

适用于 RAC 框架结构的地震动强度指标研究*

侯红梅^{1,2}, 刘文锋¹, 陈冠君¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266033)

(2. 滨州学院建筑工程学院 滨州, 256600)

摘要 再生混凝土结构的合理地震动强度指标是预测和评价其抗震响应的映射判据。基于 3 种层数和 5 种再生骨料取代率的 15 个结构模型, 选取 120 条地震动记录进行时程分析, 综合考虑结构高度、再生骨料取代率、地震动震源机制和是否脉冲型地震动等因素的影响, 评估了 28 个地震动强度指标与 4 个关键工程需求参数的相关性、有效性和充分性。研究表明: 谱强度指标与工程需求参数之间具有较强的相关性; 基于结构高度和再生骨料取代率的变化, 不同地震动强度指标与工程需求参数相关性存在明显差异, 谱速度是与 4 个工程需求参数综合相关性最强的地震动强度指标; 再生骨料取代率、震源机制和是否脉冲型地震动都会影响相关性系数; 谱强度指标表征工程需求参数具有良好的有效性和充分性。

关键词 再生混凝土框架结构; 地震动强度指标; 工程需求参数; 相关性; 有效性; 充分性

中图分类号 TU375.4

引言

再生骨料混凝土 (recycled aggregate concrete, 简称 RAC) 是将废弃混凝土块经破碎、清洗和分级, 部分或全部代替天然骨料配制而成的混凝土。RAC 的使用和推广可应对建筑垃圾污染、天然骨料短缺和保护自然资源问题, 是实施可持续发展战略的有效途径。RAC 应用于实际工程结构, 其抗震性能是首要关注问题。在已有材料力学性能的基础上, 文献[1-3]对 RAC 构件的抗震性能进行了研究, 文献[4-9]对 RAC 结构的抗震性能进行了研究。通过合理的配合比设计, RAC 可达到设计强度要求, 具有良好的抗震性能, 已应用于工程承重结构。

合理的地震动强度指标 (intensity measure, 简称 IM) 能够反映地震动特性对结构地震响应的影响。IM 的选取除要考虑其与工程需求参数 (engineering demand parameter, 简称 EDP) 的相关性外, 还要考虑其有效性和充分性, 以保证 IM 的可信度。有效性分析可减小不同地震动记录的抗震响应的离散度; 充分性分析可减少或消除动力分析对所选 IM 未能反映的其他地震动特性的依赖^[10-11]。近年来, 针对混凝土结构的 IM 已有大量研究, 分别有针对框架结构^[12-15]、高层结构^[16-18]、超高层结构^[19-20]、隔震结构^[21-23]和网壳结构^[24-25], 但目前还缺乏基于再生混凝土框架结构材料

特征来进行地震动强度指标的研究。

RAC 框架结构与普通混凝土框架结构的抗震性能试验结果相比, 屈服前初始刚度和骨架曲线基本相同, 屈服后最大和极限承载能力变化明显, 且试验结果具有较明显的离散性, 因此有必要对适用于 RAC 框架结构的 IM 进行研究, 以更好地关联地震动与结构响应, 减小结构地震响应预测结果的离散性, 达到有效预测和评价结构抗震响应的目的。本研究基于 3 种层数 (4, 8 和 12 层) 的框架结构模型, 综合考虑 5 种再生骨料取代率 (0, 30%, 50%, 70% 和 100%)、4 种震源机制 (正断层、逆断层、走滑断层和逆斜断层) 以及是否脉冲型地震动的影响, 评估 28 个 IM 与 4 个 EDP 的相关性、有效性和充分性, 为 RAC 框架结构抗震设计和抗震性能评估提供参考。

1 结构模型与地震动记录的选取

1.1 结构模型

1.1.1 模型参数

不同的再生骨料取代率 r 会影响 RAC 的力学性能, 确定不同取代率 RAC 的本构关系是进行结构抗震性能分析的基础。基于中国《混凝土结构设计规范》, 对比分析大量试验研究成果, 笔者采用文

* 国家自然科学基金资助项目 (50878110)

收稿日期: 2020-06-14; 修回日期: 2020-10-20

献[26]提出的本构关系模型,应力-应变曲线方程为

$$f_c^r = \begin{cases} a\epsilon_0^r + (3-2a)\epsilon_0^{r^2} + (a-2)\epsilon_0^{r^3} & (0 \leq \epsilon_0^r < 1) \\ \frac{\epsilon_0^r}{b(\epsilon_0^r - 1)^2 + \epsilon_0^r} & (\epsilon_0^r \geq 1) \end{cases} \quad (1)$$

其中: f_c^r 为再生骨料取代率为 r 的RAC棱柱体抗压强度; ϵ_0^r 为再生骨料取代率为 r 的RAC峰值应变; a 、 b 为最小二乘法计算拟合得到的待定参数值。

经过统计回归,得到参数 a 、 b 与再生骨料取代率 r 的关系为

$$a = 2.2(0.748r^2 - 1.231r + 0.975) \quad (2)$$

$$b = 0.8(7.648 \times 3r + 1.142) \quad (3)$$

考虑5种再生骨料取代率,即 r 为0,30%,50%,70%和100%。 $r=0$ 时为普通混凝土。各再生骨料取代率下参数 a 和 b 的取值如表1所示。

表1 待定参数 a 和 b 的取值

r	0	30%	50%	70%	100%
a	2.20	1.32	1.26	1.15	1.04
b	0.80	3.30	3.96	4.31	7.50

除确定不同取代率下的RAC本构关系,还需确定弹性模量 E_c 、泊松比 ν_i 等性能指标。不同取代率下再生混凝土 E_c 和 ν_i 的计算式^[27]分别如式(4)、式(5)所示,计算结果见表2。

表2 不同取代率下再生混凝土弹性模量和泊松比取值

r	0	50%	70%	100%
$E_c/10^3\text{MPa}$	28.55	15.85	15.55	14.94
ν_i	0.210	0.195	0.189	0.180

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7f_{cu}} (0.271r + 1.065) \quad (4)$$

$$\nu_i = 0.21 - 0.0003r \quad (5)$$

1.1.2 模型的建立及验证

使用SAP2000建立三维框架结构模型(避免选取一榀建立模型而造成平面二维模型荷载简化计算与实际整体结构计算的差异)。综合考虑3种层数(4,8和12层)和5种再生骨料取代率(0,30%,50%,70%,100%),共计15个结构模型。模型均为三榀四跨规则框架结构,层高均为3.6m。抗震等级均为3级,基准再生混凝土强度为C30,箍筋强度等级为HRB335级,其他纵筋强度等级为HRB400级。抗震设防烈度均为8度(0.2g),设计地震分组为2组,Ⅱ类

场地。模型中使用三维框架单元模拟梁柱,使用膜单元模拟楼板,梁间荷载取6.0kN/m²替代填充墙。将软件中默认的铰属性指定给框架单元,梁两端指定主轴方向弯曲铰(M3),框架柱底部指定轴力和弯矩相互作用的耦合铰(P-M2-M3)。

文献[26]完成了5种再生骨料取代率再生混凝土的单轴受压应力-应变全曲线试验,研究了各取代率下再生混凝土的本构关系模型。将本研究模型应力-应变全曲线与文献[26]试验实测全曲线进行对比,两曲线吻合良好,证明了本研究模型材料力学性能模拟的合理性。对比了SAP2000所建结构模型与设计软件PKPM的设计分析结果,其几何尺寸、楼层荷载分布和振型模态信息均十分相近,验证了结构模型的合理性。

1.2 地震动记录的选取

从太平洋地震工程中心地震动记录库(pacific earthquake engineering research center-next generation attenuation,简称PEER-NGA)选取地震动记录,为减小场地类别对结构动力分析的影响,输入本研究结构模型所建场地的设计反应谱,设定搜索地震动的限制条件。

PEER-NGA系统共选出619条地震动记录,为最大程度地减小重合地震事件概率,从中选取120条地震动记录进行结构动力分析。震源机制类型和地震动有无脉冲都会对结构反应产生影响,有必要研究其对适用于RAC框架结构的地震动强度指标的影响。其中,脉冲型地震动记录20条,非脉冲型地震动记录100条,不同震源机制的地震动记录数量分布如表3所示。

表3 地震动记录的震源机制分布

震源机制	地震动记录数量
正断层(N)	17
逆断层(R)	41
走滑断层(SS)	28
逆斜断层(RO)	34

2 工程需求参数与地震动强度指标

2.1 工程需求参数

笔者主要研究地震作用下RAC框架结构的4个工程需求参数,分别为结构层间位移角最大值(maximum inter-story drift ratio,简称MIDR)、楼层

加速度最大值 (maximum floor acceleration, 简称 MFA)、楼层速度最大值 (maximum floor velocity, 简称 MFV) 和顶层位移最大值 (maximum roof displacement, 简称 MRD)。其中: MIDR 表示结构楼层的变形程度; MFA 表示结构楼层的受力程度; MFV 表示结构楼层的耗能程度, 三者是评价结构构件和非结构构件损伤状况的重要参数; MRD 表示结构整体倾覆程度, 是评价结构整体抗倾覆能力和结构整体损伤状况的重要参数。

2.2 地震动强度指标

笔者选取 28 个具有代表性的地震动强度指标作为研究对象, 根据地震动三要素特征, 将 28 个地震动强度指标分为 3 类^[13, 23, 25], 如表 4 所示。

表 4 地震动强度指标

Tab.4 Intensity indexes of ground motion

类型	名称	符号
幅值型	峰值加速度	PGA
	峰值速度	PGV
	峰值位移	PGD
	峰值速度与加速度比值	$R(V/A)$
	峰值位移与速度比值	$R(D/V)$
频谱特征型	加速度反应谱峰值	$S_{a \max}$
	速度反应谱峰值	$S_{v \max}$
	位移反应谱峰值	$S_{d \max}$
	基本周期加速度反应谱值	$S_a(T_1)$
	基本周期速度反应谱值	$S_v(T_1)$
	基本周期位移反应谱值	$S_d(T_1)$
	有效峰值加速度	EPA
	有效峰值速度	EPV
	有效峰值位移	EPD
	加速度谱强度	ASI
	速度谱强度	VSI
	位移谱强度	DSI
	持时特征型	持续最大加速度
持续最大速度		SMV
累积绝对速度		CAV
累积绝对位移		CAD
累积绝对动力		CAI
Arias 强度		I_A
比能量密度		SED
加速度均方根		a_{rms}
速度均方根		v_{rms}
位移均方根		d_{rms}
特征强度	I_c	

3 地震动强度指标的评价内容

3.1 相关性

相关性表示地震动强度指标与结构地震反应需求参数之间的关联程度。EDP 与 IM 满足幂指数回

归关系式^[17, 19]为

$$\hat{EDP} = a(IM)^b \quad (6)$$

其中: \hat{EDP} 为 EDP 的拟合值; a, b 为目标回归系数。

对式(6)两边同时取对数, 即可建立 \hat{EDP} 与 IM 在对数线性空间中的回归模型, 得到对数线性关系式为

$$\ln(\hat{EDP}) = \ln(a) + b \ln(IM) \quad (7)$$

因为拟合值 \hat{EDP} 与实际工程需求参数值 EDP 间存在残差, 则

$$\ln(EDP) = \ln(\hat{EDP}) + \ln \epsilon \quad (8)$$

其中: $\ln \epsilon$ 为残差项。

将第 i 条地震动的强度指标记为 IM_i , 将结构的第 i 条地震动时程分析所得工程需求参数记为 EDP_i , 获得离散数据点 $(\ln(IM_i), \ln(EDP_i))$ 。对 N 个离散点 $(\ln(IM_i), \ln(EDP_i))$ 进行回归分析, 用 Pearson 积矩相关系数 ρ 表示 $\ln(IM_i)$ 与 $\ln(EDP_i)$ 之间的关联程度, 研究两者之间的相关性, 得

$$\rho = \left| \frac{\text{cov}[\ln(IM_i), \ln(EDP_i)]}{\sqrt{D[\ln(IM_i)]} \sqrt{D[\ln(EDP_i)]}} \right| \quad (9)$$

其中: $\text{cov}[\ln(IM_i), \ln(EDP_i)]$ 为随机变量 $\ln(IM_i)$ 和 $\ln(EDP_i)$ 的协方差; $D[\ln(IM_i)]$ 和 $D[\ln(EDP_i)]$ 为随机变量 $\ln(IM_i)$ 和 $\ln(EDP_i)$ 的方差。

相关系数 ρ 越接近 1, 表明相关性越强。当 ρ 介于 0.8~1 时为强相关; 当 ρ 介于 0.4~0.8 时为中等强度相关; 当 $\rho < 0.4$ 时为弱相关。

3.2 有效性

因本研究基于未调幅的原始地震动记录, 可排除调幅因素对工程需求参数的影响, 只考虑不同地震动产生的随机误差。有效性可采用线性回归分析中的估计标准误差 e 来衡量, 是在某一 IM 下对 EDP 所满足的对数正态分布中的标准差进行无偏估计, e 值越小则有效性越好^[18, 25]。 e 的计算公式为

$$e = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [\ln(IM_i) - \hat{\ln(IM)}]^2} \quad (10)$$

其中: $\hat{\ln(IM)}$ 为按线性拟合表达式计算得到的地震动强度指标估计值。

3.3 充分性

相关性分析中, IM 与 EDP 满足式(7)和式(8), 可通过检验残差项 $\ln \epsilon$ 与震级 M 、震中距对数 $\ln R$ 的线性关系是否显著判定地震动强度指标的充分性。笔者采用 F 检验法进行线性关系的假设检验^[18], 给定

显著性水平阈值为5%,当对数线性回归获得的显著性水平 p 值小于5%时,二者线性关系显著,即可判断 IM 充分性较差;反之表明 IM 具有较好的充分性。

4 地震动强度指标分析

4.1 相关性分析

4.1.1 IM 与 EDP 相关性分析

计算获取 120 条地震动记录的 IM,对 15 个结构模型进行 120 条地震动记录下的时程分析获得各 EDP。以不同层数结构和不同再生骨料取代率分组,对 120 条地震动的 IM 与 EDP 进行相关性分析,获得各相关性系数 ρ 。地震动强度指标与工程需求参数的相关性系数范围如图 1 所示。

1) MIDR:7 个地震动强度指标与 MIDR 具有

强相关性,分别为 PGV, $S_{v,max}$, $S_a(T_1)$, $S_d(T_1)$, $S_v(T_1)$, VSI 和 SMV。其中, $S_a(T_1)$, $S_d(T_1)$ 与 MIDR 之间存在最强的相关性(相关性系数均大于 0.9)。此外,PGV, SMV, a_{rms} 与 MIDR 相关性系数范围上、下限值的差值分别为 0.016,0.017 和 0.010,表明结构高度和再生骨料取代率对 PGV, SMV, a_{rms} 与 MIDR 的相关性影响基本可以忽略。

2) MFA: 16 个地震动强度指标与 MFA 具有强相关性。其中, $S_v(T_1)$, EPA, IA, IC 与 MFA 之间存在最强的相关性(相关性系数均大于 0.9)。此外, $S_a(T_1)$, CAV, IA, IC 与 MFA 相关性系数范围上、下限值的差值分别为 0.012,0.011,0.014 和 0.008,表明各影响因素对 $S_a(T_1)$, CAV, IA, IC 与 MFA 的相关性影响基本可以忽略。

3) MFV: 3 个地震动强度指标与 MFV 具有强相关性,分别为 $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$ 和 $S_d(T_1)$,相关性

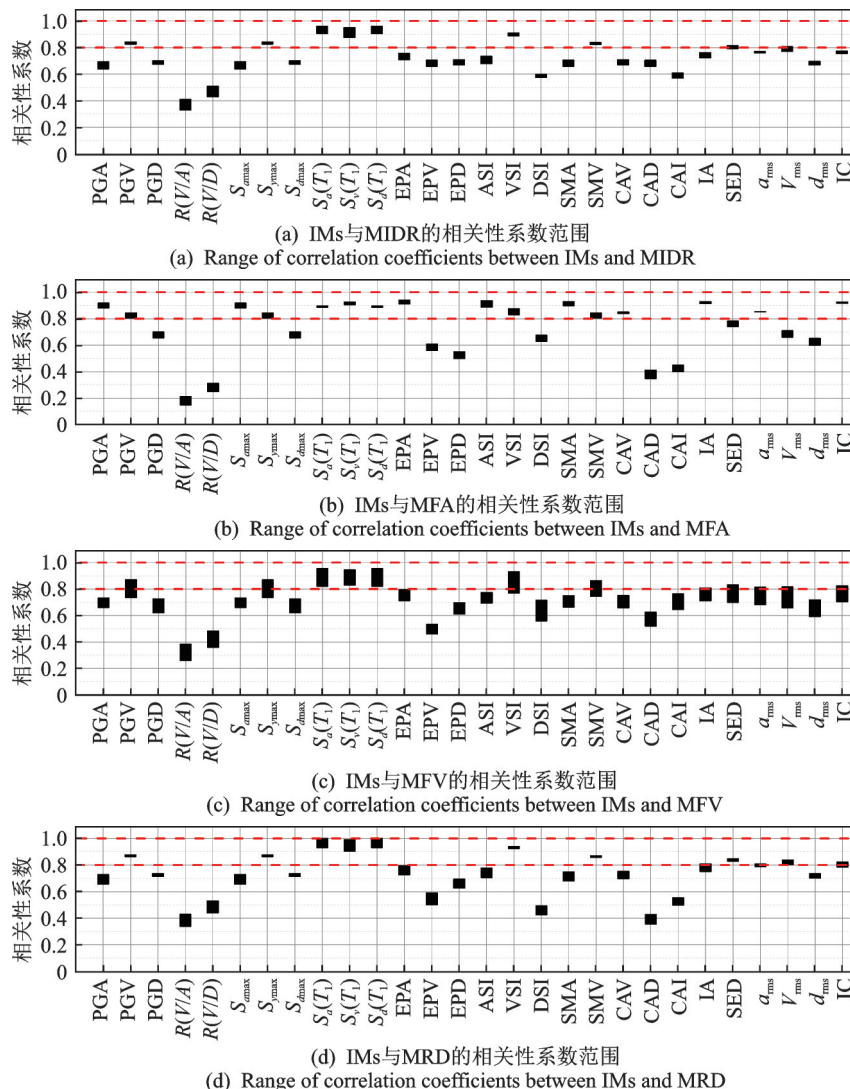


图 1 地震动强度指标与工程需求参数的相关性系数范围

Fig.1 Range of correlation coefficients between IMs and EDPs

系数均在0.8~1之间。各地震动强度指标与MFV的相关性系数取值范围均较大,表明各影响因素对地震动强度指标与MFV的相关性影响较明显。

4) MRD:9个地震动强度指标与MRD具有强相关性,分别为PGV, $S_{v\max}$, $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$, VSI, SMV, SED, V_{\max} 和 $S_d(T_1)$ 。其中, $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$, VSI与MRD之间存在最强的相关性(相关性系数均大于0.9)。此外,PGV, $S_{v\max}$, VSI, SMV, SED与MRD相关性系数范围上、下限值的差值分别为0.015, 0.014, 0.016, 0.011和0.018,表明各影响因素对PGV, $S_{v\max}$, VSI, SMV, SED与MRD的相关性影响基本可以忽略。

4.1.2 综合相关性最佳IM分析

不同再生骨料取代率的结构抗震设计均需要选取1个合适的地震动强度指标,该指标应该和各个反应结构损伤程度的关键工程需求参数均存在强相关性。优选相关性系数分析见表5,相关性较好的IM是PGV, $S_{v\max}$, $S_a(T_1)$, $S_d(T_1)$, $S_v(T_1)$, VSI和SMV,将这7种地震动强度指标与各工程需求参数的相关性系数 ρ 范围列于表5中,通过对比分析,可获得综合相关性最佳的地震动强度指标。

表5 优选相关性系数分析

Tab.5 Analysis of excellent correlation coefficients				
IM	MIDR	MFA	MFV	MRD
PGV	0.826~0.842 (0.016)	0.805~0.845 (0.040)	0.736~0.870 (0.133)	0.862~0.877 (0.015)
$S_{v\max}$	0.825~0.842 (0.017)	0.804~0.845 (0.041)	0.734~0.870 (0.136)	0.86~0.877 (0.014)
$S_a(T_1)$	0.905~0.960 (0.055)	0.887~0.898 (0.012)	0.821~0.955 (0.135)	0.930~0.999 (0.069)
$S_v(T_1)$	0.876~0.951 (0.075)	0.906~0.926 (0.020)	0.830~0.945 (0.115)	0.902~0.991 (0.089)
$S_d(T_1)$	0.905~0.960 (0.055)	0.886~0.897 (0.012)	0.821~0.955 (0.135)	0.930~0.999 (0.069)
VSI	0.887~0.910 (0.023)	0.829~0.877 (0.047)	0.769~0.931 (0.162)	0.924~0.939 (0.016)
SMV	0.822~0.839 (0.017)	0.806~0.845 (0.039)	0.745~0.863 (0.118)	0.858~0.869 (0.011)

括号中的数值为相关性系数范围上、下限值差值

从表5可以看出:PGV, $S_{v\max}$, VSI和SMV这4个速度相关型地震动强度指标与MIDR, MFA和MRD相关性范围均在0.8以上,但与MFV相关性范围有小于0.8的部分,且取值范围较离散;3个反应谱地震动强度指标 $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$ 和

$S_d(T_1)$ 与4个工程需求参数的相关性明显优越,其中 $S_a(T_1)$ 及 $S_d(T_1)$ 相比 $S_v(T_1)$ 与MIDR的相关性略强,但 $S_v(T_1)$ 相比 $S_a(T_1)$ 及 $S_d(T_1)$ 与MFA的相关性要强,相关性系数范围均大于0.9。综合考虑, $S_v(T_1)$ 与各工程需求参数均具有较好的相关性,是具有综合相关性最佳的地震动强度指标。

4.2 有效性分析

对120条地震动所得的各IM与EDP进行线性回归分析,综合考虑不同的结构高度和再生骨料取代率 r ,确定每一个估计标准误差 e ,各地震动强度指标与各工程需求参数标准误差 e 的范围见图2。

从图2可以看出:①估计MIDR时离散性较小的地震动强度指标为 $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$ 和VSI;②各地震动强度指标在估计MFA时离散性均较小,且 e 值范围上、下限差值非常小,说明结构高度和再生骨料取代率 r 对地震动强度指标有效性的影响可忽略;③估计MFV和MRD离散性小的地震动强度指标也较多,但图2(c,d)与图2(b)相比, e 值范围上、下限差值明显增大,说明结构高度、再生骨料取代率 r 对地震动强度指标有效性的影响较明显;④在估计4个关键工程需求参数的地震动强度指标中, $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$ 和 $S_d(T_1)$ 表现出良好的有效性,与4.1节分析结果比较,地震动强度指标与结构响应的相关性越强,则其有效性越好。

4.3 充分性分析

基于IM与EDP线性回归分析得到残差项 $\ln \epsilon$,分析 $\ln \epsilon$ 与震级 M 、震中距对数 $\ln R$ 的线性回归关系,统计不同IM与震级 M 、震中距对数 $\ln R$ 的显著性水平 p 值,如图3所示。

从图3可以看出,有8种地震动强度指标与震级 M 、震中距对数 $\ln R$ 的显著性水平 p 值小于显著性水平阈值0.05,不能满足充分性的要求。其中,PGA, $S_{a\max}$, $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$, ASI, VSI和 a_{\max} 与震级 M 、震中距对数 $\ln R$ 的显著性水平 p 值远大于0.05,表示在这些地震动强度指标下,工程需求参数与地震动事件参数震级 M 、震中距 R 等的线性关系弱,具有明显的相对独立性,说明这些地震动强度指标具有较好的充分性。

5 结论

1) 反应谱相关型地震动强度指标 $S_a(T_1)$,

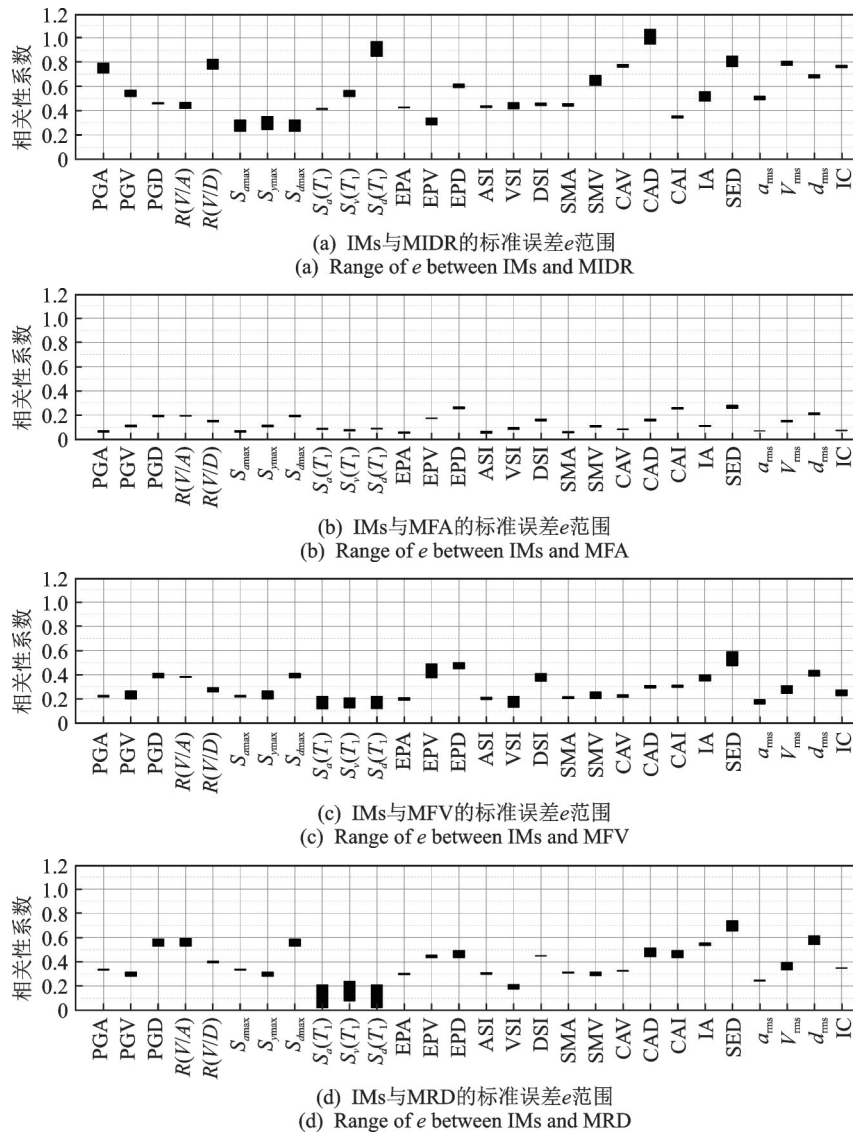


图 2 各地震动强度指标与各工程需求参数标准误差 e 的范围

Fig.2 Range of e between IMs and EDPs

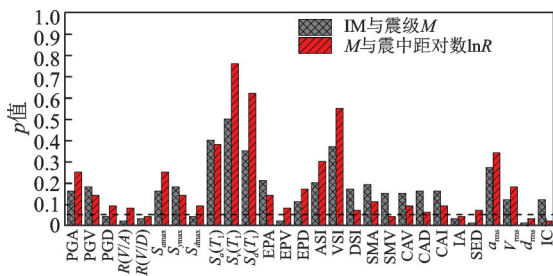


图 3 各地震动强度指标与震级 M 、震中距对数 $\ln R$ 的显著性水平 p 值

Fig.3 p -value for different intensity measures with respect to M and $\ln R$

$S_v(T_1)$ 和 $S_d(T_1)$ 与各工程需求参数表现出较强的相关性,其中: $S_a(T_1)$ 、 $S_d(T_1)$ 与MIDR相关性最强; $S_v(T_1)$ 、EPA、IA、IC与MFA相关性最强; $S_a(T_1)$ 、 $S_v(T_1)$ 、 $S_d(T_1)$ 与MFV相关性最强; $S_a(T_1)$ 、

$S_v(T_1)$ 、 $S_d(T_1)$ 、VSI与MRD相关性最强。因此, $S_a(T_1)$ 、 $S_v(T_1)$ 和 $S_d(T_1)$ 与结构地震反应之间有较高的关联程度。

2) 框架结构高度和再生骨料取代率 r 对不同地震动强度指标与不同工程需求参数相关性的影响差别较大,其中:PGV、 $S_{v\max}$ 、VSI、SMV、SED与MIDR的相关性影响基本可以忽略; $S_a(T_1)$ 、CAV、IA、IC与MFA的相关性影响基本可以忽略;PGV、 $S_{v\max}$ 、VSI、SMV、SED与MRD的相关性影响基本可以忽略;各IM与MFV的相关性影响较明显。在实际工程应用中,应具体参考结构高度和 r 的影响选取相关性较好的IM。

3) 反应谱相关型地震动强度指标 $S_a(T_1)$ 、 $S_v(T_1)$ 和 $S_d(T_1)$ 表现出良好的有效性和充分性。框架结构高度、再生骨料取代率 r 对地震动强度指

标估计MFA有效性的影响可忽略,但对地震动强度指标估计MIDR, MFV和MRD有效性的影响较明显。因此,选取地震动强度指标时,要根据不同结构反应类型考虑结构高度和 r 的影响,以减小抗震响应的离散度,消除动力分析对所选IM未能反映的其他地震动特性的依赖性。

参 考 文 献

- [1] 曹万林,郭晏利,乔崎云,等. 型钢再生混凝土高轴压比柱抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6):47-55.
CAO Wanlin, GUO Yanli, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled concrete columns with high axial compression ratio[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6):47-55. (in Chinese)
- [2] 郭宏超,郝波,刘云贺,等. 钢框架装配式再生混凝土墙结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(1):172-181.
GUO Hongchao, HAO Bo, LIU Yunhe, et al. Experimental study on seismic behavior of steel frame with fabricated recycled concrete wall[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(1):172-181. (in Chinese)
- [3] 陈宗平,张向冈,薛建阳,等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能与影响因素分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6):129-137.
CHEN Zongping, ZHANG Xianggang, XUE Jianyang, et al. Analysis on aseismic performance and influence factors of recycled concrete filled circular steel-tube columns[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6):129-137. (in Chinese)
- [4] 肖建庄,胡博,王春晖. 高层再生混凝土框剪结构动力弹塑性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):633-642.
XIAO Jianzhuang, HU Bo, WANG Chunhui. Dynamic elastic-plastic analysis on high-rise recycled aggregate concrete frame-shear wall structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(5):633-642. (in Chinese)
- [5] 陈宗平,张向冈,薛建阳,等. 钢管再生混凝土柱-钢筋再生混凝土梁框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10):22-31.
CHEN Zongping, ZHANG Xianggang, XUE Jianyang, et al. Experimental study on seismic performance of recycled aggregate concrete filled steel tube column and reinforced recycled aggregate concrete beam frame[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10):22-31. (in Chinese)
- [6] 郭宏超,孙立建,刘云贺,等. 内填再生混凝土墙的柔性钢框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(7):103-112.
GUO Hongchao, SUN Lijian, LIU Yunhe, et al. Experimental research on seismic behavior of flexible steel frame with infilling recycled concrete wall[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(7):103-112. (in Chinese)
- [7] 肖建庄,王长青,丁陶. 再生混凝土框架结构抗震性能及其评价[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8):55-66.
XIAO Jianzhuang, WANG Changqing, DING Tao. Study and evaluation on the seismic performance of recycled aggregate concrete frame[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8):55-66. (in Chinese)
- [8] 吕西林,张翠强,周颖,等. 全再生混凝土框架抗震性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6):1932-1942.
LÜ Xilin, ZHANG Cuiqiang, ZHOU Ying, et al. Seismic performance of reinforced totally-recycled concrete frame[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6):1932-1942. (in Chinese)
- [9] 樊禹江,余滨杉,王社良. 再生混凝土框架结构地震作用下随机损伤与评估分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5):97-102.
FAN Yujiang, YU Binbin, WANG Sheliang. Random damage and evaluation analysis of recycled aggregate concrete frame structure under seismic load[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5):97-102. (in Chinese)
- [10] KATSANOS E I, SEXTOS A G, MANOLIS G D. Selection of earthquake ground motion records: a state-of-the-art review from a structural engineering perspective[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(4):157-169.
- [11] 韩建平,周伟,李慧. 基于汶川地震记录的地震动强度指标与中长周期SDOF体系最大响应相关性的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(10):185-196.
HAN Jianping, ZHOU Wei, LI Hui. Correlation between ground motion intensity indices and SDOF system responses with medium-to-long period based on the Wenchuan earthquake data[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(10):185-196. (in Chinese)
- [12] BOJORQUEZ E, IERVOLINO I, REYES-SALAZAR A, et al. Comparing vector-valued intensity measures for fragility analysis of steel frames in the case of narrow-band ground motions[J]. Engineering Structures, 2012, 45(9):472-480.
- [13] 陈健云,李静,韩进财,等. 地震动强度指标与框架结构响应的相关性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3):105-112, 144.

- CHEN Jianyun, LI Jing, HAN Jincai, et al. Correlation between ground motion intensity measures and seismic response of frame structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3):105-112,144. (in Chinese)
- [14] 刘亭亭,于晓辉,吕大刚.地震动多元强度参数主成分与结构损伤的相关性分析[J].工程力学,2018,35(8):122-129.
- LIU Tingting, YU Xiaohui, LÜ Dagang. Analysis of correlation between principal components of multivariate earthquake intensity measures and structural damage[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8):122-129. (in Chinese)
- [15] 刘亭亭,于晓辉,吕大刚.RC框架基于典型相关分析的地震动多元破坏势评估[J].土木工程学报,2019,52(1):27-36.
- LIU Tingting, YU Xiaohui, LÜ Dagang. Multivariate damage potential estimation of earthquake ground motions for RC frames based on canonical correlation analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1):27-36. (in Chinese)
- [16] ZHANG Y T, HE Z, LV W G, et al. A spectral-acceleration-based linear combination-type earthquake intensity measure for high-rise buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 22(8):1479-1508.
- [17] ZHANG Y T, HE Z, LU W G, et al. A spectral-acceleration-based linear combination-type earthquake intensity measure for high-rise buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 22(8):1479-1508.
- [18] 张艺欣,郑山锁,秦卿,等.适用于高层RC结构的谱加速度指标分析[J].工程力学,2017,34(10):149-157.
- ZHANG Yixin, ZHENG Shansuo, QIN Qing, et al. Analysis of spectra acceleration as an intensity measure adapted to RC high-rise buildings[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10):149-157. (in Chinese)
- [19] LU X, YE L P, LU X Z, et al. An improved ground motion intensity measure for super high-rise buildings[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6):1525-1533.
- [20] 卢啸,陆新征,叶列平,等.适用于超高层建筑的改进地震动强度指标[J].建筑结构学报,2014,35(2):15-21.
- LU Xiao, LU Xinzheng, YE Lieping, et al. Development of an improved ground motion intensity measure for super high-rise buildings[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2):15-21. (in Chinese)
- [21] MOLLAIOLI F, LUCCHINI A, CHENG Y, et al. Intensity measures for the seismic response prediction of base-isolated buildings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2013, 11(5):1841-1866.
- [22] 刘彦辉,谭平,周福霖,等.高层框架-剪力墙隔震结构地震响应研究[J].工程力学,2015,32(3):134-139,224.
- LIU Yanhui, TAN Ping, ZHOU Fulin, et al. Study of seismic response in isolated high-rise frame-shear wall structures during earthquakes[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3):134-139,224. (in Chinese)
- [23] 杨参天,解琳琳,李爱群,等.适用于高层隔震结构的地震动强度指标研究[J].工程力学,2018,35(8):21-29.
- YANG Cantian, XIE Linlin, LI Aiqun, et al. Intensity measures for seismically isolated tall buildings[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8):21-29. (in Chinese)
- [24] 范峰,李玉刚,洪汉平.基于Kiewitt-8型单层球面网壳的一维地震动强度参数研究[J].建筑结构学报,2012,33(12):72-78.
- FAN Feng, LI Yugang, HONG Hanping. Study on one-dimensional earthquake intensities for Kiewitt-8 single-layer reticulated domes[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12):72-78. (in Chinese)
- [25] 丁阳,田兴业,宗亮.基于三向敏感频率的单层球面网壳结构地震动强度参数分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):85-90.
- DING Yang, TIAN Xingye, ZONG Liang. Analysis on a ground motion intensity measure of single-layer reticulated domes based on three-dimensional sensitive frequencies[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9):85-90. (in Chinese)
- [26] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1445-1449
- XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11):1445-1449. (in Chinese)
- [27] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等.再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J].建筑材料学报,2013,16(1):24-32.
- CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):24-32. (in Chinese)

第一作者简介:侯红梅,女,1983年10月生,博士。主要研究方向为结构抗震。曾发表《基于反应谱的地震动备选库建构方法》(《振动与冲击》2019年第38卷第9期)等论文。

E-mail: houhm@qut.edu.cn

