

文章编号:1673-2049(2013)04-0001-13

钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌破坏的研究现状与对策分析

刘伯权,付 国

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:总结了罕遇地震作用下结构倒塌破坏的研究现状,重点分析了建筑物倒塌破坏的系统性和不确定性,对比了不同的倒塌破坏准则和倒塌破坏分析方法,给出了建筑物倒塌的临界状态定义。研究表明:现有的倒塌破坏准则无法准确定义结构的倒塌破坏;时程分析法更为精确,且较少地引入了地震动随机性影响,更适于结构倒塌研究;建议的倒塌破坏区间能够更好地反映倒塌破坏特性;塑性变形集中是框架倒塌的主要原因,应重视柱端塑性铰发育导致的结构整体性能退化;相关研究成果可为定量研究建筑结构的倒塌破坏提供理论基础。

关键词:钢筋混凝土框架结构;地震;倒塌破坏;不确定性;系统性;子结构;破坏准则;时程分析
中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A

Present Research Status and Countermeasure Analysis of Earthquake Collapse Damage of RC Frame Structures

LIU Bo-quan, FU Guo

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

Abstract: The present research status of structural collapse damage under rare earthquake was summarized, and the systematicness and uncertainty of structural collapse damage were emphatically analyzed. Meanwhile, the contrastive researches on the different failure criteria and analysis methods were made, and the precise definition of the critical state on structural collapse damage was given. The research results show that the existing failure criteria cannot be used to define the collapse of reinforced concrete (RC) structure precisely. Time history analysis method is more accurate and suitable for collapse research owing to the introduction of a small amount of ground motion randomness. The recommended interval of collapse damage can better reflect the characteristics of collapse damage. The concentration of plastic deformation is the principal factor affecting the structural frame collapse, the overall structure performance degradation caused by the development of plastic hinge in the column ends should be noted. The relevant research results can provide a theoretical basis for quantitative research on the collapse damage of building structure.

Key words: RC frame structure; earthquake; collapse damage; uncertainty; systematicness; sub-structure; failure criterion; time history analysis

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51078037)

作者简介:刘伯权(1956-),男,甘肃定西人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:bqliu@chd.edu.cn。

0 引言

建筑物的倒塌是造成人员伤亡最直接和最主要的原因,受倒塌破坏的复杂性以及经济发展水平和抗震理论研究水平限制,抗倒塌研究开展还很不充分,对结构的倒塌破坏机理、倒塌破坏准则和倒塌破坏临界状态定义等均需要进一步深入研究。抗地震倒塌设计作为结构抗震设计的最基本设防目标,应采取更为完善的设计方法以最大限度保障建筑物内的人员安全,避免结构倒塌引发人员伤亡。

近年来的数次震害调查表明,即使严格按照规范进行抗震设计的建筑物也可能发生严重的倒塌破坏^[1-2],按抗震规范要求仅进行薄弱层的弹塑性变形验算和采取一定的构造措施并不能完全保证建筑物“大震不倒”,这引发了广大地震工作者对抗震设计特别是抗地震倒塌设计的思考。“大震不倒”抗震设防目标未实现的根本原因在于缺乏对结构倒塌破坏机理的深入研究和准确合理的倒塌破坏临界状态定义以及真实准确对应于倒塌的评价指标,倒塌破坏准则的相关研究开展还很不充分。随着中国经济发展水平和抗震理论研究水平的快速提升,各种抗震设计软件逐步成熟且计算机硬件性能大幅提升,现阶段具备了开展更为严谨、复杂且深入的地震倒塌分析基本条件。

本文中笔者回顾了近年来各国的结构抗倒塌研究,指出了目前抗倒塌特别是抗地震倒塌破坏研究存在的问题,提出了抗倒塌研究可行的研究思路和方法,为抗倒塌设计研究提供参考。

1 建筑结构抗地震倒塌破坏特性

1.1 地震倒塌破坏与连续倒塌破坏

抗震设计中的倒塌机理是指结构的振动倒塌机理,抗连续倒塌设计中的倒塌机理是指结构的“跨越倒塌机理”^[3-4]。地震倒塌破坏与连续倒塌破坏在荷载输入、破坏特点以及分析方法等方面都存在较大的差异。

连续倒塌破坏发生的起因是单个构件破坏,移除构件瞬间剩余结构和构件是完好的,可视为一种准静力破坏。地震倒塌破坏发生时结构和大多数构件均已发生了较严重的损伤破坏,是一个复杂的动力响应过程。

连续倒塌分析过程中结构初始破坏位置是已知的,倒塌的初始发生位置是固定的。而地震倒塌破坏几乎是未知的,构件、子结构均可能发生严重破

坏,且构件的倒塌破坏程度也存在较大的差异,整体结构倒塌的初始发生位置、破坏程度均可能发生显著的变化。

框架结构的连续倒塌通过结构构件的 DCR(需供比,即构件的内力需求量与预期极限承载力之比)进行判断^[5-6],连续倒塌破坏判定方法相对成熟,而结构的抗地震倒塌破坏仍然缺乏合理准确的判定方法。

很多概念设计方法和构造措施均能同时提升结构的抗连续倒塌性能和抗地震倒塌性能,在倒塌分析中应该分别对待。

1.2 地震倒塌破坏特性

广义地讲,结构可视作反映某种因果关系的系统,地震作为输入作用于结构,系统就会发生损伤或倒塌(输出)^[7],图 1 为 RC 结构倒塌破坏模型。结构地震倒塌破坏研究应综合考虑输入、系统和输出 3 个层次的破坏特点。

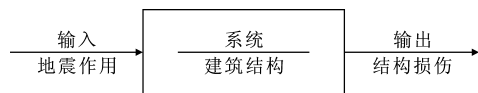


Fig. 1 Collapse Damage Model of RC Structure

地震动输入的强随机性特点^[8]已被广大地震工程研究者所熟知,本文中主要考虑倒塌破坏在系统层面和输出层面的特性。

1.2.1 地震倒塌破坏的系统性

建筑物抗倒塌破坏依靠的是结构作为一个完善系统的整体作用,即构件的组合方式和构件之间的相互作用。系统性考虑了结构的整体性能和构件对整体性能的影响,准确地描述了结构倒塌破坏的基本特性^[9]。系统性可以简单地表述为 $2 > 1 + 1$ 或 $3 - 1 > 2$,但是采用怎样的方法定义和量化这种系统性是结构整体性能研究和抗倒塌设计面临的最大困难。

文献[10]中认为,保证结构的整体承载力储备和变形能力,增加结构的冗余度和整体性,采取有效措施使结构形成合理的屈服机制,可以显著提高框架结构的抗倒塌能力。结构的整体协同受力性能、构件的相互作用和构件的延性需求是提升结构整体性的关键内容。

结构的地震倒塌破坏本质上就是结构整体性能的逐渐退化直至发生倒塌破坏,建筑结构抵御地震作用的系统性是倒塌破坏最为显著的特点。

1.2.2 地震倒塌破坏的不确定性

相对于建筑结构抵御地震的系统性,结构地震

响应的不确定性更容易被广大研究者所重视。文献[11]中指出,地震倒塌破坏的最不利因素是地震动随机性与结构自身的随机性,两者共同作用下的结构地震损伤与倒塌破坏具有更大的随机性,建筑物的损伤演化规律、倒塌破坏机理仍有待深入研究。

王亚勇等^[12]系统分析和论述了大震作用下的结构倒塌研究现状和相关的科学问题,强调了地震动和结构的不确定性对倒塌破坏的影响。建筑物地震响应的不确定性主要来源包括地震动输入的不确定性和构件性能的不确定性^[13],建造者应充分考虑建筑物在地震作用下的不确定因素,以准确评估结构的层间位移角。

Haselton 等^[14-16]依据增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)曲线定义了结构倒塌破坏,得出了结构倒塌破坏位置的可能性(图2),分析结果表明,不同地震动输入引起结构破坏的范围和位置存在较大的差异,结构倒塌破坏具有显著的不确定性。

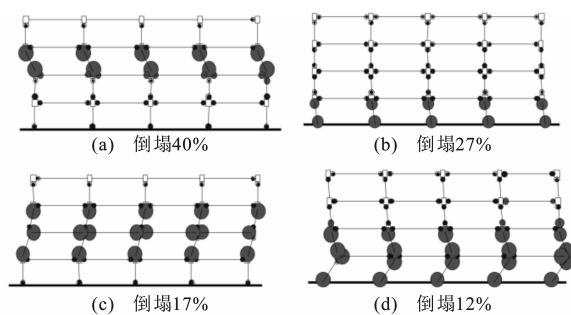


图2 结构倒塌破坏模式

Fig. 2 Structural Collapse Damage Modes

罕遇地震作用下建筑结构倒塌破坏的最主要特性包括地震动输入的强随机性、结构抵御地震的系统性和结构地震响应的不确定性,倒塌破坏准则和倒塌破坏临界状态需要兼顾上述破坏特点,建立联系不确定性和系统性的纽带,在反映系统性的基础上兼顾结构破坏的不确定性特点。

2 抗地震倒塌破坏方法研究

现阶段抗震研究对倒塌破坏的随机性、系统性以及不确定性还缺乏深入研究,地震倒塌破坏研究仍以数值模拟为主,应用于倒塌研究较多的是静力推覆分析法、动力非线性法和离散单元法。

2.1 静力推覆分析法

静力推覆分析法(Pushover 法)是一种典型的静力非线性分析方法,对结构逐级加载特定形式的水平侧向力,直至结构或构件达到特定目标值后终

止计算。

文献[17]中采用静力推覆分析法完成了框架结构的地震反应分析,研究结果表明,梁柱的延性需求趋势存在较大的差异,梁铰的延性需求随层高的增加而降低,柱铰的延性需求总体低于梁铰的延性需求。要充分发挥梁的耗能能力,应保证框架柱不先发生倒塌破坏,即延性耗能水平要高于框架梁。文献[18]中定义了一种位移刚性约束来保持恒定侧向力的加载方式,模拟了复杂结构的软化段,最终分析结果为底层中柱柱脚破坏引发结构倒塌。

文献[19]中基于 Pushover 法完成了大震作用下构件的失效相关性分析,分析结果表明,对中低层结构和高层结构的下部,梁失效在同一层和相邻层是相关的。而柱的上下端失效是相关的,薄弱层中各框架柱约束的失效也是相关的。

Pushover 分析中侧向力加载模式与实际地震动作用总是存在一定的差异,Pushover 分析并不能够获得准确的层间位移角特别是薄弱层的层间位移角^[20]。与多模态 Pushover 法(MPA 法)和 IDA 法相比,Pushover 法由于没有考虑结构的动力特性和高阶振型作用,故分析结果最差^[21]。Pushover 法需要考虑高级振型的影响^[22],但考虑高阶振型的结构层间变形将显著增加,可能超出规范中规定的层间位移角限值(1/50),非线性静力分析方法在一定程度上低估了结构的倒塌破坏程度^[23]。

Pushover 法虽然考虑了结构的弹塑性变形,但未考虑高级振型对结构抗震性能的影响,且侧向力保持恒定,与结构地震反应存在一定的差异,未考虑地震的动力特性。

2.2 动力非线性法

2.2.1 逐步增量弹塑性时程分析法

逐步增量弹塑性时程分析法是一种较为精确的动力非线性分析方法,通过设定一系列单调递增的地震动强度指标,在每个强度指标下对结构进行弹塑性时程分析后,得到结构在不同烈度地震作用下的弹塑性响应。

Vamvatsikos 等^[24]定义了3种确定极限状态点的破坏准则:IM(A Monotonic Scalable Ground Motion Intensity Measure),DM(Damage Measure)和 IM-DM 混合准则,选取以结构动力失稳处的 IM 或 DM 指标作为倒塌临界点,定义变形显著增加为倒塌临界破坏临界点,该准则并不准确对应结构倒塌的临界状态。吕大刚等^[25]提出了改进的 IM 准则确定结构的倒塌极限状态点,通过不断半分 IDA 调幅

系数寻找结构倒塌极限状态点,取有限元分析不收敛作为结构倒塌的标志,多条 IDA 曲线能够在统计意义上评价 Pushover 法计算结果的可靠性^[26]。

Luco 等^[27]基于 IDA 法揭示了不同水平地震作用下构件连接破坏和高振型影响的发展特征,杨成等^[28]认为,IDA 曲线的屈服段差异是地震动的局部时频特性与结构非线性特征耦合后对总地震作用形成的影响。

Haselton 等基于 IDA 法的研究表明,结构倒塌破坏受轴压比、强柱弱梁系数、 $P-\Delta$ (力-位移)效应等因素影响,其中柱的塑性变形能力和 $P-\Delta$ 效应是影响层间位移的最主要因素。

IDA 法最突出的优点在于考虑了地震动输入的随机性和地震动输入的强度,在倒塌破坏机理尚不完全明朗的情况下,引入地震波使得分析结果受地震动强随机性的影响极大,且 IDA 法中对地震动的调幅处理可能与实际结构的地震响应存在一定的差别。

2.2.2 时程分析法

时程分析法是一种直接动力分析方法,它是根据动力学运动方程,将地震波时程记录作为激励,直接积分求解结构在各个时刻的动态响应,其动力学基本运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = -M\mathbf{a}_g \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; \mathbf{u} 为节点的位移向量; $\dot{\mathbf{u}}$ 为节点速度向量; $\ddot{\mathbf{u}}$ 为节点加速度向量; \mathbf{a}_g 为地震动加速度矩阵。

文献[29]中选取云南澜沧-耿马地震中的某一建筑进行了弹塑性时程反应分析,结果表明,框架结构底层与二层均出现了不同程度的塑性铰,而且地震作用下的结构塑性转角不大,低于规范中规定的层间位移角限值(1/50),分析结果与震害调查结果相同。

吴小峰等^[30]对比了某高压直流输电换流阀塔抗震性能的反应谱法和时程分析法,结果表明,2 种方法确定的结构主要响应频率在数值上基本一致,但时程分析法对冲击型激励识别优于反应谱法。文献[31]中的研究也表明,时程分析法计算结果较反应谱法计算结果更为准确,同时指出,在多向扰动下,时程分析法计算的精度明显优于反应谱法。

双向地震作用下的时程分析法也能较好地模拟地震作用下的结构响应,双向地震动加载下的结构地震响应应包括周期、位移、角柱等,其均有一定幅度的增加^[32-33],但最大位移出现的时间略有滞后。

时程分析法的不足主要集中在以下 2 点:

(1)地震动选取对时程分析的影响较大^[34-35],不同地震波的时程分析结果差异极大,甚至多达几十倍^[36-37]。

(2)时程分析的数据分析量较大,对计算机的性能有一定的要求,如果考虑结构反应的非线性,则会进一步增加时程分析所消耗的时间。

在抗地震倒塌研究中,由于时程分析法未过多地引入地震动输入的影响,就单次地震反应分析而言是一种复杂但足够精确的分析方法,能够获得更好的抗震分析计算结果,更适用于意义重大的建筑结构抗地震倒塌设计。

2.3 离散单元法

离散单元法是一种显式求解的数值方法,单元间相互作用力根据力和位移的关系求出,单元运动则完全根据单元所受的不平衡力和不平衡力矩的大小按牛顿运动定律确定。离散单元法大多应用于结构倒塌全过程模拟中,以实现结构倒塌破坏的再现。

文献[38]中建立了一种三维拉压弹簧组模型,以法向、切向和受弯 3 个弹簧单元来反映刚体之间的受力情况,达到构件破坏标准后进行移除,在移除构件时考虑了移除瞬间对结构产生的动力效应,建立框架结构和砌体结构的地震倒塌破坏过程。文献[39]中给出了不同构件碰撞前后的速度计算公式,得到了碰撞冲量力学模型,考虑构件碰撞的有限元分析表明,结构倒塌破坏始于底层柱端破坏。

文献[40]中定义构件一旦失效就在倒塌分析中移除该单元,研究结果表明,构件的失效标准对结构倒塌性能的影响较大。构件的失效标准过高可能过高估计构件对结构的贡献,构件失效时建筑物可能已经倒塌,而失效标准过低就会弱化结构的整体性能,使得结构较早地进入“倒塌破坏”。

离散单元法还无法准确定义构件的塌落和飞溅以及构件的塌落程度、范围和时间,基于离散单元法的倒塌全过程分析与结构倒塌试验或多或少存在一定的差异。从抗倒塌设计角度来看,结构倒塌破坏临界状态发生“后”的状态并不是抗震设计最关心的,也不是抗倒塌设计的依据,离散单元法定义倒塌的关键仍是建立和完善倒塌破坏准则。

3 抗地震倒塌破坏准则研究

3.1 规范中建议的变形破坏准则

地震作用下的多层结构存在塑性变形集中的薄弱层,且薄弱层的弹塑性变形与弹性变形存在相对

稳定的关系,规范中通过定义结构的塑性变形集中程度反映层间变形大小,判定是否发生倒塌破坏。但规范中对大震作用下的结构抗震设计以弹塑性变形验算为主,对倒塌设计并未给予足够的重视。

(1)规范中以构件(梁、柱、墙)和节点达到极限变形时的层间位移角作为罕遇地震作用下结构弹塑性位移角限值的依据,不是以结构整体性能的加速退化或失效为依据的,未准确定义结构的倒塌破坏临界状态^[41]。

(2)规范中认为塑性变形集中的薄弱层是一种普遍现象,但选取层间位移角能否准确全面评价薄弱层的塑性变形集中程度仍需要大量深入研究。

(3)规范中给定的层间位移角限值并不能准确对应结构的倒塌破坏,即使留有足够的安全储备,其本质上仍属于构件破坏限值的延伸而非结构破坏准则。规范中建议的弹塑性位移增大系数并不能准确估计实际震害中结构的变形,结构的位移角限值统计和分析仍需深入研究。

规范中给定的层间位移角限值是结构不倒塌的标准,而非结构倒塌破坏标准,建立结构倒塌的性能指标需要对结构倒塌进行深入研究。

3.2 结构倒塌破坏准则

结构的倒塌破坏准则包括变形或延性准则、能量准则、变形-能量双参数准则以及强度、刚度退化准则等^[42-45]。

破坏准则定义了构件和结构 2 个层次的破坏。构件层次上,破坏准则需要定义“最不利截面”的极限状态,一旦该截面达到某个特定极限状态,则可判定构件破坏。上述破坏准则在一定范围内均能够准确地定义构件的破坏,但都是结构倒塌的必要条件,而非充分条件^[46]。结构层次上,破坏准则需要定义结构整体性能的“最易失效组合”的倒塌破坏临界状态,结构性性能退化超出最易极限状态后均可能发生倒塌破坏。

目前的结构倒塌破坏准则并不严格对应于结构的倒塌破坏临界状态,破坏准则应该考虑合理性、唯一性和量化性。试验研究表明,规范中给定的层间位移角限值是结构不倒塌破坏的标准,而非结构倒塌破坏标准;基于耗能的破坏准则受加载方式、加载顺序等因素影响较大,小位移加载下耗能计算值与理论值相差极大;变形-耗能双参数准则不仅需要重新评估位移项和耗能项的影响,还需要建立更为准确的位移和耗能的比关系^[47]。结构倒塌破坏沿用构件破坏准则设计思想,只能对应于某个特定的

或人为假定的失效模式,无法准确定义结构失效的不确定性和系统性。

结构的破坏较构件破坏要复杂得多,从失效概率上讲,结构的整体失效概率要远小于构件失效概率^[48],大多数构件破坏准则能精确地定义构件失效和弹塑性发展过程,但结构破坏准则仍处于摸索研究阶段。结构的构件组合方式对结构整体性能的提升幅度和影响机理尚不明确,已有的抗震设计更多地分析了不同宏观表象(层数、跨数、轴压比、强柱弱梁系数等)对结构输出性能指标的影响,但缺乏对结构整体性能的系统研究。以强柱弱梁为例,规范中给出了强柱弱梁系数的限值,以保证结构具有较好的抗震性能,但强柱弱梁对结构倒塌的影响程度有多大,是否存在一个阈值,目前还缺乏相关深入分析。

结构破坏的随机性较构件破坏的随机性要大得多,也复杂得多,地震动三要素、构件首先压溃的位置、位移加载幅值顺序、小位移加载幅值所占比例等因素使得结构的整体性能退化变得极为复杂,结构的损伤、破坏和倒塌应该在地震响应的全过程中进行考察。

建筑结构要求具有很高的冗余度和一定的鲁棒性,结构体系的特性评估方法要比构件评估复杂得多,目前为止还缺乏可行的、考虑结构体系性能的结构破坏准则和设计方法。

3.3 考虑子结构损伤的整体倒塌破坏准则

地震作用下的倒塌破坏是结构整体性能退化导致的,其宏观表现为 1 个或多个结构构件超出其性能极限^[49]。抗倒塌性能研究需要考虑子结构损伤程度和子结构对结构整体性能影响的重要性程度。

文献[50]中考虑构件破坏的差异性,给出了结构损伤指数 D_θ^+ 的计算公式,即

$$D_\theta^+ = \frac{(\theta_p^+ |_{\text{currentPHC}})^\alpha + \sum_{i=1}^n (\theta_p^+ |_{\text{FHC},i})^\beta}{(\theta_{pu}^+)^\alpha + \sum_{i=1}^n (\theta_p^+ |_{\text{FHC},i})^\beta} \quad (2)$$

式中: $\theta_p^+ |_{\text{currentPHC}}$ 为计算时刻所在的正向加载半周期内位移角极值; $\theta_p^+ |_{\text{FHC},i}$ 为计算时刻前的最大正向加载位移角; θ_{pu}^+ 为单调加载下的极限位移角; α, β 均为通过试验结果回归得出的参数。

整体倒塌破坏准则定义结构破坏的关键是参数 α, β ,参数的定义需要大量试验数据和数值模拟验证,位移角的计算稍显复杂。

文献[13]中认为,框架结构的破坏最终是整体破坏与层破坏共同作用导致的,并把结构的破坏机

制分成 4 种类型(图 3)。通过区分结构的弹性位移和塑性位移,考虑结构层的位移增量,以获得更精确的结构层间位移角,但是倒塌破坏临界状态下如何准确区分整体变形和层变形仍需要进一步深入研究。

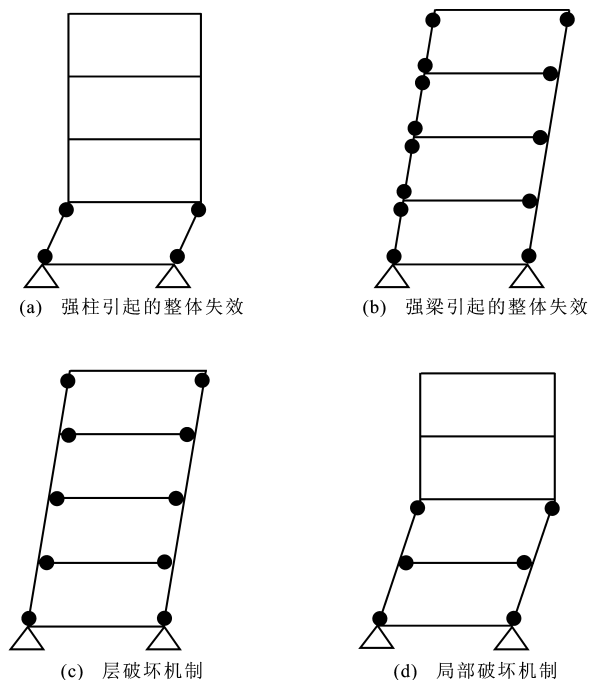


图 3 框架结构失效机制

Fig. 3 Failure Mechanisms of Frame Structure

当子结构性能退化至极限时结构将发生倒塌破坏,量化子结构性能、建立子结构-整体结构评价体系均需要进行大量深入的抗倒塌研究和抗震研究。

4 建筑结构倒塌破坏临界状态

抗地震倒塌破坏研究的首要问题是合理准确地定义倒塌破坏的临界状态,在此基础上建立相应的倒塌破坏准则。

4.1 结构倒塌破坏临界状态

结构倒塌破坏临界状态包括 2 种可能的情形:①结构在大震作用下抗震性能达到极限,此时地震作用仍未结束,下一时刻结构开始倒塌;②结构在大震作用下未发生倒塌破坏,但微小扰动下(如余震、构件塌落引起的结构振动、抗震救灾引发的结构扰动等)结构极易发生倒塌破坏。

目前结构倒塌破坏临界状态包括多种模式,唐代远等^[51]和施炜等^[52]以“结构丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的生存空间”作为结构倒塌的判定依据,选取构件竖向位移超过一定比例的层高为结构倒塌判定依据。但是实际震害下构件塌落与

结构倒塌并不完全相关,梁、板、柱的塌落与倒塌破坏不完全一致,且维持安全生存空间则是一个较为笼统的宏观性能指标,很难应用于倒塌量化分析中。

《高层建筑混凝土结构技术规程》和《建筑抗震设计规范》中规定混凝土框架结构的层间位移角限值(1/50)为倒塌破坏的判定标准,这一判定标准被大量研究者认为是结构不发生倒塌破坏的标准而非倒塌破坏标准。

结构的倒塌储备系数 C_{MR} 作为一种结构的倒塌判定标准^[53],反映了结构的实际抗地震倒塌能力和设防需求之间的储备关系,即

$$C_{MR} = \frac{S_a(T_1)_{50\%}}{S_a(T_1)_s} \quad (3)$$

式中: $S_a(T_1)_{50\%}$ 为有 50% 地震输入出现倒塌对应的地面运动强度; $S_a(T_1)_s$ 为规范中建议的罕遇地震下的地面运动强度。

C_{MR} 反映了结构的抗倒塌能力,一定程度上考虑了地震动的不确定性影响,由于未定义倒塌破坏临界状态, $S_a(T_1)_s$ 本质上属于设防需求而非结构倒塌需求。地震波数量及代表性、多向地震动、场地等因素均影响 C_{MR} 的准确性。

李耀庄等^[54]研究了火灾作用下结构的整体性能退化特点,认为高温作用使得材料性能逐步发生退化,部分构件性能退化甚至失效,结构不断进行荷载重分布,直至这种平衡无法建立,结构将发生倒塌破坏。而地震作用下的结构倒塌破坏受构件性能退化影响显著,该平衡点并不是一个确定的值。

文献[13]中定义了一种基于 Pushover 法的机构点(图 4),根据结构推覆曲线中的转折点将曲线转换为三折线。机构点标志着结构的整体性能以及整体性能逐步下降的趋势,但机构点与倒塌点并未建立准确的对应关系。

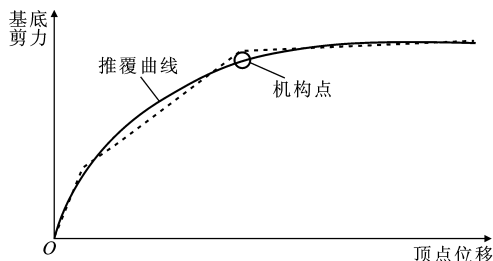


图 4 基于 Pushover 法的结构推覆机构点

Fig. 4 Mechanism Point of Structure Based on Pushover Method

文献[55]中给出了地震作用下构件的最大层间变形角分布,考虑到累积效应对结构稳定的作用机

理仍不清楚,提出了一种二阶非弹性稳定分析方法:首先降低构件的刚度和强度作为结构性能的一种损伤,然后把剩余(永久)的建筑变形加入到结构的拓扑结构中。但文献[55]中仍未给出完整的倒塌破坏评价指标,二阶分析方法与实际倒塌破坏也存在一定的差异。

上述倒塌破坏临界状态定义并不真正对应结构整体性能的退化,是结构倒塌发生某一特定值。

结构倒塌破坏临界状态有多种失效模式,不同的失效模式对结构整体性能使用的影响是不同的,每一个失效模式又是由多个失效约束所组成的。结构的倒塌破坏随机性使得倒塌破坏临界状态并不是一个孤立的点(图5),而是若干个倒塌破坏临界点组成的倒塌破坏区间 $[D', D]$,不同地震输入下系统在这个区间内都有可能发生倒塌破坏。

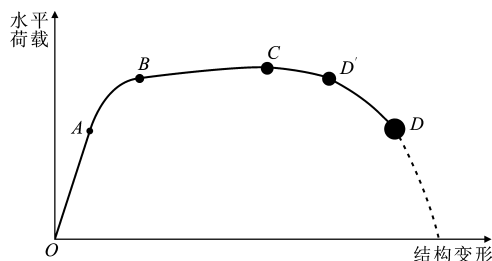


图5 建筑结构的抗倒塌性能

Fig. 5 Collapse Resistance Performance of Building Structure

倒塌破坏区间的确定需要大量的震害调查数据和整体结构试验数据,现阶段并不具备上述条件,最为可行的方法是准确定义结构极限点 D 或控制点 D' 。

4.2 塑性变形与倒塌破坏

对钢筋混凝土框架结构来说,典型的结构破坏机制有梁铰机制、柱铰机制和混合铰机制。梁铰破坏具有较好的耗能能力,是抗震设计所期望的屈服机制;而柱铰破坏表现出不稳定的塑性铰发育特征,其耗能能力差,容易引发结构的倒塌破坏^[56]。

文献[56]中对比了地震作用下7~9度区的一系列典型框架的塑性铰数量和分布特性,指出梁、板超强使得结构出现大量柱铰,而加强柱后的结构在罕遇地震作用下形成梁铰破坏机制使得结构承载力提高。

文献[57]中完成了4榀刚架的试验研究,分析了梁、柱的塑性铰发育特性和刚架破坏特性,强柱型框架单元与弱柱型框架单元的塑性铰分布存在较大的不同,弱柱型框架单元上下端同时达到极限曲率,

而强柱型框架单元柱下端和梁端同时达到极限曲率。由于门式刚架较为简单,文献[57]中并未得出框架倒塌破坏的相关规律。

在超过设防烈度3度的强烈地震作用下,柱端塑性铰的数量代表结构的耗能能力大小,较多的柱端塑性铰数量则可以增加整体结构在倒塌前的耗能能力^[58]。结构层出现大量充分发育的塑性铰区域往往是结构倒塌破坏的区域。

混凝土框架结构中,梁铰耗能能力优于柱铰耗能能力,选择合适的能量耗散机制是抗倒塌设计的关键,必须确保梁、柱节点和框架柱不作为能量耗散的主要构件,应避免出现柱端混凝土压溃和钢筋滑移^[59],换言之,混凝土柱塑性铰的大量充分发育是引起结构倒塌破坏的关键因素。

当平面结构扩展为空间结构时,柱端塑性铰的分布和发育程度仍然是导致结构破坏的主要原因。在双向地震的耦合作用下,塑性变形更多集中于柱端,考虑双向地震作用能够更好地评估结构的抗震性能^[60-62]。文献[63]中选取纤维模型对纯框架模型、带楼板的框架模型和带楼板-填充墙的框架模型进行了三维弹塑性时程动力分析,底层柱端出现塑性铰且达到极限变形时结构形成倒塌机构。对纯框架模型、带楼板的框架模型这2种结构形式,柱端塑性铰的大量充分发育最终引发结构倒塌破坏,由于填充墙的存在使得柱端塑性铰发育变缓,倒塌破坏时底层柱端均出现塑性铰,结构出现明显的底层软弱层。

Kim等^[64]定义单元塑性铰损伤到一定程度后,将该单元分离并重新定义节点,给出了不同框架柱破坏后结构的塑性铰分布。当同一跨的框架梁产生大量塑性铰时,该区域发生竖向坍塌的概率显著增加。

岳茂光等^[65]给出了2组平面框架结构的双向地震反应分析,次方向层间位移角达到一定值后突然减小,地震强度增大使结构改变了破坏路径,塑性铰出现在不同位置。选取位移作为结构倒塌破坏的判定标准,在次方向可能低估了结构的破坏程度。文献[51]中的分析表明,较小的轴压比降低了框架结构的倒塌概率,各层柱出现一定数量的塑性铰,且倒塌始于轴压比最大的底层中柱的小偏压破坏是倒塌破坏的典型模式。

考虑到钢筋屈服后的超强使得梁、板承载力提高,而柱在双向地震作用下承载力退化严重,大震作用下结构很难满足“强柱弱梁”要求,预期的梁铰破

坏机制很难实现^[66-68]。震害调查结果表明,现浇框架结构多出现柱铰机制,框架结构的柱铰大量出现将导致结构发生倒塌破坏。

袁景等^[69]通过定义材料的失效准则来判定单元是否失效,使该构件对整体性能的贡献为 0,认为框架柱的承载力不足和节点区混凝土碎裂是形成不稳定机构的主要原因,而不稳定机构最终导致了结构的倒塌破坏。文献[70]中提出了一种判断构件是否属于超静定约束的算法,以反映框架结构是否形成整体或局部可动机构。文献[71]中定义了杆件的机械铰,判定当结构中形成足够数目的机械铰后,将转变为不可恢复的可动机构,并出现不可逆的倾覆过程。地震作用下结构形成机构是倒塌破坏的主要原因,但构件形成可动铰或机械铰标志着构件完全发生破坏,构件已经退出工作,对结构抗倒塌已无贡献,严格意义上讲,上述倒塌判定准则是结构倒塌“后”的临界状态。

结构的抗倒塌性能研究应避免结构出现耗能能力差的柱铰破坏。框架结构在特定区域内形成大量发育充分且集中的塑性变形集中区域是结构局部性能退化、破坏集中并最终导致整体倒塌破坏的最直接原因。结构在地震作用下的耗能、构件破坏、变形等均是构件塑性铰发育和集中导致的,抗地震倒塌破坏准则和倒塌机理研究应该重视构件塑性铰特别是柱铰发育对结构整体性能退化的影响。

4.3 倒塌破坏影响因素分析

结构的倒塌破坏是一个损伤发生、积累和演化的过程,柱端塑性铰的产生和发育使得结构的整体性能退化。实际结构的震害中,如果把倒塌的原因归结为单柱或多柱的剪切破坏和竖向承载力严重不足,显然忽视了结构的延性破坏和累积损伤破坏特性,且钢筋混凝土柱试验已经表明,低周疲劳加载下构件的耗能、损伤与位移加载幅值、加载顺序密切相关。此外,梁、板的悬索作用、薄弱层对临近层的影响、构件之间的耦合作用、构件的位置因素等都将对结构的倒塌破坏产生一定的影响。

连续倒塌研究表明,梁、板的悬索作用能够有效地防止结构的坍塌,限制倒塌的范围^[72],但是悬索作用在结构抗震倒塌中的作用机理、对结构整体抗倒塌性能的提升程度等研究相对滞后。

除梁、板外,框架柱也一定程度影响结构的整体抗倒塌性能。文献[73]中认为,一旦框架柱发生破坏,将导致缺乏其他冗余系统继续抵抗结构倒塌破坏。首个构件破坏时会对剩余构件产生影响^[74],其

相邻构件很难达到同等的极限荷载。结构底层损伤的累积致使上部结构整体倒塌,角柱的震害较中柱震害严重。文献[75]中研究也认为,大震作用下同层、同高度柱约束在时间序列上具有同时性,边柱一层柱顶和二层柱顶约束几乎同时出现。

文献[76]中研究结果表明,结构的脆性破坏使得相邻构件发生严重破坏,抗震研究中需要重视脆性破坏的构件位置并重点对其进行加固,避免发生更大范围的倒塌破坏。

考虑到引起倒塌的因素无法预测和避免,Starossek^[77]建议人为设置薄弱层,以限制结构倒塌的程度和范围。白凤^[78]认为,采用延性构件、增加结构超静定次数和耗能构件是增加抗震多道防线的有效手段,且设置多道防线后的结构整体抗震能力大幅提高而经济支出增加有限。

除了结构本身的影响因素外,地震动输入对结构倒塌破坏的影响也不可忽视。文献[39]中研究结果表明,结构的倒塌破坏机制不仅取决于结构梁、柱的强弱,还与地震波的特性密切相关,强柱弱梁型结构的倒塌破坏对应的层间位移和倒塌过程持续时间均有一定程度的增加。此外,结构的扭转导致了额外的结构边缘处变形,其结果是扭转处附近的延性需求和构件转角显著增大。

5 结 语

(1)建筑结构倒塌破坏具有显著的地震动输入强随机性、结构抵御地震系统性和地震响应不确定性的特点。静力推覆分析法和 IDA 法或少和或多地考虑了地震动输入随机性对倒塌破坏的影响,时程分析法真实再现了地震动作用下的结构性能退化过程。

(2)现有破坏准则是构件破坏准则的延伸,未考虑结构的不确定性和系统性,不能准确地定义结构倒塌破坏的临界状态和解释倒塌破坏机理。

(3)结构的倒塌存在多种破坏模式,最弱失效模型和极限倒塌状态组成的倒塌破坏区间 $[D', D]$ 能够更好地定义结构倒塌破坏,易于抗倒塌设计实现。

(4)框架结构形成大量发育充分且集中的塑性变形集中区域是结构局部性能退化、破坏集中并最终导致结构整体发生倒塌破坏的最直接原因,抗地震倒塌破坏准则和倒塌破坏机理研究应重视构件塑性铰特别是柱铰发育对结构整体性能退化的影响。

(5)柱铰破坏是结构倒塌破坏的主要原因,但是梁、板的超强、悬索作用、构件的相关性、地震动输入

等也对结构的倒塌破坏产生一定的影响,倒塌研究应重点开展影响柱铰发展的因素分析。

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, Xinan 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] 李英民, 韩军, 刘立平, 等. “5·12”汶川地震砌体结构房屋震害调查与分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 606-611.
LI Ying-min, HAN Jun, LIU Li-ping, et al. Investigation and Analysis of Masonry Building Damage Caused by the 5·12 Wenchuan Earthquake, Sichuan Province[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(5): 606-611.
- [3] GURLEY C. Progressive Collapse and Earthquake Resistance[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2008, 13(1): 19-23.
- [4] 蔡建国, 王峰岚, 冯健, 等. 建筑结构连续倒塌概念设计[J]. 工业建筑, 2011, 41(2): 74-77.
CAI Jian-guo, WANG Feng-lan, FENG Jian, et al. Concept Design of Progressive Collapse of Structures [J]. Industrial Construction, 2011, 41(2): 74-77.
- [5] FEMA 273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S].
- [6] FEMA 274, NEHRP Commentary of the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S].
- [7] 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. Criteria for Seismic Structural Damage and Reliability Analysis[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 1995.
- [8] 李英民, 刘立平. 工程结构的设计地震动[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
LI Ying-min, LIU Li-ping. Design Ground Motion for Engineering Structure [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [9] 叶列平, 曲哲, 陆新征, 等. 提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 42-50.
YE Lie-ping, QU Zhe, LU Xin-zheng, et al. Collapse Prevention of Building Structures: A Lesson from the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42-50.
- [10] 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.
- [11] 吕大刚, 宋鹏彦, 于晓辉, 等. 土木工程结构抗震可靠度理论的研究与发展[C]//李宏男, 伊廷华. 第二届结构工程新进展国际论坛论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 775-787.
LU Da-gang, SONG Peng-yan, YU Xiao-hui, et al. Research and Developments of Seismic Reliability Theory of Civil Engineering Structures[C]//LI Hong-nan, Yi Ting-hua. Proceedings of the Second International Forum on Advances in Structural Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 775-787.
- [12] 王亚勇, 高孟潭, 叶列平, 等. 基于大震和特大震下倒塌率目标的建筑抗震设计方法研究方案[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(增2): 291-297.
WANG Ya-yong, GAO Meng-tan, YE Lie-ping, et al. Seismic Design Methodology Based on Rate of Collapse Target for Severe Earthquake and Super-major Earthquake[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(S2): 291-297.
- [13] DINH T V, LCHINOSE T. Probabilistic Estimation of Seismic Story Drifts in Reinforced Concrete Buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(3): 416-427.
- [14] HASELTON C B, LIEL A B, DEIERLEIN G G, et al. Seismic Collapse Safety of Reinforced Concrete Buildings. I: Assessment of Ductile Moment Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 137(4): 481-491.
- [15] LIEL A B, HASELTON C B, DEIERLEIN G G. Seismic Collapse Safety of Reinforced Concrete Buildings. II: Comparative Assessment of Nonductile and Ductile Moment Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 137(4): 492-502.
- [16] HASELTON C B, DEIERLEIN G G. Assessing Seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment-frame Buildings[M]. Berkeley: Pacific Earth-

- quake Engineering Research Center, 2007.
- [17] MOGHADAM A S, TSO W K. Damage Assessment of Eccentric Multistory Buildings Using 3-D Pushover Analysis[C]//Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica. Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco: Elsevier, 1996: 1-8.
- [18] 黄羽立, 陆新征, 叶列平, 等. 基于多点位移控制的推覆分析算法[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 18-23.
HUANG Yu-li, LU Xin-zheng, YE Lie-ping, et al. A Pushover Analysis Algorithm Based on Multiple Point Constraints[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 18-23.
- [19] 朱俊锋, 王东炜, 霍 达. 在大震下 RC 框架结构基于 Pushover 方法的失效相关性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 85-90.
ZHU Jun-feng, WANG Dong-wei, HUO Da. An Analysis of Failure Dependencies of RC Frame Structures Based on Pushover Method Under Strong Earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 85-90.
- [20] KIM S P, KURAMA Y C. An Alternative Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Displacement Demands[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3793-3807.
- [21] 马千里, 叶列平, 陆新征. MPA 法与 Pushover 法的准确性对比[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 121-128.
MA Qian-li, YE Lie-ping, LU Xin-zheng. Comparative Evaluation of Correctness Between MAP and Pushover Analyses[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(11): 121-128.
- [22] 王 丰, 李宏男, 伊廷华. 考虑双向地震动作用的非对称结构多维 Pushover 分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(6): 1055-1060.
WANG Feng, LI Hong-nan, YI Ting-hua. A Multiple Pushover Analysis Procedure for Asymmetric Structures Subjected to Bi-directional Ground Motions[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(6): 1055-1060.
- [23] 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.
- [24] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental Dynamic Analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [25] 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]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6): 33-39.
- [26] 马千里. 钢筋混凝土框架结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
MA Qian-li. Study on Energy-based Seismic Design Methodology and Application for RC Frames[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [27] LUCO N, CORNELL C A. Effects of Connection Fractures on SMRF Seismic Drift Demands[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(1): 127-136.
- [28] 杨 成, 赵世春, 赵人达, 等. 地震作用特征对结构 IDA 曲线的影响分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(2): 93-99.
YANG Cheng, ZHAO Shi-chun, ZHAO Ren-da, et al. Investigation for the Characters of Seismic Effect to Incremental Dynamic Analysis Curves[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(2): 93-99.
- [29] 王亚勇, 刘小弟, 安 东. 钢筋砼框架结构时程法地震反应分析[J]. 建筑结构, 1993(7): 21-24.
WANG Ya-yong, LIU Xiao-di, AN Dong. Time-history Analysis of Reinforced Concrete Frame Structure [J]. Building Structure, 1993(7): 21-24.
- [30] 吴小峰, 孙启国, 狄杰建, 等. 抗震分析反应谱法和时程分析法数值仿真比较[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 275-278, 304.
WU Xiao-feng, SUN Qi-guo, DI Jie-jian, et al. A Numerical Simulation Comparison Between Response Spectrum Analysis and Time History Analysis [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 275-278, 304.
- [31] NAIR D, VADIVIESO J B, JOHNSON C M. Comparison of Spectrum and Time History Techniques in Seismic Design of Platforms[C]//American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Proceedings of the Twelfth Annual Offshore Technology Conference. New York: Society of Petroleum, 1980: 1-12.
- [32] 李 兵, 陈 鑫, 赵乃志. RC 框-剪结构多维弹塑性时程反应分析[J]. 低温建筑技术, 2009(8): 29-31.
LI Bing, CHEN Xin, ZHAO Nai-zhi. Nonlinear Analysis of R/C Frame-wall Structures to Multiple Earth-

- quake Excitations[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009(8): 29-31.
- [33] 陈万祥,郭志昆,杨成忠. 结构多维弹塑性地震反应的时程分析研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(1): 74-76.
- CHEN Wan-xiang, GUO Zhi-kun, YANG Cheng-zhong. Time History Analysis of Multi-dimensional Elastic-plastic Earthquake Response for Structure[J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(1): 74-76.
- [34] 王亚勇,程民宪,刘小弟. 结构抗震时程分析法输入地震记录的选择方法及其应用[J]. 建筑结构, 1992(5): 3-7.
- WANG Ya-yong, CHENG Min-xian, LIU Xiao-di. Method and Example of Selecting of Earthquake Ground Motion for Time-history Analysis of Structures[J]. Building Structure, 1992(5): 3-7.
- [35] 王亚勇,刘小弟,程民宪. 建筑结构时程分析法输入地震波的研究[J]. 建筑结构学报, 1991, 12(2): 51-60.
- WANG Ya-yong, LIU Xiao-di, CHENG Min-xian. Study on the Input of Earthquake Ground Motion for Time-history Analysis of Structures [J]. Journal of Building Structures, 1991, 12(2): 51-60.
- [36] 董 娣,周锡元,闫维明,等. 地震动不确定性及其影响因素的初步分析[J]. 地震研究, 2006, 29(2): 167-175.
- DONG Di, ZHOU Xi-yuan, YAN Wei-ming, et al. Uncertainty of Ground Motion and Primary Analysis of Its Effect Factors [J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(2): 167-175.
- [37] 王亚勇. 关于设计反应谱、时程法和能量方法的探讨[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 21-28.
- WANG Ya-yong. A Review of Seismic Response Spectra, Time History Analysis and Energy Method [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 21-28.
- [38] 顾祥林,印小晶,林 峰,等. 建筑结构倒塌过程模拟与防倒塌设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 179-187.
- GU Xiang-lin, YIN Xiao-jing, LIN Feng, et al. Simulation of Collapse Process and Design Method to Resist Collapse for Building Structures[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 179-187.
- [39] 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.
- [40] 刘海卿,刘 东. 钢筋混凝土框架结构地震倒塌过程模拟分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 969-972.
- LIU Hai-qing, LIU Dong. Simulation Analysis for Collapse Process of Frame Structures Under Earthquake[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(6): 969-972.
- [41] 何 政. 强震下混凝土结构渐进倒塌性能分析与设计新进展[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2009, 1(1): 59-66.
- HE Zheng. Advances in Progressive Collapse Analysis and Design of Concrete Structures Subjected to Strong Earthquakes[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2009, 1(1): 59-66.
- [42] 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 & Engineering, 1993, 15(4): 1-8, 21.
- [43] 刘伯权,刘 鸣,白绍良. 抗震结构破坏准则的再思考[J]. 世界地震工程, 1998, 14(1): 17-20, 45.
- LIU Bo-quan, LIU Ming, BAI Shao-liang. Reconsideration of Damage Criteria for Earthquake Resistant Structures[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1998, 14(1): 17-20, 45.
- [44] 张国军,刘伯权,李应斌,等. 抗震结构破坏准则的研究进展[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(3): 68-71.
- ZHANG Guo-jun, LIU Bo-quan, LI Ying-bin. The Research Progress of Damage Criteria for Earthquake Resistant Structures[J]. Building Science Research of Sichuan, 2002, 28(3): 68-71.
- [45] 孙玉红,聂立武,韩古月. 地震作用下建筑结构倒塌失效准则分析[J]. 中外建筑, 2011, 17(7): 199-201.
- SUN Yu-hong, NIE Li-wu, HAN Gu-yue. Analysis on the Rules of Architecture Structure Tumble Invalidation Earthquake Function[J]. Chinese and Overseas Architecture, 2011, 17(7): 199-201.
- [46] 王 强,吕西林. 框架结构在地震作用下倒塌的离散单元法仿真分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 77-82.
- WANG Qiang, LU Xi-lin. Simulation Analysis of Seismic Collapse Process for Frame Structures by DEM[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 77-82.

- [47] 付 国,刘伯权,邢国华. 基于有效耗能的改进 Park-Ang 双参数损伤模型及其计算研究[J]. 工程力学, 2013,30(7):84-90.
- FU Guo,LIU Bo-quan,XING Guo-hua. The Research and Calculation on Modified Park-Ang Double Parameter Seismic Damage Model Based on Energy Dissipation[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(7):84-90.
- [48] 秦 权,林道锦,梅 刚. 结构可靠度随机有限元——理论及工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- QIN Quan,LIN Dao-jin,MEI Gang. Theory and Applications Reliability Stochastic Finite Element Methods[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006.
- [49] ZAREIAN F,KRAWINKLER H. Structural System Parameter Selection Based on Collapse Potential of Buildings in Earthquakes [J]. Journal of Structural Engineering, 2010,136(8):933-943.
- [50] MEHANNY S S F,DEIERLEIN G G. Seismic Damage and Collapse Assessment of Composite Moment frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9):1045-1053.
- [51] 唐代远,陆新征,叶列平,等. 柱轴压比对我国 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2010,32(5):26-35.
- TANG Dai-yuan,LU Xin-zheng,YE Lie-ping, et al. Influence of Axial Compression Ratio to the Seismic Collapse Resistance of RC Frame Structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010,32(5):26-35.
- [52] 施 炜,叶列平,陆新征,等. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究[J]. 工程力学, 2011,28(3): 41-48,68.
- SHI Wei,YE Lie-ping,LU Xin-zheng, et al. Study on the Collapse-resistant Capacity of RC Frames with Different Seismic Fortification Levels[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(3):41-48,68.
- [53] FEMA P-695,Quantification of Building Seismic Performance Factors[S].
- [54] 李耀庄,苏玲红,吴小华. 火灾下工程结构连续性倒塌分析与设计方法探讨[J]. 灾害学, 2010,25(1):89-92.
- LI Yao-zhuang,SU Ling-hong,WU Xiao-hua. Discussion on Analysis and Design Methods of Preventing Structural Progressive Collapse in Case of Fire[J]. Journal of Catastrophology, 2010,25(1):89-92.
- [55] DEIERLEIN G G,MEHANNY S S. On Assessing Near Collapse in Seismic Performance-based Design [C]//ELGAALY M. Advanced Technology in Structural Engineering. Philadelphia:ASCE,2004:1-8.
- [56] 王 彬. 大震下钢筋混凝土框架结构塑性铰破坏机制研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- WANG Bin. Study on Failure Mechanism of Reinforced Concrete Frame Structure's Plastic Hinge by Rare Earthquake Action[D]. Changchun:Jilin University,2009.
- [57] 高振世,庞同和. 钢筋混凝土框架单元的延性和塑性铰性能[J]. 南京工学院学报, 1987,17(1):106-117.
- GAO Zhen-shi,PANG Tong-he. Ductility and Plastic Hinge of the Reinforced Concrete Frames[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 1987,17(1):106-117.
- [58] 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.
- [59] ZAREIAN F,KRAWINKLER H. Structural System Parameter Selection Based on Collapse Potential of Buildings in Earthquakes [J]. Journal of Structural Engineering, 2010,136(8):933-943.
- [60] 杨 红,高文生,王志军. 空间框架简化为平面模型的抗震分析[J]. 重庆大学学报, 2008,31(11):1267-1272.
- YANG Hong,GAO Wen-sheng,WANG Zhi-jun. The Rationality of Plane Model Simplifying Three-dimension Frame in Seismic Response Analysis[J]. Journal of Chongqing University, 2008,31(11):1267-1272.
- [61] 杨 红,朱振华,白绍良. 双向地震作用下我国“强柱弱梁”措施的有效性评估[J]. 土木工程学报, 2011,44(1):58-64.
- YANG Hong,ZHU Zhen-hua,BAI Shao-liang. An Evaluation of the Effectiveness of the Chinese Strong Column Weak Beam Measure Under Bi-directional Horizontal Seismic Excitations [J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(1):58-64.
- [62] 杨 红,王七林,白绍良. 双向水平地震作用下我国框架的“强柱弱梁”屈服机制[J]. 建筑结构, 2010,40(8):71-76.
- YANG Hong,WANG Qi-lin,BAI Shao-liang. Strong Column-weak Beam Mechanism for RC Frames in China Under Bi-directional Horizontal Seismic Excitation[J]. Building Structure, 2010,40(8):71-76.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 岳茂光, 王东升, 孙治国, 等. 汶川地震下框架结构的抗倒塌能力分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11):250-256.
- YUE Mao-guang, WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo, et al. Analysis on Collapse Resistant Capability of Reinforced Concrete Frame Structure Under Wenchuan Earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11):250-256.
- [66] 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.
- [67] 杨红, 王建辉, 白绍良. 双向地震作用对框架柱端弯矩增大系数的影响分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(9):40-47.
- YANG Hong, WANG Jian-hui, BAI Shao-liang. Effect of Bi-directional Horizontal Seismic Excitation on the Moment Amplification Factor of Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(9):40-47.
- [68] PANTAZOPOULOU S J, FRENCH C W. Slab Participation in Practical Earthquake Design of Reinforced Concrete Frames[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4):479-489.
- [69] 袁景, 刘海卿, 刘东. 强震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌破坏的三维仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增1):115-119.
- YUAN Jing, LIU Hai-qing, LIU Dong. 3-D Simulation Analysis on Collapse of RC Frame Structures Under Strong Earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(S1):115-119.
- [70] 倪强, 唐家祥. 钢筋混凝土框架结构倒塌的计算机仿真研究[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(8):49-51.
- NI Qiang, TANG Jia-xiang. Computer Simulation of RC Frame Collapse[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1999, 27(8):49-51.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] BERG G V. Engineering Implications of the Bucharest Computing Center Collapse[C]//WCEE. Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering: Volume VI. Istanbul: WCEE, 1980:455-462.
- [74] 朱俊锋, 王东炜, 霍达. 在大震下 RC 框架结构基于 Pushover 方法的失效相关性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4):85-90.
- ZHU Jun-feng, WANG Dong-wei, HUO Da. An Analysis of Failure Dependencies of RC Frame Structures Based on Pushover Method Under Strong Earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4):85-90.
- [75] 朱小青. 基于拟动力模型试验的 RC 框架结构失效相关性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
- ZHU Xiao-qing. An Analysis of Failure Dependencies of RC Frame Structures Based on the Pseudo-dynamic Testing[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [76] ZHANG L M, LIU X L. Collapse Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Considering Collision Effects [C]//WCEE. Proceedings of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: WCEE, 2000:1-8.
- [77] STAROSSEK U. Progressive Collapse of Bridges [C]//CHANG H M, KOH H M, LEE S L. Proceedings of International Symposium on Sea-crossing Long-span Bridges. Mokpo: Bridge World Press, 2006:1-6.
- [78] 白凤. 论我国中小学教学楼防倒塌的抗震概念设计[J]. 工业建筑, 2009, 39(1):42-46.
- BAI Feng. Discussion on Aseismic Conceptual Design of Middle and Primary Schools' Buildings in China for Preventing Collapse[J]. Industrial Construction, 2009, 39(1):42-46.

