

建筑结构抗连续倒塌设计研究

高会晓

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 建筑结构的连续倒塌会造成巨大的社会损失, 其抗连续倒塌研究非常必要。文章对结构连续倒塌的内容、影响及国内外规范中抗连续倒塌的概念设计进行了简要阐述, 对一些设计方法进行了详细介绍, 对结构的抗连续倒塌设计进行了归纳总结。

[关键词] 建筑结构; 设计; 研究

DOI: 10.33142/ec.v3i2.1472

中图分类号: TU352.11; TU375.4

文献标识码: A

Study on Design of Building Structure Against Continuous Collapse

GAO Huixiao

Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Continuous collapse of building structure will cause huge social loss, so it is necessary to study its resistance to continuous collapse. In this paper, the content and influence of structure continuous collapse and the conceptual design of continuous collapse resistance in the domestic and foreign codes are briefly described, some design methods are introduced in detail and continuous collapse resistance design of structure is summarized.

Keywords: building structure; design; research

引言

连续倒塌是指建筑在偶然荷载作用下, 结构局部发生破坏, 且破坏蔓延至周围构件造成结构发生部分或整体倒塌。局部的构件失效破坏后, 破坏范围可能沿水平方向或者是竖直方向发展, 其中竖直方向发展影响较为突出, 因此高层建筑的连续倒塌影响更大。1968 年英国 RonanPoint 公寓因爆炸发生部分墙体破坏, 导致整体结构出现连续倒塌。1995 年 Oklahoma 联邦大厦发生爆炸, 之后发生倒塌。“9.11”事件中世界贸易大楼在遭飞机撞击后发生连续倒塌。造成结构连续倒塌的因素有很多, 包括爆炸、撞击、火灾、飓风、地震、地基基础失效等偶然因素。建筑结构的连续倒塌会造成巨大的损失, 因此, 结构的抗连续倒塌研究具有重要的意义。

1 抗连续倒塌内容与影响因素

结构的连续倒塌大体可以分为两类, 一类是地震作用下, 结构产生大变形, 构件局部破坏, 传力途径改变, 导致结构大范围倒塌; 另一类是由于撞击、爆炸、地基基础塌陷及人为破坏造成结构承重构件失效, 导致整体结构倒塌破坏。于此对应, 结构的防连续倒塌内容主要包括两项: (1) 防止意外事故造成的结构连续倒塌问题, 包括自然紧急状态 (地质变化等)、人为紧急状态 (结构内部火灾等)。(2) 防止地震作用造成的结构连续倒塌问题。

影响结构抗连续倒塌性能的主要因素为结构的“鲁棒性”, 即结构的整体牢固性, 结构整体牢固性能好, 结构存在较多多余约束, 个别构件失效后, 结构不会出现少约束的情况, 且结构内力具有新的传力途径, 不致构件失效, 因此结构会有较好的抗连续倒塌能力; 结构整体牢固性能差, 个别构件发生破坏, 其余构件存在变为可变机构的情况或形成新的传力途径后构件内力超出承载极限发生破坏, 从而出现结构连续倒塌破坏。结构整体牢固性好的结构包括: 剪力墙结构、存在较多剪力墙的框剪结构、筒中筒结构、钢管混凝土结构及型钢混凝土结构等; 结构整体牢固性差的结构包括: 框支结构、转换结构、板柱结构、单跨框架结构和装配式结构等。

2 抗连续倒塌设计原则与设计方法

结构防连续倒塌设计难度较大, 一般结构只进行概念设计, 国内外规范给出了结构抗连续倒塌的概念设计基本原则, 以定性方法控制结构在偶然荷载作用下发生大范围倒塌破坏。若结构局部破坏不会引起结构连续倒塌, 即认为结构具有整体稳定性^[1]。

2.1 国内结构抗连续倒塌设计原则

混凝土结构设计时宜符合: (1) 采取减小偶然作用效应的措施; (2) 采取使重要构件及关键传力部位避免直接遭

受偶然作用的措施；(3) 在结构容易遭受偶然作用的区域增加冗余约束，布置备用传力途径；(4) 设置结构缝，控制可能发生连续倒塌的范围；(5) 配置贯通钢筋^[2]。

高层结构设计时应符合：(1) 加强结构连接；(2) 采用多跨规则超静定结构 (3) 构件应具有适宜延性，合理控制构件截面；(4) 独立基础间宜采用拉梁连接；(5) 转换结构应具有整体多重传递重力荷载途径^[3-4]。

2.2 俄罗斯规范抗连续倒塌规定

(1) 高度超过限值应进行结构的防连续倒塌验算，防止结构在自然紧急状态或人为紧急状态下发生连续倒塌破坏；

(2) 发生局部破坏时，结构的整体牢固性能计算应考虑到相应的荷载组合，且对结构整体牢固性能的评估应根据破坏的最大效应确定；

(3) 防止连续破坏主要措施：保证结构有较多的冗余度；连续加强配筋；提高结构和构件延性；加大连接件强度及韧性。

2.3 美国规范抗连续倒塌规定

(1) GSA 导则：多层房屋首层去除一个主要支承，不应导致结构连续倒塌，主要支承的确定如图 1 所示；对延性差的结构则考虑动力系数 2；结构具有多赘余度和多传力路径；考虑相邻构件破坏，应有足够的反向承载力；构件具有良好的延性和足够的抗剪承载力。

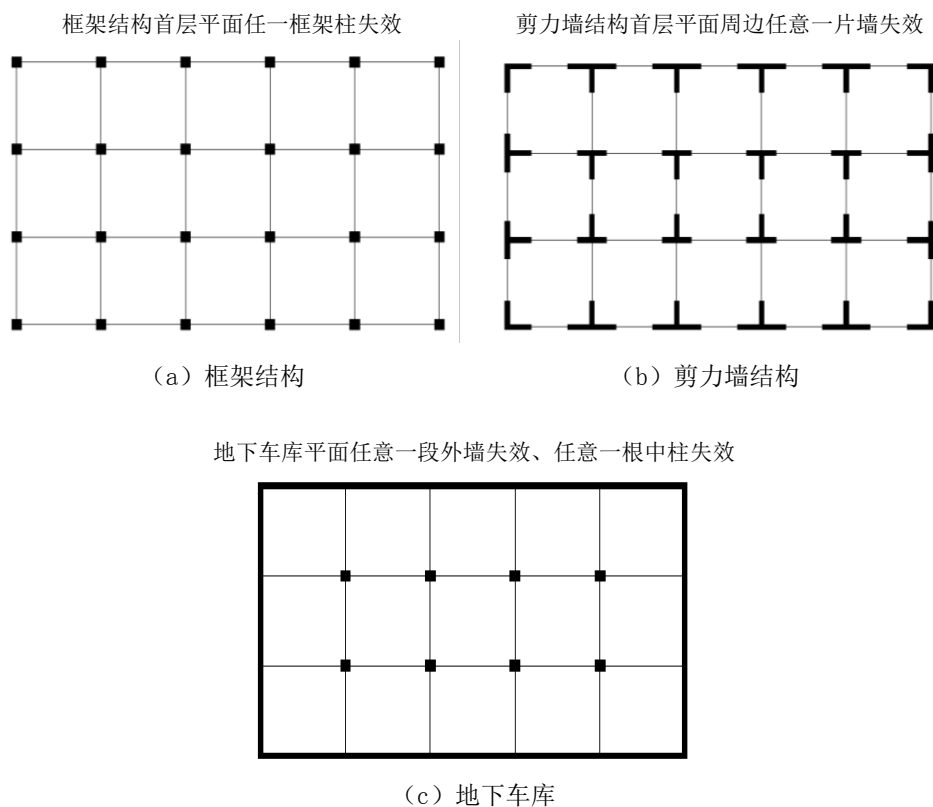


图 1 主要支承的确定

(2) DOD 导则：去掉一个主要承重构件后结构反应分析。对于框架结构，去掉任一层一根柱相当于去除与之相连所有构件；对于承重墙结构，去掉长度为两倍墙高的一段墙；对于支撑-框架结构，去掉一根柱，做法与框架结构相似；对于框架-剪力墙结构，参考框架结构和承重墙结构体系。

2.4 抗连续倒塌设计方法

虽然防连续倒塌设计难度较大，但在必要时仍需进行抗连续倒塌分析，分析方法包括局部加强法、拉结构件法和拆除构件法^[2]。

局部加强法：提高可能遭受偶然荷载作用而发生破坏的关键构件和关键传力构件的安全储备，或者直接考虑偶然作用来进行设计。

拉结构件法：在结构局部竖向构件失效情况下，跟据实际情况分别按梁-拉结模型、悬索-拉结模型和悬臂-拉结模型进行承载力验算，维持结构的整体稳固性。

拆除构件法：按一定规则拆除结构的主要受力构件，验算剩余结构体系的极限承载力或采用倒塌全过程分析进行设计，部分构件失效拆除后楼板传力途径如图2所示。

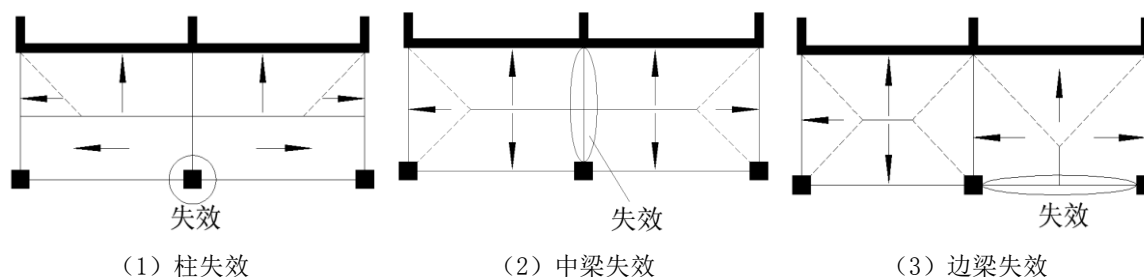


图2 构件失效后传力途径

分析方法中拆除构件法研究较多，应用较广。拆除构件设计中需要注意几个关键问题：(1) 移除构件的选择，包括概念判断方法（根据工作经验、力学分析选择荷载主要传递路径上的构件作为拆除对象，为防止遗漏，一般选取构件较多）和敏感性分析方法（基于静力线性分析，根据构件破坏后对结构整体性能的影响程度评价构件的重要性，该方法适用范围广，高效易行）；(2) 构件破坏评价（如构件变形达到极限而失效，在模拟计算中可通过设定失效的应变控制）；(3) 非线性效应及动力效应的考虑；(4) 结构倒塌评价^[5]。

3 结构抗连续倒塌仿真分析

基于拆除构件法，许多研究学者利用有限元分析软件对一些结构的连续倒塌进行了模拟分析总结出结构连续倒塌发生的部分机理，给出部分提高结构抗连续倒塌能力的设计方法。

陆征新^[6]利用 LS-DYNA 仿真分析了纽约世贸大楼的连续倒塌过程，得出其直接原因是火灾下钢材软化和构件塌落冲击。因此钢材的防火措施和承载至关重要。胡晓斌^[7]采用 LS-DYNA，对多层的平面钢框架进行了连续倒塌模拟分析，结果发现，提高钢材的失效应变能提高结构的抗连续倒塌能力。刘世朋建立了平面钢框架模型，加入转动弹簧模拟节点转动刚度，对节点模型进行了数值分析，结果表明，当考虑节点刚度退化时，动力放大系数会增大，随着节点转动刚度增大，节点能耗占比减小，梁耗能占比增加。

4 总结

结构的抗连续倒塌研究具有重要的现实意义，包括概念设计和仿真模拟设计。

概念设计中需要注意采用减小偶然作用影响、加强结构连接、增加冗余约束、增强构件承载力、设置结构缝等措施来预防结构的连续倒塌。仿真模拟设计要合理选择移除的构件，合理选择计算方法，合理选择倒塌破坏评价标准，从而得出接近实际的模拟分析结果。

[参考文献]

- [1] 孙健. 天津大剧院吊挂结构及天津图书馆结构抗连续倒塌分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
 - [2] 汤国华. 混凝土结构设计 GB 50010-2010[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 - [3] 赵新辉. 高层民用建筑钢结构技术规程 JGJ 99-2015[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
 - [4] 蒋璠, 倪建公, 瞿革, 李庆武. 复杂高层钢结构抗连续倒塌能力分析关键技术研究[J]. 建筑结构学报, 2019(06): 155-165.
 - [5] 陆新征, 江见鲸. 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析[J]. 土木工程学报, 2001(06): 8-10.
 - [6] 胡晓斌, 钱稼茹. 多层平面钢框架连续倒塌仿真分析[J]. 力学与实践, 2008(04): 54-57.
 - [7] 刘世朋, 刘铭劼, 芦燕, 赵一峰. 考虑梁柱节点转动刚度的钢框架抗连续倒塌性能研究[J]. 建筑结构, 2017(16): 9-13.
- 作者简介: 高会晓 (1986.9-), 毕业院校: 大连理工大学; 现就职单位: 河北建筑设计研究院有限责任公司。