

文章编号:1673-2049(2010)02-0051-10

基于破坏准则的钢筋混凝土结构 抗倒塌研究进展

潘 元,刘伯权,邢国华,吴 涛

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为了进一步研究钢筋混凝土结构抗倒塌性能,全面总结了各国钢筋混凝土结构抗倒塌性能试验研究与理论分析的现状,重点介绍了抗震结构破坏准则在建筑结构抗地震倒塌研究中的应用情况;在归纳总结的基础上,指出了基于破坏准则的钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌研究存在的问题,建议应在构件破坏准则的基础上确定钢筋混凝土框架结构的倒塌准则和损伤评估指标。研究成果为钢筋混凝土结构抗地震倒塌的定量设计及计算分析提供了理论依据。

关键词:钢筋混凝土;框架结构;破坏准则;位移延性;倒塌;累积损伤识别

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A

Research Progress of Seismic Collapse Resistance of Reinforced Concrete Structures Based on Damage Criteria

PAN Yuan, LIU Bo-quan, XING Guo-hua, WU Tao

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to further study the seismic collapse resistance of reinforced concrete structures, a summary of existing experimental investigation and theoretical analysis of seismic collapse resistance of building structures at home and abroad was presented. The state-of-the-art of studies on damage criterion of earthquake resistant structures for the collapse analysis was analyzed emphatically. Based on the summary of previous research, the existing problems of seismic collapse resistance of reinforced concrete frame structures based on damage criteria were addressed and pointed out for further study. That collapse criteria and damage assessment indexes of reinforced concrete frame structures should be determined based on member damage criteria were suggested. The research results can serve as a theoretical basis for further calculation analysis and quantitative design on seismic collapse resistance of reinforced concrete structures.

Key words: reinforced concrete; frame structure; damage criterion; displacement ductility; collapse; cumulative damage identification

0 引 言

建筑结构在大震作用下的抗倒塌能力是人民生

命财产安全的重要保障。2008 年 5 月 12 日发生的四川汶川特大地震中,经过抗震设计的结构震害明显较轻,但是仍有一些按照规范设计的钢筋混凝土

收稿日期:2010-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50608004);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060710004)

作者简介:潘 元(1974-),男,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:pustudio@126.com。

框架结构发生倒塌破坏并造成严重人员伤亡^[1-2],除去地震烈度过大这一客观因素以外,深入研究钢筋混凝土结构地震倒塌破坏机理,对于改进和完善中国今后建筑结构抗震设计,提高抗地震倒塌能力具有深远意义。

就防止结构体系在强震作用下发生倒塌而言,结构抗震设计的主要任务就是将外界对结构的作用效应与结构自身的相应抗力加以比较,并考虑其中的随机性以保证结构的可靠性。问题在于选择怎样的物理量以正确表征地震引起的结构破坏,这就是抗震结构破坏准则所要解决的问题。目前,钢筋混凝土结构抗倒塌设计原则虽已列入中国《混凝土结构设计规范》(送审稿),但是相关研究工作开展得极不充分。本文中笔者全面总结了各国建筑结构抗倒塌性能试验研究与理论分析的研究成果,重点介绍了抗震结构破坏准则在建筑结构抗地震倒塌研究中的应用情况,为进一步研究钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌性能提供参考。

1 结构抗倒塌研究进展

现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[3]中抗震设计的主要目标之一是保证大震作用下人民的生命安全,要求结构发生倒塌破坏的概率尽可能降低至一定可接受的水平。然而,迄今为止各国规范^[4-10]中有关结构抗倒塌设计的条款均为基于经验或者概念意义的考虑所得,缺乏充足的试验依据和深入的理论分析,结构抗倒塌能力并未被有效探究以指导工程实际。

1.1 倒塌模式分类

建筑物按最终倒塌模式^[11]一般可分为:倾覆倒塌和竖向倒塌。倾覆倒塌主要是在结构抗侧强度和刚度退化后由重力二阶效应引起的过大层间变形所致;竖向倒塌主要是由结构各承重构件失效所致,实际工程的倒塌破坏均兼有这2种特征。合理的结构地震倒塌评价指标应反映以上2种破坏形式。

结构若按破坏过程可分为:结构整体倒塌和结构连续倒塌。结构整体倒塌由于发生概率低^[12],一般不作为研究的重点(经过抗震设计的结构均有一定的冗余度);结构连续倒塌是结构局部某关键构件破坏导致相邻构件失效,继而引发更多构件破坏,最终产生和初始诱因极不相称的大范围坍塌^[13-14]。

1.2 结构抗连续倒塌的研究进展

结构抗连续倒塌的研究最早始于20世纪“二战”时期,Baker等^[15-16]以炸弹等武器爆炸引起的动

力效应对框架结构受力性能的影响进行了研究。而1968年因煤气爆炸造成英国 Ronan Point 22 层装配式结构公寓连续倒塌事件则被公认为结构抗连续倒塌研究的起点^[17-18],从此国外开展了较为广泛的结构抗连续倒塌性能研究,其间发生的1995年美国俄克拉荷马州城市联邦政府工作大楼^[19]和2001年世贸双塔^[20]等多起重大连续性倒塌事件,更加推动了这一研究的迅速发展。

在近半个世纪的研究历程中,各国研究者主要借助于灾害调查评估、试验研究和非线性数值分析对结构抗连续倒塌进行了研究。

1975年 Taylor^[21]针对当时加拿大规范的附录C对结构连续倒塌反应进行了深入阐述,指出偶然荷载是结构发生倒塌的主要原因且其取值不易确定^[22],建议控制结构的局部损伤以防止倒塌,并给出了结构抗连续倒塌的初步设计实例。1978年 El-lingwood 等^[23]针对于建筑结构的连续倒塌破坏讨论了直接设计法和间接设计法的优缺点,推荐使用直接设计法和构件损伤控制。1983年 Gross 等^[24]对结构连续倒塌设计的替代荷载路径法进行探讨,开发了用计算机程序进行结构抗倒塌的初步设计。1991年 Wood 等^[25]对1985年智利大地震进行的震后灾害调查结果表明,基底剪力和层间位移角可以表征结构破损,指出混凝土结构底层是薄弱环节,结构进行抗震设计应满足截面的最小配筋率要求。

1994年刘伯权等^[26]基于低周疲劳试验建立了抗震结构倒塌的验算指标,并通过18 000多个结构倒塌反应算例得到了结构倒塌反应主要影响因素的显著性水平和显著性顺序,将结构划分为强结构、中强结构和弱结构3种类型,并提出了相应的倒塌验算方法。1998年 Corley 等^[27]对美国俄克拉荷马州城市联邦政府工作大楼由爆炸引起的倒塌破坏进行了灾害调查分析,认为对新建建筑进行细部设计时可通过增大结构延性来改善结构抗连续倒塌性能;对已建结构则可通过对柱进行局部加固、增加填充墙或抗弯框架形成多重防线来改进结构的抗倒塌能力。

进入21世纪以来,随着突发事件(煤气爆炸、恐怖袭击和汽车撞击等)日益增多和特大地震频繁发生,结构抗连续倒塌性能研究引起了越来越多的科研工作者的关注。

试验研究^[28-37]手段从最初的拟动力子结构试验逐步扩展至足尺振动台试验,现场抗倒塌性能试验研究^[38-40]成果也时有发表。随着数值分析技术^[41-44]的日益成熟和通用(专用)分析程序^[45-54]逐

步推广应用,研究方法从灾害调查分析为主^[55]逐步扩展为以总结灾害经验和数值分析二者并重^[56-59]。

研究对象从理想的单自由度体系^[60-62]延伸至较符合实际工程的多自由度体系^[63-65],部分文献中甚至研究了填充墙^[66-67]的影响,需要指出的是现阶段的研究主要集中于框架结构。目前各国学者的研究主要涉及以下几个方面:①研究并论证制定抗连续倒塌规范条款的可行性与意义,指出抗连续倒塌的研究方向;②研究结构遭遇初始破坏后的倒塌机理;③研究防止结构连续倒塌的构造措施;④对结构物倒塌过程进行仿真模拟和试验验证等。

1.3 结构抗倒塌设计规程

通过上述的研究,几个主要的多地震国家先后在各自规范(规程)中制定了结构抗倒塌设计相关条款,多数均为概念设计,其中 ASCE 7 是目前惟一本详细阐述结构抗连续倒塌设计的规范^[68]。根据 Ellingwood 等的建议,ASCE 7 中给出了结构抗连续倒塌的 2 种设计方法:直接设计法和间接设计法。间接设计法主要通过规定结构构件的最小配筋率、整体性、延性、冗余度等措施来实现抗倒塌设计;直接设计法则又可细分为以下 2 种方法:替代荷载路径法和局部加强法。其中替代荷载路径法已被美国 GSA 2003 和 UFC 4-010-01 规范采用,成为探讨其合理性及改进设计的方法。中国虽在 20 世纪 70 年代就已提出“大震不倒”的抗震设计基本准则,但由于当时中国国情和国力所限,结构抗倒塌设计方法多年来一直停滞不前^[69],直至 2008 年汶川发生特大地震才再次引起了政府管理人员和科技工作者的高度重视。

2 结构抗地震倒塌研究进展

建筑物的抗倒塌性能是结构设计应关注的首要问题。对防止结构体系在各种荷载作用下发生破坏而言,结构设计的主要任务^[70]是将外界作用对结构的效应与结构自身的相应抗力加以比较,并考虑其中的随机性以保证结构的可靠性。然而从结构破坏的实例来看,大量工程事故都与偶然荷载有关,对于倒塌破坏更是如此。

概括起来,引起结构倒塌破坏的偶然荷载可分为 2 类:爆炸(或冲击)荷载和地震荷载。从荷载角度而言二者有本质上的不同:冲击荷载一般持时短、强度大,爆炸能量的衰减与距离成正比,有效影响范围有限;而地震荷载持时相对较长,地震产生的能量极大,影响范围极广,危害性更大。因此,进行结构

抗地震倒塌研究具有更深远的意义,尤其对于地震多发国家更是如此。

2.1 地震破坏机理

进行结构抗地震倒塌研究,首要问题在于选择怎样的物理量以正确表征地震引起的结构破坏,这就是抗震结构破坏准则^[71]所要解决的问题。结构的破坏形式总是与施加于结构的作用(输入)及结构(系统)的特性有关,只有了解地震动的特性与结构的特性,才能了解地震破坏。通过多年来对地震动宏观震害经验和仪器量测数据的分析和总结,一般认为地震动的特性可以通过 3 个要素来描述,即振幅、频谱和持时。这 3 个要素的不同组合使结构破坏呈现不同形式,通常可归纳为 2 种形式^[72]:首次超越破坏和累积损伤破坏。

2.2 单参数破坏准则

导致结构破坏的地震反应除与地震动特性有关,还取决于结构的动力特性,相应的破坏准则也受人们在这 2 个方面认识水平的影响。在静力阶段,输入地震动只考虑根据历史震害估计的地震最大加速度,设计准则是静力强度准则;在反应谱阶段,通过反应谱考虑了地震动的振幅与频谱,也考虑了结构的动力特性(自振周期、振幅和阻尼)的影响,但是,在设计中仍把地震惯性力看作静力,是一种等效静力法,设计准则仍采用静力强度准则。

到 20 世纪 60 年代,结构非线性反应研究盛行,以美国伊利诺大学的 Newmark 为首的研究者们取得了有意义的成果。他们提出了用延性这个简单的概念来概括结构超过弹性阶段的抗震能力^[73],并把延性大小作为衡量结构抗震能力强弱的重要指标。由于延性定义不能反映结构刚度和强度退化,部分研究者试图对其进行改进。Bigger 等首先提出了破坏比的概念,破坏比定义为初始切线刚度与最大变位处一个减小了的割线刚度之比。尽管不断减小的割线刚度能反映强度的退化,但未得到普遍重视。以上涉及的静力强度准则、延性准则等均可统称为单参数破坏准则。

强调延性对结构抗震的有利作用,强调结构的变形反应并把延性准则简化为可在设计中采用的简单形式,是 20 世纪 60 年代到 20 世纪 70 年代地震工程学取得的一大进展,并为许多抗震规范所采用。但是,将变形(延性)作为判断结构地震破坏的惟一标准却没有说明问题的全部,延性准则只反映了地震动振幅和频谱的影响及结构非线性反应的部分影响,没有考虑地震动持时对结构的累积破坏作用。

2.3 双参数破坏准则

随着实际震害经验的积累、强震观测资料的日益丰富、结构试验结果的不断增多以及计算机的普及和功能的增强,地震反应分析方法日臻完善,人们对地震动及结构特性的认识日益深化。人们注意到单以振幅和频谱来表征地震动是不够的,应该在振动过程中考察结构的破坏。除考虑结构在大地震脉冲下的首次超越破坏外,还应考虑累积损伤破坏。

20 世纪 70 年代,对结构累积损伤的研究主要集中于钢结构的疲劳问题上^[74-75]。Yao 等根据所做的软钢疲劳试验得出了其寿命曲线,计算了单层钢刚架在 El Centro 地震波和 Taft 地震波作用下的最大反应和疲劳损伤,指出在地震强度较大或结构屈服强度较小的情况下,应该用疲劳损伤而不是最大位移反应量来确定结构的破坏。日本神户大学的 Mizuhata 等分别做了薄壁圆管和 8 个缩尺比例均为 1:4 的单层钢框架模型疲劳试验,应用金属疲劳理论计算了 El Centro 地震波作用下的疲劳损伤,得出与 Yao 等类似的结论。

结构累积损伤的研究在 20 世纪 80 年代取得了新进展。研究的重点从钢结构转到钢筋混凝土结构,并注意到反复荷载引起的结构刚度、强度和滞回耗能能力退化以及变形和能耗(疲劳)间的相互影响。日本京都大学的 Iemura 根据钢筋混凝土梁的疲劳试验,得出了其寿命曲线。Mizuhata 等用 7 个缩尺比例均为 1:4 的钢筋混凝土单跨框架进行了固定变位的疲劳试验,得出了钢筋混凝土构件的疲劳寿命,并将结构的破坏指数表示为最大变形和累积疲劳损伤的线性组合。Banon 等^[76]首先将结构破坏表示为最大变形和累积耗能的函数,并建立了变形和能量的双参数破坏准则。但是可能由于所统计数据的离散性太大,或者是因为所做试验仅为受弯构件,未能引起学术界和工程界的足够重视。

1985 年美国伊利诺大学的 Park 和洪华生等建立了最大反应变形和累积耗能线性组合的地震破坏评估模型,即 Park-Ang 双参数准则,具体损伤指数 D 可按式(1)计算,即

$$D = \delta_m / \delta_u + [\beta / (Q_y \delta_u)] \int dE \quad (1)$$

式中: δ_m 为地震作用下结构的最大变形; δ_u 为单调荷载下结构的极限变形; Q_y 为屈服强度; dE 为滞回能增量; β 为非负参数。

由于 Park-Ang 双参数准则^[77]反映了破坏是由大的荷载幅值和重复的循环加载效应联合作用所引

起的这一事实,较好解释了地震动的 3 个要素各自对结构破坏的影响,在各国地震工程界得到了广泛应用。陈永祁等^[78]于 1986 年对 Park-Ang 双参数准则进行了适当修正,然而修正后的准则最大缺点是忽略了加载幅值和加载路径变化对累积损伤的影响,这一点已为文献^[79]的对比试验结果所证实。

进入 20 世纪 90 年代,McCabe 等^[80]提出了基于等效滞回耗能的破坏准则,该准则可以应用于地震动的谱分析,也可以通过损伤指数确定简单结构的延性系数,Fajfar^[81]在这一准则的基础上发展了基于性能的抗震设计理论。1993 年 Sadeghi 等^[82]提出了能量耗散破坏准则,将损伤指数表示为滞回耗能与最大变形耗能之比,一定程度上反映了低周疲劳试验中^[83]首次循环单周耗能明显大于剩余循环单周耗能这一事实。与此同时,欧进萍等^[84-85]、牛荻涛等^[86]通过试验研究和理论分析对 Park-Ang 双参数准则进行改进,为抗震结构的灾害评估和可靠性分析提供了依据。10 年后,王东升等^[87]也对双参数准则进行了改进,改进的地震损伤模型的规格化最大位移与规格化滞回耗能是非线性组合,可以近似考虑加载路径对损伤的影响。

不难看出,各国学者虽然对 Park-Ang 双参数准则进行了修正,但能量毕竟是个比较抽象的概念,无论理论分析还是实际工程应用,能量的计算总是比较困难的。

2.4 破坏准则研究进展

1995 年,刘伯权等完成了 20 根大比例钢筋混凝土柱的低周疲劳试验,对钢筋混凝土柱的低周疲劳特性进行了较深入的研究,得到了以延性比为参数的钢筋混凝土柱的低周疲劳寿命曲线。试验加载方式包括单调加载、等幅对称位移循环加载、等幅不对称位移循环加载和变幅位移循环加载。基于试验结果与理论分析,提出了反映结构低周疲劳特性的等效延性破坏准则,即

$$D = \frac{\mu_{\max}}{\mu^*} = \frac{\mu_{\max}}{k \mu_p} \quad (2)$$

式中: μ_{\max} 为地震最大位移反应确定的最大位移比, $\mu_{\max} = \Delta_{\max} / \Delta_y$, Δ_{\max} 为地震波作用下结构的最大位移, Δ_y 为结构的屈服位移; μ_p 为极限延性,即单调荷载下结构的层间最大延性; μ^* 为考虑低周疲劳特性的等效层间延性系数; k 为等效系数, $k = (4\tilde{N})^{-0.152} \mu_p$, \tilde{N} 为等效滞回次数。

\tilde{N} 可通过式(3)计算,即

$$\tilde{N} = \sum_i n_i \left(\frac{\mu_i}{\mu_p} \right)^{1/0.152} \quad (3)$$

式中: n_i 为延性水平 μ_i 下的滞回次数。

等效延性破坏准则将首次破坏和累积损伤破坏统一在一个表达式中,其形式简单、概念明确,与工程人员熟知的延性指标联系,有利于在实际工程中推广应用。但是限于语言的原因,破坏准则应与位移延性直接联系这一思想未能在国际上广泛传播。

1998 年,Rao 等将位移延性比这一指标引入 Park-Ang 双参数准则,修正后的准则形式为位移延性和滞回耗能的线性组合,其表达式为

$$D = \frac{\mu_{cy-\delta}}{\mu_{st}} + \beta' \frac{\sum E_{cy-\delta}}{\sum k' E_{st-\delta}} \quad (4)$$

式中: μ_{st} 为单调荷载下结构的位移延性; $\mu_{cy-\delta}$ 为循环位移系数,其大小介于 1 和 μ_{cy} 之间, μ_{cy} 为循环荷载下结构的最大位移延性系数; β' 为结构反应常数,由试验确定; $E_{cy-\delta}$ 为在循环位移 δ 下耗散的能量; $E_{st-\delta}$ 为单调荷载作用下最大位移为 δ 时耗散的能量; k' 为单元受弯承载力系数,其大小介于 1 和 2 之间,对称配筋时取 2; δ 为循环位移大小。

该准则初步考虑了加载幅值和加载路径对累积损伤的影响,但没有能有效考虑轴压比对抗震结构的影响。尽管如此,由于该准则与工程人员熟知的延性指标联系,在抗震结构的动力分析方面得到了广泛应用^[88-90]。

1999 年,El-Bahy 等对 12 个桥梁工程中广泛应用的圆形截面桥墩柱进行了低周疲劳试验^[91-92],得到了其寿命曲线,并根据 Minner 线性损伤理论确定了其累积损伤指标。

进入 21 世纪后,抗震结构累积损伤研究取得了新进展。2009 年,Zhang 等^[93]将研究对象转向钢管混凝土结构,对 12 个大比例钢管混凝土柱进行了低周疲劳试验,得到了桥梁工程中钢管混凝土柱的寿命曲线。近年来,混凝土结构抗震破坏准则^[94]本身没有太多实质性的进展,但破坏准则在结构抗地震倒塌研究中发挥的作用越来越大。

2.5 破坏准则在动力分析中的应用

2002 年,Elwood 等基于修正的 Park-Ang 双参数准则发展了以剪切破坏为主的框架柱剪-压复合作用模型,并通过开源程序 OPENSEES 对其完成的振动台试验进行对比分析,研究框架结构的抗连续倒塌性能。

2007 年,Mohammed 等^[95]在 Elwood 等研究的基础上,建立了以发生弯曲破坏为主的框架柱的分

析模型,在 OPENSEES 平台上开发了框架结构各构件移除策略程序,即若构件在地震作用下损伤指数 D 大于 1,则立刻移除,按照替代荷载路径法的思路进行设计,采用基于增量动力分析 (Incremental Dynamic Analysis, IDA) 方法对结构抗地震倒塌能力进行评价。

2009 年,Kim 等注意到框架结构的移除柱被移除实际上相当于瞬时在该处施加一个同样大小的反力,对关键移除柱的框架结构进行抗倒塌分析时应考虑动力的重分布。因此,Kim 等应用 Park-Ang 双参数准则确定各构件的损伤状态,并基于 OPENSEES 开发了结构抗连续倒塌分析程序。

为了迭代计算方便,以上分析均采用简化的双参数准则判定构件的损伤状态,但仍未能合理反映加载幅值及加载路径对结构累积损伤的影响。

3 存在的问题

概括起来,现阶段钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌设计的研究主要存在以下问题:

(1)合理的抗震破坏准则匮乏。现有准则未能反映荷载幅值和作用路径变化对结构累积损伤的影响,尤其是高轴压大位移幅值下的低周疲劳试验资料缺乏。

(2)替代荷载路径法中被移除构件确定方法单一。设计时一般将底层柱逐个移除以确定重分布荷载的传递路径,缺乏科学的识别方法和依据,其可作为衡量构件是否失效的标准需进行深入研究。

(3)地震倒塌准则和评价指标较少。鉴于结构地震倒塌反应的复杂性,仅靠位移角来评价结构能否实现“大震不倒”存在不足,应在构件破坏准则的基础上确定钢筋混凝土框架结构的倒塌准则和损伤评估指标,为钢筋混凝土结构抗地震倒塌的定量设计及计算分析提供理论依据。

4 结 语

(1)为了进一步研究钢筋混凝土结构抗倒塌性能,总结了各国建筑结构抗倒塌性能试验研究与理论分析的研究现状,重点介绍了抗震结构破坏准则在建筑结构抗地震倒塌研究中的应用情况,指出了基于破坏准则的钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌研究存在的问题。

(2)结构抗地震倒塌量化设计越来越具有重要的现实意义,破坏准则作为评价结构(尤其是构件)破损状态的重要工具,应在抗地震倒塌分析中发挥

越来越重要的作用。

参考文献:

References:

- [1] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Southwest Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on Seismic Damage of Buildings in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [2] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——三水准设防和抗震设计基本要求[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 26-33.
WANG Ya-yong. Lessons Learnt from Building Damages in the Wenchuan Earthquake—Three Earthquake Performance Objectives and Basic Requirements for Seismic Design of Buildings[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 26-33.
- [3] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [4] ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary[S].
- [5] GSA 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S].
- [6] UFC 4-010-01, Design of Building to Resist Progressive Collapse[S].
- [7] ASCE/SEI 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S].
- [8] BS 6399-1:1996, Loading for Buildings. Part 1: Code of Practice for Dead and Imposed Loads[S].
- [9] ICC 2005, International Building Code[S].
- [10] CCBFC 1995, National Building Code of Canada[S].
- [11] DEIERLEIN G G, LIEL A B, HASELTON C B, et al. ATC 63 Methodology for Evaluating Seismic Collapse Safety of Archetype Buildings[C/CD]//ANDERSON D, VENTURA C, HARVEY D, et al. Structural Congress 2008: Crossing Borders. Vancouver: ASCE, 2008: 1-10.
- [12] 刘伯权, 赖明, 白绍良. 地震作用下剪切型结构的可靠性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(1): 39-48.
LIU Bo-quan, LAI Ming, BAI Shao-liang. Reliability Analysis of Shear Type Structures Subjected to Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(1): 39-48.
- [13] 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): 1-8.
- [14] ELLINGWOOD B R. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.
- [15] BAKER J F. Plasticity as a Factor in the Design of War-time Structures[R]. London: Institution of Civil Engineers, 1948: 30-53.
- [16] BAKER J F, LEAD W E, LAX P. The Design of Framed Buildings Against High-explosive Bombs[R]. London: Institution of Civil Engineers, 1948: 80-113.
- [17] PEARSON C, DELATTE N. Ronan Point Apartment Tower Collapse and Its Effect on Building Codes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172-177.
- [18] KAEWKULCHAI G, WILLIAMSON E B. Beam Element Formulation and Solution Procedure for Dynamic Progressive Collapse Analysis[J]. Computers & Structures, 2004, 82(7/8): 639-651.
- [19] SOZEN M A, SRMLAKAR P F, CORLEY W G. The Oklahoma City Bombing: Structure and Mechanisms of the Murrah Building[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1998, 12(3): 120-136.
- [20] 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, 34(6): 8-10.
LU Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Dynamic Finite Element Simulation for the Collapse of World Trade Center[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 8-10.
- [21] TAYLOR D. Progressive Collapse[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1975, 2(4): 517-529.
- [22] BREEN J E, SIESS C P. Progressive Collapse—Symposium Summary[J]. ACI Structural Journal, 1979, 76(9): 997-1004.
- [23] ELLINGWOOD B R, LEYENDECKER E V. Approaches for Design Against Progressive Collapse[J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104(3): 413-423.
- [24] GROSS J L, MCGUIRE W. Progressive Collapse Resistant Design[J]. Journal of the Structural Engineering, 1983, 109(1): 1-15.
- [25] WOOD S L, STARK R, GREER S A. Collapse of Eight-story RC Building During 1985 Chile Earth-

- quake[J]. Journal of the Structural Engineering, 1991, 117(2): 600-619.
- [26] 刘伯权, 赖明, 杨红. 多层建筑考虑低周疲劳特性的地震倒塌反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2): 86-93.
- LIU Bo-quan, LAI Ming, YANG Hong. Analysis of Collapse Earthquake Responses of Multi-story Buildings Taking Account of Structural Low-cycle Fatigue Character[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(2): 86-93.
- [27] CORLEY W G, MLAKAR P F, SOZEN M A, et al. The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1998, 12(3): 100-112.
- [28] 魏琰, 戴国莹. 唐山地震作用下一座三层钢筋混凝土框架结构倒塌的分析[J]. 地震工程与工程振动, 1981, 1(1): 25-33.
- WEI Lian, DAI Guo-ying. A Study on the Collapse of a Three-storey Reinforced Concrete Framed Structure in a Factory During the Tangshan Earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1981, 1(1): 25-33.
- [29] 王志浩, 苗启松, 陈肇元. 冲击波作用下剪力墙房屋的倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 26-34.
- WANG Zhi-hao, MIAO Qi-song, CHEN Zhao-yuan. Experimental Study on Collapse Process of Shear Wall Building Under Blast Loading[J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(1): 26-34.
- [30] VIAN D, BRUNEAU M. Tests to Structural Collapse of Single Degree of Freedom Frames Subjected to Earthquake Excitations[J]. Journal of the Structural Engineering, 2003, 129(12): 1676-1685.
- [31] ELWOOD K J. Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames[D]. Berkeley: University of California, 2002.
- [32] ELWOOD K J, MOEHLE J P. Drift Capacity of Reinforced Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(1): 71-89.
- [33] NAKASHIMA M, MATSUMIYA T, SUITA K, et al. Test on Full-scale Three-storey Steel Moment Frame and Assessment of Ability of Numerical Simulation to Trace Cyclic Inelastic Behaviour[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 35(1): 3-19.
- [34] KASAI K, OOKI Y, MOTOYUI S, et al. E-defense Tests on Full-scale Steel Buildings; Part 1 — Experiments Using Dampers and Isolators[C]//ASCE. Structural Engineering Research Frontiers 2007. Long Beach: ASCE, 2007: 1-12.
- [35] SUITA K, YAMADA S, TADA M, et al. Results of Recent E-defense Tests on Full-scale Steel Buildings; Part 1 — Collapse Experiments on 4-story Moment Frames[C/CD]//ANDERSON D, VENTURA C, HARVEY D, et al. Structural Congress 2008: Crossing Borders. Vancouver: ASCE, 2008: 1-10.
- [36] YAVARI S, ELWOOD K J, LIN S H, et al. Experimental Study on Dynamic Behavior of Multi-story Reinforced Concrete Frames with Non-seismic Detailing[C]//ASCE. Proceedings of the 2009 ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco: ASCE, 2009: 489-499.
- [37] 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.
- [38] SASANI M, BAZAN M, SAGIROGLU S. Experimental and Analytical Progressive Collapse Evaluation of Actual Reinforced Concrete Structure[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(6): 731-739.
- [39] AKINCI N O. An Investigation on Seismic Resistance of Reinforced Concrete Industrial Chimneys[C]//ASCE. Proceedings of the 2009 ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco: ASCE, 2009: 964-971.
- [40] SASANI M, SAGIROGLU S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(3): 478-488.
- [41] BANGASH T, MUNJIZA A. A Computationally Efficient Beam Element for FEM/DEM Simulations of Structural Failure and Collapse[C]//ASCE. Proceedings of the Third International Conference on Discrete Element Methods. New Mexico: ASCE, 2002: 133-137.
- [42] 金伟良, 方韬. 钢筋混凝土框架结构破坏性能的离散单元法模拟[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 67-73.
- JIN Wei-liang, FANG Tao. Numerical Simulation of Failure Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures by Discrete Element Method[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 67-73.
- [43] SCOTT M H, FENVES G L. Krylov Subspace Accel-

- erated Newton Algorithm Application to Dynamic Progressive Collapse Simulation of Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(5): 473-480.
- [44] 吕大刚, 于晓辉, 王光远. 基于单地震动记录 IDA 方法的结构倒塌分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 33-39.
- LU Da-gang, YU Xiao-hui, WANG Guang-yuan. Structural Collapse Analysis Based on Single-record IDA Method[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6): 33-39.
- [45] SU Y P, QI J R, LIU Y. Finite Element Simulation on Progressive Collapse Resistance of Reinforced-concrete Frame[C]//ASCE. Proceeding of the Eleventh Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operation in Challenging Environments. Long Beach: ASCE, 2008: 1-7.
- [46] PUJOL S, SMITH-PARDO J P. A New Perspective on the Effects of Abrupt Column Removal[J]. Engineering Structures, 2009, 31(4): 869-874.
- [47] MOHAMED O A. Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings[J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 749-757.
- [48] TSAI M H, LIN B H. Investigation of Progressive Collapse Resistance and Inelastic Response for an Earthquake-resistant RC Building Subjected to Column Failure[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3619-3628.
- [49] KWASNIEWSKI L. Nonlinear Dynamic Simulations of Progressive Collapse for a Multistory Building[J]. Engineering Structures, 2010, 32(5): 1223-1235.
- [50] LEE C H, KIM S, HAN K H, et al. Simplified Nonlinear Progressive Collapse Analysis of Welded Steel Moment Frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(5): 1130-1137.
- [51] 唐曹明, 徐培福, 徐自国, 等. 钢筋混凝土框架结构楼层刚度比限制方法研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 128-134.
- TANG Cao-ming, XU Pei-fu, XU Zi-guo, et al. A Study of the Method for Limiting the Story Stiffness Ratio of RC Frame Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 128-134.
- [52] 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[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2007, 8(6): 652-658.
- SHI Yan-chao, LI Zhong-xian, HAO Hong. Numerical Analysis of Progressive Collapse of Reinforced Concrete Frame Under Blast Loading[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(6): 652-658.
- [53] 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2): 150-157.
- LU Xin-zheng, LI Yi, YE Lie-ping, et al. Study on Design Method to Resist Progressive Collapse for Reinforced Concrete Frames[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S2): 150-157.
- [54] 宣纲, 顾祥林, 吕西林. 强震作用下混凝土框架结构倒塌过程的数值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(6): 24-30.
- XUAN Gang, GU Xiang-lin, LU Xi-lin. Numerical Analysis of Collapse Process for RC Frame Structures Subjected to Strong Earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 24-30.
- [55] IRTEM E, TURKER K, HASGUL U. Causes of Collapse and Damage to Low-rise RC Buildings in Recent Turkish Earthquakes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21(5): 351-360.
- [56] 苏幼坡, 张玉敏, 王绍杰, 等. 从汶川地震看提高建筑结构抗倒塌能力的必要性和可行性[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 25-32.
- SU You-po, ZHANG Yu-min, WANG Shao-jie, et al. The Necessity and Feasibility of Enhancing Seismic Design of Structures Based on the Wenchuan Earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 25-32.
- [57] 张富文, 吕西林. 框架结构不同倒塌模式的数值模拟与分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 119-125.
- ZHANG Fu-wen, LU Xi-lin. Numerical Simulation and Analysis of Different Collapse Patterns for RC Frame Structure[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 119-125.
- [58] 林旭川, 潘鹏, 叶列平, 等. 汶川地震中典型 RC 框架结构的震害仿真与分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 13-20.
- LIN Xu-chuan, PAN Peng, YE Lie-ping, et al. Analysis of the Damage Mechanism of a Typical RC Frame in Wenchuan Earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 13-20.
- [59] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 等. 框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 67-76.
- YE Lie-ping, LU Xin-zheng, ZHAO Shi-chun, et al. Seismic Collapse Resistance of RC Frame Structures

- Case Studies on Seismic Damages of Several RC Frame Structures Under Extreme Ground Motion in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 67-76.
- [60] OTANI S. RC Building Damage Statistics and SDF Response with Design Seismic Forces[J]. Earthquake Spectra, 1999, 15(3): 485-501.
- [61] 刘伯权, 白绍良, 刘 鸣. 抗震结构的等效延性破坏准则及其子结构试验验证[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(3): 77-83.
- LIU Bo-quan, BAI Shao-liang, LIU Ming. Equivalent Ductility Damage Criteria of Earthquake-resistant Structures and Their Verification by Substructure Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(3): 77-83.
- [62] 甘 泉, 黄良璧. 钢筋混凝土抗震框架倒塌分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1998, 30(1): 1-4.
- GAN Quan, HUANG Liang-bi. Collapse Analysis of Aseismic R. C Frame Structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 1998, 30(1): 1-4.
- [63] BAO Y H, KUNNATH S K, EL-TAWIL S, et al. Macromodel-based Simulation of Progressive Collapse; RC Frame Structures[J]. Journal of the Structural Engineering, 2008, 134(7): 1079-1091.
- [64] LASKAR A, GU H C, MO Y L, et al. Progressive Collapse of a 2-story Reinforced Concrete Frame [C]//ASCE. Proceeding of the Eleventh Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operation in Challenging Environments. Long Beach: ASCE, 2008: 11-19.
- [65] HARTMANN D, BREIDT M, NGUYEN V, et al. Structural Collapse Simulation Under Consideration of Uncertainty — Fundamental Concept and Results [J]. Computers & Structures, 2008, 86(21/22): 2064-2078.
- [66] GUNAY S, KOROLYK M, MAR D, et al. Infill Walls as a Spine to Enhance the Seismic Performance of Non-ductile Reinforced Concrete Frames[C]//ASCE. Proceedings of the 2009 ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco: ASCE, 2009: 1093-1104.
- [67] SASANI M. Response of a Reinforced Concrete In-filled-frame Structure to Removal of Two Adjacent Columns[J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2478-2491.
- [68] MUNSHI J. State-of-the-art vs. State-of-the Practice in Blast and Progressive Collapse Design of Reinforced Concrete Structures[C]//ASCE. Proceedings of Structures Congress 2004. Nashville: ASCE, 2004: 1-10.
- [69] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- SHEN Ju-min, ZHOU Xi-yuan, GAO Xiao-wang, et al. Aseismic Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [70] 刘伯权. 抗震结构的破坏准则及可靠性分析[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- LIU Bo-quan. Damage Criteria and Reliability Analysis of Earthquake Resistant Structures[M]. Beijing: China Building Material Industrial Publishing House, 1995.
- [71] 刘伯权, 白绍良, 赖 明. 抗震结构的破坏准则评述及探讨[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1993, 15(4): 1-8, 21.
- LIU Bo-quan, BAI Shao-liang, LAI Ming. A Review and Analysis of Failure Criteria for Aseismic Structures[J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1993, 15(4): 1-8, 21.
- [72] 瞿伟廉, 李桂青. 建筑结构地震破坏机制的探讨[J]. 工程抗震, 1990(3): 27-30.
- QU Wei-lian, LI Gui-qing. Discussion on Failure Criteria for Building Structures[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1990(3): 27-30.
- [73] NEWMARK N M. An Engineering Approach to Blast Resistant Design[R]. New York: American Society of Civil Engineers Transactions, 1956: 45-65.
- [74] KASIRAJ I, YAO J T P. Fatigue Damage in Seismic Structures[J]. Journal of the Structural Engineering, 1969, 95(8): 1673-1692.
- [75] TANG J P, YAO J T P. Expected Fatigue Damage of Seismic Structures[J]. Journal of the Structural Engineering, 1972, 98(3): 695-708.
- [76] BANON H, IRVINE H M, BIGGS J M. Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames[J]. Journal of the Structural Engineering, 1981, 107(9): 1713-1729.
- [77] PARK Y J, ANG H S, WEN Y K. Damage-limiting Aseismic Design of Buildings[J]. Earthquake Spectra, 1987, 3(1): 1-26.
- [78] 陈永祁, 龚思礼. 结构在地震动时延性和累积塑性耗能的双重破坏准则[J]. 建筑结构学报, 1986, 7(1): 35-48.
- CHEN Yong-qi, GONG Si-li. Double Control Damage

- Index of Structural Ductility and Dissipated Energy During Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 1986, 7(1): 35-48.
- [79] 刘伯权, 徐云中, 白绍良. 钢筋混凝土柱在等幅对称位移循环加载下的低周疲劳性能[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(2): 34-42.
- LIU Bo-quan, XU Yun-zhong, BAI Shao-liang. Low-cyclic Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Column Subjected to Symmetric Displacement Cycling [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(2): 34-42.
- [80] MCCABE S L, HALL W J. Assessment of Seismic Structural Damage[J]. Journal of the Structural Engineering, 1989, 115(9): 2166-2183.
- [81] FAJFAR P. A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(3): 573-592.
- [82] SADEGHK, LAMIRAULT J, SIEFFERT J G. Damage Indicator Improvement Applied on R/C Structures Subjected to Cyclic Loading[C]//MOAN T. Proceedings of the Second European Conference on Structural Dynamics. Rotterdam: Balkema A A, 1993: 129-136.
- [83] RAO P S, SARMA B S, LAKSHMANAN N, et al. Damage Model for Reinforced Concrete Elements Under Cyclic Loading [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 682-690.
- [84] 欧进萍, 牛荻涛, 王光远. 多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠性分析与设计[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(4): 27-37.
- OU Jin-ping, NIU Di-tao, WANG Guang-yuan. Fuzzy Dynamical Reliability Analysis and Design of Multi-story Nonlinear Aseismic Steel Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(4): 27-37.
- [85] 欧进萍, 吴一波. 有损伤压弯构件的恢复力试验研究及其应用[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(6): 21-29.
- OU Jin-ping, WU Bo. Experimental Research on Restoring Force of Damaged Compression-flexure Members and Its Applications [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(6): 21-29.
- [86] 牛荻涛, 任利杰. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(4): 44-54.
- NIU Di-tao, REN Li-jie. A Modified Seismic Damage Model with Double Variables for Reinforced Concrete Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(4): 44-54.
- [87] 王东升, 冯启民, 王国新. 考虑低周疲劳寿命的改进 Park-Ang 地震损伤模型[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11): 41-49.
- WANG Dong-sheng, FENG Qi-min, WANG Guo-xin. A Modified Park-Ang Seismic Damage Model Considering Low-cycle Fatigue Life [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11): 41-49.
- [88] KAEWKULCHAI G, WILLIAMSON E B. Beam Element Formulation and Solution Procedure for Dynamic Progressive Collapse Analysis [J]. Computers & Structures, 2004, 82(7/8): 639-651.
- [89] SARMA B S, SREENATH H G, BHAGAVAN N G, et al. Experimental Studies on In-plane Ductility of Confined Masonry Panels[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 330-336.
- [90] YAN Z H, AU F T K. Nonlinear Dynamic Analysis of Frames with Plastic Hinges at Arbitrary Locations [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(3): 313-325.
- [91] EL-BAHY A, KUNNATH S K, STONE W C, et al. Cumulative Seismic Damage of Circular Bridge Columns: Benchmark and Low-cycle Fatigue Tests[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 633-641.
- [92] EL-BAHY A, KUNNATH S K, STONE W C, et al. Cumulative Seismic Damage of Circular Bridge Columns: Variable Amplitude Tests[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(5): 711-719.
- [93] ZHANG G W, XIAO Y, KUNNATH S. Low-cycle Fatigue Damage of Circular Concrete-filled-tube Columns[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 151-159.
- [94] COLOMBO A, NEGRO P. A Damage Index of Generalised Applicability[J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1164-1174.
- [95] MOHAMMED T, MOSALAM K M. Towards Modeling Progressive Collapse in Reinforced Concrete Buildings[C]//ASCE. Proceedings of Sessions of the 2007 Structures Congress. Long Beach: ASCE, 2007: 1-6.