该规范主要是通过设计要求来减少由于突发事件导致建筑物损伤的概率。

2.3 美国相关规范

2.3.1 美国混凝土协会《美国混凝土结构设计规范》（简称 ACI 318 规范）

美国混凝土协会在 1989 年编订的 ACI 318 规范中就有关于结构整体性的规定，并在此后的 30

多年里不断地更新修正。2002年出版的ACI 318规范(ACI 318M-02)仅提供了一定的措施用以改善结构延性从而提高建筑物整体性,没有给出具体的设计方法。该规范指出:为提高结构的整体性,构件的设计应满足结构构件之间的拉接要求。2008年修订的ACI规范(ACI 318M-08)第7.13条说明中指出“应增强结构的冗余度和延性,当任意关键构件受到破坏或是承受非正常荷载时,都能将其造成的破坏控制在一定范围内。”为将结构更好地拉结,规范对钢筋的细部构造进行了基本规定。2011版规范(ACI 318M-11)对旧版规范进行了补充说明,针对概念设计法进行了详细介绍。

2.3.2 美国公共事务管理局《结构抗连续倒塌备用荷载路径法分析及设计指南》(简称GSA指南)

2000年美国出版了第一部主要针对建筑物抗连续倒塌设计的指南,也是第一部抗连续倒塌设计标准。2003年出版的GSA指南(GSA 2003)里提供了一个判断建筑物可否免于进行抗连续倒塌分析的分析流程。该流程考虑了建筑物的用途、使用年限、结构材料、结构构造等多方面的因素,如果判定建筑的倒塌风险为“低”,则可免除进一步的分析,否则将采用拆除构件法对结构的抗连续倒塌能力进行评估(梁益等,2007)。

2013年出版的GSA指南(GSA 2013)较之前版本有了较大的变化,强调了拆除构件法概念,并对操作流程和分析方法进行详细说明。指南详细介绍了线弹性分析及非线性分析方法使用范围,并给出不同破坏准则的判别方法。通过是否考虑动力效应将分析方法划分为静力分析与动力分析。

2016年出版的GSA指南(GSA 2016)又进行了更新,在2013版的基础上删除了关于拉结强度法的相关内容,并删除了不同材料增强局部抗力法的内容,对整体内容进行了调整,还给出一些提高新建结构抗连续倒塌能力的概念性措施,在附录中给出了初始设计的基本流程。

2.3.3 美国国防部《建筑抗连续倒塌设计》(简称DoD规范)

1999年美国国防部发布了《建筑抗连续倒塌设计》的暂行ATFP标准。该规范设立的目标是提高国防设施的安全性,尽可能减少由于突发事件

造成设施发生连续倒塌事故,是一部抗连续倒塌设计专业规范。2001年经过修正与补充,发布了DoD关于防止连续倒塌的ITC标准。

2005版DoD规范(DoD. UFC 4-023-03, 2005)沿用了英国BS 8110规范有关拉结构件法的设计方法,对拆除构件法也进行了详细介绍,提出了具体设计方法。此规范比GSA指南在连续倒塌的设计方面的要求更为严格,对已建建筑物均需要进行风险评估和抗倒塌能力分析,而对新建的建筑物还要额外考虑抗连续倒塌设计。

2009版DoD规范(DoD. UFC 4-023-03, 2009)对2005版规范进行了全面更新,包括全称的变化。该规范新增了如钢梁柱连接及考虑结构的惯性效应、非线性和材料因素的情况;对线性静力、非线性静力以及动力分析提出更完善明确的要求;对拆除构件法的要求更加细化;根据具体的结构类型、功能以及位置等提出不同的设计方法。

2010版DoD规范(DoD. UFC 4-023-03, 2010)在2009版基础上额外采用了拉结强度法,并在拉结强度的要求部分对英国规范做了一定的修正。此版中对拆除构件法的规定大部分遵从GSA指南的相关要求,但一些部分的要求更加严格。

2013版DoD规范(DoD. UFC 4-023-03, 2013)内容比2010版更加丰富,包括钢结构、混凝土结构、砌体结构、木结构以及冷弯薄壁型钢结构相关的抗连续倒塌设计。规范采用了新的拉结强度法(图2),认为在发生大变形时楼板能够发挥薄膜或悬链线作用,提供水平拉结力,局部破坏区域的竖向荷载通过楼板的作用传递至结构完好区域,从而避免结构发生连续倒塌。规范针对结构的外部墙边柱以及转角柱采用增强局部抗力法来强化设计,限制了水平拉结的分布位置,并具体要求了拉结的连续性以及如何进行锚固、搭接。

2016年,美国DoD规范又一次进行了更新,增加了“入住率”这一风险类别,并增加了对屈服设计的相关建议,形成了最新标准(DoD. UFC 4-023-03, 2016)。DoD规范是目前美国已出版的标准中最新、最全面的设计标准。

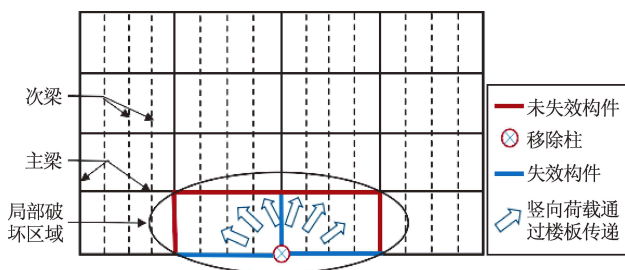


图2 美国 DoD 规范 (DoD. UFC 4-023-03, 2016)
标准拉结机制

Fig. 2 The standard tying mechanism of American
DoD2016 (DoD, UFC 4-023-03, 2016)

2.3.4 美国土木工程学会《美国建筑荷载规范》 (简称 ASCE/SEI 7 标准)

美国土木工程学会在《美国建筑荷载规范》(ASCE/SEI 7-05) 中对连续倒塌概念做了定义: 结构在使用阶段因意外事件致使结构发生局部破坏, 最终造成结构发生整体性垮塌或与初始破坏不相符的过大破坏。2010 年版 ASCE/SEI 7 规范 (ASCE/SEI 7-10) 在 1.4 节指出对于许多大型场馆, 或者用以保护公共安全及失效时会对经济产生重大影响类型的建筑, 应额外采取有效措施限制倒塌的发生。2016 年版 ASCE/SEI 7 规范 (ASCE/SEI 7-16) 在注释中包含有关于减小连续倒塌存在风险的论述, 但没有提供具体分析以及实施办法, 仅提出了设计建议。

2.4 加拿大《国家建筑规范》(简称 NBCC 规范)

1975 年加拿大颁布首部建筑规范 NBCC 规范 (Canada - NBCC. NRCC 56190), 该规范从建筑结构的强度和完整性入手, 规定结构应具备足够的强度和完整性防止意外荷载, 避免发生连续倒塌。1977 年加拿大参考英国相关规范对该规范进行了修订, 规定在建筑结构设计阶段就要考虑到偶然荷载作用的情况, 降低发生连续倒塌的概率。1995 年加拿大再次对该规范进行修订, 规定结构构件的设计应有足够的能力防止局部倒塌的扩散, 可以抵抗偶然荷载。

2.5 日本《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》

《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》主要利用概念设计法, 提出了评估多高层及大跨空间钢结构冗余度的详细措施和加强结构冗余度的方法, 主要有 2 种方法提高冗余度: ①当发生倒塌时结构

能够提供一个承载能力较强且安全的逃生区域, ②尽可能多地设置竖向构件以承受竖向荷载, 当其中一部分构件失效后结构会进行荷载的重分布, 阻止连续倒塌发生 (日本钢结构协会, 美国高层建筑和城市住宅理事会, 2007)。该指南对于连续倒塌的评估提出 3 种评价方法: 柱轴压比分析法、简单分析法和详细分析法, 同时做了二维和三维模型的对比分析。

2.6 中国相关规范

2.6.1 《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)

此规范在 3.1 节中提出了防御连续倒塌的基本要求: 当发生爆炸、撞击、人为错误等偶然事件时, 结构能保持必需的整体稳固性, 不出现与起因不相称的破坏后果, 并指出应采取有效的措施避免结构的连续倒塌。

2.6.2 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)

此规范有关于“抗连续倒塌设计原则”的规定。在 3.6 节中提出对混凝土结构进行“为避免偶然作用而加强结构关键部分的冗余度”的概念设计, 并对重要结构提出了包括拉结构件设计法、局部加强设计法和拆除构件设计法在内的抗连续倒塌设计方法, 但规范仅进行了简单介绍, 并没有给出具体的操作方法。

2.6.3 《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)

此规程参考美国《建筑抗连续倒塌设计》(DoD. UFC 4-023-03, 2005), 详细规定了概念设计法、拆除构件法 (弹性静力分析方法) 和关键构件法的适用范围及具体流程, 并给出荷载组合效应设计值计算方法。

2.6.4 《建筑结构抗倒塌设计标准》(CECS 392: 2020)

我国针对抗连续倒塌制订的首部规范为《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392: 2014)。该规范包括建筑结构倒塌案例、最新研究、实际操作、现行国家有关规定以及工程实际中可能会出现但现行国家标准缺少的建筑结构抗倒塌设计具体内容。在房屋建筑抵御连续倒塌、地震、火灾以及建造时加固、改造现有结构时防倒塌等方面

提出了具体设计方法及措施。其发行拓展了原有规定,对建筑结构抗倒塌设计规定了具体的设计方法,但此方法仍具有一定的局限性(李奉阁等,2017),很多研究并不够深入,于是专家学者对该规范做了进一步修改。

2020年将规范更名为《建筑结构抗倒塌设计标准》(CECS 392:2020),这是我国迄今为止最新、最全面的抗连续倒塌规范标准。在内容上对2014版进行了完善和更新,2014版只考虑构件失效后整体结构后续破坏过程,没有具体考虑构件失效的原因,在2020年版中除了考虑“灾害无关型”问题外,还考虑了“灾害相关型”连续倒塌问题。在第三章“基本规定”中将影响建筑结构整体稳固性的偶然作用类型进行划分,并进一步明确在具体设计中如何选取合适的方法进行分析计算。第四章“建筑结构抗连续倒塌设计”中新增加了性能目标和设计方法适用范围的说明,在概念设计部分中增加了高风险区域钢筋混凝土结构以及高层装配整体式混凝土构造措施相关内容,并提出在采用非线性静力及动力方法进行抗倒塌计算时,如何采用剩余结构的变形及破坏参数作为倒塌判定准则。第五章更明确了抗地震倒塌设计的使用范围,增加了极罕遇地震的情况,同时对抗地震倒塌计算方法进行了详细梳理。第六章对“房屋建筑抗火灾倒塌设计”的设计方法进行了修改,删除了简化构件法,提出在升温与降温时要对节点承载力进行计算。在原有章节基础上新增了第七章“建筑结构抗爆炸连续倒塌设计”。

2.6.5 《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)

此规范要求突发事件发生后的一定设计年限内,结构可以保持整体稳定性。偶然情况下结构局部发生破坏,剩余部分应当有一定的可靠度,以确保在一定时间内不会发生连续倒塌。

2.7 小结

各国规范对抗连续倒塌的设计重点有所不同,英国及欧洲规范在进行抗连续倒塌设计时偏重于使用关键构件法和拉结构件法;美国规范针对拆除构件法在原有的基础上进行了进一步研究,给出抗连续倒塌设计时具体的研究方法和基本流程;加拿大规范要求建筑结构应具有一定的强度和完

整性,从而抵御连续倒塌的发生;日本规范重点对大跨钢结构提出抗连续倒塌设计要求。相比于其它国家的规范,我国首部针对结构抗连续倒塌编写的规范《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392:2014)给出了关于结构抗连续倒塌设计最详尽的规定。

3 规范中安全等级划分与对应设计要求对比

考虑到经济等因素,大部分规范按使用类别和结构特点将建筑物划分为不同安全等级,采用分级的方式对建筑采用相应的设计方法进行设计建造。由于各规范的设计方法及对应的设计目标不同,所以在安全等级的划分及设计要求方面的规定也有差异,下面就相关规范中安全等级划分与对应的设计要求进行比较。

3.1 英国《建筑规范》、英国 BS 8110 规范、欧洲 Eurocode1 规范

《建筑规范》结构部分(Assessed Document A)第五章规定了如何降低建筑物因偶然作用造成连续倒塌的风险,将建筑物安全等级按使用功能和容纳率分为1级、2a级、2b级和3级,并详细区划了每个等级的建筑类型。

对应不同安全等级规定了不同的设计方法:
① 1级建筑仅按照批准文件中规定的规则进行设计和建造即可;
② 2a级建筑,应额外提供有效的水平拉结;
③ 2b级建筑,除了要满足以上设计外,还要提供有效的竖向拉结。提出采用“拆除构件法”检验在拆除不同的构件后建筑的垮塌区域面积,并确定结构“关键构件”,有针对性设计与加强;
④ 3级建筑应对结构及其组成部分进行详细设计,考虑所有可预见的危险,并对建筑物进行系统风险评估。

英国 BS 8110 规范及欧洲 Eurocode1 规范在安全等级的划分上与《建筑规范》一致,仅在个别建筑物的面积以及容纳人数的划分上有细微差别。

3.2 美国国防部《建筑抗连续倒塌设计》(DoD. UFC 4-023-03)

该规范与英国 BS 8110 规范相似,将建筑分为 I、II、III 和 IV 等 4 个安全等级,并对不同等级

做出具体设计要求: ① I 级建筑正常设计即可; ② II 级建筑可以进行拉结设计, 增强首层角柱和边柱, 或选取“关键构件”进行设计, 当构件在竖直方向比较薄弱时需采用拆除构件法进行分析; ③ III 级建筑除了要对拉结强度进行设计并使用拆除构件法分析, 还要将底层外围所有柱、墙选取为关键构件进行设计; ④ IV 级建筑在 III 级建筑的基础上, 还需对底部两层所有外围柱、墙进行关键构件设计。此规范仅给出了不同安全等级所对应的设计方法, 但未给出每个安全等级的结构具体类型。

3.3 中国《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)

该规范建议根据结构一旦发生破坏对人类、社会、经济和环境产生影响的严重性, 分别采用一级、二级、三级的安全等级进行设计, 对应的破坏后果分别为很严重、严重和不严重。

该规范仅是通过结构破坏后果严重程度简单划分了结构的安全等级, 并没有详细列出建筑类别以及使用类型。规范在“注释”中指出, 不管是哪一安全等级的结构, 均要依据结构整体稳固性设计原则对结构整体稳固性进行概念设计以及构造处理, 不同安全等级所对应的处理方法有一定差别: ① 三级结构只进行概念设计和构造处理即可; ② 二级结构除概念设计以及必要的构造处理以外, 还额外采用线性静力方法进行计算; ③ 一级结构对结构整体的稳固性要求较高, 除进行概念设计和构造处理以外还要进行复杂程度不低于线性静力方法的计算, 并在适当时候采用非线性静力或动力方法进行计算。

3.4 中国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)

该规范将建筑按抗震等级分为特一、一、二、三、四级, 并指出, 安全等级为一级及以上的高层建筑结构需进行概念设计, 必要时可以采用拆除构件法进行设计。

3.5 中国《建筑结构抗倒塌设计标准》(CECS 392: 2020)

该规范在第 7 章“建筑结构抗爆炸连续倒塌设计”中, 采用与《民用建筑防爆设计标准》(T/CECS 736—2020) 相同的建筑重要性等级确定方法, 将建筑按抗爆设防类别分为甲、乙、丙、丁

等 4 类。甲类建筑为对社会影响重大, 一旦发生爆炸危害严重或功能不可中断的建筑; 乙类建筑为对社会影响较大、爆炸危害性较严重或爆炸后功能需快速恢复的建筑; 丙类建筑为对社会影响可忽略不计, 一旦发生爆炸不会构成危害的建筑; 丁类建筑为除了前 3 类建筑以外的建筑。在设计爆炸威胁时, 仅允许甲类建筑发生轻微破坏, 不影响其正常使用; 乙类建筑的主要构件仅可发生轻微破坏, 次要构件以及非结构构件允许发生中等程度破坏, 建筑经过修复后可很快继续使用; 丙类建筑的主要结构构件允许发生中等程度的破坏, 次要构件和非结构构件允许发生严重破坏, 结构破坏后经过大修可以继续使用; 丁类建筑则允许发生不可修复的破坏。本条规定与《民用建筑防爆设计标准》基本一致。

4 各规范验算时等效静荷载组合及界定破坏范围对比

建筑物在遭受超设计基准荷载时不可避免会发生一定的破坏, 在进行结构的抗连续倒塌计算时, 各规范所采用的方法以及等效荷载的取值均有所不同, 表 1 列出不同规范中的荷载取值公式以及对偶然荷载的取值。

各国学者在编写规范时会在结构设计阶段提出指导, 尽可能使倒塌破坏的程度在可控范围内, 如果超出这个可控范围则判断结构发生了连续倒塌。各规范对连续倒塌破坏范围的界定有一定区别, 见表 2。

5 结论

国内外不同规范有关抗连续倒塌设计方法在适用范围、规定严格程度、设计复杂程度均有所不同。本文对连续倒塌的研究历史进行简要梳理, 并在现有的规范基础上进行归纳总结, 对各国规范的异同点与适用范围进行了详细对比, 希望对未来统一规范的形成提供参考依据, 并帮助设计以及建筑人员充分认识这些不同点, 进而采取恰当的方式来应对实际工程中的需要, 为我国今后的结构设计提供一定的参考。

表1 各规范的等效静荷载组合

Tab.1 Equivalent static load combination of each code

规范名称	构件移除后荷载组合取值	偶然荷载
《美国建筑荷载规范》(ASCE/SEI 7-05, ASCE/SEI 7-10, ASCE/SEI 7-16)	$(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S) + 0.2W_n$ (构件移除) $1.2D + Q_{ak} + (0.5L \text{ or } 0.2S)$ (局部抵抗特殊偶然荷载) $(0.9 \text{ or } 1.2)D + Q_{ak} + 0.2W_n$ (局部抵抗特殊偶然荷载) $(0.9 \text{ or } 1.2)D + 0.5L + 0.2(L \text{ or } S \text{ or } R)$ (局部抵抗特殊偶然荷载)	Q_{ak}
美国《建筑抗连续倒塌设计》(DoD. UFC 4-023-03, 2016)	整体: $D + 0.5L$ 线性静力分析: $\Omega_{LD} \text{ or } \Omega_{LF} (0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S) + 0.2W_n$ 非线性动力分析: $(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S) + 0.2W_n$	—
美国《结构抗连续倒塌备用荷载路径法分析及设计指南》(GSA 2016)	静力分析: $\Omega_{LD} [1.2D + (0.5L \text{ or } 0.2S)]$ (位移控制) $\Omega_{LF} [1.2D + (0.5L \text{ or } 0.2S)]$ (力控制) 动力分析: $1.2D + (0.5L \text{ or } 0.2S)$	—
加拿大《国家建筑规范》(Canada - NBCC. NRCC 56190, 2015)	$D + L/3 + W_n/3$	—
中国《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010),《高层建筑混凝土结构技术规程(2010年版)》(JGJ 3—2010)	$S_d = \eta_d (D + \sum \psi_q S_{Qi,k}) + \psi_w W_n$	80 kPa
中国《建筑结构抗倒塌设计标准》(CECS392: 2020)	$S_V = S_{V1} + S_{V2} + S_{V3}$ 线性及非线性静力法: $S_{V1} = \eta_d (D + \psi_q L \text{ or } \gamma_s S)$ $S_{V2} = D + \psi_q L$ $S_{V3} = D + \psi_q L \text{ or } \gamma_s S$ 非线性动力法: $S_V = S_{VS} + S_{VD}$ $S_{VS} = \gamma_G D + \gamma_Q L \text{ or } \gamma_s S$	—

注: D 、 L 、 R 、 S 、 W_n 分别表示恒、活、雨、雪、风荷载标准值; Q_{ak} 表示偶然荷载标准值; Ω_{LD}/Ω_{LF} 为变形控制/力控制系数, 具体结构的系数值如表2所示; $S_{Qi,k}$ 为第 i 个竖向活荷载标准值; ψ_q 、 ψ_w 、 γ_s 分别表示活、风、雪荷载标准值系数; S_d 为荷载设计值; η_d 为竖向荷载动力放大系数; S_{V1} 、 S_{V2} 为与被移除柱相连跨楼面重力荷载组合效应设计值; S_{V3} 为与被移除柱不相连各跨楼面重力荷载组合效应设计值; S_{VS} 为原结构重力荷载效应设计值; S_{VD} 为拆除构件后余下结构动力荷载效应设计值。

表2 线性静力分析不同情况荷载系数值

Tab.2 Load coefficient values of linear static analysis under different conditions

材料	结构类型	变形控制/ Ω_{LD}	力控制/ Ω_{LF}
钢	框架结构	$0.9m_{LIF} + 1.1$	2.0
钢筋混凝土	框架结构	$1.2m_{LIF} + 0.80$	2.0
	承重墙	$2.0m_{LIF}$	2.0
砌体	承重墙	$2.0m_{LIF}$	2.0
木材	承重墙	$2.0m_{LIF}$	2.0
冷弯钢	承重墙	$2.0m_{LIF}$	2.0

注: m_{LIF} 是与移除柱或墙位置正上方的柱或墙直接连接的主梁、次梁或墙单元的最小 m 。对于每个主梁、次梁或墙单元, m 是 UFC 规范中第 4~8 章中定义的 m 因数, 对于未在章节中明确提供的 m , 则需要参考 ASCE/SEI 41-13 及相应的性能水平 (抗倒塌或生命安全)。

表 3 各规范界定的连续倒塌破坏范围
Tab. 3 The scope of progressive collapse defined by each code

规范	水平方向破坏面积及范围	竖直方向破坏面积及范围
英国《建筑规范》The Building Regulations 2010 – Approved Document A: Structure (BS 5950 – 1: 2000), 欧洲 Eurocode 1: Actions on Structures – part1. 7: General Actions – Accidental Actions (EN 1991 – 1 – 7)	楼板或屋面面积的 15% 或 100 m ² (取较小值), 不可跨层	视情况而定
美国《建筑抗连续倒塌设计》 (DoD. UFC 4 – 023 – 03, 2009)	外柱: 上方楼板或屋面面积的 15% 或 70 m ² (取较小值); 内柱: 上方楼板或屋面面积的 30% 或 140 m ² (取较小值)	破坏部分对应的下方楼板 不可发生破坏
美国《建筑抗连续倒塌设计》 (DoD. UFC 4 – 023 – 03, 2016), 美国《结构抗连续倒塌备用荷载路径法分析及设计指南》 (GSA 2013)	与移除构件相连的梁和楼板不可发生倒塌破坏	与移除构件相连的梁和楼板 不可发生倒塌破坏
加拿大《国家建筑规范》 (Canada – NBCC. NRCC 56190, 2015)	破坏初期桁架、梁、楼板发生的破坏叠加在同侧或两侧, 开间板失去一端支撑, 形成悬挑结构	视情况而定
美国《结构抗连续倒塌备用荷载路径法分析及设计指南》 (GSA 2016)	与移除构件相邻的楼板或屋面破坏范围控制在其所在开间内	被拆除外柱上方楼板不超过 167 m ² , 被拆除内柱上方楼板不超过 334 m ²

参考文献:

李奉阁, 李爱伟, 贾宏玉. 2017. 钢屋架体系连续倒塌性能研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 48(6): 837 – 843.

李奉阁, 杨晓健. 2016. 新旧抗震规范下不同延性框架结构倒塌性能的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 47(6): 889 – 893.

李全旺, 张望喜. 2020. 装配式混凝土结构抗强震与防连续倒塌[M]. 南京: 东南大学出版社.

梁益, 陆新征, 缪志伟. 2007. 结构的连续倒塌: 规范介绍和比较[C]//中国力学学会爆炸力学专业委员会, 中国土木工程学会防护工程分会, 中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会. 第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集.

陆新征, 李易, 叶列平. 2011. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.

潘珠峰, 杨健, 王斐亮, 等. 2020. 典型连接节点对钢框架抗连续倒塌性能影响研究进展[J]. 建筑结构, 50(24): 11 – 18.

日本钢结构协会, 美国高层建筑和城市住宅理事会. 2007. 高冗余度钢结构倒塌控制设计指南[M]. 陈以一, 赵宪忠, 译. 上海: 同济大学出版社.

CECS 392: 2014, 建筑结构抗倒塌设计规范[S].

CECS 392: 2020, 建筑结构抗倒塌设计标准[S].

GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范(2015 年版)[S].

GB 50068—2018, 建筑结构可靠度统一设计标准[S].

GB 50153—2008, 工程结构可靠性设计统一标准[S].

JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程(2010 年版)[S].

T/CECS 736—2020, 民用建筑防爆设计标准[S].

ACI 318M – 02, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S]. 2002.

ACI 318M – 08, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S]. 2008.

ACI 318M – 11, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S]. 2011.

ACI 318M – 89, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary[S]. 1989.

ANSI A58. 1 – 1982. American standard building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures[S].

ASCE/SEI 41 – 13, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings [S]. 2013.

ASCE/SEI 7 – 05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S]. 2005.

ASCE/SEI 7 – 10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S]. 2010.

ASCE/SEI 7 – 16, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S]. 2016.

BS 5950 – 1: 2000, Structural Use of Steelwork in Building. Code of Practice for Design. Rolled and Welded Sections[S]. 2001.

BS 8110 – 1: 1997, Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction[S]. 1997.

BS 8110 – 1: 2005, Structural Use of Concrete: Part 2: Code of Practice for Special Circumstances. [S]. 2005.

Canada – NBCC. NRCC 56190, National Building Code of Canada; Canadian Commission on Building and Fire Codes[S]. 2015.

DoD. UFC 4 – 023 – 03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. 2005.

- DoD. UFC 4 - 023 - 03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. 2009.
- DoD. UFC 4 - 023 - 03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. 2010.
- DoD. UFC 4 - 023 - 03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. 2013.
- DoD. UFC 4 - 023 - 03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S]. 2016.
- EN 1991 - 1 - 7, Eurocode 1: Actions on Structures - Part1. 7: General Actions - Accidental Actions[S].
- EN 1998 - 3: 2005, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. European Standard[S].
- GSA 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S].
- GSA 2013, Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance[S].
- GSA 2016, Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance[S].
- MCGUIRE. 1974. Prevention of Progressive Collapse[C]. Proceeding of the Regional Conference on Tall Buildings. Bangkok; Asian Institute of Technology.
- Starossek U. 2007. Typology of Progressive Collapse [J]. Engineering Structures, 29: 2302 - 2307.
- The Building Regulations 2010 - Approved Document A: Structure [S]. 2013.

Research and Comparison of Domestic and Foreign Design Codes for the Resistance to Progressive Collapse

PEI Qiang, GUO Hang, DING Yu

(*School of Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China*)

Abstract

The structural progressive collapse has always been the focus of attention in the field of civil engineering. There are lots of differences in the design methods and specific provisions of the codes for progressive collapse designation in their own countries at current state. This paper reviews the development history of progressive collapse resistance, sorts out the different provisions of codes for progressive collapse resistance design and summarizes the design methods of progressive collapse resistance codes at home and abroad. A comparative study on the similarities and differences of safety classification methods and load combinations in national codes, and a detailed comparison of the definition of the range of failure is conducted. The results can provide a reference for the preparation of unified codes for progressive collapse resistance design in the future.

Keywords: building structure; progressive collapse resistance; code for collapse design; load combination