

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0049-05

FRP 加固非延性 RC 框架结构的地震易损性分析

吕大刚^{1,2}, 代旷宇^{1,2}, 于晓辉^{1,2}, 李 宁³

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江, 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150090; 3. 天津大学建筑设计规划研究总院, 天津 300100)

摘 要: 对 FRP 加固非延性 RC 框架结构的地震易损性进行分析。以 3 层、6 层和 9 层非延性 RC 框架结构为研究对象, 针对三种不同的 FRP 加固方案, 分别采用云图法和 Pushover 方法对结构的地震需求和抗震能力进行分析。通过对比 FRP 加固前后非延性 RC 框架结构的地震易损性, 评估 FRP 加固方法对非延性 RC 框架结构抗震性能的影响。研究表明: FRP 加固方法可以有效提高非延性 RC 框架结构抗震性能。在所采用的 FRP 加固方案中, 底层关键楼层加固方案对非延性 RC 框架结构的抗震性能改善作用最为明显。此外, FRP 加固方法对非延性 RC 框架结构的性能改善作用与结构高度相关, 结构越高, FRP 加固效果越差。

关键词: FRP; 非延性; RC 框架结构; 地震易损性; 抗震加固

中图分类号: TU375.4; TU352.11 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.S019

SEISMIC FRAGILITY ANALYSIS ON NON-DUCTILE RC FRAME STRUCTURES RETROFITTED WITH FRP

LÜ Da-gang^{1,2}, DAI Kuang-yu^{1,2}, YU Xiao-hui^{1,2}, LI Ning³

(1. Key Lab of Structure Dynamic Behavior and Control (HIT), Ministry of Education, Harbin, Heilongjiang 150090, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China;

3. Research Institute of Architectural Design & Urban Planning, Tianjin University, Tianjin 300100, China)

Abstract: Seismic fragility analysis is performed for non-ductile reinforced concrete (RC) frame structures retrofitted by FRP. Three non-ductile RC frames designed with 3, 6 and 9 stories are used as the study cases. Three different rehabilitation strategies are adopted for each case structure. The cloud method and the Pushover method are used for the assessment of seismic demand and seismic capacity, respectively. The derived seismic fragility for the non-ductile RC frames retrofitted w/o FRP is compared to evaluate the effect of FRP rehabilitation. The results show that FRP rehabilitation is an effective alternative to improve the seismic performance of non-ductile RC frame structures. Among the adopted rehabilitation strategies, the one used to strengthen the lower stories can mostly promote the seismic capacity of the non-ductile RC frames. Moreover, the improvement of structural performance due to FRP rehabilitation is related to the height of the non-ductile RC frames. With a given rehabilitation strategy, the higher the frame is, the less improvement on structural performance is obtained.

Key words: FRP; non-ductile; RC frame structure; seismic fragility; seismic retrofit

在我国既有钢筋混凝土(RC)结构中, 部分 RC 对结构可能遭受的地震作用估计不足, 因此导致结构延性设计考虑不足。本文将这些不满足规范延性框架结构由于建造年代久远, 设计所循规范较老,

收稿日期: 2016-04-01; 修改日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378162, 51408155); 国家科技支撑计划项目(2013BAJ08B01)

通讯作者: 吕大刚(1970—), 男, 黑龙江人, 教授, 工学博士, 博导, 主要从事结构可靠度、地震工程研究(E-mail: ludagang@hit.edu.cn).

作者简介: 代旷宇(1991—), 男, 河南人, 博士生, 主要从事建筑结构抗震方向研究(E-mail: daikuangyu@hit.edu.cn);

于晓辉(1982—), 男, 辽宁人, 助理研究员, 工学博士, 主要从事地震易损性理论及应用研究(E-mail: yxhhit@126.com);

李 宁(1989—), 男, 黑龙江人, 助理工程师, 工学硕士, 主要从事 FRP 加固 RC 结构的抗震性能研究(E-mail: 317726701@qq.com).

性要求的 RC 框架结构统称为“非延性 RC 框架结构”。具体表现为：结构柱的轴压比偏大以及体积配箍率低等情况。已有的震害调查结果表明：非延性 RC 框架结构在地震作用下发生严重破坏甚至倒塌的风险远高于按现有规范设计的 RC 框架结构。

近年来国内外学者提出采用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastics, FRP)对既有 RC 框架结构进行加固的方法,以提高其抗震能力。到目前为止,研究学者已在 FRP 加固 RC 构件层面进行了大量理论及试验研究^[1-5],并颁布了 FRP 加固 RC 结构的技术规程^[6-7]。考虑到地震作用和结构自身均存在较强不确定性,因此,有必要从概率的角度评估 FRP 加固方案对 RC 结构整体抗震性能影响。作为一种有效的结构抗震性能概率评估手段,地震易损性近年来得到研究人员的广泛关注^[8-12]。但作者尚未见对 FRP 加固非延性 RC 框架结构的地震易损性分析方面的研究。为此,本文选择不同高度的三个非延性 RC 框架结构作为研究对象,采用不同的 FRP 加固方案,对不同 FRP 加固方案对非延性 RC 框架结构的地震易损性影响进行了研究。

1 FRP 加固方案及有限元建模

1.1 RC 框架原型结构设计

本文以文献[13]中所采用的 3 层、6 层、9 层三个非延性 RC 框架结构作为研究对象。上述结构在设计中不考虑地震作用的影响。结构采用等跨布置,每跨 6 m,长度方向 5 跨,宽度方向 3 跨。结构底层层高为 4.5 m,标准层层高为 3.6 m。楼面板厚为 120 mm,外墙采用灰砂砖,内隔墙为水泥空心砖。混凝土等级为 C30,梁柱纵向受力钢筋采用 HRB335 钢筋,箍筋等级为 HPB235。考虑抹灰层及找平层等之后的屋面和标准楼层的楼面恒荷载标准值分别为 6.5 kN/m² 及 4.5 kN/m²;屋面和标准楼层的楼面活荷载标准值分别为 0.5 kN/m² 和 2.0 kN/m²;雪荷载为 0.30 kN/m²;考虑填充墙的荷载作用影响,在标准层框架梁上施加 7.5 kN/m 的线荷载。此外,在顶层外围框架梁上施加 3 kN/m 的线荷载来考虑女儿墙的作用。模型结构中所有梁截面尺寸均为 250 mm×500 mm,箍筋信息为 $\Phi 6@200$;因模型结构的柱轴压比不同,模型在 1 层~3 层、4 层~6 层、7 层~9 层的柱截面尺寸分别取 350 mm×350 mm、450 mm×450 mm 及 550 mm×

550 mm,箍筋信息为 $\Phi 6@200$ 。

1.2 FRP 加固方案

为考虑不同 FRP 加固方案对非延性 RC 框架结构抗震性能的影响,本文采用 3 种 FRP 加固方案进行研究^[13]。三种 FRP 加固方案的加固细节,如表 1 所示。本文在 FRP 加固中所采用的 FRP 为单层厚度为 0.167 mm 的 UT70_30 型单向纤维布,其极限抗拉强度的平均值为 4340 MPa,极限抗拉应变的平均值为 1.78%,弹性模量为 244 GPa。

表 1 三种 FRP 加固方案的加固细节

Table 1 Details of three FRP retrofitting schemes

方案名称	加固方案细节
方案 1	对 3 层、6 层、9 层非延性 RC 框架的下部半数楼层的梁、柱端塑性铰区横向包裹 6 层 FRP,加固范围为 1.5 倍截面高度
方案 2	对 3 层、6 层、9 层非延性 RC 框架的全部楼层的梁、柱端塑性铰区横向包裹 6 层 FRP,加固范围为 1.5 倍截面高度
方案 3	对 3 层、6 层、9 层非延性 RC 框架的全部楼层的梁、柱端塑性铰区横向包裹 6 层 FRP,加固范围为 1.5 倍截面高度,同时在梁柱塑性铰区沿纵向粘贴 2 层宽度为 250 mm 的 FRP

1.3 FRP 加固 RC 框架结构建模

本文基于 OpenSees 平台对 FRP 加固非延性 RC 框架结构进行有限元建模。建模过程中针对梁和柱采用基于力的非线性梁柱单元进行模拟,混凝土截面采用纤维截面进行模拟,混凝土及钢筋材料分别采用不考虑混凝土受拉应力的 Concrete01 材料及 Steel02 材料进行模拟。将混凝土构件分为非加固区及加固区分别进行模拟。加固区分为 4 层 FRP 加固区及 6 层 FRP 加固区。对于非加固区截面,基于是否有箍筋约束,分为外包混凝土(无约束混凝土)及核心区混凝土(约束混凝土),其中,箍筋约束核心区混凝土的本构曲线控制点采用 Mander 等^[14]提出的约束混凝土本构模型进行计算。FRP 约束钢筋混凝土柱端塑性铰区的混凝土采用文献[15]提出的可考虑 FRP 与箍筋双重约束及柱尺寸效应的 FRP 约束混凝土模型进行建模。纵向受力的 FRP 材料采用 OpenSees 中的单轴理想弹塑性材料(EPPmaterial)进行模拟。本文在确定 EPP 材料参数时,不考虑其抗压强度,将 FRP 的最大拉应力取为极限拉应力的 50%。此外,在建模过程中混凝土柱考虑 P-Delta 效应,梁不考虑 P-Delta 效应,且不考虑节点破坏和钢筋滑移。

2 FRP 加固非延性 RC 框架结构的概率地震需求分析

采用“云图法”来建立结构的概率地震需求模型。在“云图法”分析中,采用若干条真实地震动作为输入,并对结构的时程分析结果进行统计分析。根据云图法基本原理,假设结构概率地震需求中位值 $m_{D|IM}$ 与地震动强度参数 IM 之间服从对数线性关系^[16]:

$$\ln(m_{D|IM}) = \beta_0 + \beta_1 \ln IM \quad (1)$$

式中, β_0 和 β_1 为回归参数。地震需求的对数标准差 $\beta_{D|IM}$ 可按下式计算:

$$\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln(D_i) - \ln(m_{D|IM}))^2}{N-2}} \quad (2)$$

式中, $D_i(i=1,2,\dots,N)$ 为第 i 条地震动所造成的结构非线性反应。本文采用文献[17]中所采用的20条真实地震动作为输入,采用结构在地震作用下的最大层间位移角 θ_{max} 作为地震需求参数,采用地震动的谱加速度 S_a 作为地震动强度参数,利用云图法根据式(1)和式(2)获得FRP加固前后非延性钢筋混凝土框架结构的概率地震需求参数,如表2所示。其中,S代表结构,随后的数字3、6、9分布代表楼层数,最后的数字代表0、1、2、3分别代表原结构、加固方案1、加固方案2、加固方案3。

表2 FRP加固前后结构的云图法统计结果

Table 2 Cloud-method statistical results of structures before and after being retrofitted with FRP

结构编号	β_0	β_1	$\beta_{D IM}$	R^2
S3-0	-3.24	0.92	0.38	0.83
S3-1	-3.25	0.92	0.38	0.83
S3-2	-3.31	0.90	0.38	0.82
S3-3	-3.20	0.96	0.34	0.86
S6-0	-3.19	0.76	0.30	0.81
S6-1	-3.21	0.76	0.29	0.82
S6-2	-3.21	0.76	0.30	0.82
S6-3	-3.17	0.77	0.30	0.83
S9-0	-2.15	0.96	0.36	0.88
S9-1	-2.27	0.90	0.33	0.91
S9-2	-2.31	0.91	0.31	0.89
S9-3	-2.21	0.94	0.30	0.90

3 FRP 加固非延性 RC 框架结构的概率抗震能力分析

根据文献[18],将结构的极限状态分为立即居

住(Immediate Occupancy, IO)、生命安全(Life Safety, LS)和倒塌预防(Collapse Prevention, CP)三个水准,并采用Pushover分析,基于结构整体损伤作为控制指标,量化地确定上述极限状态所对应的结构抗震能力。在Pushover分析过程中,采用倒三角分布侧向加载模式。基于Pushover曲线,将本文所考虑的极限状态按下述原则进行确定:IO极限状态对应Pushover曲线的等效屈服点,LS极限状态对应Pushover曲线的峰值点,CP极限状态对应Pushover曲线下降段上承载力下降15%的点。基于上述原则,采用Pushover分析获得FRP加固前后非延性钢筋混凝土框架结构在不同极限状态下的最大层间位移角,如表3所示。为考虑结构不确定性的影响,结构抗震能力通常假设服从对数正态分布,其中,能力中位值 m_C 采用表2的分析结果,而抗震能力对数标准差 β_C 按FEMA350^[19]的建议取值取 $\beta_C=0.25$ 。

表3 FRP加固前后结构在不同极限状态下的最大层间位移角/(%)

Table 3 Maximum inter-story drift angles of structures before and after being retrofitted with FRP corresponding to different limit states

加固方案	极限状态			加固方案	极限状态			加固方案	极限状态		
	IO	LS	CP		IO	LS	CP		IO	LS	CP
S3-0	0.76	1.17	2.55	S6-0	0.79	1.20	3.20	S9-0	0.91	1.70	2.40
S3-1	1.03	2.18	5.07	S6-1	0.89	1.60	3.49	S9-1	0.90	1.71	2.95
S3-2	1.03	2.20	5.04	S6-2	0.90	1.60	3.72	S9-2	0.91	1.71	2.96
S3-3	1.09	1.61	2.68	S6-3	1.03	2.03	5.20	S9-3	1.04	2.02	3.50

4 FRP 加固非延性 RC 框架结构概率地震易损性分析

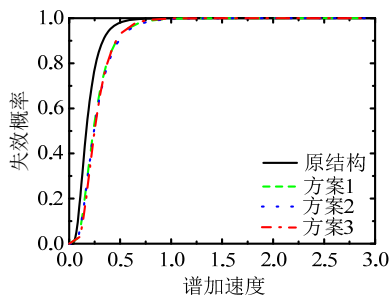
地震易损性(Seismic Fragility)表示结构在不同强度地震作用下,结构达到或超过某种极限状态的条件概率。地震易损性函数 $F_R(x)$ 可定义为^[20]:

$$F_R(x) = \Phi \left[\frac{\ln m_{D|IM} - \ln m_C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|IM}^2}} \right] \quad (3)$$

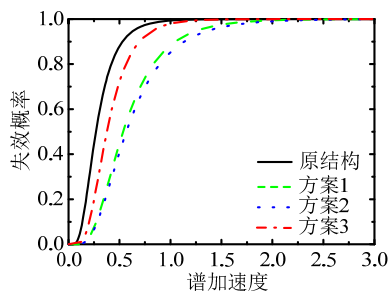
基于前文分析得到的结构概率抗震能力及概率抗震需求分析结果,将表1和表2中的概率地震需求模型参数和概率抗震能力模型参数代入式(3)中,计算获得3层、6层和9层非延性RC框架结构在FRP加固前及加固后不同极限状态下(IO、LS、CP)的地震易损性曲线,如图1所示。

对比未加固RC非延性框架结构加固后的RC非延性框架结构在IO、LS、CP极限状态的失效概

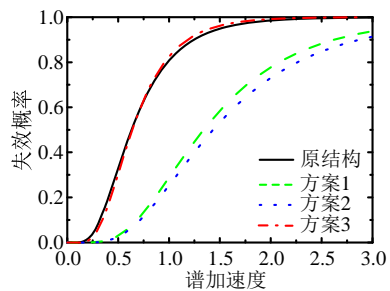
率可发现, FRP 加固方法有助于提升非延性 RC 框架结构的抗震性能的提高。对比三层 RC 非延性结构加固前后的易损性曲线, 可发现: 采用方案 3 进行加固的结构其在 LS 及 CP 极限状态下的失效概率反而比方案 1、方案 2 要高, 造成这种结果的主要原因是: 对低矮的 RC 结构来说, FRP 用量增加结构的刚度, 从而造成延性降低, FRP 在进行非延性 RC 框架加固时并非用量越大加固效果越好。此外, 对比采用方案 1 与方案 2 后各结构加固效果, 可发现仅加固下部楼层与加固全部楼层对结构抗震的影响差别不大, 这说明仅加固薄弱层即可有效改善 RC 非延性框架结构的抗震性能。从另一个角度也可认为, 在 FRP 加固方案的选择中, 并非 FRP 的用量越多越好。对比针对不同层数各方案的加固效果可发现, FRP 对结构抗震性能提升与结构本身的层数有关, 随着楼层层数提高, FRP 加固对于结构性能的提升程度在逐渐减小, 各加固方案之间的差异性也在逐渐降低, FRP 对结构的加固效果就越不明显。



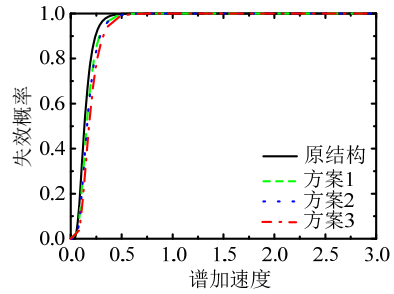
(a) 三层结构 IO 状态



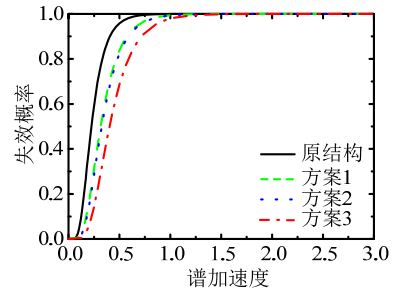
(b) 三层结构 LS 状态



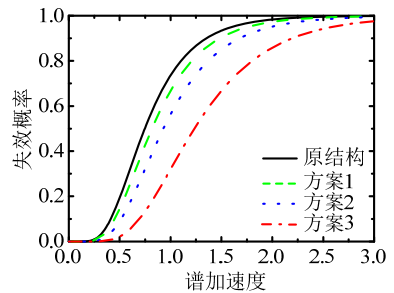
(c) 三层结构 CP 状态



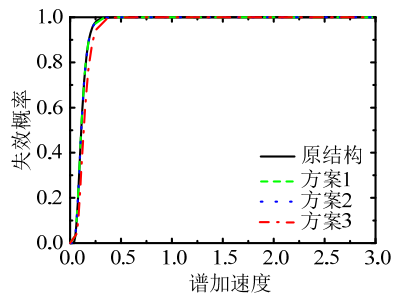
(d) 六层结构 IO 状态



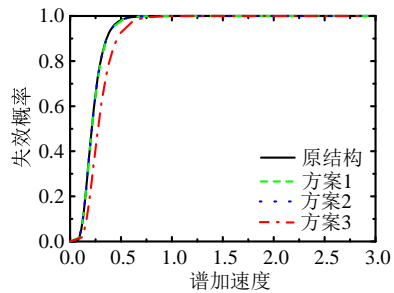
(e) 六层结构 LS 状态



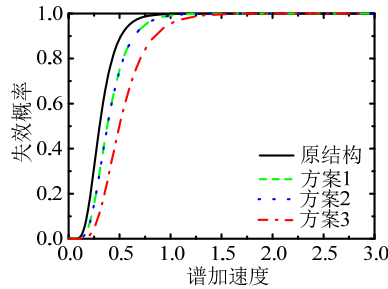
(f) 六层结构 CP 状态



(g) 九层结构 IO 状态



(h) 九层结构 LS 状态



(i) 九层结构 CP 状态

图 1 FRP 加固前后各结构的地震易损性曲线

Fig.1 Seismic fragility curves of structures before and after being retrofitted with FRP

5 结论

本文主要得到以下结论:

(1) FRP 加固可有效提高非延性 RC 框架结构的抗震性能,但对于低矮层非延性 RC 框架来说,FRP 的用量需控制在一个合理的范围,FRP 用量过多会造成结构刚度过大,反而无法有效提升结构延性;

(2) FRP 加固效果并非仅取决于 FRP 的用量,还与结构自身形式和加固方式有关。采用底层关键楼层加强的 FRP 加固方法对非延性框架结构的抗震性能改善作用最为明显;

(3) FRP 对结构抗震性能提升与结构本身的层数有关,结构层数越高,FRP 加固对于结构性能的提升程度越小,加固效果就越不明显。

参考文献:

- [1] 顾冬生, 吴刚. 地震荷载作用下 FRP 加固钢筋混凝土圆柱变形能力计算方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 261—270.
Gu Dongsheng, Wu Gang. Deformation capacity of FRP retrofitted circular concrete columns under simulated seismic loading [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 261—270. (in Chinese)
- [2] 顾冬生, 吴刚, 吴智深, 等. CFRP 加固高轴压比钢筋混凝土短圆柱抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(6): 71—77.
Gu Dongsheng, Wu Gang, Wu Zhishen, et al. Experimental study on seismic performance of RC short circular columns strengthened with CFRP composites under high level compression [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(6): 71—77. (in Chinese)
- [3] 王代玉, 王震宇, 乔鑫. CFRP 中等约束钢筋混凝土方柱反复受压本构模型[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 39—46.
Wang Daiyu, Wang Zhenyu, Qiao Xin. Cyclic stress-strain model for CFRP moderately-confined reinforced concrete square columns [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(4): 39—46. (in Chinese)
- [4] 王震宇, 王代玉, 吕大刚. 高轴压比 CFRP 约束钢筋混凝土圆柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 1—8.
Wang Zhenyu, Wang Daiyu, Lü Dagang. Experiment and finite element analysis of the seismic behavior of CFRP-confined RC circular columns with high axial compression ratio [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 1—8. (in Chinese)
- [5] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 10—18.
Lu Xinzheng, Ye Lieping, Teng Jingguang, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 10—18. (in Chinese)
- [6] CECS146: 2003, 碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
CECS146: 2003, Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [7] GB50367-2006, 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
GB50367-2006, Design code for strengthening concrete structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 郑山锁, 代旷宇, 韩超伟, 等. 基于材料性能退化模型的钢排架结构易损性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(17): 18—24.
Zheng Shansuo, Dai Kuangyu, Han Chaowei, et al. Steel bent frame structure vulnerability analysis based on steel performance degradation model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(17): 18—24. (in Chinese)
- [9] 吕大刚, 于晓辉. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 41—48.
Lü Dagang, Yu Xiaohui. Theoretical study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 41—48. (in Chinese)
- [10] 于晓辉, 吕大刚. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险应用研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 49—56.
Yu Xiaohui, Lü Dagang. Application study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 49—56. (in Chinese)
- [11] 吕大刚, 李晓鹏, 王光远. 基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(2): 107—114.
Lü Dagang, Li Xiaopeng, Wang Guangyuan. Global seismic fragility analysis of structures based on reliability and performance [J]. Journal of Natural Disaster, 2006, 15(2): 107—114. (in Chinese)

(参考文献[12]—[20]转第 70 页)

- concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(6): 44–49. (in Chinese)
- [8] 朱美春, 王清湘, 冯秀峰. 轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(6): 35–41.
Zhu Meichun, Wang Qingxiang, Feng Xiufeng. Behavior of axially-loaded square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(6): 35–41. (in Chinese)
- [9] 尧国皇, 孙素文, 李秀明. 轴心受压型钢-钢管混凝土柱力学性能的研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2007, 9(6): 26–32.
Yao Guohuang, Sun Suwen, Li Xiuming. Research on hollow steel tube columns filled with steel-reinforced concrete subjected to axial-compressing [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2007, 9(6): 26–32. (in Chinese)
- [10] 史艳莉, 王文达, 王亚伟. 内配型钢方钢管混凝土轴压短柱力学性能及参数分析[J]. *工程力学*, 2014, 31(增刊): 201–206.
Shi Yanli, Wang Wenda, Wang Yawei. Mechanical behavior and parametric study of concrete-filled steel tubular stub columns with encased profiled steel under axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(Suppl): 201–206. (in Chinese)
- [11] 韩祎, 王景玄, 王文达. 内配型钢方钢管混凝土偏压构件受火全过程数值模拟[J]. *工程力学*, 2015, 32(增刊): 60–65, 90.
Han Yi, Wang Jingxuan, Wang Wenda. Numerical simulation analysis on concrete-filled square steel tubular columns with internal profiled steel under eccentric compression exposure to full-range fire [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(Suppl): 60–65, 90. (in Chinese)
- [12] 韩祎, 王景玄, 王文达. 内配型钢的圆钢管混凝土轴压构件的耐火性能[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(2): 52–59.
Han Yi, Wang Jingxuan, Wang Wenda. Fire performance of concrete-filled steel tubular column with encased profiled steel under axial compression [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(2): 52–59. (in Chinese)
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2007: 105–169.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structure-theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 105–169. (in Chinese)

(上接第 53 页)

- [12] 吕大刚, 王光远. 基于可靠度和灵敏度的结构局部地震易损性分析[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(4): 157–162.
Lü Dagang, Wang Guangyuan. Local seismic fragility analysis based on reliability and sensitivity [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(4): 157–162. (in Chinese)
- [13] 李宁. FRP 加固非延性钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Li Ning. Seismic fragility analysis of nonductile RC frame structures with FRP [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] Mander J B, Priestley M JN, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1998, 114(8): 1804–1826.
- [15] 王代玉. FRP 加固非延性钢筋混凝土框架结构的抗震性能试验与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Wang Daiyu. Experimental and analytical investigation of seismic performance of nonductile RC frames retrofitted with FRP [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [16] 于晓辉, 吕大刚, 王光远. 关于概率地震需求模型的讨论[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 172–179.
Yu Xiaohui, Lü Dagang, Wang Guangyuan. Discussions on probabilistic seismic demand models [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 172–179. (in Chinese)
- [17] 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 Xiaohui, Lü Dagang. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(10): 8–14. (in Chinese)
- [18] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. FEMA Publication 273, 1997.
- [19] FEMA 350 (2000). “Recommended seismic criteria for new steel moment frame buildings.” Federal Emergency Management Agency [S]. Washington, D.C., 2000.
- [20] 于晓辉, 李雁军, 吕大刚, 等. 基于易损性的 RC 框架填充墙结构概率地震安全评估[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(增刊 2): 260–265.
Yu Xiaohui, Li Yanjun, Lü Dagang, et al. Fragility-based probabilistic seismic safety assessment of the RC frame structures with infilled masonry walls [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2014, 47(Suppl 2): 260–265. (in Chinese)