

谈建筑结构抗连续倒塌设计方法与数值模拟研究

王江

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]连续倒塌作为建筑结构在局部构件破坏后可能引发的大范围链式失效现象, 已成为现代结构工程领域的重要研究方向。随着建筑高度与复杂程度不断增加, 传统设计方法已难以满足极端灾害作用下的安全需求, 抗连续倒塌设计理念逐步成为结构规范体系的重要组成部分。文中基于建筑结构受力体系的复杂性, 从连续倒塌的形成机理出发, 系统梳理间接设计法、直接设计法与基于性能的设计理论框架, 探讨关键构件韧性提升、多路径传力体系构建与节点延性强化等抗倒塌策略。在数值模拟方面, 文章分析有限元方法在构件移除、动力响应分析、全寿命周期倒塌风险预测中的应用特点, 并指出非线性材料模型、失效准则与多尺度模拟技术对预测精度的影响。研究表明, 构建具有冗余性与延性的结构体系、提高关键构件耗能能力、完善节点连接细部构造是提升抗倒塌能力的核心路径; 数值模拟技术可为设计优化提供量化依据, 是未来抗倒塌工程的重要研究方向。研究成果对提升我国建筑结构安全可靠性具有积极意义。

[关键词]连续倒塌; 关键构件; 数值模拟; 结构韧性; 构件移除法

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18627 中图分类号: TU375.4 文献标识码: A

Discussion on Research on the Design Method and Numerical Simulation of Building Structure Resistance to Continuous Collapse

WANG Jiang

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Continuous collapse, as a large-scale chain failure phenomenon that may be caused by the failure of local components in building structures, has become an important research direction in the field of modern structural engineering. With the increasing height and complexity of buildings, traditional design methods are no longer able to meet the safety requirements under extreme disasters. The concept of anti continuous collapse design has gradually become an important component of the structural specification system. Based on the complexity of the stress system of building structures, starting from the formation mechanism of continuous collapse, this article systematically sorts out the theoretical frameworks of indirect design method, direct design method, and performance-based design, and explores anti collapse strategies such as improving the toughness of key components, constructing multi-path force transmission systems, and strengthening node ductility. In terms of numerical simulation, the article analyzes the application characteristics of finite element method in component removal, dynamic response analysis, and full life cycle collapse risk prediction, and points out the influence of nonlinear material models, failure criteria, and multi-scale simulation techniques on prediction accuracy. Research has shown that constructing a structural system with redundancy and ductility, improving the energy dissipation capacity of key components, and perfecting the detailed structure of node connections are the core paths to enhance the ability to resist collapse; Numerical simulation technology can provide quantitative basis for design optimization and is an important research direction for future anti collapse engineering. The research results have positive significance for improving the safety and reliability of building structures in China.

Keywords: continuous collapse; key components; numerical simulation; structural toughness; component removal method

引言

随着我国城市化和建筑工业化的持续发展, 高层建筑、大跨空间结构、大型公共建筑不断涌现, 建筑结构受力体系呈现出更高的复杂性与敏感性。在自然灾害、爆炸冲击、构件老化、材料劣化等极端情形下, 局部构件可能因承载能力不足而发生破坏。若破坏后的荷载不能被周边构件或体系有效重新分配, 则极有可能形成连锁反应, 引发局部区域进一步扩展至整体结构的连续倒塌。连续倒塌事件具有突发性强、危害范围广、不可逆性明显等特点, 已成为

结构安全事故中损失最严重的破坏模式之一。因此, 在结构设计阶段引入抗连续倒塌理念, 对保障建筑安全、降低灾害损失具有重要意义。近年来, 国内外规范逐步将抗连续倒塌要求纳入结构设计体系。美国国防部 UFC、英国结构规范、欧盟规范与我国《建筑结构可靠度设计统一标准》中均明确提出相关要求, 使得研究从理论探讨逐步走向实际工程。然而, 由于建筑体系不断创新, 材料性能多样化, 传统经验式设计方法难以对结构整体破坏模式进行准确判断。与此同时, 随着有限元模拟技术、大数据分析

与性能化设计理念的发展,对连续倒塌过程进行定量模拟与机理预测成为可能,为抗倒塌设计提供了更科学的依据。本文从连续倒塌的形成机理、设计方法、关键技术路径与数值模拟策略四个方面展开研究,旨在为工程抗灾设计与结构安全优化提供理论基础与工程参考。

1 建筑结构连续倒塌的形成机理

1.1 局部破坏引发的荷载再分配与动力放大效应

建筑结构在正常工况下具有明确且稳定的受力路径,但当某一主要承重构件由于爆炸、老化或超载等因素失效后,其承担的竖向与水平荷载将迅速转移至相邻构件。此时,周边构件需要在极短时间内承担超出设计预期的荷载,并承受显著的动力放大效应。一旦相邻构件缺乏足够韧性与延性,无法吸收冲击能量,便会进入非线性破坏程序。此类破坏进一步扩散,导致结构内部传力路径连续断裂,从而形成链式倒塌过程。动力效应在倒塌过程中发挥关键作用,其瞬态峰值荷载可能达到静载的数倍,是结构破坏加速的重要诱因。

1.2 体系冗余性不足导致的破坏路径单一化

结构冗余性是指体系在部分构件损伤后仍能依靠其他路径传递荷载的能力。一旦结构体系过度依赖单一传力路径,例如由少量柱或梁承担主要荷载,则局部破坏引发的影响将迅速放大,使结构难以形成新的稳定传力体系,最终导致整体失稳。冗余性不足的根本原因在于体系布置不合理、节点构造形式单一或抗侧体系欠缺。当突发破坏发生后,结构不能通过替代路径重新分配荷载,从而形成脆性、快速的联锁倒塌模式。提高冗余性是抗连续倒塌设计的核心理念之一。

1.3 节点延性不足引发的脆性断裂失效

节点是结构最关键的连接部位,也是连续倒塌过程中最易出现脆性失效的位置。若节点设计不合理,如核心区约束不足、焊缝质量低、连接构件抗剪能力弱等,破坏往往呈现突发性断裂。节点脆性破坏通常伴随高能量释放、低变形能力,难以提供过渡阶段使周边构件调整受力状态,因此极易触发联锁倒塌。此外,在地震、火灾等极端条件下,节点材料性能退化更加严重,破坏风险进一步提升。因此,提高节点延性是阻断倒塌传播的关键技术方向。

2 建筑结构抗连续倒塌的主要设计方法

2.1 间接设计法的系统强化思路

间接设计法不针对特定倒塌场景进行模拟,而是通过提高结构整体承载能力、改善延性、增强抗震与抗冲击性能等途径,提高结构应对突发破坏的能力。具体措施包括提高构件强度、增大截面尺寸、优化配筋布置、设置抗侧体系、加强节点构造等。该方法适用性广、实施难度低,是我国工程中最常用的抗倒塌策略。然而,间接法无法精确评估结构在局部破坏后的动力响应,也难以量化其抗倒塌能力,因此需与其他方法结合。

2.2 直接设计法在抗倒塌中的应用逻辑

直接设计法包括构件移除法和替代荷载法,是评估结

构局部破坏后的整体稳定性的重要手段。构件移除法通过模拟关键柱、梁或墙突然失效,观察结构的动力响应与替代传力路径;替代荷载法则通过施加等效于构件破坏的集中荷载,简化分析过程。直接法能够较为真实地反映结构在极端事件下的受力模式,是目前国际规范重点推荐的倒塌分析方法。其不足之处在于分析复杂、计算量大,但随着数值模拟能力增强,该方法越来越成为工程可行方案。

2.3 基于性能的抗连续倒塌设计理念

性能化设计强调结构在不同倒塌场景下的定量化性能目标,包括变形能力、能量耗散能力、塑性铰形成模式与节点失效概率等指标。性能化方法突破传统规范的经验式限制,通过模拟不同破坏情景实现设计优化。其核心是构建结构全生命周期安全指标体系,使设计目标更加清晰可控。性能化设计要求大量数值模拟与材料参数输入,因此需要更高的技术能力,但未来在建筑工程中将具有更广泛的应用前景。

3 抗连续倒塌的关键技术路径

3.1 构件延性与韧性增强技术

构件延性对于抵抗连续倒塌至关重要。混凝土结构可通过提高箍筋约束、使用高延性钢筋、优化纵筋锚固等方式增强塑性变形能力;钢结构可通过加劲肋设置、提高焊缝质量、采用高强螺栓实现韧性提升。构件延性越高,越能在局部破坏后提供塑性储备,使结构有机会形成稳定的新传力路径,避免脆性破坏的发生。

3.2 多路径传力体系构建与替代路径形成

连续倒塌传播的本质是结构内部传力路径的连续断裂,因此构建多路径体系对提高安全性至关重要。通过设置框架—剪力墙协同体系、附加支撑体系、钢—混凝土组合结构、悬链式吊挂体系等,可显著增强结构冗余性。多路径体系的目标是使结构在局部失效后具有自适应受力能力,使荷载重新分配更加平稳,从而减少联锁破坏概率。

3.3 关键构件与节点的抗倒塌强化策略

关键构件包括承重柱、转换层构件、大跨主梁、核心筒墙体等,其破坏风险直接影响整体结构安全。关键构件通常需要采用强柱弱梁设计原则、提高承载储备系数、增加抗剪承载力与延性。对于节点,可通过提高约束、优化钢筋搭接方式、采用韧性连接构造等方式显著提升抗倒塌能力。节点设计是结构抗倒塌的薄弱环节,强化节点细部构造往往能大幅改善整体稳定性。

4 数值模拟技术在连续倒塌研究中的应用

4.1 有限元模拟的技术优势

数值模拟技术能够较为真实地再现结构在局部构件失效后的动力响应过程,为连续倒塌机理研究提供重要支撑。在模拟过程中,塑性铰的发展、构件断裂演化以及连接部位失效等复杂非线性行为均可得到细致刻画,使结构受力与变形过程更加清晰。ABAQUS、ETABS、ANSYS、OpenSees 等有限元软件已被广泛应用于相关研究,不同

软件在材料模型、单元类型和求解策略上的优势，使其能够适应多种结构形式与分析需求。通过建立合理的数值模型，结构从初始局部破坏到整体坍塌的发展过程可以被完整呈现，实现全过程响应的可视化分析。

4.2 构件移除法与替代荷载法的数值实现机理

在连续倒塌研究中，有限元分析为结构失效机理模拟提供了重要技术手段。构件移除法通过在计算过程中瞬间删除关键构件单元，模拟突发破坏情形，以评估结构在局部失效后的整体响应。该方法能够较真实地反映内力重分布和结构变形过程，但模型需充分考虑几何非线性、材料非线性以及构件接触等复杂因素，对计算精度和建模水平要求较高。替代荷载法通过在失效构件位置施加等效荷载，间接反映构件缺失后的受力状态，建模过程相对简化，适合用于方案比选和初步安全评估。

4.3 全寿命周期数值预测模型构建

随着材料老化模型、环境作用模型与损伤累积理论的不断完善，结构安全评估正逐步由静态分析转向全寿命动态预测。通过构建连续倒塌预测框架，可在时间维度上模拟结构性能的演化过程，更真实地反映服役期内的安全状态。模型可综合考虑材料强度随时间退化、节点反复受力导致的性能衰减以及钢筋在腐蚀环境中的截面损失，对结构整体承载与传力能力进行系统评估。长期环境作用与荷载效应叠加后，局部薄弱环节可能逐步放大，对抗倒塌能力产生不利影响。基于这一预测结果，可提前识别高风险部位，为维护加固方案制定提供科学依据。全寿命连续倒塌预测使结构安全管理更加前瞻和精准，有助于实现由事后修复向主动防控的转变。

5 建筑结构抗连续倒塌的未来发展方向

5.1 韧性导向结构体系的提升策略

韧性设计将关注点从单纯防止破坏转向灾害后的恢复能力，强调结构在遭遇极端事件后的可修复性、功能保持水平与恢复速度。结构不再以“是否损坏”作为唯一评价标准，而是更加重视损伤是否可控、修复是否便捷以及整体功能是否能够快速恢复。围绕这一目标，建筑结构逐步引入韧性化构造理念，通过设置可更换节点，使受损部位在灾后能够快速拆换，减少对主体结构的影响。耗能构件在灾害中优先承担能量消耗任务，将损伤集中在可控区域，自修复材料则通过材料自身机制延缓裂缝发展。多种措施协同作用，有助于降低倒塌扩展风险，提高结构在极端条件下的安全性和持续使用能力，为城市安全运行提供更具韧性的工程支撑。

5.2 智能监测与大数据分析在倒塌预警中的应用

通过在结构关键部位布设传感器网络，可对构件应力、整体位移、裂缝变化及节点性能进行连续监测，使结构运行状态得到实时掌握。监测数据在长期积累后，能够形成完整的结构行为数据库，为安全分析提供可靠基础。借助

大数据分析模型，对多源信息进行综合研判，可识别结构性能退化趋势和潜在失稳特征，提前发现传统人工检查难以察觉的风险信号。智能预警系统在此基础上建立风险判别规则，当监测指标接近或超过安全阈值时，系统能够自动发出预警信息，为管理人员争取处置时间。通过提前干预和针对性维护，可有效避免风险进一步扩大，减少突发性结构事故的发生。智能监测与预警技术的应用，使结构安全管理由被动响应转向主动防控，为工程长期安全运行提供有力保障。

5.3 新材料与智能构造体系的发展趋势

高性能混凝土和超高强钢材的应用，为结构提供了更高的承载能力和更优的变形性能，使其在极端荷载作用下表现出更强的安全储备。自修复混凝土通过材料内部的修复机制，在裂缝初期阶段即可实现性能恢复，延缓结构劣化进程。高延性纤维增强材料在受力过程中能够持续耗散能量，改善传统材料脆性破坏特征，为结构提供稳定的延性支撑。材料性能的提升为结构整体韧性奠定了坚实基础。智能构造技术的引入，使结构具备一定的自适应能力，可控连接件能够在荷载变化时调节受力路径，可调刚度支撑通过改变结构响应特性减轻局部损伤影响。这类构造方式在局部破坏发生后仍能维持整体功能，为结构安全提供多重保障。

6 结论

连续倒塌作为最严重的结构破坏模式之一，是现代建筑设计中不可忽视的重要问题。本文从连续倒塌机理、设计方法、关键技术路径与数值模拟等方面展开系统研究，指出提高结构冗余性、强化关键节点与构件延性、构建多路径传力体系等措施对于提升结构抗倒塌能力具有关键作用。数值模拟技术为连续倒塌研究提供了精准的预测与优化手段，有助于建立性能化与韧性的结构体系。未来，结合智能监测、先进材料与全寿命周期评估，建筑结构抗连续倒塌能力将得到进一步提升。研究成果对于工程安全保障与结构灾害防控具有重要理论与实践意义。

【参考文献】

- [1]蒋友宝,王艺琨,吴春成,等.管内穿索下弦与交叉撑杆的张弦梁结构连续倒塌抗力计算模型[J].建筑结构学报,2025,46(11):237-249.
 - [2]程琳阳,蒋明持,朱云力,等.浙江警用无人机项目航空主题馆单层 ETFE 膜结构施工关键技术研究[J].建筑施工,2025,47(9):1448-1451.
 - [3]黄秉文,许成龙,周强,等.爆炸荷载下高层框剪结构破坏数值分析[J].武汉理工大学学报,2025,47(8):27-34.
 - [4]李治,喻贺云,褚怡璇,等.锈蚀空间网架结构力学性能分析和失效概率评估[J].振动与冲击,2025,44(15):1-10.
- 作者简介：王江（1987.6—），男，汉族，毕业院校：河北建筑工程学院；现就职单位：中土大地国际建筑设计有限公司。