

# 强震下混凝土结构渐进倒塌性能分析与设计新进展

何政<sup>1</sup>

## 摘要

对重大工程结构进行强地震作用下的渐进倒塌全过程分析并建立相应的设计方法已成为当前地震工程领域的发展趋势. 现行抗震设计规范中针对结构临界倒塌状态的界定、抗倒塌性能与倒塌机制的评估方法等方面已不能适应发展迅速的结构性性能优化设计理论和日趋复杂的建筑使用环境的要求. 围绕结构渐进倒塌过程分析、相关设计规范或指南、结构抗渐进倒塌性能及其设计以及结构渐进倒塌地震损伤性能评估 4 个方面的最新研究进展进行了回顾, 并指出了其中存在的一些问题.

## 关键词

渐进倒塌; 地震损伤; 仿真分析; 混凝土结构; 性能设计

中图分类号 TU352.1; TU375

文献标志码 A

收稿日期 2009-05-23

资助项目 国家自然科学基金(50778035); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0096)

## 作者简介

何政, 男, 工学博士, 教授, 博导, 主要从事基于性能的结构抗震设计、FRP 增强混凝土结构性能以及混凝土结构非线性分析方面的研究. hezheng1971@gmail.com

## 0 引言

### Introduction

在美国《建筑和其他结构的最小设计荷载》规范<sup>[1]</sup>中, 渐进倒塌被定义为在正常使用条件下, 由于突发事件, 结构发生局部破坏, 这种破坏从初始位置沿构件进行传递, 最终导致整个建筑物倒塌或者造成与初始破坏不成比例的倒塌. 可见, 渐进倒塌具有非对称性和渐进性两个重要特征. 引起渐进倒塌的因素或作用有很多种, 根据这些因素作用在结构上的持续时间长短可以分为快速渐进倒塌和慢速渐进倒塌两大类. 爆炸、冲击、撞击等瞬间作用引起的结构渐进倒塌属于前者; 地震、火灾、雪灾、强风等作用引起的结构渐进倒塌则属于后者. 与前者分析相比, 在强地震引起的渐进倒塌分析中除了考虑作用不同外, 还主要体现在对应变率、楼板刚性假设、构件强度与刚度的衰减规律等处理上<sup>[2]</sup>.

我国现行抗震设计规范针对“大震不倒”的抗震设计原则是要求结构在罕遇地震作用下仍能保持整体稳定和保障建筑物内人员生命安全. 在具体设计实践中, 这一原则是通过验算薄弱层的弹塑性变形来实现的. 然而, 这样的设计实践存在一些缺陷: 1) 过于粗略的弹塑性变形限值掩盖了实际结构构件在强地震作用下的复杂力学行为; 2) 未能就结构构件的实际临界倒塌状态给出清晰的界定; 3) 不能体现结构在暂时失去局部稳定性后的整体抗震性能. 对于一般的工业与民用建筑, 这种简化的设计方法基本能满足其相应的性能水准要求. 但是对于性能水准要求更高的重大工程结构来说, 建立更加科学、合理的抗渐进倒塌设计方法已势在必行<sup>[3]</sup>.

建立这种抗渐进倒塌设计方法的关键在于能够对结构在强地震作用下依次经历弹性状态、弹塑性状态、首个受力构件失效和断裂、临界倒塌状态、局部体系发生坍塌甚至结构整体出现倒塌的全过程力学行为给出准确、合理的描述. 钢筋混凝土结构是目前抵御竖向荷载和水平地震作用的主要结构体系之一, 分析其在强地震作用下发生的渐进倒塌过程必然面临来自材料非线性、几何非线性、接触-碰撞分析以及不连续位移场的描述四个方面的数值挑战. 目前的倒塌分析大多数集中于建立结构构件的倒塌判据, 而对于其中的接触-碰撞分析以及不连续位移场的描述鲜有涉及, 而这两者恰恰又是渐进倒塌分析中的核心和难点, 它直接关系到对倒塌机理和相关力学行为的

<sup>1</sup> 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳, 110004

预测结果.

## 1 结构渐进倒塌过程分析

### Analysis of structural progressive collapse

结构的渐进倒塌分析涉及到极端作用条件下材料力学性能的高度非线性、大变形和大转动情况下的几何非线性、构件失效断裂脱离后在惯性作用下与其他构件的接触碰撞非线性以及构件脱离导致的不连续位移场的描述问题. 结构在强地震作用下的振动可能要多次经历从稳定振动到不稳定振动再恢复到稳定振动这样的反复过程, 当结构被判定形成机构后, 结构有可能即将发生整体倒塌, 也可能只是形成局部坍塌而整体仍然继续承载<sup>[4]</sup>. 一旦这种过程出现不可逆, 即使激励停止, 结构也将进入渐进倒塌状态<sup>[5]</sup>. 绝大多数针对强地震作用下结构的渐进倒塌分析和研究止步于初始倒塌判据的建立, 除了上述数值求解困难之外, 主要还是因为结构抗震设计规范一直以来过于强调避免倒塌设计, 对于引起渐进倒塌的原因、倒塌机制和倒塌后果并没有给予足够的重视. 针对渐进倒塌的研究始于 1968 年英国 Ronan Point 公寓因煤气泄漏引起爆炸而导致建筑物局部倒塌的调查工作. 随后, 研究工作逐步扩展到其他因素引起的倒塌问题. 2001 年美国世界贸易中心的倒塌更是全面加速了这一研究进程, 同时也促成了“灾害源无关型”抗渐进倒塌设计思路的提出<sup>[6]</sup>.

由于结构渐进倒塌分析涉及诸多数值求解困难, 常规的有限元方法不能直接应用于渐进倒塌全过程的分析, 不少学者尝试了其他数值求解方法, 如修正有限元方法、离散单元法、DEM 法、AEM、非连续变形分析法等. 在秦东等<sup>[7]</sup>采用的扩展散体单元模型中, 钢筋混凝土被离散成一个个质点, 质点之间用非线性弹簧和阻尼器相连, 用以模拟混凝土的断裂、钢筋的屈服和内阻尼的存在. 这种方法存在参数选取困难和计算效率不高的问题. 宣纲<sup>[8]</sup>将离散单元法的动态松弛法运用到钢筋混凝土剪切型框架结构的倒塌分析中, 分析中没有考虑接触非线性、构件的断裂以及悬链线机制. 周健等<sup>[9]</sup>应用基于离散元原理的颗粒流数值模拟(简称 PFC2D)软件对钢筋混凝土框架结构从构件的失效、局部坍塌到整体倒塌全过程模拟做了有益的尝试. 黄庆华<sup>[10]</sup>则在分析中采用离散宏单元的做法, 将混凝土空间框架结构离散化为梁单元、柱单元和节点单元, 建立了单元连接界面处钢筋和混凝土单轴弹簧的恢复力模型.

张雷明等<sup>[11]</sup>采用基于广义函数建立的杆单元混合铰模型来描述结构倒塌过程中的不连续位移场, 这种模型也同时被用来建立倒塌判据, 他们在描述接触碰撞现象时引入了拉格朗日乘子以描述构件空间构形的位置变化. Isobe 等<sup>[12]</sup>除了采用了类似的方法描述渐进倒塌过程结构几何构形的变化, 他们在分析时还采用了可转换积分(ASI)技术, 对混凝土构件采用了集中塑性假设, 构件的断裂是以作者自己定义的塑性铰处的损伤指数来判断的. Kaewkulchai<sup>[13]</sup>采用一种改进的 Park & Ang 损伤模型来描述钢构件端部的损伤状态和判别构件的失效—断裂情况, 构件端部损伤对构件强度和刚度的影响也反映在构件单元刚度矩阵中. 当首个构件失效后, 结构分析即刻分成完好主结构分析系统和脱离杆件子结构分析系统两个系统同时进行, 这样在主结构分析中无需引入新的节点, 保证了计算效率, 且能跟踪破坏构件的轨迹, 值得借鉴. 但是在针对碰撞建模所采用的假设条件中忽略了被碰撞构件的速度, 值得商榷. Liu<sup>[14]</sup>在其分析钢结构框架渐进倒塌的程序中考虑了弯曲弹塑性变形、剪切变形和轴向变形, 并建立了弯矩、剪力和轴力联合作用下构件截面的 M-V-P 破坏准则, 通过各自的刚度折减系数来模拟各自刚度的衰减, 构件端部的脱离对节点损伤程度采用所谓的“健康指数”来说明.

由于倒塌全过程分析涉及的非线性问题较多, 直接利用现有相对成熟的有限元分析平台进行科学、合理的二次开发应该是一个不错的选择. Lu 等<sup>[15]</sup>在针对混凝土剪力墙结构的渐进倒塌分析中, 就是将自己编制的多层混凝土壳单元模型用户子程序嵌入到 MARC® 有限元分析软件中. Bao 等<sup>[16]</sup>开发了一种模拟节点力传递和钢筋拔出过程且能考虑几何非线性的宏单元, 他们将该单元模型嵌入到 OpenSEES 分析平台中, 并对钢筋混凝土框架结构渐进倒塌全过程进行了分析. OpenSEES 是一种开放性分析平台, 其中的单元库可以体现构件刚度和强度的衰减, 并能反映集中塑性发展. Kim 等<sup>[17]</sup>同样利用 OpenSEES 分析平台进行了钢框架的渐进倒塌反应仿真, 分析中融入了 Colombo-Negro 广义损伤指数<sup>[18]</sup>, 该损伤指数与屈服强度衰减程度有关. 当单元塑性铰损伤到一定程度时, 程序自动分离单元并重新定义节点. 美国应用技术理事会(简称 ATC)在确定 ATC-63 报告<sup>[19]</sup>中地震性能参数时, 也是部分借鉴了 OpenSEES 分析平台对几个 Benchmark 体系

的非线性动力分析结果. 一些常被用于分析爆炸、撞击等快速作用的显示积分有限元程序, 如 LS-DYNA<sup>®</sup> 和 AUTODYN<sup>®</sup> 也被用来分析结构的渐进倒塌过程. 此外, 美国 CSI 公司推出的 SAP2000 和 ETABS 也被应用于结构的渐进倒塌分析中.

## 2 相关设计规范或指南

### Relevant design codes or guidelines

英国是开展渐进倒塌研究最早的国家, 历经 30 多年的研究和设计实践取得了很好的效果, 相关设计条款归纳在现行“结构混凝土”第 1 分册中<sup>[20]</sup>, 该规范建议采用拉结强度法、备用传力路径 (AP) 法和特殊局部抗力法进行渐进倒塌性能分析和评估. 欧盟在这个领域的研究虽然较晚, 但是提出的抗倒塌设计方法较英国的设计指南更为合理一些, 它采用了拉结强度法、拆除构件法和关键构件法 3 种方法. 英国正在考虑借鉴 2006 年 EnroCode Draft 版本<sup>[21]</sup> 中的部分内容来对现行规范中的相应条款进行修订. 美国针对渐进倒塌的研究热潮是在“9·11”事件发生之后. 2002 年 7 月, 在美国 Illinois 州的 Rosemont 市召开了由国家建筑科学学会组织的“全国避免渐进倒塌研讨会”, 大会共提交了 11 篇特邀论文. 2001—2007 年, 多部相关设计指南<sup>[22-25]</sup> 出现, 其中美国总务管理局 (简称 GSA) 于 2003 年编制的《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》<sup>[23]</sup> 和国防部 (简称 DOD) 于 2001 年编制、2005 年修订的《建筑抗连续倒塌设计》<sup>[24]</sup> 给出了较为详细的结构抗连续倒塌的设计方法及流程. 这 2 本指南均建议采用 AP 法, 其中 DOD 指南的制定主要参考了英国现行设计指南, 而 GSA 指南则提供了一个判断建筑是否可以免于进行抗连续倒塌分析的流程. 2008 年 4 月, 美国 ATC 发布“结构体系性能与响应参数的量化”90% Draft 版本<sup>[19]</sup>. 该指南首次制定了不同结构体系在遭受强地震作用时具备等效抗渐进倒塌安全性的地震性能参数, 如响应修正系数  $R$ 、体系超强系数  $W_0$  和挠度放大系数 ( $C_d$ ). 显然, 该指南已深入到具体结构体系的设计和倒塌危险性的可靠性评估中, 100% 草稿内容将于近期公布. 日本紧随美国之后, 也集中力量进行了相关研究. 2003 年, 日本钢结构协会和日本高层建筑与城镇住宅理事会着手研究高层钢结构的冗余度问题以及结构抵御地震和火灾的设计方法, 于 2005 年最终形成了《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》<sup>[26]</sup>. 相比之

下, 我国在这个领域的研究工作起步相对较晚, 制定相应设计条款的工作才刚刚启动. 在现行《建筑结构可靠度设计统一标准》<sup>[27]</sup> 中仅定性地规定: 因偶然事件而产生局部破坏后, 其余部分不致于发生灾难性的连续倒塌. 现行《建筑抗震设计规范》<sup>[28]</sup> 中也有类似的规定: 应避免部分结构或构件破坏而导致整个结构丧失抗震承载力或对重力荷载的承载能力, 至于如何满足此项要求, 规范条文说明中并没有给出具体的设计准则. 目前, 我国已启动《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[29]</sup> 的修订工作, 拟补充有关结构抗连续倒塌的设计规定.

## 3 结构抗渐进倒塌性能及其设计

### Structural progressive collapse resistance and its design

进行连续倒塌分析时, 其临界倒塌状态是在毫秒内发生的, 对构件具有很高的局部应变速率, 可能造成构件强度的瞬间提高<sup>[2]</sup>, 一旦倒塌临界状态出现之后, 主要考虑的是在服役竖向荷载作用下的结构连续倒塌分析; 而在强地震作用下的结构渐进倒塌分析中, 其临界倒塌状态是在结构构件损伤经历一段时间累积之后出现的, 不需要考虑应变率的变化, 但是必须考虑损伤积累带来的构件强度和刚度的衰减, 临界倒塌状态出现时对应的初始运动条件与前者也有所不同. 当临界倒塌状态出现后, 结构受到的水平惯性力和竖向服役荷载必须同时考虑, 所以地震作用下引起的渐进倒塌大多表现为水平惯性力和竖向荷载作用下的竖向失稳. 可见, 两者的倒塌机制是不同的, 不同的倒塌机制实际上体现了结构在渐进倒塌过程中不同的力学行为, 需要采取不同的应对措施. 尽管如此, 两者在倒塌临界状态出现之后发生的内力重新分布机制在原理上是相似的, 针对前者的分析与设计对后者仍具有一定的借鉴意义.

在渐进倒塌过程中, 混凝土构件要依次经历弹性、弹塑性、抗弯失效、悬链受拉和断裂 5 种状态. 其中悬链线机制被认为是备用荷载传递路径, 可以抵抗额外施加的荷载, 成为抵抗渐进倒塌的最后一道防线. 有关试验证实, 混凝土框架结构的连续倒塌破坏最终是由梁中纵筋的断裂来控制的, 如果能够提高梁受拉钢筋应变分布的均匀性, 则可以提高梁在悬链线状态下的变形能力<sup>[30]</sup>. 此外, 当某个或某些局部构件失效后, 结构作为空间整体体系也可以提供了类似的“空腹作用”来主导结构层面的内力重新

分布过程,楼板的悬链线机制则主要影响着局部楼面体系的内力重新分布过程,其中梁底部受拉钢筋的锚固性能对内力分布过程影响显著<sup>[31]</sup>.除了梁底部受拉钢筋之外,梁中抗剪钢筋的用量对倒塌性能也有不可忽视的影响<sup>[32]</sup>.除了保证钢筋用量之外,提高构件的延性,如提高材料的失效应变同样也可以明显提高结构抵抗渐进倒塌的能力<sup>[33]</sup>.

结构抗渐进倒塌设计方法可分为事件控制法、间接法和直接法3类<sup>[34]</sup>.所谓的事件控制就是指在不可能消除潜在的渐进倒塌危险性的情况下,把出现渐进倒塌的可能性降低至可以接受的程度,而不致于发展成整体倒塌. Ellingwood<sup>[35]</sup>事件控制法在具体应用时可以继续沿用基于可靠度的荷载与抗力设计理论框架,但是 Starossek<sup>[36]</sup>则认为这种理论框架目前存在3个致命缺陷:1)只注重局部破坏而不重视整体破坏,不同的结构体系在局部破坏后的后果不同,而这一点在可靠度设计中无法体现;2)由于统计数据的严重缺乏,低概率事件和偶然事件并没有考虑进来;3)需要规定容许的失效概率.目前针对渐进倒塌这种低概率、高后果事件的认识和相关的失效概率还没有统一.间接法就是通过加强结构的概念设计,加固其整体性,提高体系冗余度、延性和强韧性来间接地提高结构的抗渐进倒塌能力,如基于悬链效应的拉结强度法.这种方法简便易行,但也存在一些明显的不足:1)未考虑集中荷载和梁端塑性弯矩的影响;2)未考虑荷载的空间传力;3)楼层高度超静定次数影响考虑不合理;4)未考虑动力效应和强度折减<sup>[37]</sup>.直接法就是采用特定的方法,如基于构件弯曲效应的AP法或关键构件法来进行结构渐进倒塌分析、评估和设计.由于AP法与产生倒塌的原因无关,故常被用来进行渐进倒塌风险评估,具体有采用动力放大系数的线弹性分析方法、对结构进行竖向荷载作用下的非线性推覆分析方法和动力分析方法3种.需要指出的是,AP法是在静力情况下去除关键构件后再进行分析的,不能完全反映结构在强地震作用下发生的运动构件失效情况.不同的方法有着不同的适用范围,在GSA和DOD指南中规定,对于保护水准很低和较低的情况,设计时只能采用拉结强度法,但可以采用AP法来检验传递拉结力不足的竖向结构构件;对于中等保护水准和高保护水准的情况,除了验算拉结力提供的悬链机制抗力之外,AP法也可以被用来检验构件的受弯承载力,同时要保证底层周边竖向承载构件的延性.

对于抗渐进倒塌能力不足的结构构件,可以考虑采取必要的加固措施. Crawford<sup>[38]</sup>从增加荷载传递路径和加强或拉结潜在可能失效的构件方面建议了一些加固措施,其中采用纤维增强塑料(FRP)对混凝土构件进行加固已经被广泛应用于静力加固和抗震加固实践中. FRP对混凝土柱抗渐进倒塌能力的提高已被许多学者的研究成果所证实<sup>[39-40]</sup>.此外,针对抗震结构的连续倒塌分析表明,抗震构造措施可以显著降低结构连续倒塌的损伤程度<sup>[41]</sup>.尽管两种倒塌设计在破坏模式、结构塑性铰的位置及其对其转动能力要求等方面不同,但在结构的整体性、延性、连续性和冗余度等方面的要求却有相似之处<sup>[42]</sup>.结构的整体强韧性是指结构对其局部破坏的不敏感程度,它是由结构冗余度、构件的韧性和连接刚度构成.一些学者<sup>[43]</sup>尝试着采用量化整体强韧性的方法,如冗余度系数法来进行结构的抗渐进倒塌设计.

性能设计的一些基本概念也被融入到结构的抗渐进倒塌设计中. Starossek<sup>[36]</sup>和吴志林<sup>[44]</sup>认为既然引起倒塌的因素无法预测和避免,按照现行指南进行抗渐进倒塌设计可能增加较大的成本,建议采用“分区设计”的概念.通过各区间人为设置的“薄弱层”的阻断,有条件地将可能的坍塌控制在独立的区域内.古音等<sup>[45]</sup>则结合性能设计的基本概念,建议了基于AP法的整体强韧性评估流程:1)假定意外灾害作用;2)假定初始的局部失效;3)确定可接受的连锁倒塌程度;4)确定可接受的剩余结构破坏程度;5)确定适用的安全系数和荷载组合.

#### 4 结构渐进倒塌地震损伤性能评估

##### Evolution of seismic damage in structural progressive collapse

损伤的发生及其演化规律是结构构件出现弹塑性、构件失效-断裂、局部坍塌或结构整体发生倒塌的根本诱因,基于损伤的混凝土结构渐进倒塌全过程分析及其控制可以提供一种新的研究思路<sup>[46]</sup>.

根据损伤指数定义和应用的层面来分,结构地震损伤刻画方法大体可以分为3类:1)基于混凝土塑性理论和连续损伤介质力学的材料损伤模型,这类方法中有的还结合了断裂力学相关知识;2)以构件或截面的宏观响应为基本变量的经验型损伤计算模型,其中以Park和Ang损伤模型<sup>[47]</sup>为代表,此类模型中又可分为单参数、双参数或多参数几种;3)以

结构体系整体响应特征参数来定义的损伤计算模型,如以体系受地震作用前后的刚度或周期变化来定义整体损伤指数。

在材料损伤建模方面, Lee 等<sup>[48]</sup>在定义混凝土单轴拉、压缩损伤变量的基础上,结合混凝土塑性理论中屈服面的概念和连续损伤力学中的损伤演化规律,建立了预测混凝土结构在循环荷载作用下响应的率相关塑性-损伤本构模型,该模型可以考虑因混凝土应变软化引起的局部损伤和开裂后混凝土单元刚度的恢复,阻尼的考虑是通过单元刚度进行折减来实现的。此后,一些学者发展了一些改进方法,如采用分层模型推导单元刚度矩阵<sup>[49]</sup>、引入开裂混凝土的裂缝处理模式<sup>[50]</sup>、引入有效阻尼应力概念以考虑耗能影响<sup>[51]</sup>等。此外,不少学者借鉴了结构非线性分析中的杆件端部集中塑性模型,发展了基于梁-柱宏单元的弹塑性-损伤模型<sup>[52-54]</sup>,构件层面的损伤状态可直接由塑性铰处的损伤进行归一化得到。断裂力学中的一些概念也被应用到混凝土塑性-损伤模型的发展过程中,在 Wu 等<sup>[55]</sup>提出的基于能量释放率的混凝土塑性-损伤本构模型中就采用了拉伸和剪切损伤变量来描述混凝土宏观力学性能的衰减。塑性-损伤模型存在的问题主要是,不同力学分支在融合过程中引入的假设条件过多,这些假设条件还需要进一步的试验验证。此外,过于繁杂的数学描述使得程序的稳定性和收敛性不易得到保证。

构件损伤模型中的变量取自于构件的宏观响应,如最大延性系数、层间位移、层间最大残余变形等,也可以是这些响应的导出量,如累积耗能,也可以是这两者的某种组合, Park 等<sup>[47]</sup>于 1985 年提出的基于位移和累积滞回耗能线性组合的双参数模型就是其中的代表。许多学者针对该双参数模型,对其中参数的选取和组合方式进行了研究并提出了许多改进形式,在此就不一一赘述。除了 Park-Ang 类型的构件损伤模型外,其他学者也建议了一些构件损伤的计算模型,这些模型中的参数可以是某一特定强度衰减变化值<sup>[18]</sup>、或刚度衰减<sup>[56-57]</sup>或频率变化<sup>[58]</sup>或滞回耗能的变化值<sup>[59]</sup>。Erdurana 等<sup>[60]</sup>针对剪切破坏形式为主的构件,其损伤函数是通过调整低延性受弯破坏构件的损伤曲线得到。

针对结构整体损伤模型的定义大体上可分为两大类,一类是基于构件损伤指数的加权平均方法,权系数通常反映了某一个构件位置重要性及其损伤值对结构整体损伤的贡献度,其中针对 Park-Ang 类损

伤模型的权系数研究较多。这种以加权形式来确定更高层次损伤的做法在塑性-损伤本构模型中也有应用<sup>[54,61]</sup>。在此类模型中,加权参数的选取和权系数的确定具有一定的经验性,模型的适用性不强;另外一类结构整体损伤模型是以结构体系在振动过程中其动力特性参数的变化值来定义,其中以 DiPasquale 等<sup>[62]</sup>提出的基于等价线性单自由度体系(简称 SD-OF)自振周期变化的结构整体损伤指数计算模型最具有代表性。此后,不少学者针对这一模型展开研究并进行了改进。Benedetti 等<sup>[63]</sup>将整体损伤定义为模态有效刚度,即某一个特定位置一个响应循环内最大模态位移时对应的每单位质量的模态恢复力与该最大位移的比值,模态有效刚度随着相对模态位移的增大而呈现衰减性质。Köylüoğlu 等<sup>[64]</sup>则采用结构体系基本振型特征频率的变化来定义结构整体损伤。Skjærbaek 等<sup>[65]</sup>是以结构最低的两套时变特征值来确定结构损伤。Gupta 等<sup>[66]</sup>将屈服位移和延性能力相关的参数作为输入变量,建立了预测特定损伤情况下结构刚度和强度的衰减关系,损伤指数等于 0.8 对应着倒塌状态,该模型没有考虑耗能的影响。损伤计算用的参变量除了提取动力时程分析结果外,还可以利用非线性静力 Pushover 分析得到的结果。在 Ghobarah 等<sup>[67]</sup>提出的方法中,结构损伤被定义为结构体系遭受地震前后两次 Pushover 分析得到的基底剪力-顶部侧移曲线切线刚度的变化函数。这种方法可以计算不同加载状态结构损伤值,而无需预测结构最大位移或结构临近倒塌时的变形。显然,这种方法的适用性和可靠性受限于 Pushover 分析方法本身。

上述混凝土损伤本构模型的定义存在一些问题:1)损伤指数定义的区间不统一。虽然对应完好状态损伤指数均统一定义为 0,但是对应失效或倒塌的损伤指数差异较大,可见对损伤指数合理的波动区间没有统一的认识;2)基于振动频率或周期变化值的结构整体损伤指数模型不能完全反映结构渐进倒塌过程中内力重分布的过程。当结构体系发生内力充分分布时,结构体系可能处于暂时的失稳态,这一类损伤模型可能给出错误的判断;3)不同层面的损伤本构模型缺乏科学、合理的过渡。

## 5 结论

### Conclusion

本文回顾了渐进倒塌性能分析与设计相关研究

的最新进展,论述了在强震作用下钢筋混凝土结构的渐进倒塌分析与设计的发展趋势.在分析手段上,由于渐进倒塌分析涉及的非线性问题更为复杂,面临更为严峻的数值求解困难,真正意义上的渐进倒塌数值分析实现起来仍然具有相当大的困难,在分析中必须做一些合理的简化.关于渐进倒塌设计,目前的观点仍然不一致,主要矛盾集中在:1)采取的策略是“抗倒塌设计”还是“控制倒塌区域”设计;2)进行抗倒塌设计是否引起工程造价的大幅度提高;3)现行可靠度设计理论框架是否依然有效.不管怎样,充分结合性能设计的基本理念应该是倒塌设计的必然发展趋势.随着分析手段不断发展和改进,以及对极端不利荷载或作用认识的不断深入,针对重大工程结构的渐进倒塌性能分析与设计方法将会逐步发展成熟.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures ( ASCE/SEI 7-05 ) [ S ]. Reston: Virginia, 2006
- [ 2 ] Powell G. Progressive collapse: Case studies using nonlinear analysis [ C ] // Proceedings of the 2005 structural congress and the 2005 forensic engineering symposium. New York, 2005
- [ 3 ] SEAOC Vision 2000 Committee. Performance-based seismic engineering of buildings [ R ]. Report Prepared by Structural Engineers Association of California, Sacramento, California USA, 1995
- [ 4 ] 焦双健,冯启民,付长文. 钢筋混凝土框架结构地震破坏的计算机模拟方法 [ J ]. 地震工程与工程振动, 2002, 22 ( 2 ) : 54-59  
JIAO Shuangjian, FENG Qimin, FU Changwen. Simulation method for earthquake damage to RC frames [ J ]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22 ( 2 ) : 54-59
- [ 5 ] 冯世平,沈聚敏. 钢筋混凝土框架结构的地震倒塌反应 [ J ]. 地震工程与工程振动, 1989, 9 ( 1 ) : 67-78  
FENG Shiping, SHEN Jumin. Seismic collapse responses of reinforced concrete frame structures [ J ]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1989, 9 ( 1 ) : 67-78
- [ 6 ] Smith J L, Swartzell S R, Hall B. Prevention of progressive collapse-DOD guidance & application [ C ] // Proceedings of SAME National Symposium on Comprehensive Force Protection. SAME Readiness Committee, Charleston, South Carolina, USA, 2001
- [ 7 ] 秦东,范立础. 钢筋混凝土结构倒塌全过程数值模拟 [ J ]. 同济大学学报, 2001, 29 ( 1 ) : 80-83  
QIN Dong, FAN Lichu. Numerical simulation on collapse process of reinforced concrete structures [ J ]. Journal of Tongji University, 2001, 29 ( 1 ) : 80-83
- [ 8 ] 宣纲. 地震作用下钢筋混凝土结构的倒塌分析 [ D ]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2002  
XUAN Gang. Collapse Analysis of reinforced concrete frame structures under earthquake [ D ]. Shanghai: Tongji University, 2002
- [ 9 ] 周健,屈俊童,贾敏才. 混凝土框架倒塌全过程的颗粒流数值模拟 [ J ]. 地震研究, 2005, 28 ( 3 ) : 288-293  
ZHOU Jian, QU Juntong, JIA Mincai. Numerical simulation of concrete frame collapsing process with PFC2D program [ J ]. Journal of Seismological Research, 2005, 28 ( 3 ) : 288-293
- [ 10 ] 黄庆华. 地震作用下钢筋混凝土框架结构空间倒塌反应分析 [ D ]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006  
HUANG Qinghua. Collapse response analysis of 3D reinforced concrete frame structures under earthquake [ D ]. Shanghai: Tongji University, 2006
- [ 11 ] 张雷明,刘西拉. 钢筋混凝土结构倒塌分析的前言研究 [ J ]. 地震工程与工程振动, 2003, 23 ( 3 ) : 47-52  
ZHANG Leiming, LIU Xila. Forward research of collapse analysis of reinforced concrete structures [ J ]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23 ( 3 ) : 47-52
- [ 12 ] Isobe D, Tsuda M. Seismic collapse analysis of reinforced concrete framed structures using the finite element method [ J ]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32: 2027-2046
- [ 13 ] Kaewkulchai G. Dynamic progressive collapse of frame structures [ D ]. Ph D dissertation, The University of Texas at Austin, Texas, USA, 2003
- [ 14 ] LIU Y X. Progressive-failure analysis of steel building structures under abnormal loads [ D ]. Ph D Dissertation, University of Waterloo, ON, Canada, 2007
- [ 15 ] LU X Z, LIN X C, MA Y H, et al. Numerical simulation for the progressive collapse of concrete building due to earthquake [ C ] // Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China, 2008
- [ 16 ] Bao Y H, Kunnath S K, El Tawil S, et al. Macromodel-based simulation of progressive collapse: RC frame structures [ J ]. Journal of Structural Engineering, 2008, 34 ( 7 ) : 1079-1091
- [ 17 ] Kim H S, Kim J, An D W. Development of integrated system for progressive collapse analysis of building structures considering dynamic effects [ J ]. Advances in Engineering Software, 2009, 40: 1-8
- [ 18 ] Colombo A, Negro P. A damage index of generalized applicability [ J ]. Engineering Structures, 2005, 27: 1164-1174
- [ 19 ] Applied Technology Council ( ATC ). Quantification of building seismic performance factors-ATC-63 and FEMA P695 project report-90% Draft [ R ]. Applied Technology Council, Redwood, California, USA, 2008
- [ 20 ] British Standard 2000. Structural use of concrete; Part 1; Code of practice for design and construction ( BS 8110-1; 2000 ) [ S ]. British Standards Institution, London, UK, 2000
- [ 21 ] European Standard. EuroCode 1-actions on structures; Part 1-7: General actions-accidental actions [ R ]. Final Project Team Draft of prEn 1991-1-7. Brussels: Belgium, 2006
- [ 22 ] National Research Council. ISC security design criteria for new federal office buildings and major modernization projects: A review and commentary [ R ]. Prepared by the Committee to Review the Security Design Criteria of the Interagency Security Committee. The National Academies Press, Washington D. C. , 2001
- [ 23 ] The U. S. General Services Administration ( GSA ). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [ R ]. Washington D C, 2003
- [ 24 ] The U. S. Department of Defense ( DOD ). Design of buildings to resist progressive collapse [ R ]. Report No UFC 4-023-03, Unified Facilities Criteria ( UFC ), Washington D. C. , 2005
- [ 25 ] The U. S. National institute of standards and technology ( NIST ). Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings [ R ]. Technology Administration, U. S. Department of Commerce, Washington, D C, 2007
- [ 26 ] Japanese Society of Steel Construction & Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Guidelines for collapse control design [ S ]. Tokyo, Japan, 2005
- [ 27 ] GB50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准 [ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001  
GB50068—2001 Unified standard for reliability design of building

- structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001
- [28] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008  
GB50011—2001 Code for seismic design of buildings (2008 edition)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008
- [29] JGJ3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002  
JGJ3—2002 Technical specification for concrete structures of tall building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002
- [30] Yi W J, He Q F, Xiao Y, et al. Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures [J]. *ACI Structural Journal*, 2008, 105(4): 433-439
- [31] Sasani M, Bazan M, Sagioglu S. Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete frame structure[J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(6): 731-739
- [32] Haselton C B, Liel A B, Deierlein G G. Example Evaluation of the ATC-63 Methodology for Reinforced Concrete Special Moment Frame Buildings[C]//Proceedings of the 2008 Structures Congress. Vancouver, BC, Canada, 2008
- [33] 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, 30(4): 54-57  
HU Xiaobin, QIAN Jiaru. Simulation analysis of progressive collapse of multi-story plane steel frames[J]. *Dynamics and Practice*, 2008, 30(4): 54-57
- [34] Leyendecker E V, Ellingwood B R. Design methods for reducing the risk of progressive collapse in buildings[R]. National Bureau of Standards, Washington D. C., 1977
- [35] Ellingwood B R. Load and resistance factor criteria for progressive collapse design [C]//National Workshop on Prevention of Progressive Collapse, National Institute of Building Sciences, Rosemont, Illinois, 2002
- [36] Starossek U. Progressive collapse of bridges[C]//Proceedings of Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges. Mokpo, Korea, 2006
- [37] 陆新征, 李易, 叶列平, 等. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(增刊2): 150-157  
LU Xinzheng, LI Yi, YE Lieping, MA Yifei, LIANG Yi. Study on design method to resist progressive collapse for reinforced concrete frames[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(Sup II): 150-157
- [38] Crawford J E. Retrofit Methods to mitigate progressive collapse [C]//National Workshop on Prevention of Progressive Collapse. National Institute of Building Sciences, Rosemont, Illinois, July 10-12, 2002
- [39] Hayes J R, Woodson S C, Pekelnicky R, et al. Can strengthening for earthquake improve blast and progressive collapse resistance [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1157-1177
- [40] Buchan P A, Chen J F. Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures A state-of-the-art review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38: 509-522
- [41] Corley W G. Applicability of Seismic design in mitigating progressive collapse[C]//National Workshop on Prevention of Progressive Collapse. National Institute of Building Sciences, Rosemont, Illinois, 2002
- [42] 江晓峰, 陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究现状[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 1-8  
JIANG Xiaofeng, CHEN Yiyi. A review on the progressive collapse and control design of building structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 1-8
- [43] Izzuddin B A, Vlassis A G, Elghazouli A Y, et al. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden columns loss-part I: simplified assessment framework [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30: 1308-1318
- [44] 吴志林. 钢筋混凝土建筑抗连续倒塌对策的研究[D]. 石家庄: 河北理工大学建筑工程学院, 2006  
WU Zhilin. Study on progressive collapse resistance methodology of reinforced concrete buildings [D]. Shijiazhuang: Hebei Polytechnic University, 2006
- [45] 古音, 范立础. 结构抗连锁倒塌问题研究[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(6): 74-80  
GU Yin, FAN Lichu. Study on progressive collapse analysis of structure[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(6): 74-80
- [46] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(1): 21-30  
OU Jinping, HE Zheng, WU Bin, et al. Seismic damage performance-based design of reinforced concrete structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1999, 19(1): 21-30
- [47] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 722-739
- [48] Lee J, Fenves G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27: 937-956
- [49] Légeron F, Paultre P, Mazars J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(6): 946-955
- [50] Park H, Kim J Y. Hybrid plasticity model for reinforced concrete in cyclic shear[J]. *Engineering Structures*, 2005, 27: 35-48
- [51] 吴建营, 李杰. 反映阻尼影响的混凝土弹塑性损伤本构模型[J]. *工程力学*, 2006, 23(11): 116-121  
WU Jianying, LI Jie. Elastoplastic damage model for concrete considering damping effects [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(11): 116-121
- [52] Perdomo M E, Ramírez A A, Flórez-López J. Simulation of damage in RC frames with variable axial forces[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28: 311-328
- [53] Alarcón E, Recuero A, Perera R, et al. A reparability index for reinforced concrete members based on fracture mechanics[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23: 687-697
- [54] Marante M E, Flórez-López J. Three-dimensional analysis of reinforced concrete frames based on lumped damage mechanics[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40: 5109-5123
- [55] Wu J Y, Li J, Faria R. An energy release rate-based plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43: 583-612
- [56] Heredia-Zavoni E, Zeballos A, Esteva L. Theoretical models and recorded response in the estimation of cumulative seismic damage on non-linear structures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29: 1779-1796
- [57] Sucuoğlu H, Erberik A. Energy-based hysteresis and damage models for deteriorating systems [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2004, 33: 69-88
- [58] Brun M, Reynouard J M, Jezequel L. A simple shear wall model taking into account stiffness degradation [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25: 1-9
- [59] Hindi R, Mansour M, Dicleli M. Prediction of damage in R/C shear panels subjected to reversed cyclic loading [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2005, 9(1): 41-66
- [60] Erdurana E, Yakut A. Component damage functions for reinforced concrete frame structures [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29: 2242-2253
- [61] Hanganu A D, Onate E, Barbat A H. A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures [J]. *Computers and Structures*, 2002, 80: 1667-1687



- [62] DiPasquale E, Cakmak A S. Identification of the serviceability limit state and detection of seismic structural damage [R]. Report NCEER-88-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York, 1988
- [63] Benedetti D, Limongelli M P. A model to estimate the virgin and ultimate effective stiffness from the response of a damaged structure to a single earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25: 1095-1108
- [64] Köyliüoğlu H U, Nielsen S R K, Cakmak A S, et al. Prediction of global and localized damage and future reliability for RC structures subjected to earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 463-475
- [65] Skjærbæk P S, Nielsen S R K, Kirkegaard P H, et al. Damage localization and quantification of earthquake excited RC frames [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27: 903-916
- [66] Gupta V K, Nielsen S R K, Kirkegaard P. A preliminary prediction of seismic damage-based degradation in RC structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30: 981-993
- [67] Ghobarah A, Abou-elfath H, Biddah A. Response-based damage assessment of structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 79-104

## Advances in progressive collapse analysis and design of concrete structures subjected to strong earthquakes

HE Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004

**Abstract** There has been a tendency in the field of earthquake engineering to make an overall progressive collapse analysis of and establish a corresponding design method for major projects' concrete structures subjected to strong ground excitations. Design provisions in current code for seismic design of buildings on the definition of structural critical collapse state and on the evaluation methods for collapse resistance and collapse mechanism, etc, could not meet the requirements of the rapidly developing methodology in performance-based structural design and the increasingly complicated building environments. Some newest advances in the four respects are critically reviewed, i. e. , 1) progressive collapse analysis methods; 2) design codes or guidelines; 3) structural resistance to progressive collapse and its design; and 4) evaluation of structural damage in progressive collapse process. Some problems are also pointed out.

**Key words** progressive collapse; seismic damage; simulation analysis; concrete structure; performance-based design