

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.198



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



RC 框架结构倒塌地震易损性评估

郑山锁¹, 温桂峰¹, 董立国¹, 杨威², 刘巍³, 张艺欣¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院; 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055;

2. 广州容柏生建筑设计事务所(普通合伙)上海分所, 上海 200063;

3. 同圆设计集团有限公司, 济南 250101)

摘要:为系统评估 RC 框架结构的抗地震倒塌能力,按照中国现行规范设计了 66 个典型 RC 框架结构,基于 OpenSEEs 平台建立了考虑节点剪切变形的典型 RC 框架结构集中塑性铰模型,并采用 IDA 分析方法得到各典型结构的 IDA 曲线与倒塌点;分析设防烈度、层数及跨度对倒塌储备系数的影响,评估 RC 框架结构在大震及特大地震下的抗地震倒塌能力。结果表明:按中国现行规范设计的 RC 框架结构的抗倒塌储备系数 CMR 与设防烈度和层数存在负相关关系,而与跨度的相关性较弱;符合现行规范设计的 RC 框架结构满足大震不倒的设防要求,但其抵御特大地震作用的能力明显不足,其中,7.5 度设防 RC 框架结构的抗倒塌能力最弱。

关键词:集中塑性铰模型; 框架结构; 倒塌储备系数; 抗倒塌能力; 易损性曲线

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)05-0177-12

Seismic collapse fragility estimation of RC frame structures

ZHENG Shansuo¹, WEN Guifeng¹, DONG Ligu¹, YANG Wei², LIU Wei³, ZHANG Yixin¹

(1. School of Civil Engineering; Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China;

2. RBS Architectural Engineering Design Associates Shanghai Office, Shanghai 2000063, P. R. China;

3. Tong Yuan Design Group Co., Ltd., Jinan 250101, P. R. China)

Abstract: In order to systematically evaluate the seismic collapse resistance of RC frame structures in China, 66 typical RC frame structures were designed in accordance with the current codes. Based on OpenSEES platform, the lumped plastic hinge model of typical RC frame structures considering shear deformation of joints was established. IDA curves and collapse points of typical structures were obtained by IDA analysis method. Furthermore, effects of building seismic fortification levels, storeys and span on the collapse margin ratio (CMR) were analyzed, and the seismic collapse resistance of the RC frame structure under major earthquakes and severe earthquakes was evaluated. The results show that, the CMR of the RC

收稿日期: 2020-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1509302); 国家自然科学基金(51678475); 西安市科技计划(2019113813CXSF016SF026); 陕西省教育厅产业项目(18JC020)

作者简介: 郑山锁(1960-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震研究, E-mail: zhengshansuo@263.net.

Received: 2020-09-02

Foundation items: National Key R & D Program of China(No. 2019YFC1509302); National Natural Science Foundation of China(No. 51678475); Science and Technology Program of Xi'an(2019113813CXSF016SF026); Industrialization Project of Shaanxi Education Department(No. 18JC020)

Author brief: ZHENG Shansuo (1960-), PhD, professor, main research interest: earthquake resistance of engineering structure, E-mail: zhengshansuo@263.net.

frame structure designed according to China's current codes has a negative correlation with the seismic fortification levels and stories, but has a weak correlation with the span; the RC frame structure designed in accordance with the current code can meet the fortification requirements of major earthquake, but its ability to withstand the effects of severe earthquakes is obviously insufficient. Among them, the 7.5 degree fortified RC frame structure has the weakest ability to resist collapse.

Keywords: lumped plastic hinge model; frame structure; collapse margin ratio; ability to resist collapse; fragility curves

21 世纪初,苏门答腊地震后,全球进入了地震高发期,中国作为典型的地震多发国家,同样进入了新的地震活跃期,这为中国防震减灾工作带来了严峻考验。据统计,2008 年汶川地震中死亡人数超过 6.94 万,受伤人数超过 37.4 万;2013 年玉树地震中,死亡人数超过 2 600,受伤人数达到 9 000 多。房屋建筑的倒塌破坏是造成震时人员伤亡的主要原因,因此,控制和预测建筑结构在地震作用下的倒塌是当前防灾减灾工作的重中之重。

结构倒塌易损性分析方法作为结构性能化抗震理念的重要组成部分,近年来逐步发展成为评估结构抗倒塌能力的主流方法。2009 年,美国应用技术委员会(ATC)颁布了第一部结构抗倒塌性能评估标准 FEMA P695^[1],建立了基于 IDA 分析的结构倒塌易损性分析方法。此后,基于该分析方法,Elshar 等^[2]、钱凯等^[3]、Huang 等^[4]分别对某一 RC 框架结构进行了抗地震倒塌性能数值模拟分析;Lu 等^[5]研究了构件尺寸及配筋对 RC 框架结构抗倒塌能力的影响;苏佶智等^[6]讨论了轴压比、梁柱线刚度比变化对 RC 框架结构抗倒塌能力的影响;罗开海等^[7-9]对不同设防烈度和不同层数 RC 框架结构的抗倒塌能力进行了研究;邓颖婷^[10]对不同跨度和不同层数的 RC 框架结构的抗倒塌能力进行了数值模拟;范萍萍等^[11]讨论了不同设防烈度和抗震等级对 RC 框架结构抗倒塌能力的影响;周洲等^[12]对中国近年来关于建筑结构地震倒塌易损性方面的研究成果进行了整理和分析,发现现阶段中国建筑结构的倒塌风险尚不具有 consistency。综合上述研究结果可以看出,目前学者们虽然已经对建筑结构的抗地震倒塌能力开展了大量研究,但其研究主要集中于探讨某一设计参数对结构抗倒塌性能的影响,缺乏对一类建筑结构抗倒塌性能的系统性评价,不利于从整体角度科学认识一类建筑结构的抗倒塌性能。

鉴于此,笔者以符合中国现行设计规范的 RC 框架结构为研究对象,考虑设防烈度、结构层数及跨

度变化对抗地震倒塌能力的影响,设计了 66 个典型 RC 框架结构,基于 IDA 分析方法,分别对其进行抗倒塌性能评估,并剖析了该类结构抗倒塌能力的概率分布,以期为总体认识中国 RC 框架的抗倒塌性能提供参考。

1 典型结构的设计

结构设计参数的离散性和所处场地的多样性是研究结构抗地震倒塌能力时不可忽视的两个重要因素。ATC-63^[13]提出可通过引入体现某一类抗侧力体系主要倒塌特征的代表结构,即典型结构来解决结构设计参数的离散性问题。Haselton 等^[14]指出,典型结构消除了单个建筑物和一类群体结构抗震性能预测间的隔阂。因此,为了研究依中国规范设计的 RC 框架结构的抗地震倒塌能力,笔者基于 ATC-63^[13]和 Syner-G^[15]中关于典型结构的建立方法,结合中国现行设计规范,并综合考虑设防烈度、建筑高度和跨度 3 种因素对结构倒塌性能的影响,建立了 66 个不同设计参数的典型 RC 框架结构,各典型结构的层数、跨度、设防烈度分布如图 1 所示。

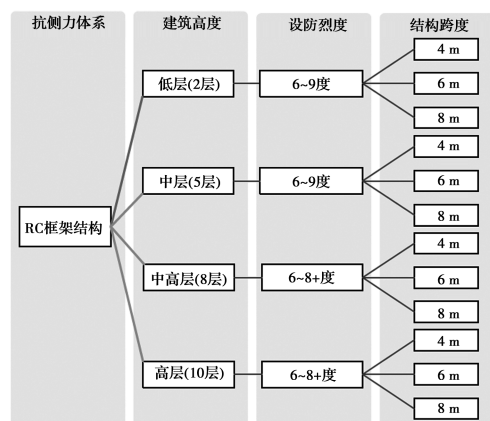


图 1 典型结构逐层细化示意图

Fig. 1 Layer by layer detailed schematic diagram of typical structure

针对各典型结构,依据中国现行设计规范,以弹性层间位移角限值为目标,通过反复迭代设计得到

各典型结构中构件的几何尺寸与详细配筋。为使设计的结构具有典型性,按照如下规则确定结构设计参数及梁柱构件的几何尺寸:

1) 梁截面尺寸:认为每层梁的截面不变,但不同层数梁的截面有所不同,基于规范规定,并满足工程模数要求及最少截面类型要求,将梁宽取为 250 mm,梁高取梁跨的 1/10~1/18,同时,考虑到梁截面的实际配筋和施工情况,部分梁的截面宽度可由 250 mm 增至 300、350、400 mm。

2) 柱截面尺寸:对于不超过 10 层的结构,其框架柱应符合规范规定的最小截面尺寸要求,并尽量减少截面类型。

3) 结构荷载信息:对于楼面和屋面荷载,参考文献[16-17]中恒载的简化取值方法,对楼板、装修、隔墙、外墙等恒载均折算为楼板恒载输入,折算后的楼面及屋面恒载取为 8 kN/m²、活载取为 2 kN/m²,并考虑周期和楼面活荷载折减;结构的设计地震分组为第二组,场地类别为 II 类;基本风压为 0.4 kN/m²、地面粗糙度为 C 类,基本雪压为 0.3 kN/m²。

4) 构件设计信息:梁、柱纵筋采用 HRB400 钢筋;箍筋采用 HPB300 钢筋;2 层、5 层结构的混凝土强度等级采用 C30;8 层、10 层混凝土强度等级采用 C40;楼面及屋面板厚分别取 120 mm(跨度 6 m 和 8 m)和 100 mm(跨度 4 m);梁、柱构件的保护层厚度取 20 mm,板保护层厚度取 15 mm。其详细配筋信息见文献[18]。

基于上述设计信息,采用 PKPM 软件设计了各典型 RC 框架结构。其中,不同层数 6 m 跨度典型 RC 框架结构的 PKPM 模型如图 2 所示。

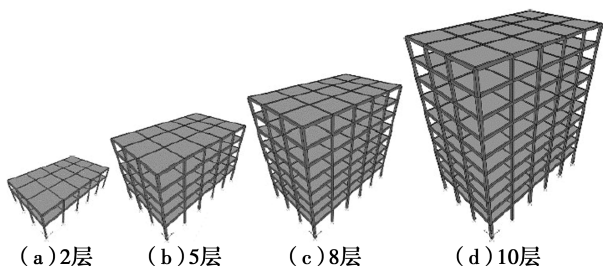


图 2 6 m 跨度典型 RC 框架结构 PKPM 模型

Fig. 2 PKPM model of 6 m span typical RC frame structure

2 RC 框架结构塑性铰模型的建立

目前,针对 RC 框架结构的数值模拟方法主要有基于材料本构关系的纤维模型与实体元模型,以及基于截面弯矩-转角关系的集中塑性铰模型。考

虑到结构倒塌易损性分析通常以大量 IDA 分析为基础,而基于材料本构关系的纤维模型和实体元模型在强非线性条件下计算耗时巨大的现状,以及在地震作用下 RC 框架结构构件一般在梁、柱构件端部形成塑性铰,发生破坏,而构件中部通常保持弹性的特性,采用基于集中塑性铰模型的 RC 框架结构的数值建模方法。相对纤维模型和实体元模型,集中塑性铰模型仅需确定构件端部非线性弹簧单元的力与变形关系就可以较准确地模拟构件的非线性行为,且能够在保证精度的同时大大降低数值计算成本。鉴于此,基于 OpenSEEs 平台建立考虑节点剪切变形的 RC 框架结构集中塑性铰模型(如图 3 所示),并对该结构模型进行倒塌分析。

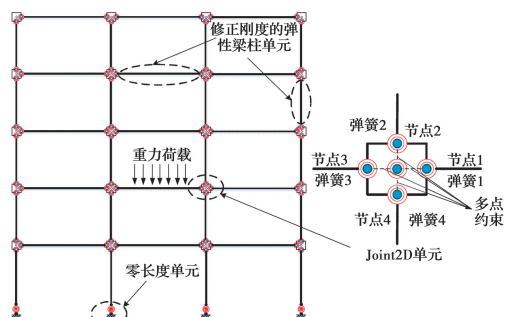


图 3 考虑节点剪切变形的 RC 框架结构的塑性铰模型

Fig. 3 Plastic hinge model of RC frame structure considering joint shear deflection

2.1 RC 框架梁、柱构件数值模型

RC 框架结构集中塑性铰模型将框架梁柱单元简化为弹性杆单元和端部零长度塑性铰单元的串联体系,准确建立梁柱单元集中塑性铰模型的关键是确定中部弹性杆单元和端部塑性铰单元的力学性能参数。

2.1.1 中部弹性杆单元 由于力学模型的简化,采用一般的弹性梁柱单元对梁柱集中塑性铰模型中部的弹性杆进行模拟时,所得到的梁柱塑性铰模型的刚度将与构件的实际刚度不符,从而导致结构动力特性产生较大误差,得出错误的结构地震反应分析结果。Zareian 等^[19]针对这一问题,提出了保证集中塑性铰具有正确刚度的修正方法,该方法通过修正内部弹性单元的截面惯性矩、单元刚度系数和端部塑性铰单元的刚度予以实现。采用 Zareian 等^[19]建议的修正方法,对梁柱单元集中塑性铰模型的相关参数进行修正,具体修正方法为

$$K_s = n \frac{6E_c I_e}{2} \quad (1)$$

$$I_e = \frac{n+1}{n} I \quad (2)$$

$$S_{ij} = S_{ji} = \frac{6(n+1)}{2+3n}I \quad (3)$$

$$S_{ii} = S_{jj} \frac{1+2n}{1+n} S_{ij} \quad (4)$$

式中: E_c 为弹性模量; I 为构件的截面惯性矩; L 为构件长度; K_s 为弹簧单元初始刚度; I_e 为修正后内部弹性单元 (ModElasticBeam2d) 的截面惯性矩; S_{ii} 、 S_{jj} 、 S_{ij} 、 S_{ji} 为修正后内部弹性单元的刚度系数; $n=K_s/K_e$, $K_e(K_e=6EI_e/L)$ 为内部弹性单元的转动刚度。在保证集中塑性铰模型转动刚度与实际单元刚度相等的前提下, 对于修正刚度的弹性单元 (ModElasticBeam2d), 当 n 取值越大, 该单元的刚度矩阵与一般弹性杆单元的刚度矩阵越接近, 但较大的 n 值容易造成数值计算不收敛, 参考 Zareian 等^[19] 的建议, 取 $n=10$ 。

表 1 塑性铰单元恢复力模型各参数计算式

Table 1 Calculation formulas for parameters of restoring force model of plastic hinge element

参数	表达式	计算式中各参数的含义
屈服弯矩 M_y	$M_y = 0.97M_{y(\text{fardis})}$ $M_{y(\text{fardis})} = bd^3 \phi_y \left\{ E_c \frac{k_y^2}{2} \left[0.5(1+\delta') - \frac{k_y}{3} \right] + \frac{E_s}{2} \left[(1-k_y)\rho + (k_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1-\delta') \right] (1-\delta') \right\}$	v 为轴压比; b 、 d 为截面的宽和高; ϕ_y 为屈服曲率; ρ 和 ρ' 分别为拉、压钢筋配筋率; ρ_v 为抗剪钢筋配筋率; d' 为受压区边缘到受压钢筋中心的距离;
强化系数 $\alpha_{s,s}$	$\alpha_{s,s} = \frac{\alpha_{s,\text{mem}}}{1+n-n\alpha_{s,\text{mem}}}$ $\alpha_{s,\text{mem}} = \frac{M_c - M_y}{K_{\text{men}} \cdot \theta_{\text{cap,pl}}}$ $K_{\text{men}} = 6E_c I/L$	$\delta' = \frac{d'}{d}$; $\alpha_{s,\text{mem}}$ 为构件应变硬化系数; α_{sl} 是等于 0 或 1 (通常为 1) 的系数, 取决于是否包括粘结滑移; c_{units} 是单位换算变量 (f'_c 单位为 MPa 时取 1.0, 为 ksi 时取 6.9); ρ 为纵向配筋率 A_s/bh ; s_n 为钢筋屈曲系数; ρ_{sh} 为塑性铰区横向钢筋面积比; s 为塑性铰区横向钢筋的间距。
塑性转角 $\theta_{\text{cap,pl}}$	$\theta_{\text{cap,pl}} = 0.12(1+0.55\alpha_{sl})(0.16)^v(0.02+40\rho_{sh})^{0.43} \times (0.54)^{0.01c_{\text{units}}} f'_c(0.66)^{0.1s_n} (2.27)^{10\rho}$	
峰值后转角 θ_{pc}	$\theta_{\text{pc}} = 0.76(0.031)^v(0.02+40\rho_{sh})^{1.02} \leq 0.10$	
循环能量耗散能力 λ	$\lambda = 170.7(0.27)^v(0.10)^{s/d}$	

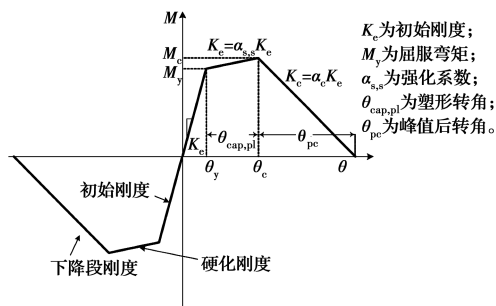


图 4 塑性铰单元模型

Fig. 4 Plastic hinge element model

此外, 由于集中塑性铰模型同样采用瑞利阻尼, 且仅考虑内部弹性单元的刚度阻尼, 不考虑弹簧单元的刚度阻尼, 而已对内部弹性单元的刚度进行了

2.1.2 塑性铰单元 强烈地震作用下, RC 框架结构中梁、柱构件端部塑性铰区的弯矩-转角关系通常具有峰值指向性特点, 因此, 采用 Ligons 等^[20] 提出的具有峰值指向性特点的滞回模型 ModIMKPeakOriented 描述梁柱塑性铰区的弯矩-转角关系, 如图 4 所示。该滞回模型的骨架曲线由 6 个参数控制, 即初始刚度 K_s 、屈服弯矩 M_y 、强化系数 $\alpha_{s,s}$ 、塑性转角 $\theta_{\text{cap,pl}}$ 、峰值后转角 θ_{pc} 和循环能量耗散能力 λ 。其中, 弹簧单元的初始刚度 K_s 按式(1)计算确定; 对于其余参数的取值, Haselton 等^[21] 基于 255 个柱试验数据建立了相应的预测公式并验证了公式的准确性, 笔者采用该预测公式确定塑性铰单元的力学性能参数。各参数的具体预测公式如表 1 所示。

修正, 因此, 为得到正确的刚度阻尼, 应对内部弹性单元的刚度阻尼系数进行修正。

$$\beta' = \frac{n+1}{n}\beta \quad (5)$$

式中: β 为刚度阻尼系数; β' 为修正后的刚度阻尼系数。

2.2 RC 框架梁柱节点域数值模型

严格依据中国现行规范设计的 RC 框架结构均满足“强节点弱构件”的抗震设计原则, 数值模拟分析中通常将节点作为弹性或刚性节点, 即不考虑节点破坏。然而, 历次震害资料表明, 节点剪切破坏亦是 RC 框架结构的典型震害, 且其破坏易引发 RC 框架结构倒塌。鉴于此, 为有效考虑节点剪切破坏对

RC框架结构抗地震倒塌能力的影响,采用 Altoontash 等^[22]提出的二维梁柱节点单元(element Jiont2d)模拟节点剪切变形,建立了考虑节点剪切变形的 RC 框架结构集中塑性铰模型,如图 3 所示。

Jiont2d 节点单元包含 4 个位于梁柱构件与节点交界面处的转角弹簧和 1 个位于节点中心的转动弹簧,其中,4 个转角弹簧用以模拟梁柱端的转动变形,中心转动弹簧用以模拟节点的剪切变形。采用 Hysteretic 滞回模型模拟节点域剪切恢复力特性,其中,剪切恢复力模型的开裂点、屈服点、峰值点的剪应力和剪应变采用 Teraoka 等^[23]模型计算确定,并根据式(6)转换为相应的弯矩-转角关系;对于节点域剪切块的滞回特征取值,参考 Altoontash^[22]建议的参数值,捏缩点的应力值取为最大历史应力的 25%,应变值取为最大历史转角的 25%。

$$M_i = \frac{\tau_i b_j h_j}{(1 - h_c/L_b)/j d_b - 1/L_c}, \quad \theta_i = \gamma_i \quad (6)$$

式中: M_i 、 θ_i 为不同受力状态下节点中心转动弹簧的弯矩和转角; τ_i 、 γ_i 为节点各受力状态下的剪应力和剪应变,计算公式见文献[22]; h_c 为柱截面高度; b_j 、 h_j 为节点核心区的有效宽度和截面高度; L_c 为上下柱的总高度; d_b 为梁截面高度; L_b 为左右梁的总长度; j 为内力矩系数,通常取 0.875。

2.3 RC 框架结构塑性铰数值模型的试验验证

为验证上述集中塑性铰模型建模方法的准确性与合理性,以清华大学完成的缩尺比例为 1:2 的 3 层 RC 整体框架拟静力倒塌试验^[24]为参照,根据物理试验中的构件尺寸、配筋信息及材料的力学性能等参数,按照前述建模方法,确定各梁柱单元的集中塑性铰模型和节点域剪切模型,按图 3 建立该试验模型的集中塑性铰数值模型,并进行模拟加载,得到其模拟滞回曲线,进而与试验结果进行对比,如图 5 所示。

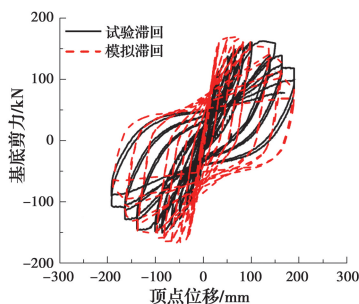


图 5 试验与模拟滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated hysteresis curves

由图 5 可看出,在模拟得到的在滞回曲线下阶段,即结构接近倒塌阶段时,与试验结果的吻合程度较好。模拟滞回曲线也较好地反映了结构近倒塌状态的强度退化特性,表明基于集中塑性铰模型的数值建模方法对 RC 框架结构的倒塌模拟具有良好的适用性,可用于该类结构的抗倒塌性能分析。

3 RC 框架结构倒塌易损性分析

3.1 倒塌点定义与 IDA 曲线

采用前述数值建模方法,分别建立 66 个典型结构的集中塑性铰模型,并以 ATC-63^[13]中推荐的 22 条远场地震动作为输入地震动记录,分别对各典型结构进行 IDA 分析,直至引起结构倒塌。其中,每次 IDA 分析实际上是一次一致激励(uniform excitation)模式下的动力时程分析。

地震荷载作用下,RC 框架结构的倒塌行为本质上是一种动力失稳问题,即在微小的地震强度增量下,结构的动力响应将急剧增大。基于此,将地震动强度的微小增量,即引发结构动力响应发生显著变化的动力失稳点定义为结构的倒塌点^[18],其在 IDA 曲线上表现为曲线变平的拐点。IDA 分析过程中,为了准确捕捉结构的倒塌特征点,并减少地震动调幅次数,借鉴 Vamvatsikos 等^[25]提出的 hunt & fill 算法对输入地震动强度进行调幅。既有研究结果表明^[16],采用结构一阶周期谱加速度 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标,可有效降低易损性分析中的不确定性,且考虑到最大层间位移角响应 θ_{max} 与 RC 框架结构的震损破坏程度具有显著的相关性,因此,采用一阶周期谱加速度 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标,采用最大层间位移角响应 θ_{max} 作为工程需求参数,绘制各典型结构的 IDA 曲线。以 5 层、6 m 跨度的典型 RC 框架结构 F-5-6m 为例,给出其 6、7、8 度设防设计的典型 RC 框架结构的 IDA 曲线及其倒塌特征点识别结果,如图 6 所示。

由图 6 可看出,最上面一条 IDA 曲线的数值明显高于其他曲线,其原因为:以图 6(c)为例,IDA 分析时,首先需要对所选地震波进行调幅,使其在结构自振周期 $T_1 = 0.875$ 时的 $S_a(T_1)$ 相等,以 $S_a(T_1) = 2.0g$ 为例,给出调幅后输入的地震动谱加速度曲线,如图 7 所示,图中各曲线与 Y 轴的交点为输入地震动的峰值加速度 PGA。由图 7 可知,相同的 $S_a(T_1)$ 下,存在一条地震动记录的 PGA 明显小于其他地震动记录的 PGA,因此,对于该地震动记录,需要调幅

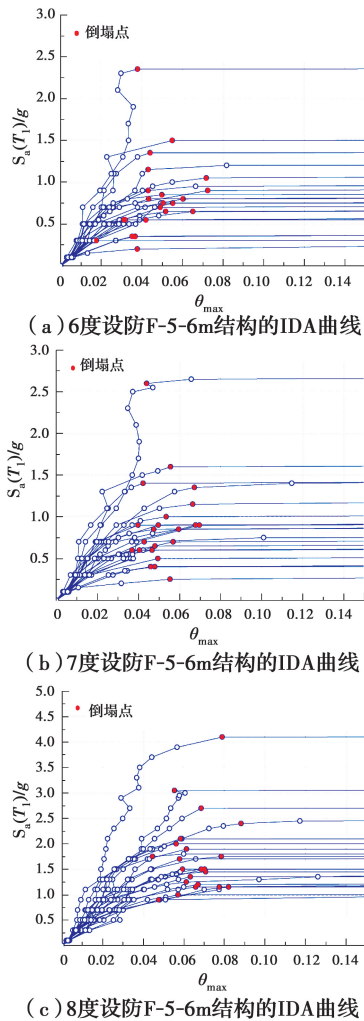


图 6 F-5-6m RC 框架结构的 IDA 曲线

Fig. 6 IDA curves of F-5-6m RC frame structures

到更大的 $S_a(T_1)$, 才能使结构发生倒塌破坏, 这是图 6(c) 中最上面一条 IDA 曲线的数值明显高于其他曲线的主要原因。该曲线对应的输入地震动记录也是结构可能遭遇的地震动, 因此, 在后续的概率分析中应该包含这一结果, 以反映频谱特性差异性对结构抗倒塌能力的影响。

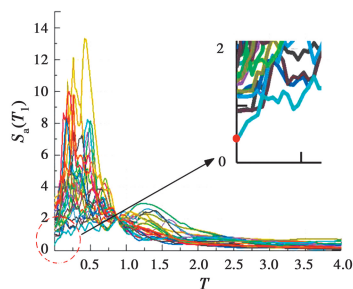


图 7 调幅后的地震动谱加速度曲线

Fig. 7 Seismic spectrum acceleration curve after amplitude modulation

3.2 倒塌储备系数 CMR 及相关性分析

图 6 中各倒塌特征点的纵坐标实际上反映了结构的抗倒塌能力。由于地震动力学特性的差异, 结构的抗倒塌能力具有明显的不确定性, 为合理量化结构的抗倒塌能力, FEMA P695^[1] 建议采用倒塌储备系数 CMR 表征结构的抗倒塌能力。CMR 反映了结构实际抗倒塌能力与设防需求间的量化关系, 其值越大, 表明结构的抗倒塌储备越高, 即结构的抗倒塌能力越强。当以一阶周期谱加速度作为地震强度指标时, 倒塌储备系数 CMR 可按式(7)计算。

$$CMR = \frac{S_a(T_1)_{50\%}}{S_a(T_1)_{大震}} \quad (7)$$

式中: $S_a(T_1)_{50\%}$ 为有 50% 地震波输入结构模型使其发生倒塌时对应的地震动强度; $S_a(T_1)_{大震}$ 为规范建议的罕遇地震下的地震动强度, 可按式(8)计算。

$$S_a(T_1)_{大震} = a(T_1)_{大震} g \quad (8)$$

式中: $a(T_1)_{大震}$ 为结构基本周期为 T_1 时所对应的罕遇地震下的水平地震影响系数, 可按中国现行抗震设计规范所述方法计算确定; g 为重力加速度。

根据式(7)~式(8)以及各典型结构的 IDA 曲线, 计算得到 66 个典型 RC 框架结构的倒塌储备系数 CMR, 并以此作为 RC 框架结构倒塌储备系数的样本, 对其进行统计分析。结果表明, 所有典型 RC 框架结构的 CMR 均在 1.82~7.09 范围内, 其均值和中位数分别为 3.37 和 3.16, 置信度为 95% 的置信区间为 [3.09, 3.65]。根据 66 个典型结构的倒塌储备系数 CMR 的分析结果, 给出其频数分布和累计概率分布结果, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 当采用对数正态分布函数对典型 RC 框架结构的倒塌储备系数 CMR 进行参数拟合时, 其拟合优度 R^2 大于 0.94, 表明按中国现行规范设计的 RC 框架的倒塌储备系数概率分布基本服从对数正态分布, 同时, 根据统计分析结果, 求出典型 RC 框架结构倒塌储备系数 CMR 概率分布的中位值及对数标准差分别为 3.188 和 0.332, 16% 及 84% 分位点为 2.283 和 4.452。该结果符合中国 RC 框架结构抗倒塌能力储备情况, 可作为初步评估符合中国现行规范的 RC 框架结构抗地震倒塌能力的依据。

对各典型结构的倒塌储备系数 CMR 进行统计分析, 得到其与结构设计参数的相关性矩阵, 如表 2 所示。由表 2 可以看出, CMR 和设防烈度间的相关系数为 -0.308, 与层数间的相关系数为 -0.373, 即

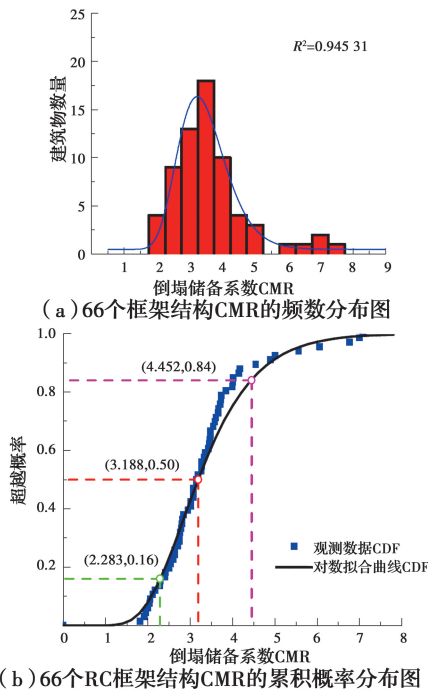


图 8 66 个 RC 框架结构 CMR 的频数及累积概率分布图
 Fig. 8 Frequency and cumulative probability distribution chart of 66 RC frame structures' CMR

随着设防烈度和层数的增大,CMR 呈下降趋势;而 CMR 和跨度的相关性较弱,但两者仍是负相关,即 CMR 随着跨度的增大而减小。

表 2 CMR 与结构设计参数间相关性系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix between CMR and structural design parameter

	层数	跨度	$S_a(T_1)$ 小震	设防烈度	CMR
层数	1.000				
跨度	0.000	1.000			
$S_a(T_1)$ 小震	-0.344	-0.006	1.000		
设防烈度	-0.168	0.000	0.960	1.000	
CMR	-0.373	-0.159	-0.185	-0.308	1.000

表 2 中的相关性分析总体上反映了 RC 框架结构的倒塌储备系数 CMR 随设防烈度、跨度以及层数的变化关系。然而,由于设防烈度、跨度和层数的不同,其 CMR 变化关系还具有一定的差异性。

不同层数、相同跨度 RC 框架结构的 CMR 随设防烈度的变化关系如图 9 所示。由图 9 可以看出,对于跨度为 4 m 的 RC 框架结构,2 层和 5 层结构的 CMR 在 8 度设防时最小,8 层与 10 层结构的 CMR 在 7 度设防时最小;对于跨度为 6 m 的 RC 框架结构,各层数结构的 CMR 均在 7.5 度设防时最小;对于跨度为 8 m 的 RC 框架结构,2 层和 5 层结构的

CMR 在 8 度设防时达到最小,8 层和 10 层结构的 CMR 在 7.5 度设防达到最小;将不同跨度下结构的 CMR 取平均值,可以发现各层数结构的 CMR 平均值在 7.5 度设防时达到最小值,即依据中国现行规范设计的 7.5 度设防 RC 框架结构的抗倒塌能力最弱。

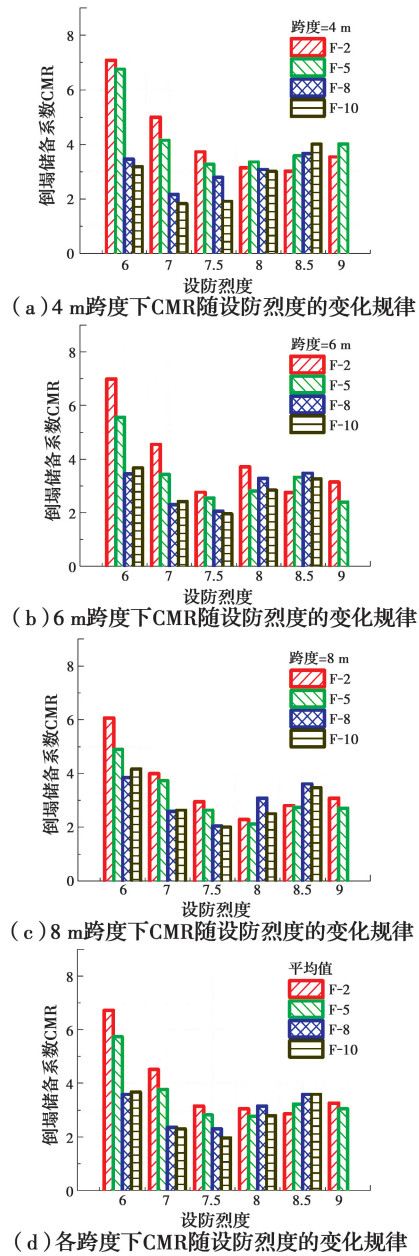


图 9 同一跨度下 CMR 随设防烈度的变化规律
 Fig. 9 Variation law of CMR under the same span with the change of fortification intensity

不同跨度、相同设防烈度 RC 框架结构的 CMR 随层数的变化关系如图 10 所示。由图 10 可以看出,当设防烈度小于 7.5 度时,RC 框架结构的 CMR 值随层数增大不断降低,且其下降速率随着设防烈度的提高不断减缓;当结构的设防烈度达到 8 度时,

其 CMR 开始随层数增大而趋于稳定,其值约为 3; 设防烈度达到 8.5 度时,RC 框架结构的 CMR 随着层数的增大而略有提升,其值在 3~4 的区间内变

化;设防烈度为 9 度时,CMR 随层数增加而保持恒定,其值约为 3。

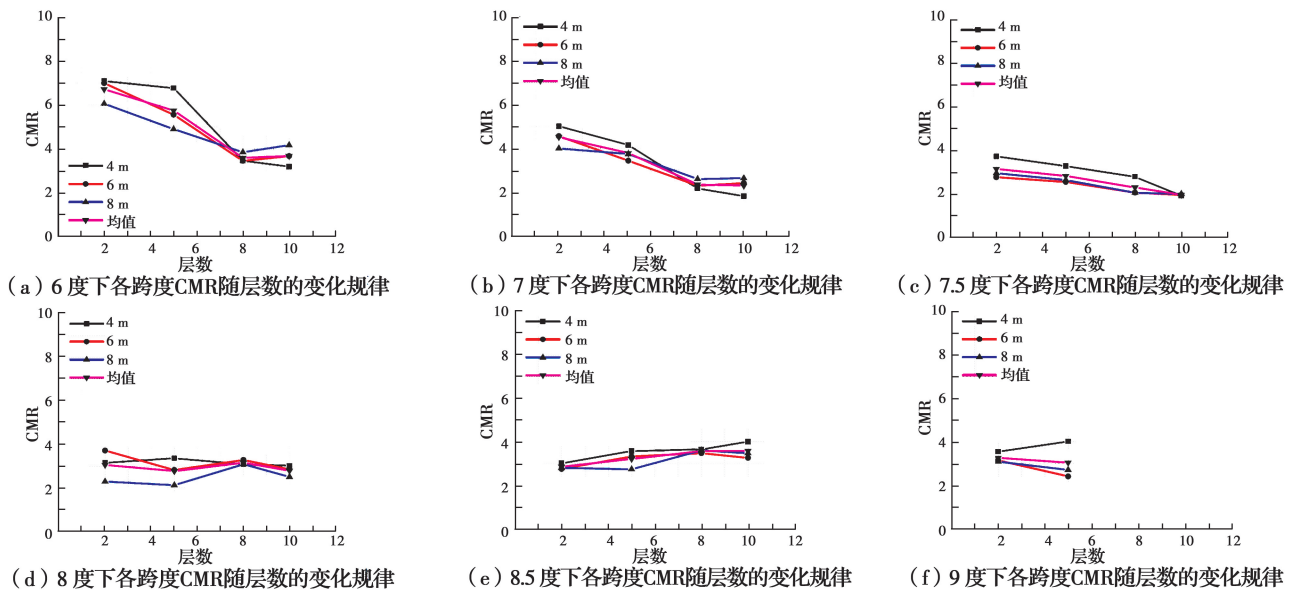


图 10 同一烈度下各跨度 CMR 随层数的变化规律

Fig. 10 CMR's variation law with the change of story number under the same intensity

产生该现象的原因为^[18]:设防烈度较低的 RC 框架结构设计水平地震力相对较小,对于层数较少的结构,其配筋一般为构造配筋,因而结构实际抗震性能相对理论计算值具有较大富余,但层数较多的结构,其配筋几乎取决于理论计算结果,因此,低设防烈度下 RC 框架结构的 CMR 随着层数的增加不断减小,抗倒塌能力不断降低。当设防烈度增大时,不同层数 RC 框架结构的配筋均由设计水平地震力控制,其抗倒塌能力的冗余性相当,因此,随着层数的增多,结构的 CMR 系数基本不变且略有增大,说明所设计的典型结构具有较一致的地震倒塌风险。

3.3 倒塌易损性分析

倒塌易损性描述了给定地震强度下结构的倒塌概率,由于结构的倒塌行为本质上是一种动力失稳问题,因此,通常采用基于强度易损性的函数形式构建结构的倒塌易损性模型,具体做法为^[26]:根据图 6 分析得到的结构倒塌点,采用式(9)所示的频数统计方法,获取结构在不同强度地震作用下的倒塌概率,进而采用式(10)对获取的倒塌概率进行参数拟合,得到连续的倒塌易损性曲线,其分析示意如图 11 所示。

$$P[C | IM = im] = \frac{N_C}{N_{RTR}} \quad (9)$$

$$P[C | IM = im] = \Phi \left[\frac{\ln(im/m_R)}{\beta_R} \right] \quad (10)$$

式中: N_C 为 N_R 条地震记录中使结构倒塌的地震

记录数量; m_R 为结构抗倒塌能力的中位值; β_R 为结构抗倒塌能力对数标准差,当仅考虑地震动的 RTR 不确定性时, $\beta_R = \beta_{RTR}$; Φ 为标准正态概率分布函数。然而,基于集中塑性铰模型对 RC 框架结构进行倒塌易损性分析时,还应考虑建模不确定性对 β_R 的影响。Haselton^[14]通过分析集中塑性铰模型中对倒塌预测有影响的各个参数,给出建模不确定性参数 β_M ,建议取值为 0.5。

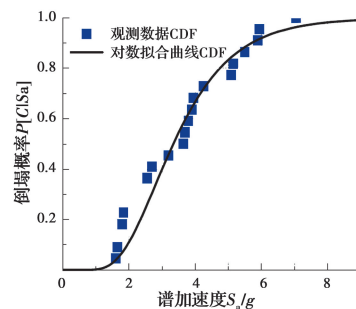


图 11 倒塌易损性曲线的拟合

Fig. 11 Fitting of collapse vulnerability curve

鉴于建模不确定性对结构抗倒塌能力的中位值并无影响,根据式(10)拟合得到各典型 RC 框架结构抗倒塌能力的中位值 m_R 和仅考虑地震动 RTR 不确定性的 β_{RTR} 后,进一步取 β_M 为 0.5,按式(11)计算得到其相应的抗倒塌能力对数标准差 β_R ,并带入式(10),得到各典型 RC 框架结构的倒塌易损性曲

线,其横坐标归一化处理,即除以相应大震下的谱加速度 $S_a(T_1)_{大震}$ 后的结果见图 12。

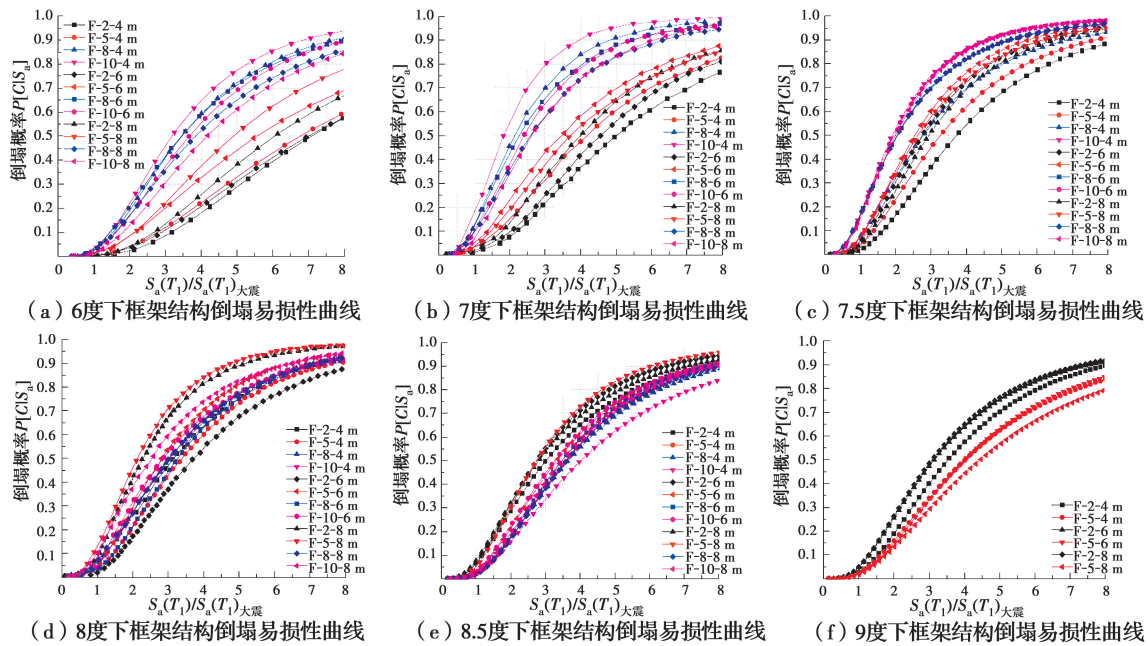


图 12 同一设防烈度不同跨度与层数 RC 框架结构倒塌易损性曲线

Fig. 12 RC frame structure's collapse fragility curves under the different span and story number and the same fortification intensity

$$\beta_R = \sqrt{\beta_{RTR} + \beta_M} \quad (11)$$

式中: β_{RTR} 值为各结构抗倒塌能力的对数标准差。

3.3.1 大震下结构倒塌概率分析 依据上述倒塌易损性分析结果,计算得到各典型 RC 框架结构在大震下的倒塌概率结果,见表 3,并作出大震倒塌概率的频数及累积概率分布图,如图 13 所示。由表 3 和图 13 可以看出,按中国现行规范设计的典型 RC 框架结构在大震作用下的倒塌概率分布于 [0.1%, 16.7%] 区间内,其中,84.8% 的结构倒塌概率小于 10%,15.2% 的结构倒塌概率在 10%~16.7% 范围内。设防烈度为 7.5 度和 8 度的 8 层、10 层结构是

倒塌概率在 10% 以上的 RC 框架结构的主要群体。相应层数和设防烈度的各跨度典型结构的大震倒塌率平均值列于表 3。由表 3 可以看出, F-8-7 度、F-10-7 度的倒塌概率较一致,约为 10%,而 F-8-7.5 度、F-10-7.5 度的倒塌概率超过了 10%,其余结构的倒塌概率在 8% 以下。ATC-63 报告^[13] 建议以设防大震下结构倒塌概率不超过 10% 作为结构达到大震不倒性能要求的标准,由此可以说明,依据中国现行规范设计的 RC 框架结构具有 91% 的可靠度,满足大震不倒的设防目标。

3.3.2 特大震下结构倒塌概率分析 建筑结构在

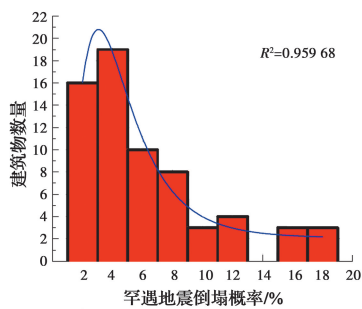
表 3 各跨度 RC 框架的倒塌概率

Table 3 Collapse probability of RC frame of each span

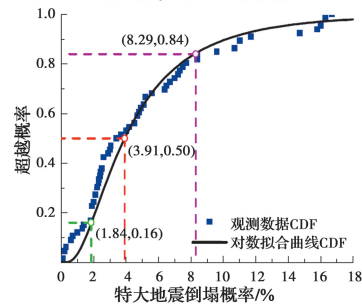
跨度	层数	大震下各结构的倒塌概率/%							特大震下各结构的倒塌概率/%				
		6度	7度	7.5度	8度	8.5度	9度	6度	7度	7.5度	8度	8.5度	9度
4 m	2	0.1	0.6	1.9	4.7	6.4	2.6	2.2	7.7	16.3	25.4	28.6	19
	5	0.3	2.1	3.7	2.9	2	2.4	3.8	14.9	22.9	21	17.3	16
	8	2.32	11	7.3	4.2	2.2		18.94	45	31.9	25.3	17.4	
	10	2.6	15.8	16.7	5.2	2.3		21.8	56.3	52.7	27.3	15.8	
6 m	2	0.2	0.7	5.2	2.2	6.5	4.7	3.4	9	30.3	17.2	31.7	25.5
	5	1	4.5	7	5.6	3	1.9	8.1	23	35.1	30	21.3	14.9
	8	3.06	11	16.3	2.6	2.1		20.5	42	48.5	21	18.3	
	10	1.9	8.4	16	7.5	3.4		16.5	38.5	51.5	31.4	22.4	

续表 3

跨度	层数	大震下各结构的倒塌概率/%						特大地震下各结构的倒塌概率/%					
		6度	7度	7.5度	8度	8.5度	9度	6度	7度	7.5度	8度	8.5度	9度
8 m	2	0.2	1.4	4	9.6	7.7	4.9	4	13.5	26.5	41.8	32	26.3
	5	0.6	3.4	7.2	11.7	5.1	1.8	8	19.3	33.9	46.4	30.5	13.2
	8	2.43	8.4	16.3	4.8	1.9		16.9	35.3	48.9	26.2	16.9	
	10	1.3	6.7	14.7	10.7	2.5		12.7	33.5	50.1	38.1	19.1	
3 种跨度的均值	2	0.2	0.9	3.7	5.5	6.9	4.1	4	13.5	26.5	41.8	32	26.3
	5	0.6	3.3	6.0	6.7	3.4	2.0	8	19.3	33.9	46.4	30.5	13.2
	8	2.6	10.1	13.3	3.9	2.1		16.9	35.3	48.9	26.2	16.9	
	10	1.9	10.3	15.8	7.8	2.7		12.7	33.5	50.1	38.1	19.1	



(a) RC 框架结构倒塌概率频数分布图



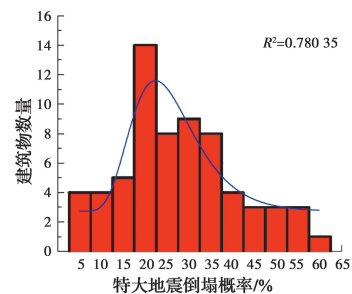
(b) RC 框架结构倒塌累积概率分布图

图 13 各 RC 框架结构倒塌概率频数及累积概率分布图

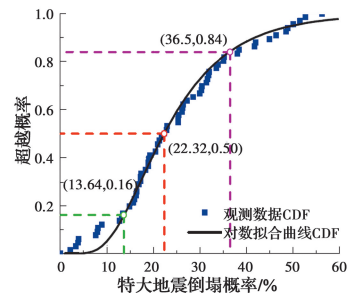
Fig. 13 Collapse frequency and cumulative probability distribution chart of each RC frame structure

服役年限内可能遭遇超越罕遇地震烈度水平的特大地震,从而带来巨大的经济损失和人员伤亡,如 2008 年汶川地震中,震中大范围区域遭遇了大于设防烈度标准的特大地震,因此,汶川地震后,中国部分学者提出^[27]应该总结和反思上述地震灾害的经验和教训,在中国的建筑防震设防体系中考虑特大地震的影响。

为明确按中国规范设计的 RC 框架结构在特大地震作用下的抗倒塌性能,参考文献[28],取特大地震的地震强度 $S_a(T_1)_{特大地震} = 2S_a(T_1)_{大震}$,计算各典型 RC 框架结构在特大地震作用下的倒塌概率,见表 3,并以此为统计分析对象,作出其特大地震倒塌概率的频数分布及累积概率分布图,如图 14 所示。



(a) 特大地震下 RC 框架结构倒塌概率的频数分布图



(b) 特大地震下 RC 框架结构倒塌累积概率分布图

图 14 特大地震下 RC 框架结构倒塌概率的频数及累积概率分布图

Fig. 14 Collapse frequency and cumulative probability distribution chart of RC frame structure under severe earthquake

由表 3 和图 14 可以看出:在特大地震作用下,设计的 66 个典型 RC 框架结构中约 87.9%倒塌概率在 10%以上,约 12.1%倒塌概率在 10%以下,其倒塌概率的均值为 25.16%,表明依据中国规范设计的 RC 框架结构抵抗特大地震的能力明显不足。文献[16]对汶川地震中极震区 RC 框架结构的破坏情况进行了统计分析,给出了 11 度下 RC 框架的倒塌比例为 23%,验证了对 RC 框架结构在特大地震下倒塌概率的计算结果基本准确。

4 结论

基于 IDA 分析方法,对 66 个符合中国现行设计规范的典型 RC 框架结构进行抗地震倒塌性能分

析,并剖析该类结构抗倒塌能力的概率分布,得到以下主要结论:

1)符合中国现行设计规范的RC框架结构倒塌储备系数CMR的分布范围为[1.82,7.09],且其与结构跨度的相关性较弱,而与层数和设防烈度均为明显的负相关关系。

2)不同设防烈度下,RC框架结构的CMR平均值在7.5度设防时达最小值,表明依据中国现行规范设计的7.5度设防RC框架结构的抗倒塌能力最弱。

3)在大震作用下,符合中国现行规范的RC框架结构倒塌概率不超过10%的约有85%,而在特大地震作用下,倒塌概率不超过10%的结构仅占12.1%,表明按照现行规范设计的RC框架结构基本满足大震不倒的设防目标,但抵御特大地震作用的能力明显不足。

此外,需指出的是,所设计的典型结构场地类型为II类,设计地震分组为第二组,其研究成果仅反映该场地条件下结构的抗倒塌性能。对于其他场地条件,应该设计相应的典型结构分别进行分析。

参考文献:

- [1] Quantification of building seismic performance factors: FEMA P-695 [S]. Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., 2009.
- [2] ELSHAER A, MOSTAFA H, SALEM H. Progressive collapse assessment of multistory reinforced concrete structures subjected to seismic actions [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(1): 184-194.
- [3] 钱凯, 罗达, 贺盛, 等. 钢筋混凝土框架结构底部相邻两柱失效的抗连续倒塌性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1): 61-68.
QIAN K, LUO D, HE S, et al. Progressive collapse performance of reinforced concrete frame structures subjected to ground two-column removal scenario [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 61-68. (in Chinese)
- [4] HUANG T C, REN X D, LI J. Incremental dynamic analysis of seismic collapse of super-tall building structures [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(16): e1370.
- [5] LU X Z, LIN K Q, LI Y, et al. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario [J]. Engineering Structures, 2017, 149: 91-103.
- [6] 苏侏智, 刘伯权, 马煜东, 等. 设计参数对RC框架结构抗倒塌性能的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 84-98.
SU J Z, LIU B Q, MA Y D, et al. Influence of design parameters on seismic collapse resistant performance of RC frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 84-98. (in Chinese)
- [7] 罗开海, 保海娥, 左琼. 建筑地震倒塌风险分析及设计对策研究(I)——不同设防烈度RC框架结构抗震设计与控制因素分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 128-136.
LUO K H, BAO H E, ZUO Q. Analysis of the risk of building earthquake collapse and research on design countermeasures (I): Seismic design of RC frame structure with different intensity and analysis of seismic design control factors [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(11): 128-136. (in Chinese)
- [8] 罗开海, 保海娥, 左琼. 建筑地震倒塌风险分析及设计对策研究(II)——不同设防烈度RC框架结构的地震倒塌风险统计与分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 137-144.
LUO K H, BAO H E, ZUO Q. Analysis of the risk of building earthquake collapse and research on design countermeasures (II): Seismic design of RC frame structure with different intensity and analysis of seismic design control factors [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(11): 137-144. (in Chinese)
- [9] 罗开海, 保海娥, 左琼. 建筑地震倒塌风险分析及设计对策研究(III)——基于统一倒塌风险的建筑抗震设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(2): 13-20.
LUO K H, BAO H E, ZUO Q. Analysis of the risk of building earthquake collapse and research on design countermeasures (III): Seismic design of RC frame structure with different intensity and analysis of seismic design control factors [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(2): 13-20. (in Chinese)
- [10] 邓颖婷. 地震作用下钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌数值模拟分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
DENG Y T. Numerical analysis of collapse-resistant performance of RC frames under earthquake [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [11] 范萍萍, 陆新征, 叶列平. 7度区RC框架抗地震倒塌能力与加强措施研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(11): 1-7.
FAN P P, LU X Z, YE L P. Study on the collapse-resistant capacity and its strengthen method of RC

- frames in zones with seismic intensity VII [J]. *Building Science*, 2018, 34(11): 1-7. (in Chinese)
- [12] 周洲, 吕大刚, 于晓辉. 基于文献调研的中国建筑结构地震倒塌风险概率评估[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(8): 1-18.
ZHOU Z, LU D G, YU X H. Probabilistic assessment of seismic collapse risk for building structures in China based on literature investigation [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(8): 1-18. (in Chinese)
- [13] ATC-63. Quantification of building seismic performance factors [R]. Washington DC, 2009.
- [14] HASELTON C B. Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment frame buildings [D]. Stanford University, 2006.
- [15] PITILAKIS K, CROWLEY H, KAYNIA A M. SYNER-G; Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [16] 清华大学. 汶川地震建筑震害分析及设计对策[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Tsinghua University. Structural damage analysis in Wenchuan earthquake and design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [17] JIANG H J, LU X L, CHEN L Z. Seismic fragility assessment of RC moment-resisting frames designed according to the current Chinese seismic design code [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2012, 11(1): 153-160.
- [18] 杨威. RC 框架结构地震易损性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
YANG W. Study on the seismic fragility of RC frame structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)
- [19] ZAREIAN F, MEDINA R A. A practical method for proper modeling of structural damping in inelastic plane structural systems [J]. *Computers & Structures*, 2010, 88(1/2): 45-53.
- [20] LIGNOS D G, KRAWINKLER H. Development and utilization of structural component databases for performance-based earthquake engineering [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(8): 1382-1394.
- [21] HASELTON C B, LIEL A B, LANGE S T, et al. Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to global collapse of RC frame buildings [R]. Peer 03/2007, 03(2008).
- [22] ALTOONTASH A. Simulaiton and damage models for performance assesment of reinforced concrete beam-column joints [D]. Stanford University, 2004.
- [23] TERAOKA M, FUJII S. Seismic damage and performance evaluation of R/C beam-column joints [C]//The Second US-Japan Workshop on Performance-Based Engineering for Reinforced Concrete Buliding Structures, Hokkaido, Japan, 2000: 379-390.
- [24] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 I: 框架试验[J]. *建筑结构*, 2012, 42(11): 19-22, 26.
LU X Z, YE L P, PAN P, et al. Pseudo-static collapse experiments and numerical prediction competition of RC frame structure I; RC frame experiment [J]. *Building Structure*, 2012, 42(11): 19-22, 26. (in Chinese)
- [25] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 491-514.
- [26] 于晓辉, 吕大刚. 考虑结构不确定性的地震倒塌易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(10): 8-14.
YU X H, LÜ D G. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(10): 8-14. (in Chinese)
- [27] 吕大刚, 周洲, 王丛, 等. 考虑巨震的四级地震设防水平一致风险导向定义与决策分析[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(11): 41-52.
LU D G, ZHOU Z, WANG C, et al. Uniform risk-targeted definitions and decision-making of four seismic design levels considering very rare earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(11): 41-52. (in Chinese)
- [28] 陆新征, 施炜, 张万开, 等. 三维地震动输入对 IDA 倒塌易损性分析的影响[J]. *工程抗震与加固改造*, 2011, 33(6): 1-7.
LU X Z, SHI W, ZHANG W K, et al. Influence of three-dimensional ground motion input on IDA-based collapse fragility analysis [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2011, 33(6): 1-7. (in Chinese)