爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌分析与防连续倒塌设计研究进展

师燕超, 李忠献*

天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350

*通讯作者, E-mail: zxli@tju.edu.cn

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-08-07; 网络出版日期: 2019-12-30

国家重点研发计划(编号: 2016YFC0701105)、国家自然科学基金(编号: 51878445)和天津市杰出青年基金(编号: 17JCJQC43900)资助项目

摘要 连续倒塌是结构局部某个关键构件的破坏导致相邻构件失效继而引发更多构件破坏, 最终导致结构整体倒塌或者产生与初始起因很不相称的大面积倒塌的连锁反应。爆炸荷载作为一种非常规荷载, 具有传播迅速、峰值大、作用时间短等特点, 是造成建筑结构连续倒塌的主要原因之一。本文在建筑结构连续倒塌已有研究的基础上, 提出了结构连续倒塌分析的分类方法; 并进一步根据结构连续倒塌分析的目的, 将结构连续倒塌分析方法分为结构抗连续倒塌性能评价方法和结构连续倒塌全过程分析方法。通过文献综述, 详细介绍了结构抗爆炸连续倒塌性能评价方法和结构抗爆炸连续倒塌全过程分析的最新研究进展; 给出了建筑结构防爆炸连续倒塌的概念设计方法和构造措施, 提出了建筑结构防爆炸连续倒塌设计的步骤和方法。

关键词 爆炸荷载, 建筑结构, 连续倒塌分析, 抗连续倒塌性能评价, 防连续倒塌设计

PACS: 02.70.Dh, 02.60.Cb, 02.50.Cw

1 引言

连续倒塌是结构局部某个关键构件的破坏导致相邻构件失效继而引发更多构件破坏, 最终导致结构整体倒塌或者产生与初始起因很不相称的大面积倒塌的连锁反应^[1]。可能引起建筑结构连续倒塌的原因有多种, 如恐怖爆炸或意外爆炸、撞击、火灾、人为失误、地震作用等。

建筑结构连续倒塌与整体坍塌不同: 前者主要表现为局部破坏在结构系统内的传播使得小范围的初始

破坏造成结构大范围的倒塌; 后者指建筑结构整体从其原有位置向下塌落或倾倒的破坏。建筑结构连续倒塌的典型案例为美国俄克拉荷马市 Alfred P. Murrah 联邦政府办公大楼遭汽车爆炸袭击后发生大面积连续倒塌, 如图 1 所示。由图可以看出, 在汽车爆炸袭击引起的爆炸荷载作用下, 4 根底层柱首先失效, 最终导致建筑迎爆面 10 跨中的 8 跨连续倒塌; 同时, 除倒塌部位的其他结构构件变形很小, 有些构件尚处于弹性工作状态。建筑结构整体坍塌的典型示例如图 2 所示, 为 2018 年“5·12”汶川地震中某建筑结构的整体坍塌。地震作用

引用格式: 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌分析与防连续倒塌设计研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024603
Shi Y C, Li Z-X. Research progress on progressive collapse resistant analysis and design of building structures under blast loading (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024603, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0180](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0180)

图 1 (网络版彩图)爆炸荷载下某建筑结构连续倒塌

Figure 1 (Color online) Progressive collapse of a building structure under blast loads.

图 2 (网络版彩图)地震作用下某建筑结构的整体坍塌

Figure 2 (Color online) Total collapse of a building structure under seismic loads.

本质为惯性力, 作用于所有的建筑结构构件上, 引发结构构件的动态响应以及结构的整体响应; 地震作用较大时, 则会引起结构构件的损伤破坏以及建筑结构的整体坍塌. 一般的, 地震作用下建筑结构更倾向于发生整体坍塌, 但当同层结构柱采用不同的配筋, 或部分结构柱存在质量问题的情况下, 也可能首先导致建筑结构构件的局部失效, 进而引起整体结构的连续倒塌.

一旦建筑结构发生连续倒塌, 将会造成巨大的人员伤亡和财产损失, 同时造成巨大的社会恐慌. 因此, 防止建筑结构在各种诱因下发生连续倒塌, 成为建筑结构防灾减灾设计的最后一道防线. 基于此, 国内外学者对建筑结构的连续倒塌开展了系统的研究, 内容包括建筑结构的连续倒塌分析方法、典型建筑结构的连续倒塌机制与模式、建筑结构的抗连续倒塌性能评价、建筑结构的防连续倒塌设计等.

爆炸荷载作为一种非常规荷载, 具有传播迅速、峰值大、作用时间短以及具有负压等特点. 如前所述, 爆炸荷载作用是引发建筑结构连续倒塌的一类主要原因, 而爆炸荷载作用下建筑结构构件的局部破坏与失效往往伴随着高应变率效应、物理非线性、几何

非线性等特征, 同时局部破坏在结构系统中的传播进而引发结构连续倒塌的机制更为复杂. 因此, 爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌的相关研究一直是建筑结构连续倒塌研究的热点问题.

本文结合本课题组近些年在爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌分析与设计领域的最新研究成果, 在建筑结构连续倒塌现有相关研究的基础上, 提出了结构连续倒塌分析的分类方法, 并进一步根据结构连续倒塌分析的目的, 将结构连续倒塌分为结构抗连续倒塌性能评价方法和结构连续倒塌全过程分析方法. 通过文献综述, 分别从定性评价和定量评价两个方面介绍了结构抗爆炸连续倒塌性能评价方法的最新研究进展, 从详细分析和简化分析的角度给出了结构抗爆炸连续倒塌全过程分析的高效方法. 最后给出了建筑结构防爆炸连续倒塌的概念设计方法和构造措施, 提出了建筑结构防爆炸连续倒塌设计的步骤和方法.

2 建筑结构连续倒塌分析方法及其分类

如前所述, 可能引起建筑结构连续倒塌的原因有多种, 如恐怖爆炸或意外爆炸、撞击、火灾、人为失误、地震作用等. 根据在结构连续倒塌分析时, 是否考虑引起结构连续倒塌的原因, 可将建筑结构连续倒塌分析方法分为两类, 如图3所示.

一类结构连续倒塌分析方法不考虑引起结构连续倒塌的原因, 最具代表性的是拆除构件法, 也叫替代传力路径法, 是目前建筑结构连续倒塌分析中最常用的方法. 2001年美国“9·11”事件之后, 替代传力路径法逐渐被美国总务管理局(US General Services Administration, GSA)和美国国防部(US Department of Defense, DOD)所采用, 写入了其关于结构连续倒塌设计和分析的导则中^[2-4]. 这类方法通常从删除掉结构的关键构件开始, 进而对结构可能的连续倒塌进行模拟分析, 依据分析方法的不同, 分为线性静力分析、非线性静力分析及非线性动力分析. 线性静力分析方法简单易用, 仅适用于结构形状、构件布置较规则的结构; 非线性静力分析法和非线性动力分析法考虑材料和几何非线性, 后者同时考虑移除结构关键构件引起的动力效应, 计算精度较高^[5-7]. 替代传力路径法虽然具有分析过程简单、便于工程应用的特点, 但是该方法仅考虑移除关键构件, 而不考虑造成关键构件失效的原因. 而实

图 3 结构连续倒塌分析方法的分类

Figure 3 Classification of the methods for progressive collapse analysis of building structures.

际上, 不管是爆炸、火灾还是地震作用, 结构关键构件失效的同时其周围构件必然发生不同程度的损伤破坏, 因此替代传力路径法得到的连续倒塌分析结果可能是不安全的^[6]。基于此, 国内外学者对替代传力路径法进行了改进, 主要思路为在非线形静力分析方法的基础上, 通过能量守恒原理, 计算其非线性动力响应, 进而对结构抗连续倒塌性能进行评估, 评估既可以采用结构的精细化模型, 也可以采用简化模型。

另一类结构连续倒塌分析方法考虑引起结构连续倒塌的原因, 典型的方法为直接动力法。以爆炸荷载作用下建筑结构的连续倒塌分析为例, 直接动力法直接对炸药的爆轰、爆炸波的传播、爆炸冲击波与结构的相互作用以及在爆炸荷载作用下建筑结构的动态响应、损伤破坏及连续倒塌的全过程进行模拟。同样, 火灾作用下建筑结构连续倒塌的直接动力法需考虑火灾作用的全过程, 进行结构的高温和荷载耦合计算, 获得结构在火灾作用下的变形和破坏情况。地震作用下建筑结构连续倒塌的直接动力法亦是如此。一般说来, 直接动力法能够对建筑结构在爆炸、撞击、火灾或地震作用下导致的连续倒塌进行准确可靠的模拟, 然而该方法过于繁杂, 并不适合在工程界推广应用。基于此, 国内外学者提出了简化的分析方法, 包括子结构法、多尺度法和高效分析模型。上述简化模型一方面可以考虑引起结构连续倒塌结构的原因, 另一方面也可以在保证结构连续倒塌分析结果精度的同时, 极大地提高计算效率。

综上所述, 替代传力路径法由于不考虑引起

结构连续倒塌的原因, 对结构的连续倒塌分析可能会得出不安全的分析结果, 更不能对建筑结构的连续倒塌全过程进行分析。基于此, 本课题组依据倒塌分析的目的, 对传统意义上的结构连续倒塌分析方法进行更细致的划分, 分为结构抗连续倒塌性能评价方法和结构连续倒塌全过程分析方法, 分别如图4和5所示。

结构抗连续倒塌性能评价方法不需对结构的连续倒塌全过程进行分析, 可以采用相对简化的模型或方法实现对结构抗连续倒塌性能的快速评估, 主要用于建筑结构选型及初步设计阶段的结构抗连续倒塌性能评价, 也可用于一般建筑结构的防连续倒塌设计。基于这一理念, 一方面, 结构抗连续倒塌性能评价可以考虑结构连续倒塌的原因, 也可以不考虑结构连续倒塌的原因; 另一方面, 无论是否考虑结构连续倒塌的原因, 性能评价既可以采用完整的结构模型, 也可以采用简化的结构模型, 如子结构模型等。典型的替代传力路径法虽然无法精确地对建筑结构连续倒塌的全过程进行分析, 但可以依据分析结果对结构的整体性、鲁棒性以及是否存在替代传力路径等抗连续倒塌性能进行定性的评价。与此同时, 国内外学者在替代传力路径法的基础上, 发展出了基于能量的结构抗连续倒塌性能评价方法, 同时考虑爆炸荷载以及结构抗力的不确定性, 提出了结构连续倒塌概率评估方法。

如果需要对结构的抗连续倒塌性能进行定量评价, 就需要考虑影响结构连续倒塌的原因。由于不需要对结构的连续倒塌全过程进行模拟, 一般可通过采用简化的结构模型来提高分析的效率, 最常用的方法为

图 4 结构抗连续倒塌性能评价方法

Figure 4 Method for assessment of progressive collapse resistant capacity of structures.

图 5 结构连续倒塌全过程分析方法

Figure 5 Method for analysis of progressive collapse process of structures.

子结构法。

结构连续倒塌全过程分析可以模拟爆炸、撞击、火灾以及地震作用下建筑结构局部破坏的产生、演化以及引发整体结构连续倒塌的全过程, 一般用于建筑结构连续倒塌机制和模式研究, 或用于结构防连续倒塌控制效果分析, 也可用于重要建筑结构的防连续倒塌设计。如前所述, 可能引起建筑结构连续倒塌的原因有多种, 如恐怖爆炸或意外爆炸、撞击、火灾、地震作用等, 结构连续倒塌全过程分析必须考虑上述引起结构连续倒塌的原因。以爆炸荷载为例, 爆炸荷载作用下首先会造成建筑结构的局部破坏, 一旦造成某个竖向关键承重构件的失效, 必将同时造成其周围梁、板、柱等结构构件不同程度的损伤。因此, 恐怖爆炸或意外爆炸引发的建筑结构连续倒塌全过程分析

时, 无论是采取替代传力路径法或直接动力法, 必须考虑爆炸荷载的作用效应。同样的, 火灾作用下以及地震作用下, 建筑结构在发生局部结构构件失效的同时, 其他结构构件也必然发生一定程度的损伤, 因此在结构连续倒塌分析时, 必须考虑上述损伤对结构连续倒塌过程的影响。依据分析模型的复杂程度, 结构连续倒塌全过程分析方法可分为直接动力法和简化分析法。直接动力法需要建立建筑结构的精细化模型, 采用材料的动态本构模型, 对爆炸、火灾以及地震作用下建筑结构局部及整体的非线性动力响应和初始损伤进行准确的模拟, 并考虑结构动力响应的P- Δ 效应, 要求使用者精通非线性数值模拟技术, 且具有深厚的力学知识, 很难在工程界推广应用。

直接分析方法的另一个突出问题是计算效率低下, 急需提出简化分析方法, 提高爆炸荷载作用下大型建筑结构连续倒塌分析的效率。在这种情况下, 简化分析方法至关重要。简化分析方法主要通过高效的单元模型如纤维梁单元模型、宏观模型等代替精细化模型, 在保证分析精度的同时, 大幅提高计算分析的效率。

3 建筑结构抗爆炸连续倒塌性能评价

如前所述, 建筑结构抗爆炸连续倒塌性能评价方法根据是否考虑引起结构连续倒塌的原因可以分为定性评价方法和定量评价方法。替代传力路径法完全不考虑爆炸荷载及爆炸冲击波与结构相互作用的影响, 仅假想结构关键构件被爆炸荷载摧毁后, 模拟移除该关键构件后结构的传力路径变化及可能发生的连续倒塌过程, 可以对建筑结构的抗连续倒塌性能进行定性评价。GSA和DOD导则将替代传力路径法分成了不同的层次: 即线性静力分析、非线性静力分析及非线性动力分析^[2-4], 每一层次有各自不同的分析步骤, 所得分析结果的可靠程度也不同。线性静力分析是基于小变形理论, 材料均视为线弹性, 其主要步骤如下: (1) 确定需拆除的结构关键构件; (2) 采用线弹性材料模型, 建立剩余结构的数值模型; (3) 对剩余结构施加导则所规定的恒载和活载; (4) 分析剩余结构的响应; (5) 依据分析结果判定结构的抗连续倒塌性能。由以上步骤可知, 线性静力法简单易用, 但由于忽略了材料及结构的非线性特征, 仅适用于对简单规则结构的抗连

续倒塌性能评价. 非线性静力法既考虑材料的物理非线性, 也考虑结构的几何非线性, 主要步骤如下: (1) 确定需拆除的结构关键构件; (2) 采用考虑非线性的材料模型, 建立剩余结构的数值模型; (3) 从零开始, 对结构逐级施加导则所规定的恒载和活载, 荷载分级不少于10级; (4) 考虑P- Δ 效应, 分析剩余结构的非线性动力响应; (5) 依据分析结果判定结构的抗连续倒塌性能. 非线性静力法一般适合于简单不规则结构的抗连续倒塌性能评价. 非线性动力分析则同时考虑结构和材料的非线性特征以及结构移除关键构件后的动力效应, 具体分析步骤为: (1) 采用材料的动态本构模型, 建立结构的有限元模型; (2) 在移除结构关键柱之前, 对结构施加导则所规定的恒载和活载, 并使结构达到静力平衡; (3) 瞬间移除结构的关键构件; (4) 在移除结构关键构件的同时, 对剩余结构进行动力分析, 时间步长不应大于剩余结构基本周期的1/50; (5) 依据分析结果判定结构的抗连续倒塌性能. 非线性动力法在三个层次的替代传力路径法中, 适用范围最广, 准确度最高.

国内外研究者如Kwasniewski^[8], Digesh等人^[9], Mohamed^[10], Tsai和Lin^[11], Abruzzo等人^[12]分别采用GSA和DOD导则中结构连续倒塌分析的替代传力路径法, 对典型钢筋混凝土框架结构在单柱失效工况下的抗连续倒塌性能进行了研究, 并比较分析了影响其抗连续倒塌性能的结构模型参数以及GSA和DOD导则中各种方法的准确性与适用性. Song等人^[13], Fu^[14,15], Kim等人^[16], Khandelwal等人^[17], Bae等人^[18], Rupa等人^[19]分别采用替代传力路径法, 对各类钢框架结构的抗连续倒塌性能进行了分析, 并将部分分析结果与试验结果进行了对比. Kim和An^[20]基于GSA导则中的替代传力路径法研究了悬链线效应对刚性钢框架连续倒塌性能的影响规律. Li和El-Tawil^[21]采用替代传力路径法, 研究了某钢框架结构的连续倒塌机制.

在替代传力路径法的基础上, Dusenberry和Hamburger^[22]提出了两种基于能量守恒的结构抗连续倒塌性能评估方法, 一种是线弹性分析法, 另一种是弹塑性分析法. Izzuddin等人^[23,24]基于能量方法, 在非线性静力替代传力路径法的基础上, 提出了一种多层次的抗连续倒塌性能评估方法, 该方法中既可以采用结构的精细化模型, 也可以采用简化模型. Xu和Ellingwood^[25]基于能量守恒思想, 针对形状规则的框架结

构, 提出了一种结构抗连续倒塌性能评估的局部非线性静力推覆(Pushdown)分析方法. Menchel等人^[26]提出等效静力推覆分析方法, 对突然移除柱结构的连续倒塌进行了分析. 该方法以能量评估为基础确定推覆分析的等效施加荷载模型, 由于将荷载模型与零动能原则相结合, 避免了对结构进行单自由度简化. Almusallama等人^[27]与McConnell和Brown^[28]在研究中发现替代传力路径法仅适用于小当量爆炸荷载下常规柱距框架结构的抗倒塌性能评价, 不适用于大当量爆炸荷载或者框架结构柱距过大或过小的情况. GSA导则^[3]规定的替代传力路径法中, 静力分析均建议动力增大系数为2. Ruth等人^[29]通过研究发现, 动力增大系数为2过于保守, 但针对建筑结构, 又很难给出统一合理的取值. DoD导则^[2]中, 在分析结构构件位移控制的力学行为时, 引入了基于构件特性的修正系数来确定荷载动力增大系数. Williamson和Stevens^[30]分别采用精细有限元模型与简化方法, 研究了框架结构的楼板对其抗连续倒塌性能的贡献. Dat等人^[31]提出了钢筋混凝土框架结构倒塌性能快速判断的简化方法, 并通过与试验结果的对比验证了其有效性.

恐怖爆炸或意外爆炸事件中, 由于炸药类型、形状、起爆位置, 甚至是环境温度、湿度及气压等随机性, 导致作用于建筑结构上的爆炸荷载具有很强的不确定性; 尤其是在城市街道等复杂环境中, 爆炸冲击波和城市建筑结构的多次反射以及相互作用, 会进一步增加作用于建筑结构上的爆炸荷载的复杂性和不确定性. 与此同时, 建筑结构本身也具有一定的随机性, 如建筑材料的强度、建筑构件的几何尺寸等. 因此, 恐怖爆炸或意外爆炸事件中建筑结构构件的非线性动态响应及损伤也具有随机性的特征, 随机性的传递使得局部构件破坏引发建筑结构连续倒塌的不确定性进一步增大. 针对上述问题, ElSayed等人^[32]提出了钢筋混凝土剪力墙结构的倒塌破坏准则, 并在此基础上通过蒙特卡洛方法, 建立了钢筋混凝土剪力墙结构的易损性曲线. Ding和Song等人^[33-35]考虑材料和构件几何尺寸的不确定性, 基于节点有限元简化模型, 建立了钢框架节点统计模型; 并将该节点统计模型引入钢框架结构倒塌概率分析中, 建立了钢框架结构倒塌易损性曲线的确定方法, 实现了对钢框架结构倒塌概率的快速评估.

如果要对爆炸荷载下建筑结构抗连续倒塌性能

能的定量评价,就需要考虑爆炸荷载的局部破坏效应.但是如前所述,由于不需要对建筑结构的连续倒塌全过程进行分析,所以可以通过选取子结构,分析子结构在爆炸荷载作用下的非线性动力响应,对整体结构的抗爆炸连续倒塌性能进行评定. Yu等人^[36]通过子结构试验,研究了恒载、活载以及接触爆炸耦合作用下某钢筋混凝土子结构的连续倒塌机制与模式. 丁阳等人^[37]通过系统研究,提出了典型建筑结构抗爆炸连续倒塌性能评估的子结构法,用于建筑结构抗连续倒塌性能的定量评价. 该方法将子结构的思想引入结构的抗连续倒塌性能评估中,主要解决了子结构的选取原则、子结构边界条件的模拟方法、结构连续倒塌判定准则以及整体结构抗连续倒塌性能评估程序等难题,分别采用子结构法和直接动力法对某10层钢框架结构在不同的爆炸荷载作用下的抗倒塌性能进行评估,评估结果对比可知,提出的子结构法建模工作量低、计算时间短、计算精度高,能够实现对爆炸荷载作用下结构抗连续倒塌性能的快速评估.

4 爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌分析高效方法

建筑结构连续倒塌全过程分析需要考虑引起结构连续倒塌的原因. 具体到恐怖或意外爆炸下建筑结构连续倒塌全过程分析,则需要充分考虑爆炸荷载效应,优先推荐的方法为直接动力法. 直接动力法采用材料动态本构模型,考虑阻尼,同时考虑爆炸冲击波的传播,具体分析步骤为: (1) 假定结构为刚体,建立炸药、空气和刚体结构的数值模型; (2) 确定建筑设计爆炸威胁; (3) 模拟爆炸冲击波的传播过程,确定作用于刚体结构的爆炸荷载; (4) 建立结构的数值模型,对结构施加恒载和活载; (5) 对结构施加爆炸荷载进行动力分析; (6) 分析结构的非线性动力响应,判断剩余结构是否发生连续倒塌. Luccioni等人^[38]通过直接动力法对因恐怖爆炸袭击而倒塌的以色列AMIA大楼在爆炸荷载作用下的连续倒塌进行了重现. Quan和Brinbaum^[39]运用AUTODYN 3D有限元显式动力分析软件对美国世贸大厦北塔受飞机撞击乃至最终倒塌的过程进行了三维有限元模拟. 张传爱^[40]运用LS-DYNA有限元显式动力分析软件对按七度设防的典型钢筋混凝土框架结构的倒塌过程进行了三维有限元模拟. Hao等

人^[41,42]基于连续损伤力学理论,通过对直接动力法进行改进,开发了一种简称DYN方法的结构连续倒塌分析方法. Zhang等人^[43]则利用LS-DYNA,采用直接动力法对钢框架结构遭爆炸荷载后的连续倒塌问题进行了研究. 综上所述,直接动力法能够对建筑结构在爆炸或撞击作用下的连续倒塌过程进行准确可靠的模拟,然而该方法需要建立详细的结构模型,并需要对炸药的爆轰、爆炸波的传播及其与结构的相互作用进行模拟,计算量大,对计算机硬件的要求高;同时该方法要求使用者对结构动力学、材料的动力特性以及数值模拟技术都有较为详尽的了解,过于复杂,并不适合在工程界推广应用.

鉴于爆炸荷载下建筑结构连续倒塌的灾难性、结构防爆炸连续倒塌设计的复杂性以及建造此类建筑结构所需的高额费用,在建筑结构的抗爆炸连续倒塌设计时,需要给出既安全又经济的设计方案. 国内外研究者从精确、可靠、快速的角度出发,提出了结构连续倒塌全过程分析的简化方法. 李忠献和师燕超等人^[44-47]综合直接动力法和替代传力路径法的优点,建立了爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件的初始速度、初始位移和初始损伤的确定方法. 进而提出了同时考虑结构关键柱失效及其周围构件非零初始条件和初始损伤的钢筋混凝土框架结构连续倒塌分析的新方法,该方法的主要步骤为: (1) 建立结构的数值模型; (2) 对结构施加恒载和活载,分析结构的响应; (3) 确定建筑设计爆炸威胁; (4) 确定需拆除的结构关键构件; (5) 计算作用于拆除构件相邻构件的爆炸荷载; (6) 确定相邻构件的初始条件和初始损伤; (7) 移除需拆除的结构关键构件,同时对相邻构件施加初始条件和初始损伤; (8) 采用非线性动力法对剩余结构进行分析; (9) 分析剩余结构的响应,判断剩余结构是否发生连续倒塌. 为了验证提出方法的有效性,分别采用直接动力法、非线性动力替代传力路径法以及提出的简化方法对某三层两跨钢筋混凝土框架结构在爆炸荷载作用下的连续倒塌进行了分析,并将三种方法得到的结果进行了对比. 结果表明,提出的简化方法能够得到与直接动力法相近的结果,在可靠、准确的同时,方便实用,能够运用于工程实际.

从建立高效单元模型的角度出发, Li课题组^[48,49]研究建立了考虑爆炸荷载效应和构件剪切变形的梁柱构件抗爆单元模型,引入钢筋混凝土梁柱节点区宏观

模型和楼板体系模拟模型, 建立了爆炸荷载下钢筋混凝土结构连续倒塌分析高效数值模型. 钢筋混凝土结构的连续倒塌过程伴随着强烈的材料非线性与几何非线性行为, 梁柱节点处也可能发生剪切破坏, 有限元实体模型虽然能较准确地模拟这些现象, 但是计算效率低下, 很难用于整体结构的倒塌分析. 为了在保证结构连续倒塌精确分析结果的同时, 提高计算效率, 研究建立了钢筋混凝土结构连续倒塌的高效分析模型, 其中梁柱构件采用纤维梁模型, 节点区采用宏观模型, 楼板采用分层壳模型. 提出的高效分析模型能考虑爆炸荷载效应、结构连续倒塌过程中节点区的失效破坏以及楼板对抗倒塌能力的贡献. 为了验证提出的高效分析模型的正确性, 以某6层钢筋混凝土框架结构为例, 分别采用直接动力法和高效分析模型分析了其不同爆炸荷载作用下的非线性动力响应与连续倒塌过程. 结果表明, 提出的高效分析模型能得到与实体模型相近的结果, 同时能够大大提高计算效率, 为钢筋混凝土结构连续倒塌全过程分析及防倒塌控制研究提供数据支撑.

与子结构法相对应, 丁阳等人^[50]考虑建筑结构连续倒塌过程中的复杂非线性行为, 建立了典型建筑结构连续倒塌全过程分析的多尺度法, 用于建筑结构连续倒塌机理及防连续倒塌控制方法研究. 多尺度建模方法根据结构构件或节点的复杂程度和破坏过程中的非线性程度, 将建筑结构划分为爆炸直接相关区、爆炸间接相关区和爆炸无关区3个区域, 每一区域选择适当尺度的分析模型, 通过不同尺度模型之间的协同计算, 达到计算精度和计算代价之间的均衡. 采用提出的多尺度法对某高层钢筋混凝土结构在外爆炸荷载下的连续倒塌行为进行了研究, 揭示了其连续倒塌机制与倒塌模式. 多尺度方法的提出使得对爆炸荷载作用下高层等大体量建筑结构的连续倒塌全过程分析成为可能.

5 建筑结构防爆炸连续倒塌设计

结构防连续倒塌设计应保证结构在爆炸荷载作用下不因结构关键构件失效而发生连续倒塌. 结构防连续倒塌设计应首先进行概念设计并采取合理的构造措施, 保证结构的整体性、延性和冗余度; 进而根据建筑的重要性等级和抗爆设防类别, 选择合理的分析方法,

对建筑结构进行防连续倒塌分析与设计.

结构防连续倒塌概念设计可以采用下列方法: 提高建筑的防护安全距离或设置防爆墙等, 降低结构关键构件承受的爆炸荷载或避免结构关键构件直接承受爆炸荷载; 结构关键构件具有反向承载能力; 增加结构替代传力路径, 提高结构冗余度; 优化结构布置或增强连接性能等, 提高结构整体性; 合理划分结构区域, 控制结构可能的破坏范围.

结构防连续倒塌设计可以采取下列构造措施: 混凝土结构梁柱刚性连接, 梁柱节点域梁下部配置连续贯通的抗拉钢筋, 在梁内有可靠连接或锚固; 钢结构梁柱节点采用刚性连接, 且梁端具有转动变形能力.

抗爆设防类别为甲类和乙类的建筑, 应进行结构防连续倒塌设计, 采用改进拆除构件法或采用直接动力法进行分析; 抗爆设防类别为丙类的建筑, 可根据业主要求进行结构防连续倒塌设计, 采用拆除构件法进行分析. 建筑抗爆设防类别应按建筑重要性和爆炸风险等级确定, 分为一至四级. 一级建筑应重点设防, 抗爆设防类别为甲类; 二级建筑应一般设防, 抗爆设防类别为乙类; 三级建筑应适度设防, 抗爆设防类别为丙类; 四级建筑可不设防, 抗爆设防类别为丁类. 当爆炸危险性低时, 三级建筑的抗爆设防类别可为丁类.

采用拆除构件法或改进拆除构件法对建筑结构进行抗连续倒塌性能评价时, 荷载组合的设计值应按下式计算^[51]:

$$L_c = \Omega_N \{ \gamma_G G_k + \psi_{QL} Q_{Lk} + \psi_{QR} Q_{Rk} \text{ 或 } \psi_{QS} S_k \} + 0.002 \sum P, \quad (1)$$

其中, L_c 为荷载组合的设计值; γ_G 为永久荷载的分项系数, 当其效应对结构不利时可取1.2, 有利时可取0.9; ψ_{QL} 为楼面可变荷载频遇值系数, 按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009规定取值; ψ_{QR} 为屋面可变荷载频遇值系数, 按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009规定取值; ψ_{QS} 为雪荷载准永久值系数, 按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009规定取值; G_k 为永久荷载标准值; Q_{Lk} 为楼面可变荷载标准值; Q_{Rk} 为屋面可变荷载标准值; S_k 为雪荷载标准值; Ω_N 为竖向荷载动力放大系数^[52].

当采用线性静力法时, 对拆除构件相连跨且位于拆除构件以上楼层的构件取2.0, 其他位置构件取1.0; 采用非线性静力法时, 对拆除构件相连跨且位于拆除

构件以上楼层的钢结构构件取1.35, 混凝土框架结构构件取1.22, 剪力墙结构构件取2.0, 框架-剪力墙结构构件取1.75, 其他位置构件取1.0; 当采用非线性动力法和改进拆除构件法时, 所有构件均取1.0; ΣP 为楼面的永久荷载与可变荷载之和.

采用拆除构件法的线性静力法进行分析时, 剩余结构构件的承载力应符合下式:

$$S_d \leq R_d, \quad (2)$$

其中, S_d 为剩余结构构件荷载组合的效应设计值; R_d 为剩余结构构件的承载力设计值.

采用拆除构件法或改进拆除构件法的非线性静力法和非线性动力法进行分析时, 剩余结构构件的塑性转角应符合下式:

$$\theta \leq [\theta], \quad (3)$$

其中, θ 为剩余结构构件的塑性转角; $[\theta]$ 为剩余结构构件的塑性转角限值(rad), 混凝土梁取0.03; 刚接钢梁: 翼缘未削弱或加强时取0.02, 翼缘狗骨形削弱时取0.03, 翼缘加盖板或加腋时取0.04^[51].

采用直接动力法进行结构连续倒塌分析时, 永久荷载和可变荷载组合的设计值应按下式计算:

$$L_c = \gamma_G G_k + \psi_{QL} Q_{Lk} + \psi_{QR} Q_{Rk} \text{ 或 } \psi_{QS} S_k. \quad (4)$$

采用直接动力法进行结构连续倒塌分析时, 允许单个结构关键构件失效, 相邻构件发生塑性变形, 变形限值应满足式(3)的要求.

6 结论

本文根据结构连续倒塌分析的目的, 将结构连续倒塌分析方法分为结构抗连续倒塌性能评价方法和结构连续倒塌全过程分析方法. 通过文献综述, 详细介绍了结构抗爆炸连续倒塌性能评价方法和结构抗爆炸连

续倒塌全过程分析的最新研究进展; 给出了建筑结构防爆炸连续倒塌的概念设计方法、构造措施及设计方法. 主要结论有:

(1) 传统意义上的结构连续倒塌分析方法可分为结构抗连续倒塌性能评价方法和结构连续倒塌全过程分析方法两类. 前者不需对结构的连续倒塌全过程进行分析, 可以采用相对简化的模型或方法实现对结构抗连续倒塌性能的快速评估, 主要用于建筑结构选型及初步设计阶段的结构抗连续倒塌性能评价; 后者可以模拟爆炸、撞击、火灾以及地震作用下建筑结构局部破坏的产生、演化以及引发整体结构连续倒塌的全过程, 一般用于建筑结构连续倒塌机制和模式研究, 或用于结构防连续倒塌控制效果分析.

(2) 建筑结构抗爆炸连续倒塌性能评价方法根据是否考虑引起结构连续倒塌的原因可以分为定性评价方法和定量评价方法. 替代传力路径法为典型的定性评价方法, 子结构法为定量评价方法. 子结构法建模工作量低、计算时间短、计算精度高, 能够实现对爆炸荷载作用下结构抗连续倒塌性能的定量快速评估.

(3) 爆炸荷载下建筑结构连续倒塌分析高效方法可分为直接动力法和简化分析方法. 前者能够对建筑结构在爆炸荷载作用下的连续倒塌过程进行准确可靠的模拟, 然而分析过程过于复杂, 不适合于工程应用; 后者包括考虑爆炸荷载效应的拆除构件法、基于纤维梁单元模型的直接动力法以及多尺度法等简化分析方法, 能够在保证分析精度的同时, 大幅度提高计算效率, 实现对爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌的全过程分析.

(4) 结构防连续倒塌设计应首先进行概念设计并采取合理的构造措施, 保证结构的整体性、延性和冗余度; 进而根据建筑的重要性等级和抗爆设防类别, 选择合理的分析方法, 对建筑结构进行防连续倒塌分析与设计.

致谢 感谢陆军工程大学方秦教授、北京理工大学陈小伟教授对组织本专刊的支持.

参考文献

- 1 Structural Engineering Institute of the ASCE. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05). Vancouver: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2005

- 2 Department of Defense (DoD). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse with Change 3 (UFC 4-023-03). Washington DC: Unified Facilities Criteria, 2016
- 3 General Services Administration (GSA). Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. Washington DC: Office of Chief Architect, 2003
- 4 General Services Administration (GSA). Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. Washington DC: Office of Design & Construction, 2013
- 5 Georgakopoulos P J. An Overview of Structure Progressive Collapse in Structure Systems. Syracuse: Massachusetts Institute of Technology, 2004
- 6 Krauthammer T, Hall R L, Woodson S C, et al. Development of Progressive Collapse Analysis Procedure and Condition Assessment for Structures. Washington DC: National Workshop on Prevention of Progressive Collapse in Rosemont, Ill. Multi-hazard Mitigation Council of the National Institute of Building Sciences, 2002
- 7 Marjanishvili S M. Progressive analysis procedure for progressive collapse. [J Perform Construct Facilities](#), 2004, 18: 79–85
- 8 Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building. [Eng Struct](#), 2010, 32: 1223–1235
- 9 Digesh D J, Paresv V P, Saumil J T. Linear and nonlinear static analysis for assessment of progressive collapse potential of multistoried building. In: Sivaji S, Kevin C, Marc H, eds. Proceedings of the 2010 Structures Congress. Vancouver: ASCE, 2010
- 10 Mohamed O A. Assessment of progressive collapse potential in corner floor panels of reinforced concrete buildings. [Eng Struct](#), 2009, 31: 749–757
- 11 Tsai M H, Lin B H. Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake-resistant RC building subjected to column failure. [Eng Struct](#), 2008, 30: 3619–3628
- 12 Abruzzo J, Matta A, Panariello G. Study of mitigation strategies for progressive collapse of a reinforced concrete commercial building. [J Perform Constr Facil](#), 2006, 20: 384–390
- 13 Song B I, Sezen H, Girunas K A. Experimental and analytical assessment on progressive collapse potential of two actual steel frame buildings. In: Sivaji S, Kevin C, Marc H, eds. Proceedings of the 2010 Structures Congress. Vancouver: ASCE, 2010
- 14 Fu F. Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method. [J Constr Steel Res](#), 2009, 65: 1269–1278
- 15 Fu F. 3-D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings-parametric study. [Eng Struct](#), 2010, 32: 3947–3980
- 16 Kim J, Kim T. Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames. [J Constr Steel Res](#), 2009, 65: 169–179
- 17 Khandelwal K, El-Tawil S, Sadek F. Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames. [J Constr Steel Res](#), 2009, 65: 699–708
- 18 Bae S W, LaBoube R A, Belarbi A, et al. Progressive collapse of cold-formed steel framed structures. [Thin-Walled Struct](#), 2008, 46: 706–719
- 19 Rupa P, Cuong N G. Progressive collapse analysis of a steel building with pre-northridge moment connections. In: Don A, Carlos V, David H, et al., eds. Proceedings of the 2008 Structures Congress. Vancouver: ASCE, 2008
- 20 Kim J, An D. Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action. [Struct Des Tall Spec Build](#), 2009, 18: 455–465
- 21 Li H, El-Tawil S. Three-dimensional effects and collapse resistance mechanisms in steel frame buildings. [J Struct Eng](#), 2014, 140: A4014017
- 22 Dusenberry D O, Hamburger R O. Practical means for energy-based analyses of disproportionate collapse potential. [J Perform Constr Facil](#), 2006, 20: 336–348
- 23 Izzuddin B A, Vlassis A G, Elghazouli A Y, et al. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework. [Eng Struct](#), 2008, 30: 1308–1318
- 24 Vlassis A G, Izzuddin B A, Elghazouli A Y, et al. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part II: Application. [Eng Struct](#), 2008, 30: 1424–1438
- 25 Xu G, Ellingwood B R. An energy-based partial pushdown analysis procedure for assessment of disproportionate collapse potential. [J Constr Steel Res](#), 2011, 67: 547–555
- 26 Menchel K, Massart T J, Bouillard P. Identification of progressive collapse pushover based on a kinetic energy criterion. [Struct Eng Mech](#), 2011, 39: 427–447
- 27 Almusallama T H, Elsanadedy H M, Abbas H, et al. Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads. [Struct Eng Mech](#),

- 2010, 36: 301–319
- 28 McConnell J R, Brown H. Evaluation of progressive collapse alternate load path analyses in designing for blast resistance of steel columns. [Eng Struct](#), 2011, 33: 2899–2909
- 29 Ruth P, Marchand K A, Williamson E B. Static equivalency in progressive collapse alternate path analysis: Reducing conservatism while retaining structural integrity. [J Perform Constr Facil](#), 2006, 20: 349–364
- 30 Williamson E B, Stevens D J. Modeling structural collapse including floor slab contributions. In: Griffis L, Helwig T, Waggoner M, et al, eds. Proceedings of the 2009 Structures Congress. Vancouver: ASCE, 2009
- 31 Dat P X, Hai T K, Jun Y. A simplified approach to assess progressive collapse resistance of reinforced concrete framed structures. [Eng Struct](#), 2015, 101: 45–57
- 32 ElSayed M, Campidelli M, El-Dakhkhni W, et al. Simplified framework for blast-risk-based cost-benefit analysis for reinforced concrete-block buildings. [J Perform Constr Facil](#), 2016, 30: 04015077
- 33 Ding Y, Song X, Zhu H T. Probabilistic progressive collapse analysis of steel-concrete composite floor systems. [J Constr Steel Res](#), 2017, 129: 129–140
- 34 Ding Y, Song X, Zhu H T. Probabilistic capacity model and fragility estimates for composite floor systems subjected to column loss. [Struct Infrastruct Eng](#), 2018, 14: 1037–1050
- 35 Ding Y, Song X, Zhu H T. Probabilistic progressive collapse analysis of steel frame structures against blast loads. [Eng Struct](#), 2017, 147: 679–691
- 36 Yu J, Rinder T, Stolz A, et al. Dynamic progressive collapse of an RC assemblage induced by contact detonation. [J Struct Eng-ASCE](#), 2014, 140: 04014014
- 37 Ding Y, Li H, Shi Y C, et al. Rapid evaluation method of progressive collapse resistant capacity of steel frame structures based on sub-structure (in Chinese). [J Building Struct](#), 2014, 35: 109–114 [丁阳, 李浩, 师燕超, 等. 基于子结构的钢框架结构抗连续倒塌性能快速评估方法. 建筑结构学报, 2014, 35: 109–114]
- 38 Luccioni B M, Ambrosini R D, Danesi R F. Analysis of building collapse under blast loads. [Eng Struct](#), 2004, 26: 63–71
- 39 Quan X, Brinbaum N K. Computer simulation of impact and collapse of New York World Trade Center North Tower on september 11. In: Proceeding of the 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, 2002
- 40 Zhang C A. Damage Effect from Penetration and Explosion of Conventional Weapons on Reinforced Concrete Structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009 [张传爱. 常规武器侵彻爆炸对钢筋混凝土结构的毁伤破坏效应. 博士学位论文. 南京: 解放军理工大学, 2009]
- 41 Hao H, Wu C. Development of a progressive collapse analysis procedure for concrete frame structure. In: Proceedings of the 18th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Development in Mechanics of Structures and Materials. Boca Raton: CRC Press, 2004. 775–779
- 42 Hao H, Wu C Q, Li Z X, et al. Numerical analysis of structural progressive collapse to blast loads. [Trans Tianjin Univ](#), 2006, 12: 31–34
- 43 Zhang X, Duan Z, Zhang C. Numerical simulation of dynamic response and collapse for steel frame structures subjected to blast load. [Trans Tianjin Univ](#), 2008, 14: 523–529
- 44 Li Z, Shi Y. Methods for progressive collapse analysis of building structures under blast and impact loads. [Trans Tianjin Univ](#), 2008, 14: 329–339
- 45 Shi Y C, Li Z X, Hao H. Numerical analysis of progressive collapse of reinforced concrete frame under blast loading (in Chinese). [J PLA Univ Sci Technol \(Sci\)](#), 2007, 8: 652–658 [师燕超, 李忠献, 郝洪. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土框架结构的连续倒塌分析. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8: 652–658]
- 46 Shi Y, Li Z X, Hao H. A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading. [Eng Struct](#), 2010, 32: 1691–1703
- 47 Shi Y C, Li Z X. State-of-the-art in damage and collapse analysis of RC structures under blast loading (in Chinese). [China Civil Eng J](#), 2010, 43: 83–92 [师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构破坏倒塌分析研究进展. 土木工程学报, 2010, 43: 83–92]
- 48 Li Z X, Zhong B, Shi Y, et al. Nonlocal formulation for numerical analysis of post-blast behavior of RC columns. [Int J Concr Struct Mater](#), 2017, 11: 403–413
- 49 Li Z, Zhong B, Shi Y. An effective model for analysis of reinforced concrete members and structures under blast loading. [Adv Struct Eng](#), 2016, 19: 1815–1831
- 50 Ding Y, Liu W Z. Research on progressive collapse mechanism and collapse modes of high-rise reinforced concrete structure under blast load (in Chinese). [Trans Tianjin Univ \(Sci Technol\)](#), 2015, 48: 881–887 [丁阳, 刘卫宗. 爆炸荷载下高层钢筋混凝土结构连续倒塌机制与模式研究. 天

津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48: 881–887]

- 51 Li Z X, Li G Q, Chen S W, et al. Standard for Blast Protection Design of Civil Buildings (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. 8 [李忠献, 李国强, 陈素文, 等. 《民用建筑防爆设计标准》. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 8]
- 52 Qian J R, Chen Z Y, Di X T, et al. Code for Anti-collapse Design of Building Structures (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2015. 4 [钱稼茹, 陈肇元, 邸小坛, 等. 《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392). 北京: 中国计划出版社, 2015. 4]

Research progress on progressive collapse resistant analysis and design of building structures under blast loading

SHI YanChao & LI Zhong-Xian*

Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China

Progressive collapse is defined as the spread of an initial local failure from a key element to adjacent elements, eventually resulting in the collapse of the whole structure or a disproportionately large part of it. As an abnormal dynamic load, blast load has the characteristic of rapid propagation, high peak value and short duration. And it is also one of the main reasons that might cause the progressive collapse of building structures. Based on the existing research achievements on the progressive collapse of building structures, in this paper the classification method for structural progressive collapse analysis is put forward. Then the current methods for progressive collapse analysis are further divided into two categories, i.e., the method for evaluation of structural progressive collapse resistance and the method for whole process analysis of structural progressive collapse. Recent progress on the evaluation of structural progressive collapse resistance and the method for whole process analysis of structural progressive collapse are presented from literatures. Finally, the conceptual design method, structural detailing and the procedure for progressive collapse resistant design of building structures against blast loading are put forward.

blast load, building structure, progressive collapse analysis, evaluation of structural progressive collapse resistance, progressive collapse resistant design

PACS: 02.70.Dh, 02.60.Cb, 02.50.Cw

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0180](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0180)