

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.03.008

基于改进 IMK 恢复力模型的填充墙 RC 框架结构地震易损性分析

张永兵,周明军,郑 磊

(广西大学 a.土木建筑工程学院;b.工程防灾与结构安全教育部重点实验室;
c.广西防灾减灾与工程安全重点实验室,南宁 530004)

摘要:为了对填充墙 RC 框架结构在设防大震下的抗震能力进行评估,采用 OpenSees 有限元软件,建立了填充墙 RC 框架结构的数值模型,其中,梁柱构件采用基于改进 IMK 恢复力模型的集中塑性铰单元进行建模,填充墙用双对角斜撑受压杆模拟,并采用基于 Clough 模型的桁架单元建模。以填充墙的不同布置方式作为参数,设计了 4 种模型,对模型进行了 44 条地震波下的增量动力时程分析和倒塌易损性分析。结果表明,底层不布置填充墙的模型和底部两层各有一跨布置填充墙的模型不满足我国规范中“大震不倒”的性能要求,在实际工程中应尽量避免运用此类型的框架结构,需要对已有的此类结构进行加固处理。

关键词:改进 Modified Ibarra-Medina-Krawinkler 模型;填充墙钢筋混凝土框架结构;增量动力分析;易损性分析

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)03-067-09

Seismic fragility analysis of infilled reinforced concrete frame building based on Modified Ibarra-Medina-Krawinkler model

ZHANG Yongbing, ZHOU Mingjun, ZHENG Lei

(a. College of Civil and Architectural Engineering; b. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education; c. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P.R. China)

Abstract: In order to evaluate the seismic performance of infilled reinforced concrete frame building in strong earthquakes, numerical models are established in OpenSees. The column or beam components are simulated by concentrated plastic hinge element based on the modified Ibarra-Medina-Krawinkler model while the infills are simulated by a pair of compression-only struts based on the Clough model. With the

收稿日期:2017-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51568005);广西自然科学基金资助项目(2013GXNSFBA019236);广西科技攻关计划(桂科攻 12426001-5);“广西工程防灾与结构安全重点实验室”和“防灾减灾与工程安全教育部重点实验室”项目(2013ZDX10);2017 年广西大学实验室建设和实验教学改革项目。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51568005), Guangxi Natural Science Foundation Project(2013GXNSFBA019236), Guangxi Science and Technology Key Project(12426001-5), Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education(2013ZDX10) and Laboratory Construction and Teaching Reform Project of Guangxi University in 2017.

作者简介:张永兵(1979—),男,广西大学副研究员,博士,主要从事结构地震易损性分析研究,
(E-mail)zhangyongbing@foxmail.com。

different arrangements of the infills, four frame models are designed, the incremental dynamic analysis of 44 seismic records and the fragility analysis are carried out. The analysis shows that the first model and the fourth model cannot satisfied the seismic performance requirements of national codes in frame building subjected to strong earthquakes, this type of frame buildings should be avoided or reinforced.

Keywords: Modified Ibarra-Medina-Krawinkler model; Infilled reinforced concrete frame building; Incremental dynamic analysis; Fragility analysis

地震易损性分析可以预测结构在不同等级地震作用下发生各级破坏的概率,因此,对结构的抗震设计、加固和维修决策具有重要的价值。当前,地震易损性分析在全世界得到了广泛的研究,特别是近年来,以控制地震损失和地震风险为目标的新一代基于性能的地震工程(Performance-based earthquake engineering, PBEE)正成为国际地震工程领域的研究热点。与基于性能的地震工程(PBEE)相对应,中国设计规范中“两阶段设计方法”、“三水准设防目标”的理论以及规定的具体措施等也都与基于性能的地震工程的设计理念基本一致^[1]。但是,现行抗震规范对结构在大震中的抗倒塌定量设计方法和定量评价指标体系尚缺乏明确规定^[2]。

随着中国城市化进程的加快,大量的钢筋混凝土 RC 框架结构运用于建筑工程,主要有临街商铺框架结构,底部为大空间、上部为住宅的框架结构等。汶川地震中框架结构所表现出的抗倒塌性能不甚理想^[3-4],出现了大量的“短柱破坏”、“薄弱层破坏”和“强梁弱柱破坏”,表明填充墙不仅会对框架结构的刚度产生影响,还会改变框架结构的承载力性能,对框架结构的抗震研究,有必要进一步考虑填充墙的影响因素^[5]。

设计了一种 6 层 3 跨的钢筋混凝土框架结构,结合实际情况设计了填充墙的 4 种布置方式和与之对应的 4 种模型工况,基于动力增量时程分析(IDA)理论和地震易损性分析理论,定量分析结构在各模型工况下的抗地震倒塌能力。

1 恢复力模型

1.1 改进 IMK 模型

Ibarra 等^[6]提出了 IMK(ibarra-medina-krawinkler)恢复力模型理论。IMK 模型的骨架曲线为三线形,由弹性段、强化段及软化段构成,能够模拟 RC 梁柱的强度、刚度退化现象,模型主要由 5 个参数来控制结构或构件的单调行为和循环行为(各参数见图 1),分别为屈服弯矩 M_y 、初始刚度 K_e 、峰值弯矩 M_c 、屈服到峰值段塑性转角 θ_p 或硬化段刚度 K_s 、软化段转角 θ_{pc} 或软化段刚度 K_c ,其中, $K_s = \alpha_s K_e$ (α_s 为强化刚度系数), $K_c = \alpha_c K_e$ (α_c 为软化刚度系数)。

在定义恢复力模型骨架曲线时,IMK 恢复力模型需先定义弹性刚度 K_e ,再由强化刚度系数 α_s 和软化刚度系数 α_c 确定硬化段及软化段的位置。相对于 IMK 模型所用参数,Lignos 等^[7]通过实验发现,采用 θ_p ($\theta_p = \theta_{cap} - \theta_y$) 作为反映机构塑性变形能力的指标较采用 δ_c / δ_y 更精确,采用比值 M_c / M_y 作为强化指标较采用 α_s 的随机性更小,采用 θ_{pc} 作为软化指标较采用的离散性更小,Lignos 等在 IMK 模型和试验结论的基础上提出了改进 IMK 恢复力模型理论(如图 1 所示),由该模型确定的骨架曲线误差小且更加精确稳定。

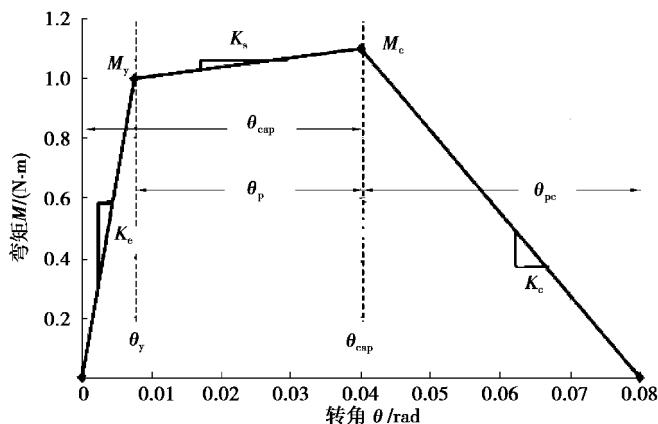


图 1 改进 IMK 模型骨架曲线

Fig.1 Backbone curve of the modified Ibarra-Medina-Krawinkler model

在滞回耗能方面,IMK 恢复力模型采用屈服转角 θ_y 与屈服弯矩 M_y 的乘积 ($E_i = \gamma M_y \theta_y$) 表示滞回耗能,而改进 IMK 模型对其进行了修改,采用了屈服点至峰值点区段对应的塑性转角 θ_p 与屈服弯矩 M_y 的乘积 ($E_i = \lambda M_y \theta_p$) 表示滞回耗能。在计算各退化系数 β_i 时,改进 IMK 模型在公式中引进了一个无量纲系数 $D (D \leq 1)$,以此来考虑正负方向加载时退化速率不对称的问题。

$$\beta_i \left(\frac{E_i}{E_i - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^c \xrightarrow{E_y = \gamma M_y \theta_y} \beta_i \left(\frac{E_i}{E_i - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^c D^{+/-} \quad (1)$$

1.2 填充墙模型

填充墙的非线性性能对填充墙 RC 框架结构的抗地震倒塌能力评估至关重要,文中采用双对角斜撑杆模型^[9](仅受压)来模拟填充墙的非线性特性,将每一方向的中心对角斜撑(central compression-only infill strut)和偏对角斜撑(off-diagonal compression-only infill strut)置于梁柱节点之间,以模拟填充墙与框架柱之间的相互作用和填充墙的性能。模型的具体布置方式如图 2 所示。

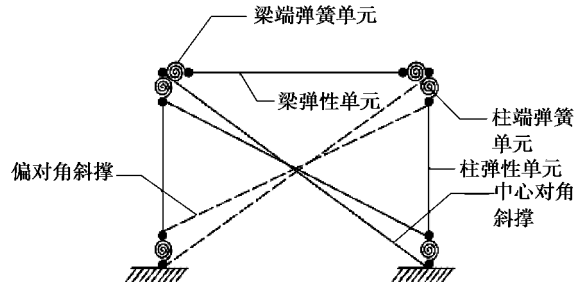


图 2 填充墙 RC 框架模型

Fig.2 The model of RC frame with infills

1.3 模型参数计算公式

通过对 255 个钢筋混凝土柱的分析,Haselton 等对上述恢复力模型中骨架曲线的参数提出了计算公式,屈服弯矩值 M_y 由 Fardis 提出的公式。

$$\theta_p = 0.12(1 + 0.55\alpha_{si}) (0.16)^\nu (0.02 + 40\rho_{sh})^{0.43} (0.54)^{0.01f'_c} (0.66)^{0.1s_n} (2.27)^{10\rho}, \quad (2)$$

$$s_n = \frac{S}{d_b} (f_y/100)^{0.5}, \quad (3)$$

$$\theta_{pc} = (0.76) (0.031)^\nu (0.02 + 40\rho_{sh})^{1.02} \leq 0.10, \quad (4)$$

$$EI_y/EI_g = 0.065 + 1.05\nu, 0.2 \leq EI_y/EI_g \leq 0.6, \quad (5)$$

$$M_c/M_y = (1.25) (0.89)^\nu (0.91)^{0.01f'_c}, \quad (6)$$

式中: θ_p 为屈服点到峰值点塑性转角; S_n 为纵向钢筋屈曲系数; θ_{pc} 为峰值点后软化段塑性转角; EI_y/EI_g 为有效抗弯刚度比,计算构件初始刚度 K_c ; M_c/M_y 为峰值弯矩与屈服弯矩的比值; α_{si} 为纵向钢筋滑移系数(考虑取 1,不考虑取 0); f'_c 为混凝土抗压强度, N/mm^2 ; ν 为构件的轴压比; ρ_{sh} 为构件箍筋配筋率; ρ 为纵向钢筋配筋率; S 为箍筋间距; d_b 为梁柱截面有效高度, mm ; f_y 为纵向钢筋屈服强度, N/mm^2 。

2 算例

为了验证改进 IMK 模型对构件和结构模拟的正确性,文中从 PEER^[11] 柱试验数据库中随机选取了 Test18 和 Test26 两根柱子进行模拟,并对文献[12]中三层三跨 RC 框架和文献[13]中框架-填充墙的低周反复加载试验进行数值模拟。模拟基于 OpenSees 有限元软件,建立了 RC 构件、RC 框架和 RC 框架-填充墙结构的数值模型,其中,梁柱单元采用集中塑性单元。集中塑性单元由以下 2 部分构成:1)梁柱中部保持弹性,故梁柱中部采用弹性梁柱单元;2)破坏集中在梁柱的两端,故两端采用基于改进 IMK 恢复力模型的零长度弹簧单元,以模拟构件的非线性行为。填充墙采用双对角斜撑杆模型模拟,填充墙材料选用文献[13]中的混凝土空心砌块,对角斜撑采用基于峰值指向型 Clough 模型的杆件(Truss)单元建模。最后,通过与 RC 构件和整体结构的试验结果分别进行对比,验证所建立的有限元数值模型的精确实用性。模拟结果与试验结果的对比如图 3~图 5 所示。

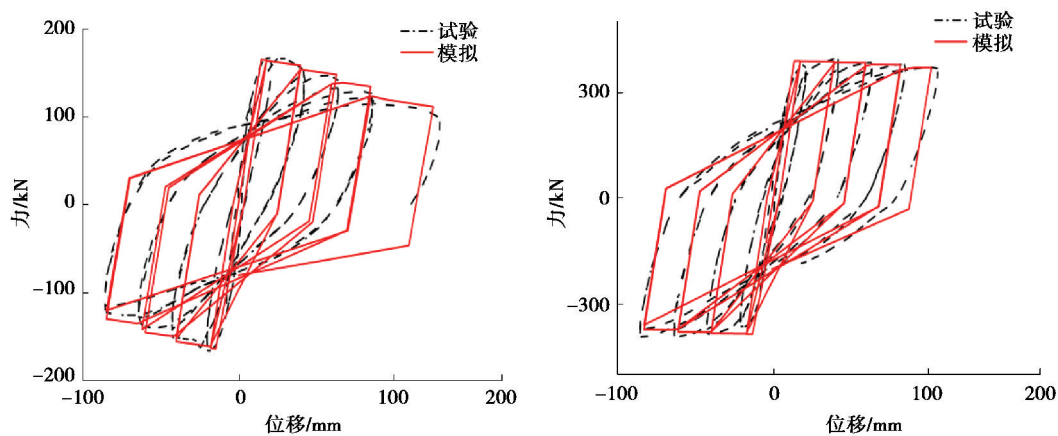


图 3 柱子试验与模拟对比图

Fig.3 Comparison between simulation and experiment for columns

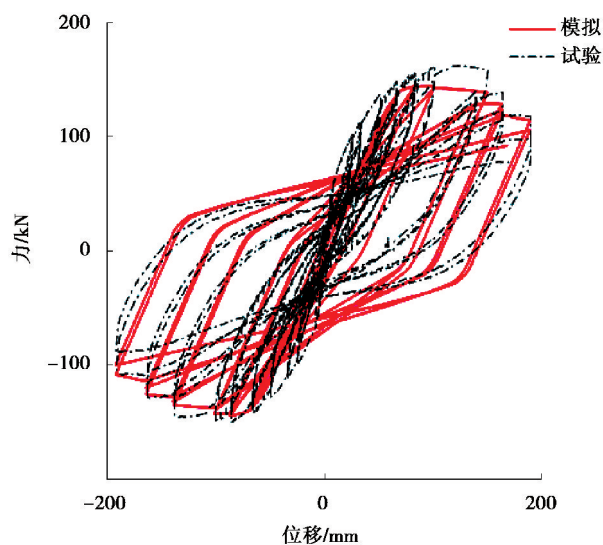


图 4 纯框架试验与模拟对比图

Fig.4 Comparison between simulation and experiment for frame

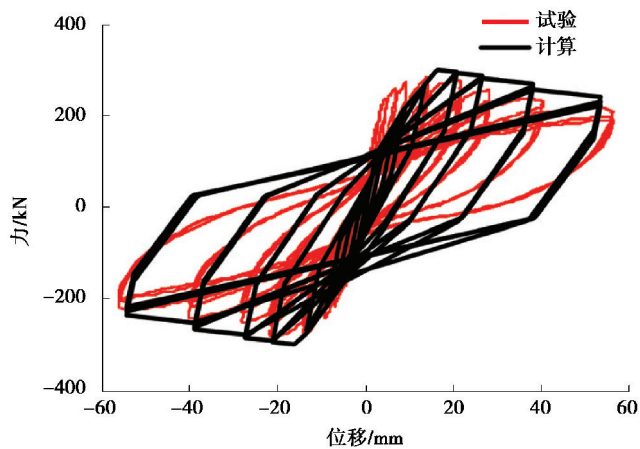


图 5 填充墙框架(AFKJ2)试验与模拟对比图

Fig.5 Comparison between simulation and experiment for AFKJ2

由图 3 可知,构件正向加载时两曲线吻合较好,但负向卸载时模型的刚度比试验稍小,产生此现象的原因可能为模型本身的误差和试验误差:1)改进 IMK 模型为三线型恢复力模型,是理想的线性模型,其本身就存在着与实际不符的误差;2)试验中存在的安装误差、试件与作动器接触不紧密等误差,导致滞回曲线出现不对称现象,没有反映结构的真实性能,而模拟采用的改进 IMK 模型是对称的滞回模型,自然不能精确地与非对称的试验曲线吻合。

由图 4~图 5 可知,在试验初级阶段,模型模拟的初始刚度比实际刚度小,图 5 在负向卸载时的模拟刚度也偏小,产生误差的原因可能有:1)构件的真实刚度值很难确定,建模时选用的 RC 梁柱弹性抗弯刚度值 EI_y 并非精确值,且结构在试验初期并没有发生屈服;2)试验存在的误差使试验结果不够准确,这一点可由图形的对称程度判断得到,改进 IMK 模型是对称的滞回模型,而试验所得曲线不对称,说明有误差存在,具体表现为结构在正向加载下的底部剪力值大于其在负向加载下的值,底部剪力在正向加载下的值比实际偏小,而在负向加载下却与 IMK 模型曲线吻合较好等;3)模拟模型中没有考虑梁柱节点的相互影响;4)改进 IMK 模型本身就存在误差。

分析图 3~图 5 可知,RC 柱、RC 框架、RC 框架-填充墙三模型滞回曲线的走势都与对应的试验曲线基本保持一致,数值模型很好地模拟出了滞回曲线的捏拢效应,对结构非线性行为的模拟较好,对强度、刚度退化行为的模拟也较好,对比结果说明所建数值模型对构件及框架的模拟是精确实用的。

3 结构的抗倒塌能力分析

3.1 结构设计

按照中国规范采用 PKPM 软件设计一种 6 层 3 跨 RC 框架结构,模型拟位于四川省汶川县某地,结构抗震设防烈度为 8 度(0.2 g),地震分组为第二组,场地类别为 II 类,考虑填充墙的影响,周期折减系数取为 0.7。文中对所建模型的第三榀框架进行结构侧向抗倒塌分析,结构平面图、立面图和梁柱尺寸及配筋见图 6(a)~图 6(c),其中柱箍筋为 $\varphi 8@100$,梁箍筋为 $\varphi 8@100/200$,结合实际情况设计了图 6(d)~图 6(g)所示的 4 种模型工况,不同工况下填充墙的布置方式不同。

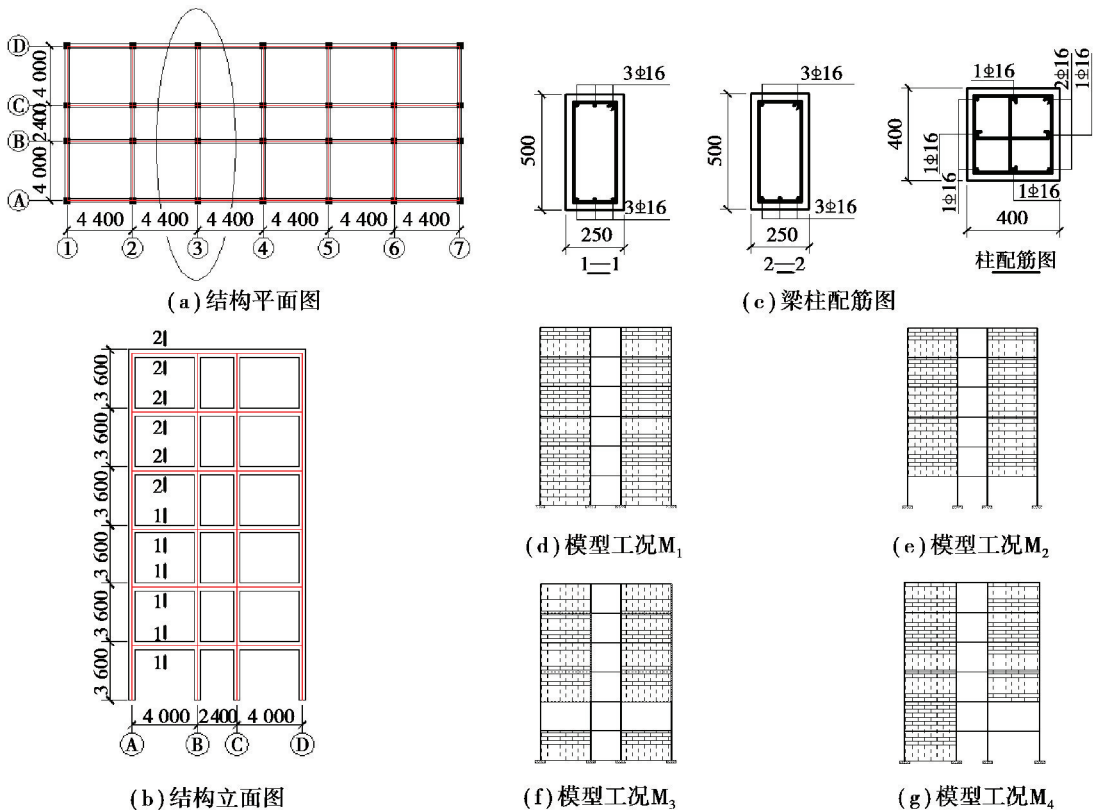


图 6 框架结构设计示意图与模型工况示意图

Fig.6 The frame structure reinforcement drawing and the diagrammatic sketch of model condition

3.2 结构的 IDA 分析

选取 FEMA P-695^[14] 推荐的 22 组(44 条)远场地震波作为 IDA 分析的地震动记录集,用结构第一周期对应的谱加速度 $S_a(T_1, 5\%) / g$ 来表示地震动强度值 IM,选取结构层间位移角 θ_{\max} (rad) 作为结构损伤性能参数 DM。地震波的调幅方法采用 Hunt & Fill 方法。结构侧向倒塌点的判断选用 IM-DM 混合准则,即 FEMA350^[15] 建议的准则。依据上述 IDA 分析准则,分别对 4 种工况下的模型进行 44 条地震波的 IDA 分析。

图 7 所示的 IDA 曲线汇总图,是将各模型工况下 44 条地震波的 IM-DM 曲线绘制于同一坐标系所得。 M_1 、 M_3 的 IDA 曲线分布较 M_2 、 M_4 分散,可更全面地反映地震动记录特性; M_1 中曲线末端所对应的地震峰值加速度值 S_a 分布均匀且范围较大,说明结构振型连续、多样,抗倒塌储备大,抗震能力强, M_3 、 M_4 曲线末端对应的 S_a 范围小,说明结构以低振型为主;“返折”曲线的存在说明在相应地震动下结构的稳定性差。综上所述, M_1 的抗震能力最好,其次为 M_3 。各图中的一系列 (DM, IM) 点也为结构地震易损性分析奠定了数据基础。

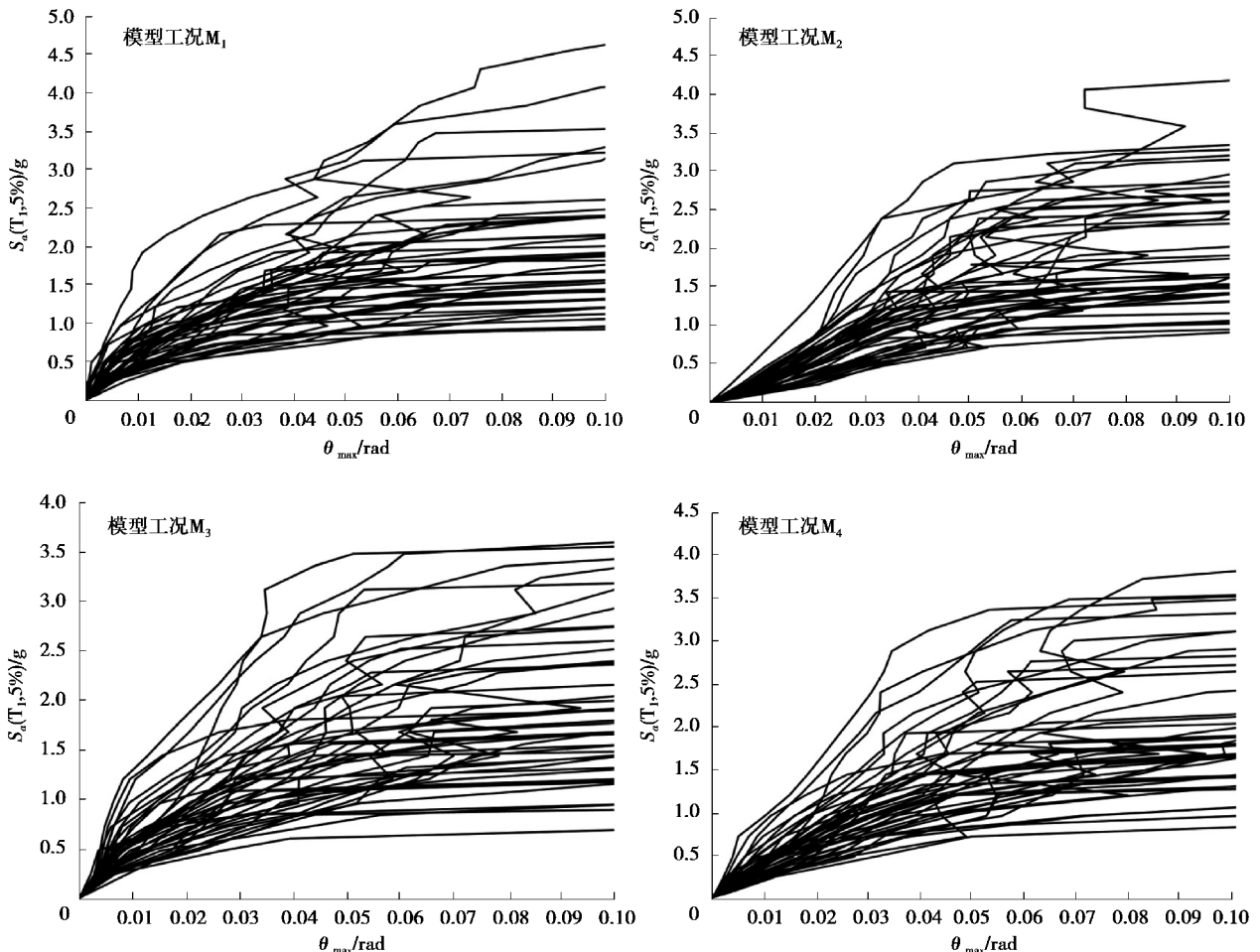


图 7 各模型的 IDA 曲线

Fig.7 IDA curves of each model

3.3 结构抗倒塌性能的评估

中国规范采用“三水准,两阶段”抗震设防理论,规定第二阶段的层间位移角不应超过 1/50,以使建筑物在大震下不致倒塌或防止发生危及生命的严重破坏。FEMA356^[21] 定义了结构的 3 个性能点:立即使用 IO(immediate occupancy)、生命安全 LS(life safe)和防止倒塌 CP(collapse prevention),与之对应的层间位移角 θ_{\max} 依次为 1%、2%和 4%。因此,要满足中国“第二阶段”的抗震性能要求,则需要满足 FEMA356 中结

构在大震下的 LS(life safe)性能水准。地震易损性是指在不同地震动强度作用下结构发生各级破坏状态的概率,它在概率的意义上定量给出结构的抗震性能。通常认为结构在地震作用下的结构反应 D 符合对数正态分布,即结构损伤指标 $DM(\theta_{max})$ 与地震动强度指标 $IM(S_a(T_1, 5\%))$ 符合指数函数关系式,该关系式又称地震概率需求模型。结构能力函数 C 符合对数正态分布。假设结构在各性能点处的能力均值为 θ_c , 标准差为 δ_c 。HAZUS99(高标准耐震设计规范)建议将 FEMA356 各性能点结构能力参数的标准差 δ_c 取为 0.38。由于结构反应函数 D 和结构能力函数 C 都服从对数正态分布,通过数学转换处理,得出了结构模型在不同级别地震下的超越概率函数公式,其中 α, β 是地震概率需求模型参数。

$$P_f = \Phi\left(\frac{L_n(\alpha(S_a(T_1, 5\%))^{\beta}/\theta_c)}{0.4}\right) \tag{7}$$

根据 IDA 分析结果,对地震动强度值 $S_a(T_1, 5\%)$ 和结构损伤参数 θ_{max} 取对数,运用 Matlab 软件进行线性回归分析,得到各模型的地震概率需求模型,进而得出结构模型的易损性公式。将 θ_c 取生命安全 LS(life safe)性能点的结构能力均值 0.02,即可得到与中国抗震规范相对应的的倒塌易损性公式,将 4 种模型的倒塌易损性公式绘制成曲线,如图 8 所示。

$$P_f(M_1) = \Phi\left(\frac{L_n(0.0246(S_a(T_1, 5\%))^{1.622}/0.02)}{0.4}\right)$$

$$P_f(M_2) = \Phi\left(\frac{L_n(0.0383(S_a(T_1, 5\%))^{0.865}/0.02)}{0.4}\right)$$

$$P_f(M_3) = \Phi\left(\frac{L_n(0.0272(S_a(T_1, 5\%))^{1.266}/0.02)}{0.4}\right)$$

$$P_f(M_4) = \Phi\left(\frac{L_n(0.0305(S_a(T_1, 5\%))^{1.1098}/0.02)}{0.4}\right)$$

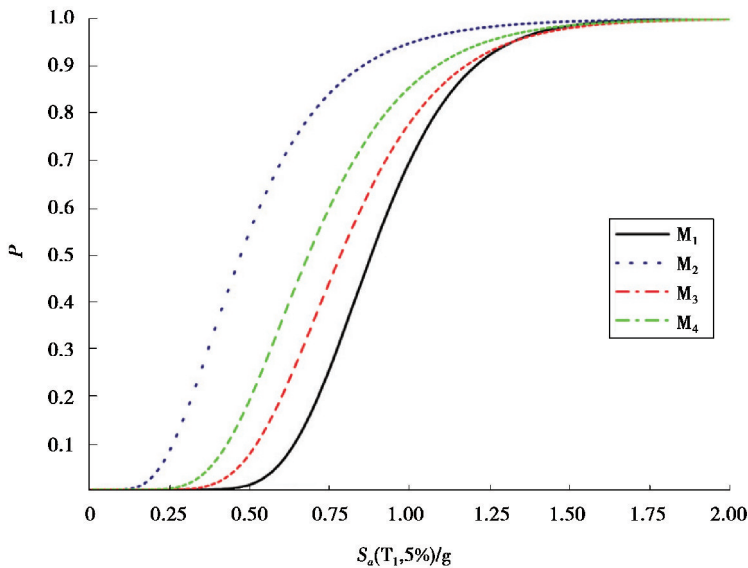


图 8 结构倒塌易损性曲线

Fig.8 The seismic fragility curves in the collapsed state

运用 OpenSees 对各模型工况进行时程分析,得出 $M_1 \sim M_4$ 模型的第 1 周期 T_1 (s) 分别为 0.760 5、1.407 840、0.937 78 和 0.838 11。根据结构第一周期和结构模型设计基本资料并参照中国抗震规范设计反应谱,可计算得出各模型在大震(罕见地震)下的地震动谱加速度值 $S_a(T_1, 5\%)$,进而可求得各模型工况在大震下的倒塌超越概率,具体计算数值如表 2 所示。

表 2 设防大震下的倒塌超越概率

Table 2 The probability of collapse under strong earthquake

参数	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
$S_a(T_1, 5\%)/g$	0.561 5	0.323 2	0.464 8	0.514 2
$P/\%$	3.335	20.053	4.561	20.805

ATC-63 报告中建议:“在设防大震作用下结构倒塌概率小于 10%,即可认为结构达到大震性能要求”。由表 2 可知:模型 M₁、M₂、M₃、M₄ 的倒塌超越概率依次为 3.335%、20.053%、4.561% 和 20.805%,其中,模型 M₂、M₄ 在大震下的超越概率均超过 10%,根据 ATC-63 报告的建议,这 2 种模型工况不符合中国“大震不倒”的抗震性能要求。

4 结 论

基于 OpenSees 平台,验证了基于改进 IMK 恢复力模型的集中塑性铰模型的可行性。数值模型中梁柱单元采用集中塑性铰单元,其中,梁柱中部为反映其弹性属性的弹性单元(elastic element),梁柱两端作为破坏的集中部位,采用基于改进 IMK 恢复力模型的零长度弹簧单元(zeroLength element)。按规范设计了一种 6 层 3 跨框架结构,设计了填充墙的 4 种布置方式和与之对应的 4 种模型工况,对各模型工况进行了 44 条地震波记录的 IDA 分析和抗倒塌易损性分析,分析结果表明: M₂ 和 M₄ 在设防大震下的倒塌超越概率均超过 10%,根据 ATC-63 报告的建议,这 2 种类型的框架结构不符合规范中“大震不倒”的性能要求,建议在实际工程中尽量避免运用此类型框架结构,同时,对已有的此类结构进行加固处理。

参考文献:

- [1] 刘光明,杨红,邹胜斌,等.基于新规范的钢筋混凝土框架抗震性能评价[J].重庆建筑大学学报,2004,26(1):40-49.
LIU Guangming, YANG hong, ZOU Shengbin, et al. Seismic assessment of RC frame structure based on new design codes[J]. Journal of Chongqing jianzhu University, 2004, 26(1):40-49. (in Chinese)
- [2] 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研究[J].工程力学,2011,28(3):41-48.
SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzhen, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3):41-48. (in Chinese)
- [3] 潘毅,杨琼,林拥军,等.汶川地震中填充墙对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响及分析[J].四川建筑科学研究,2010(5):141-144.
PAN Yi, YANG Qiong, LIN Yongjun, et al. Seismic analysis of masonry-infilled RC frame structures in Wenchuan earthquake[J]. Sichuan Building Science, 2010(5):141-144. (in Chinese)
- [4] 石宏彬.框架结构填充墙影响和强梁弱柱成因研究[J].国际地震动态,2013(3):47-48.
SHI Hongbin. Study on infill wall function and strong beam-weak column damage for frame structures[J]. Recent Developments in World Seismology, 2013(3):47-48. (in Chinese)
- [5] 叶列平,陆新征.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(04):1-9.
YE Lieping, LU Xinzhen. Analysis on seismic damage of buildings in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(04):1-9. (in Chinese)
- [6] Ibarra L F, Medina R A, Krawinkler H. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(12):1489-1511.
- [7] Lignos D G, Krawinkler H. Development and utilization of structural component databases for performance-based earthquake engineering[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(8):1382-1394.
- [8] Burton H, Deierlein G. Simulation of seismic collapse in nonductile reinforced concrete frame buildings with masonry

- infills[J]. Journal of Structural Engineering,2013,140(8):1-10.
- [9] Haselton C B, Liel S, Taylor L, et al. Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to global collapse of RC frame buildings[D]. California: PEER Report Pacific Engineering Research Center,2008.
- [10] Panagiotakos T B, Fardis M N. Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate[J]. Structural Journal,2001,98(2):135-148.
- [11] Berry M, Parrish M, Eberhard M. PEER structural performance database user's manual (version 1.0)[M]. Berkeley: University of California,2004.
- [12] 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.
- LU Xinzheng, YE Lieping, PAN Peng, 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.(in Chinese)
- [13] 黄群贤,郭子雄,朱雁茹,等.混凝土空心砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(2):110-118.
- HUANG Qunxian, GUO Zixiong, ZHU Yanru, et al. Experimental study on seismic behavior of RC frames infilled with concrete hollow blocks[J]. Journal of Building Structures,2012,32(2):110-118.(in Chinese)
- [14] Mahoney M, Hanson R D. Quantification of building seismic performance factors [D]. Washington D C: FEMA P695,2009.
- [15] Estados Unidos Federal Emergency Management Agency. FEMA. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[M]. Washington D C: FEMA,2000.

(编辑 陈移峰)