

文章编号:1007-9629(2022)03-0270-08

# HPFRC 耗能墙-RC 框架结构地震易损性分析

杨鹏辉<sup>1,2</sup>, 梁兴文<sup>2,\*</sup>, 辛力<sup>3</sup>, 何伟<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学设计研究总院, 陕西西安 710055; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西西安 710055; 3. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西西安 710018;  
4. 中国启源工程设计研究院有限公司, 陕西西安 710018)

**摘要:**采用 Perform-3D 结构分析软件, 选取 44 条地震动记录, 对高性能纤维增强混凝土 (HPFRC) 耗能墙-钢筋混凝土 (RC) 框架结构进行基于增量动力分析方法 (IDA) 的地震易损性分析. 结果表明: HPFRC 材料良好的受拉应变硬化性能, 可以改善结构或构件的耐损伤能力和耗能能力, 进而提高整体结构的抗震性能; 结构发生倒塌时, 由 44 条地震波计算出的对应于结构基本周期的反应谱加速度平均值大于 8 度设防烈度对应的罕遇地震作用下结构基本周期所对应的谱加速度值, 说明 HPFRC 耗能墙-RC 框架结构具有良好的抗倒塌能力; 在 8 度设防烈度对应的罕遇地震作用下, HPFRC 耗能墙-RC 框架结构发生倒塌的超越概率为 0.03%, 满足大震作用下结构的抗震设防要求.

**关键词:**纤维增强混凝土耗能墙; 钢筋混凝土框架; 抗震性能; 增量动力分析; 易损性分析

**中图分类号:** TU398.2; TU377.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.008

## Seismic Fragility Analysis of HPFRC Energy Dissipation Wall-RC Frame Structure

YANG Penghui<sup>1,2</sup>, LIANG Xingwen<sup>2,\*</sup>, XIN Li<sup>3</sup>, HE Wei<sup>4</sup>

(1. General Institute of Design and Research, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;  
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;  
3. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China;  
4. China Qiyuan Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Based on the incremental dynamic analysis (IDA) method, the seismic fragility analysis of high performance fiber reinforced concrete (HPFRC) energy dissipation wall-reinforced concrete (RC) frame structure was carried out by using Perform-3D structural analysis software and 44 seismic records. The results show that the HPFRC material has good tensile strain hardening performance, which can improve the damage resistance and energy dissipation capacity of the structure, and then improve the seismic performance of the whole structure; when the structure collapses, the average response spectral acceleration corresponding to the basic period of the structure calculated by 44 seismic waves is greater than the spectral acceleration corresponding to the basic period of the structure under the rare earthquake with 8 degree fortification intensity, it means that the HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure has good anti-collapse ability; under the action of 8 degree rare earthquake, the probability of exceeding collapse of the HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure is 0.03%, which meets the requirements of seismic protection of the structure under large earthquake.

收稿日期: 2020-11-16; 修订日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51278402)

第一作者: 杨鹏辉 (1984-), 男, 陕西咸阳人, 西安建筑科技大学高级工程师, 博士. E-mail: yph\_003@163.com

通讯作者: 梁兴文 (1952-), 男, 陕西渭南人, 西安建筑科技大学教授, 博士生导师, 硕士. E-mail: liangxingwen2000@163.com

**Key words:** high performance fiber reinforced concrete (HPFRC) energy dissipation wall; reinforced concrete (RC) frame; seismic performance; incremental dynamic analysis; fragility analysis

高性能纤维增强混凝土(HPFRC)作为一种高性能绿色建筑材料,以优良的受拉应变硬化特性,克服了传统混凝土材料抗拉强度低、变形能力差等缺点,在拉伸、弯曲等荷载作用下,因产生大量细密裂缝而使其同时具有高延性、高韧性和高能量吸收能力,能显著改善混凝土基体的脆性行为,提高混凝土与钢筋界面间的协调变形能力,在工程抗震领域表现优良<sup>[1-2]</sup>。本课题组将HPFRC耗能墙装配于钢筋混凝土(RC)框架结构中,形成HPFRC耗能墙-RC框架新型抗震结构,并对这种结构的试验模型进行了拟静力试验,分析其破坏机理及各主要特征点的荷载和位移。研究表明,这种结构在反复水平荷载作用下具有良好的耗能能力和较高的残余承载力<sup>[3]</sup>。

地震易损性分析可以预测结构在不同水准地震作用下发生不同损伤程度的概率,对结构的抗震设计、加固和维修决策具有重要的应用价值。本文利用Perform-3D软件,对HPFRC耗能墙-RC框架结构进行动力弹塑性分析,进一步研究HPFRC耗能墙对RC框架结构整体抗震性能的影响;同时基于增量动力分析方法,对HPFRC耗能墙-RC框架结构进行地震易损性分析,评估该类结构的抗震性能。

## 1 HPFRC耗能墙-RC框架结构模型

### 1.1 结构模型

位于西安市某大学的5层框架结构实验办公楼,丙类建筑,底层层高为6.0 m(用途为大型实验室),其余各层层高均为3.9 m(用途为办公室和小型实验室),结构总高度为22.2 m。抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为0.20g,设计地震分组为第2组,场地类别为Ⅱ类(特征周期 $T_g=0.40$  s),框架的抗震等级为2级。屋面恒载 $4.5 \text{ kN/m}^2$ (板自重除外,余同),活载 $2.0 \text{ kN/m}^2$ ;办公层楼面恒载 $1.5 \text{ kN/m}^2$ ,活载 $2.5 \text{ kN/m}^2$ ;实验室层楼面恒载 $1.5 \text{ kN/m}^2$ ,活载 $4.0 \text{ kN/m}^2$ 。梁上线荷载为 $7.2 \text{ kN/m}$ ,屋面梁上女儿墙线荷载为 $8 \text{ kN/m}$ 。屋面板厚120 mm,其余各层板厚均为110 mm。混凝土强度等级:1、2层墙柱为C40,3层及以上墙柱为C35,所有梁、板均为C35。钢筋均采用HRB400级。由于此建筑底层层高较大,且属于超长结构,为满足GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》和JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》规定的弹性层间位移角限值 $1/550$ 和第1扭转周期

与第1平动周期之比小于0.9的要求,所需框架柱和框架梁截面尺寸较大。

在此实例基础上设置HPFRC耗能墙,形成HPFRC耗能墙-RC框架结构,结构平面布置如图1所示。HPFRC材料的配合比及抗压、抗拉强度实测值见文献[3]。HPFRC耗能墙厚度为160 mm,净长1200 mm(其中紧靠B、C轴的耗能墙仅1层和2层设置,其余耗能墙每层均设)。HPFRC耗能墙的设计原则是:首先,作为耗能构件,其不应承担过多的地震倾覆力矩,故结构中框架部分所承担的地震倾覆力矩应大于结构总地震倾覆力矩的50%;其次,耗能墙的刚度应该与结构梁、柱的刚度相匹配;最后,耗能墙沿结构高度从下而上可以不连续布置。采用YJK软件进行弹性计算(按文献[3]所提方法计算HPFRC墙的弹性刚度后,对模型中按普通混凝土墙输入的墙刚度进行折减近似处理)的结果表明,设置耗能墙后,结构层间位移角及扭转周期比等整体指标在满足GB 50011—2010和JGJ 3—2010的要求下可得到明显改善,且框架柱和框架梁的截面尺寸可在优化后显著减小,框架梁、柱的配筋量也有减少。RC框架结构与HPFRC耗能墙-RC框架结构的具体计算参数对比见表1。表1中:水平向为X轴,纵向为Y轴;自振周期的格式含义是周期值/平动系数 $(X+Y)$ /扭转系数 $(Z)$ 。

### 1.2 Perform-3D模型建立

在本文模型中,为了考虑箍筋对混凝土的约束作用,在梁端、柱端箍筋加密区以及耗能墙的边缘构件部位采用约束混凝土本构,结构其余部位采用非约束混凝土本构。对于普通混凝土材料,本文约束混凝土采用修正的Kent-Park约束混凝土本构模型<sup>[4]</sup>,非约束混凝土采用GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》附录C中的混凝土单轴受压本构模型,均不考虑受拉性能的影响;对于高性能纤维增强混凝土(HPFRC)材料,约束HPFRC材料本构采用文献[5]提出的约束HPFRC本构模型,非约束HPFRC采用文献[6]提出的单轴受压本构模型,并且考虑其受拉性能。考虑HPFRC材料的受拉应变硬化特性,其拉压滞回本构模型见文献[7]。由于钢筋有较好的各向同性,因此钢筋在拉、压方向采用对称的理想弹塑性即双折线本构模型。梁构件、柱构件和耗能墙的模拟均采用纤维截面模型。

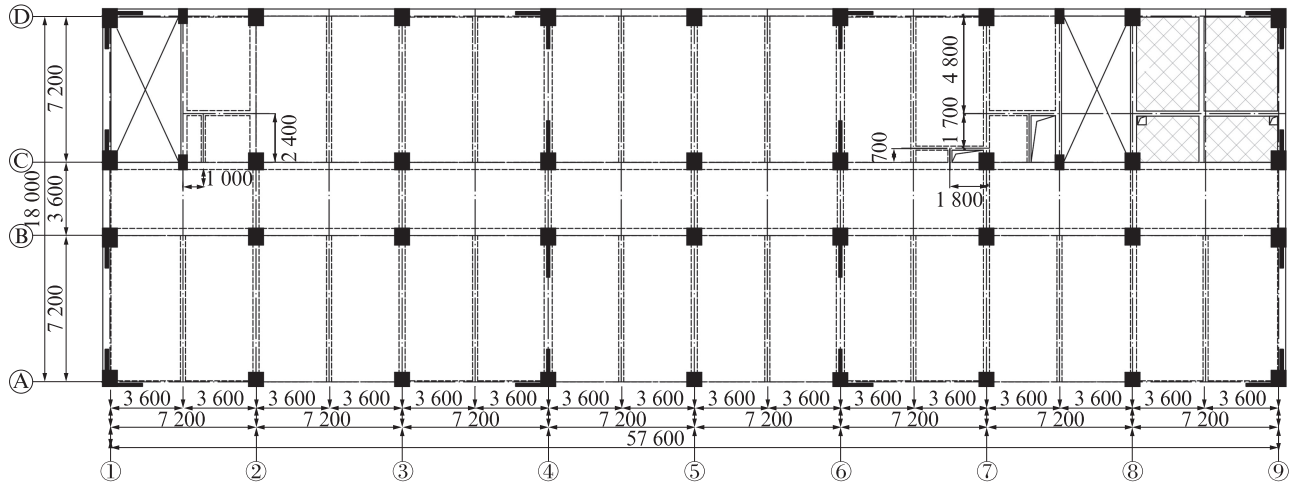


图 1 HPFRC 耗能墙-RC 框架结构布置图

Fig. 1 Plan view of the HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure (size:mm)

表 1 RC 框架结构与 HPFRC 耗能墙-RC 框架结构计算参数对比

Table 1 Comparison of calculation parameters of RC frame structure and HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure

Performance index		RC frame structure	HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure
Natural vibration period	$T_1$ (Y direction)	0.786 6/1.00/0	0.822 4/1.00/0
	$T_2$ (X direction)	0.785 7/0.98/0.02	0.711 3/1.00/0
	$T_3$ (Reverse)	0.680 2/0.02/0.98	0.607 3/0/1.00
	$T_3/T_1$	0.86	0.73
Maximum seismic shear force/kN	Y	7 201.63	7 379.83
	X	7 069.69	7 772.25
Maximum inter-story displacement angle	Y	1/732	1/667
	X	1/686	1/717
Column section /(mm×mm)	1F	800×1 000(1 and 9 axis), 800×800(other axis)	700×700(1 and 9 axis), 600×600(other axis)
	2F	700×1 000(1 and 9 axis), 700×800(other axis)	600×600(1 and 9 axis), 500×500(other axis)
	3F	700×900(1 and 9 axis), 600×700(other axis)	500×500(1 and 9 axis), 500×500(other axis)
	4-5F	600×600	500×500
Frame beam section/(mm×mm)	1-2F	400×700	300×600
	3-5F	300×700	250×600

1.3 模型验证

在弹塑性分析之前,用 Perform-3D 软件对所建立的 HPFRC 耗能墙-RC 框架结构进行模态分析,得到结构第 1 振型 y 向平动、x 向平动及扭转对应的

周期  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ ,并将其与 YJK 计算的结果进行对比,结果见表 2.由表 2 可见,2 种软件的模态分析结果基本吻合,故所建模型可以用于后期结构的弹塑性分析.

表 2 HPFRC 耗能墙-RC 框架结构周期计算对比

Table 2 Comparison of period calculation of the HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure

Computing software	First mode $T_1$ (y direction)/s	First mode $T_2$ (x direction)/s	First mode $T_3$ (Reverse)/s	$T_3/T_1$
Perform-3D	0.796 0	0.651 2	0.556 3	0.70
YJK	0.822 4	0.711 3	0.607 3	0.73
Deviation rate/%	3.210 0	8.450 0	8.390 0	4.11

## 2 HPFRC耗能墙-RC框架结构弹塑性时程分析

### 2.1 地震波的选取

根据上述结构设计信息,该结构抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度值为 $0.20g$ ,设计地震分组为第2组,场地类别为II类(特征周期 $T_g=0.40\text{ s}$ ).在计算罕遇地震作用时,特征周期应增加 $0.05\text{ s}$ ,即在选择地震波时,结构特征周期应取 $T_g=0.45\text{ s}$ .根据规范GB 50011—2010关于地震波的选取要求,结合场地条件和结构动力特性,综合考虑地震波的峰值、频谱及持时的影响,按照规范目标反应谱,从美国太平洋地震工程研究中心的地震动数据库中,选择EI centro波和Northridge波2条天然波;另外通过上述规范中的反应谱由SIMQKE软件拟合生成1条人工波,共计3条波.根据GB 50011—2010第5.1.2条的规定,用程序计算时先将各地震波的峰值加速度PGA调幅至8度罕遇地震作用下结构基本周期所对应的地震加速度时程最大值 $0.4g$ ,再对RC框架结构和HPFRC耗能墙-RC框架结构进行罕遇地震作用下的动力时程分析.

### 2.2 8度罕遇地震作用下的动力时程分析

在8度设防烈度对应的罕遇地震作用下,RC框架结构和HPFRC耗能墙-RC框架结构的最大层间位移角沿楼层高度分布对比如图2所示.由图2可知,对于不同的地震波,2种结构的地震反应均表现出较大的离散性.在相同地震波作用下,RC框架结

构和HPFRC耗能墙-RC框架结构的变形分布规律基本一致,最大层间位移角均发生在中部楼层附近;2种结构的弹塑性层间位移角最大值均小于GB 50011—2010规定的位移角限值 $1/50$ ,但HPFRC耗能墙-RC框架结构的层间位移角相比RC框架结构明显较小.这是由于HPFRC耗能墙具有一定的侧向刚度和水平承载力,能提高整体结构的抗侧刚度和水平承载力;另外,HPFRC材料具有良好的受拉应变硬化性能和多裂缝开展性能,可以改善结构或构件的耐损伤能力和耗能能力,故HPFRC耗能墙-RC框架结构在地震作用下的损伤程度会较轻.

## 3 HPFRC耗能墙-RC框架结构增量动力分析

综上所述,HPFRC耗能墙-RC框架结构具有较好的抗震性能.为详细研究地震动离散性对结构地震反应的影响,更合理地评估结构在不同强度地震作用下的失效概率,本文基于增量动力分析(IDA)方法研究HPFRC耗能墙-RC框架结构的地震易损性,从概率角度对该结构抗震性能进行评估.

### 3.1 IDA方法的原理和步骤

增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法最早由Bertero<sup>[8]</sup>在1977年提出,本世纪初被美国FEMA-350、FEMA-351所采用,2002年Vamvatsikos等<sup>[9]</sup>对该方法进行了研究和总结,使其在基于性能的地震工程中得到了广泛应用.IDA方法考虑结构抗震能力和需求的不确定性和随机性因素,能较合理地评估不同性能水准下的结构抗震能力.增量动力分析方法是将选取的地震动记录经调幅得到一系列不同强度水平的地震动,然后对结构分别施加这一系列地震动进行动力弹塑性分析,直至所选取的结构性能参数满足指定的极限状态判断,由地震动强度指标(intensity measure, IM)和工程需求参数(engineering demand parameter, EDP)之间的关系曲线(IDA曲线)来研究结构在地震作用下的损伤破坏全过程,评估结构的抗震性能.IDA方法的分析步骤见文献[9].

### 3.2 地震波的选取

地震易损性分析中的不确定性主要考虑地震动的不确定性和结构的不确定性.研究表明:地震动不确定性对结构统计反应的影响要大于结构不确定性<sup>[10]</sup>.地震动不确定性因素包括震源机制、场地效应和强度大小等一系列因素,因此对结构进行增量动力分析时,选取合适的地震动记录非常关键.根据本文算例结构的设计信息,并充分考虑地震随机性的

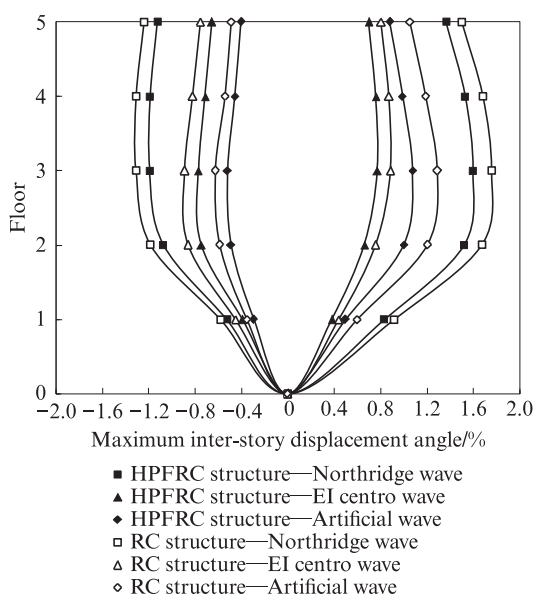


图2 8度设防烈度的罕遇地震作用下结构反应  
Fig. 2 Structure response under rare earthquake corresponding to 8 degree precautionary intensity



影响,本文采用FEMA P-695报告<sup>[11]</sup>推荐的22对,共44条远场地震动记录进行IDA分析,综合考虑了震级、震源、场地土剪切波速、峰值加速度等因素,具有一定的代表性.44条地震动记录对应的加速度反应谱如图3所示.

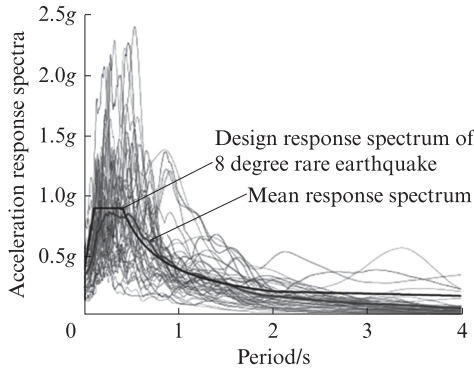


图3 44条地震动记录对应的加速度反应谱  
Fig. 3 Acceleration response spectra corresponding to 44 seismic records

### 3.3 地震动强度指标和工程需求参数的选取

基于IDA方法对结构进行抗震性能评估时,选取地震动强度指标和工程需求参数是重要步骤之一.目前,常用的地震动强度指标有:地面速度峰值PGV、地面加速度峰值PGA、结构弹性基本周期与5%阻尼比对应的反应谱加速度值( $S_a(T_1, 5\%)$ )等.Vamvatsikos等<sup>[9]</sup>对比分析了以PGA和 $S_a(T_1, 5\%)$ 分别作为地震动强度指标时的IDA曲线簇,结果表明,采用 $S_a(T_1, 5\%)$ 时的离散程度相对较小.因此,本文采用 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为地震动强度指标.

地震工程需求参数通常包括:破坏指数、最大基底剪力、顶点最大位移角、最大层间位移角、最大层间残余变形、耗能等,其从不同角度体现了在地震作用下建筑物的响应情况和损伤程度,该参数的选择取决于结构本身和分析用途.其中最大层间位移角能体现轴压比、剪跨比、混凝土强度等级、配筋率、配箍率、梁柱相对的强弱关系等对结构和构件延性的影响,并能够在一定程度上反映梁、柱以及节点的弹塑性变形,可见该参数能够综合反映结构的响应和损伤状况,因此本文选择最大层间位移角( $\theta_{max}$ )作为结构的工程需求参数.

### 3.4 IDA结果分析

IDA方法的实质是用经过调幅的地震动记录对结构进行一系列的动力弹塑性分析.为了更好地反映结构反应随地震动强度的变化,本文采用Hunt & Fill方法<sup>[12]</sup>进行地震动强度指标的调幅;对于倒塌点的判断,本文采用FEMA-350<sup>[13]</sup>建议的基于结构

IDA曲线的倒塌判别方法,即当结构切线刚度退化为初始弹性刚度的20%或者结构的最大层间位移角超过10%时,认为结构倒塌.基于以上分析,采用Perform-3D软件对HPFRC耗能墙-RC框架结构进行计算,得到的HPFRC耗能墙-RC框架结构的IDA曲线如图4所示.

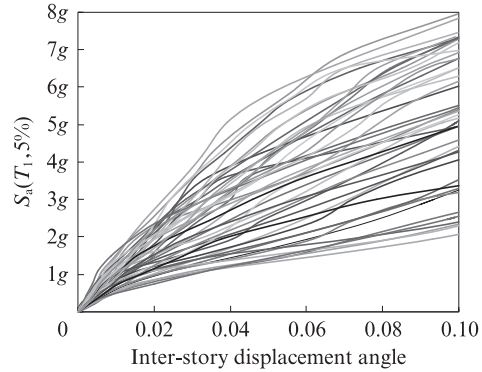


图4 HPFRC耗能墙-RC框架结构IDA曲线  
Fig. 4 IDA curves of HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure

在不同地震动作用下,由于仅考虑了 $S_a(T_1, 5\%)$ 这一地震动强度指标,因此IDA分析结果存在一定的离散性.为了在抗震性能评估过程中降低差异性,需要对IDA曲线进行后处理统计分析.文献[14-15]证明了假定结构IDA曲线服从对数正态分布是合理的,故在某IM值下,可求出不同EDP值的均值 $\mu_{EDP}$ 和对数标准差 $\sigma_{lnEDP}$ ,从而得到 $(\mu_{EDP}, IM)$ 、 $(\mu_{EDP}e^{\sigma_{lnEDP}}, IM)$ 、 $(\mu_{EDP}e^{-\sigma_{lnEDP}}, IM)$ 这3条曲线,它们分别表示50%、84%和16%分位曲线.其中:50%代表中值分位曲线,16%和84%分位曲线反映了用对数标准差来表示计算的离散程度.经统计分析得到的HPFRC耗能墙-RC框架结构的分位曲线如图5所示.

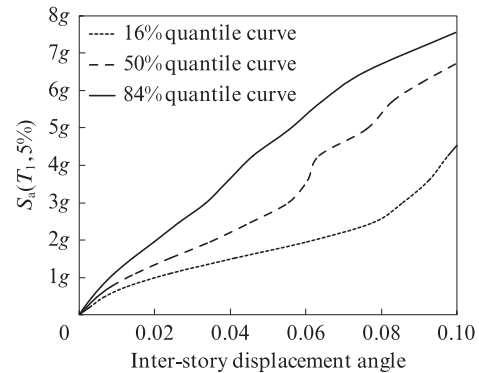


图5 HPFRC耗能墙-RC框架结构的分位曲线  
Fig. 5 Quantile curve of HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure

由图4、5可知:当谱加速度值较小时,IDA曲线比较平直,曲线斜率变化不大,表明此时结构处于弹性阶段,结构响应和地震动强度之间基本呈线性关系;当地震动强度增大时,部分IDA曲线出现一定的波动,IDA曲线簇逐渐变得离散,表明结构进入弹塑性阶段,结构响应和地震动强度之间呈现出非线性关系.根据对44条地震波所做的IDA分析,可得到在每条地震波作用下HPFRC耗能墙-RC框架结构达到倒塌极限状态时所对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ (结构弹性基本周期与5%阻尼比对应的反应谱加速度值),取44个 $S_a(T_1, 5\%)$ 的平均值,其值为1.024g,大于该结构在8度罕遇地震作用下结构基本周期所对应的谱加速度值0.536g(根据该结构的基本周期 $T_1$ 以及图3中8度设防烈度对应的罕遇地震设计反应谱曲线,可得该结构在8度罕遇地震作用下基本周期所对应的谱加速度为0.536g),表明HPFRC耗能墙-RC框架结构具有良好的抗倒塌能力.

#### 4 HPFRC耗能墙-RC框架结构易损性分析

地震易损性分析主要包括基于有限元的数值解析方法和基于震害资料及试验数据统计的经验方法等.本文采用有限元数值解析法对结构进行易损性分析.首先建立结构的有限元分析模型;然后选定地震动参数,对结构进行弹塑性分析;再选择结构反应参数,定义不同破坏状态的性能水平,确定结构在不同地震动强度下发生破坏状态的概率;最后根据结构发生破坏的概率进一步拟合地震易损性曲线,评估结构的抗震性能.地震易损性分析包括概率地震需求分析和概率抗震能力分析.

##### 4.1 概率地震需求分析

根据已有研究成果<sup>[16]</sup>,结构的工程需求参数EDP与地震动强度指标IM之间服从幂指数回归关系:

$$EDP = \alpha(IM)^\beta \quad (1)$$

对应于本文所选取的工程需求参数 $\theta_{max}$ 和地震动强度指标 $S_a(T_1, 5\%)$ ,对式(1)两边取对数,可得:

$$\ln \theta_{max} = \ln \alpha + \beta \ln S_a(T_1, 5\%) \quad (2)$$

基于IDA分析结果,对不同地震动强度下IDA曲线簇上的数据点进行对数线性拟合,如图6所示,得到结构的概率地震需求模型数学表达式为:

$$\ln \theta_{max} = -4.391 + 1.105 \ln S_a(T_1, 5\%), R^2 = 0.947 \quad (3)$$

##### 4.2 概率抗震能力分析

概率抗震能力分析即确定结构的能力参数,本

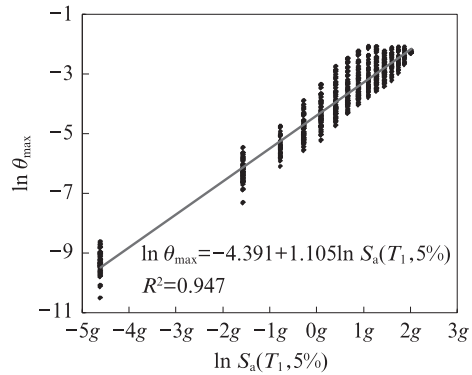


图6 线性回归曲线

Fig. 6 Linear regression curve

文将结构的极限状态划分为轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌4个等级.有2种方法可以确定不同极限状态所对应的概率抗震能力参数:一是采用随机有限元分析方法,考虑结构不确定性对结构抗震能力的影响;二是采用相关设计规范中规定的层间位移角限值 $\theta_c$ ,并基于经验假设抗震能力的对数标准差 $\beta_c$ .本文采用后者,根据FEMA-366的规定<sup>[17]</sup>,确定各极限状态及其对应的结构抗震能力参数,见表3.

表3 结构极限状态及其对应的结构抗震能力参数

Table 3 Limit state of structure and its corresponding seismic capacity parameters

Capability parameter	Limit state			
	Slight damage	Medium damage	Serious damage	Collapse
$\theta_c$	0.002	0.005	0.015	0.040
$\beta_c$	0.380	0.380	0.380	0.380

##### 4.3 结构易损性分析

假定结构在地震作用下的地震需求 $D$ 和结构抗力 $C$ 均服从对数正态分布,可进一步推导出结构在不同性能水平下的超越概率 $P_f$ <sup>[18]</sup>:

$$P_f = \Phi \left( \frac{\ln(\theta_{max}/\theta_c)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right) \quad (4)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; $\beta_d$ 和 $\beta_c$ 分别为结构需求参数和结构能力参数的对数标准差,可根据统计结果计算得到,也可根据易损性曲线参数由FEMA 350取值,当易损性曲线以结构弹性基本周期与5%阻尼比对应的反应谱加速度值 $S_a(T_1, 5\%)$ 为自变量时, $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$ 取0.4<sup>[19]</sup>.

将式(3)代入式(4),可得到结构在不同性能水平下的超越概率 $P_f$ 为:

$$P_f = \Phi \left( \frac{\ln(0.0124(S_a(T_1, 5\%))^{1.105}/\theta_c)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right) \quad (5)$$

根据式(5)及表3,绘制出不同性能水平下HPFRC耗能墙-RC框架结构的易损性曲线,如图7所示.

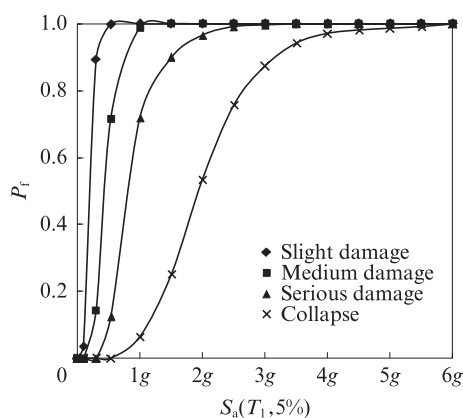


图7 HPFRC耗能墙-RC框架结构易损性曲线  
Fig. 7 Fragility curves of HPFRC energy dissipation wall-RC frame structure

根据结构地震易损性曲线,HPFRC耗能墙-RC框架结构在轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌性能水平下的超越概率分别为99.79%、78.57%、12.36%和0.03%。根据CECS 392:2014《建筑结构抗倒塌设计规范》建议,当在设防烈度对应的罕遇地震作用下结构倒塌概率小于5%时,即可认为结构达到抗倒塌性能的要求。由此说明,HPFRC耗能墙-RC框架结构能够满足大震作用下的抗震设防要求,具有较好的抗倒塌能力。

## 5 结论

(1)在8度设防烈度对应的罕遇地震作用下,与RC框架结构相比,HPFRC耗能墙-RC框架结构的层间位移角较小,其在地震作用下的损伤程度较轻,可见设置HPFRC耗能墙可以提高RC框架结构的抗震性能。

(2)结构达到倒塌极限状态时,由44条地震波计算出的对应于结构基本周期的反应谱加速度平均值大于8度设防烈度对应的罕遇地震作用下结构基本周期所对应的谱加速度值,表明HPFRC耗能墙-RC框架结构具有良好的抗倒塌能力。

(3)在8度设防烈度对应的罕遇地震作用下,HPFRC耗能墙-RC框架结构发生倒塌的超越概率为0.03%,满足大震作用下结构的抗震设防要求。

### 参考文献:

[1] LI V C, KANDA T. Engineered cementitious composites for

structural applications [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(2):66-69.

[2] LI V C. From micromechanics to structural engineering—The design of cementitious composites for civil engineering applications [J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 1993, 10(2):37-48.

[3] 梁兴文,杨鹏辉,何伟,等. 钢筋混凝土框架-纤维增强混凝土耗能墙结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(1):209-218. LIANG Xingwen, YANG Penghui, HE Wei, et al. Experimental study on aseismic behavior of reinforced concrete frame-energy dissipation walls made with high performance fiber reinforced concrete [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(1):209-218.(in Chinese)

[4] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79(1):13-27.

[5] 王焕芳. 箍筋约束ECC矩形截面短柱力学性能试验研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2017.

WANG Huanfang. Experimental study on the mechanical performance of ECC rectangular section short columns confined by stirrups [D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University, 2017.(in Chinese)

[6] 李艳. 高性能纤维增强水泥基复合材料力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.

LI Yan. Study on mechanical performance of high performance fiber reinforced cement composite [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.(in Chinese)

[7] 杨鹏辉. 纤维增强混凝土耗能墙-钢筋混凝土框架结构侧向力-位移计算模型及抗震性能评估[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.

YANG Penghui. Lateral force-displacement calculation model and seismic performance evaluation of HPFRC energy dissipation wall-RC frame [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.(in Chinese)

[8] BERTERO V V. Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments [M]. Prentice Hall: Englewood Cliffs NJ, 1977:211-215.

[9] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3):491-514.

[10] LEE T H, MOSALAM K M. Seismic demand sensitivity of reinforced concrete shear-wall building using FOSM method [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34(14):1719-1736.

[11] FEMA P-695. Quantification of building seismic performance factors (ATC-63Project Report) [R]. Washington, D C:Federal Emergency Management Agency, 2009.

[12] 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)

[13] FEMA. Recommended seismic design criteria for new steel

- moment-frame buildings, FEMA-350 [R]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [14] GHAFORY-ASHTIANY M, MOUSAVI M, AZARBAKHT A. Strong ground motion record selection for the reliable prediction of the mean seismic collapse capacity of a structure group [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011, 40(6):691-708.
- [15] BRADLEY B A, DHAKAL R P. Error estimation of closedform solution for annual rate of structural collapse [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37(15):1721-1737.
- [16] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [D]. Stanford:Stanford University, 1999.
- [17] FEMA. HAZUS 99 estimated annualized earthquake losses for the United States, FEMA-366[R]. Washington, D C:Federal Emergency Management Agency, 2001.
- [18] 昌继胜. 基于IDA的不同框架-剪力墙结构的抗震性能分析[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- CHANG Jisheng. The seismic performance analysis of the different frame-shear wall structure based on IDA [D]. Chongqing:Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [19] 黄超, 梁兴文. FRC框架结构地震风险评估的简化方法[J]. *工程力学*, 2017, 34(7):117-125.
- HUANG Chao, LIANG Xingwen. A simplified method for evaluating the seismic risk of FRC frame structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(7):117-125. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 234 页)

- [21] SHEN W G, ZHOU M K, ZHAO Q L. Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21:1480-1485.
- [22] SHEN W G, ZHOU M K, MA W, et al. Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164:99-104.
- [23] 林宗寿, 黄贇, 水中和. 过硫磷石膏矿渣水泥与混凝土[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2015.
- LIN Zongshou, HUANG Yun, SHUI Zhonghe. Excess-sulfate phosphogypsum slag cement and concrete[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2015. (in Chinese)