

许立强.混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估[J].地震工程学报,2018,40(1):14-19.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.014

XU Liqiang.Evaluation of Earthquake Damage and Anti-destruction Ability of Concrete High-rise Building Structures[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):14-19.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.014

混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估^①

许立强

(武昌工学院土木工程学院,湖北 武汉 430065)

摘要:提出基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估方法,采用强度与延性法分析混凝土高层建筑构件强度和变形,以对强震作用下混凝土高层建筑结构性能实施准确描述。基于建筑性能以及多条地震波情况下高层建筑结构倒塌极限状态的分析规范,采用IDA方法设置建筑结构抗倒塌能力系数,并依据该系数获取基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估流程,实现建筑结构地震破坏抗毁能力的准确评估。实验结果说明,所提方法实现了混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力的准确评估。

关键词:混凝土;高层建筑;结构;地震破坏;抗毁能力;评估

中图分类号: TU375.401

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)01-0014-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.014

Evaluation of Earthquake Damage and Anti-destruction Ability of Concrete High-rise Building Structures

XU Liqiang

(College of Civil Engineering, Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430065, Hubei, China)

Abstract: In previous studies, evaluations of earthquake damage and anti-destruction ability of concrete high-rise buildings based on the static nonlinear evaluation method and structural damage assessment model do not consider the damage development of structures under an earthquake; thus, the evaluation results often differ from reality. Therefore, this paper proposes an evaluation method of earthquake damage and anti-destruction ability of concrete high-rise buildings based on component performance. By using the strength and ductility method, the performance of concrete high-rise buildings under strong earthquakes can be exactly described based on the strength and deformation of the building. Based on the structure performance and the analysis of the collapse limit state of high-rise buildings subjected to various seismic waves, the collapse resistant capacity ratio of structure is set up with the incremental dynamic analysis (IDA) method. According to the ratio, the evaluation process of earthquake damage and the anti-destruction ability of concrete high-rise buildings based on component performance can be obtained. The experimental results confirm that the proposed method can be used to exactly describe the earth-

① 收稿日期:2017-08-20

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2015256)

作者简介:许立强(1976—),男,山东临沂人,硕士,高级工程师,研究方向:结构工程、施工技术类。E-mail:309558918@qq.com。

quake damage and anti-destruction ability of concrete high-rise buildings.

Key words: concrete; high-rise building; structure; earthquake damage; anti-destruction ability; evaluation

0 引言

随着经济的快速发展,建筑领域得到了空前发展,特别是混凝土高层建筑量日益增加。为了确保人们生命和财产的安全性,对混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁性能实施准确评估具有重要应用意义^[1]。能力谱法以及性能法等基于静力非线性研究为依据的相关评估方法,通过结构的损伤破坏模型对建筑结构抗地震破坏能力实施评估。但这些方法对数值模拟要求较高,进行结构内力研究以及强度运算时未分析地震下结构的损伤发展,存在收敛性差以及评估结果偏差高等弊端^[2]。因此,本文提出基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估方法,以期实现混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力的准确评估。

1 混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估

1.1 基于强度和变形的楼层抗震能力评估

变形是结构强度以及刚度综合作用的结果,是评估混凝土高层建筑结构损伤的关键指标及抗震规范中基于楼层变形控制结构的总体性能。评估构件损伤的关键指标是梁柱构件层次以及截面转角变形,但结构体系会对它们产生较大的干扰^[3]。基于强度以及变形全面分析建筑结构抗震性能,即采用强度与延性法评估结构抗震性能,其采用调整楼层抗震性能的参数——变形^[4]。

强度与延性法的评估指标是楼层可抵抗的地震加速度 A_c ,同目标地震加速度实施对比分析建筑结构的抗震性能是否合理。混凝土高层建筑结构抗震性能表达式为:

$$A_c = A_g a_y F_u = A_y F_u \quad (1)$$

其中: A_g 为小震产生的地震加速度,其值基于场地属性和地震规范进行设置; a_y 和 F_u 分别为楼层地震加速度放大系数以及地震作用塑性系数。其中 a_y 的表达式为:

$$a_y = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i^{C_i} - V_{DL}^{C_i})}{\sum V_E^{C_i}} \quad (2)$$

其中:柱 C_i 的抗剪承载力是 $V_i^{C_i}$,因为综合分析抗弯以及节点破坏的干扰作用,则上标 C_i 用于描述柱的编号;重力荷载代表值情况下柱 C_i 受到的剪力是

$V_{DL}^{C_i}$,重力荷载代表值工况用 DL 描述;0.05g 地震情况下柱 C_i 受到的剪力是 $V_E^{C_i}$ 。

强度与延性法(SD)通过线性经静力研究获取小震情况下混凝土高层建筑结构的内力,依据建筑结构强度以及变形性能得到地震作用下混凝土高层建筑的抗毁情况,从而得到建筑结构的缺陷部分,为设置建筑结构加固策略提供可靠的分析依据^[5]。SD 法的流程是先分析小震情况下建筑结构内力,基于建筑梁、柱构件的强度以及变形性能对柱构件抗震性能实施修正,运算混凝土高层建筑结构可抵抗的地震加速度,并运算目标地震加速度,基于该加速度对对应混凝土高层建筑的抗毁能力实施评估^[6]。

SD 法对混凝土高层建筑梁、柱的不同破坏模式以及相邻梁、柱对目标柱承载力的干扰情况实施了全面分析。该过程是基于构件的安全存储系数完成的。建筑左梁以及右梁用 BL 和 BR 描述,建筑梁的编号是 B_i 。基于抗剪以及抗压的安全存储系数 a_{y1} 以及 a_{y2} ,采用较低值对构件最保守的破坏模式实施分析^[7],基于相邻梁的抗弯安全存储系数 a_{y3} ,对建筑梁失效的目标柱承载力的干扰实施分析。基于节点位置梁以及柱的总体安全存储系数 FB 以及 FC ,对强梁弱柱以及强柱弱梁的状态实施分析。综合上述分析内容,文章采用 $a = \min(a_{y1}, a_{y2}, a_{y3}, FB, FC)$ 对柱抗剪承载力实施修正,则有:

$$V_f = V_{DL} + \alpha V_E \quad (3)$$

$$a_{y3} = \frac{(M_y^{BL} - M_{DL}^{BL}) + (M_y^{BR} - M_{DL}^{BR})}{M_E^{BL} + M_E^{BR}} \quad (4)$$

$$FB = \frac{\sum_{i=1}^n (M_y^{B_i} - M_{DL}^{B_i})}{\sum M_E^{B_i}} \quad (5)$$

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^n (M_y^{C_i} - M_{DL}^{C_i})}{\sum M_E^{C_i}} \quad (6)$$

其中: α 用于描述折减系数;建筑构件的延性比是 R ;构件抗剪性能退化的起始点是 L ;构件屈服后剩下抗剪强度是 R 点;剪切以及弯曲下的构件真实性能点是 P ; V_{DL} 、 M_{DL} 分别用于描述地震重力情况下的高层建筑柱剪力、弯矩;在小震情况下建筑柱剪

力、弯矩以分别是 V_E 、 M_E ；如果建筑构件剪切、弯曲，则其内力达到性能点 V_y 、 M_y 。

SD 方法融合混凝土高层建筑梁以及柱构件强度运算同变形能力，梁以及柱构件破坏情况下的延性容量是 5.0 以及 3.0。变形对结构承载力的干扰内容是：基于性能点 P 分析构件强度同变形的耦合^[8]，获取梁、柱真实的延性 R_i ，综合分析相邻梁构件变形性能的干扰，将建筑构件延性比的加权平均

$$F_u = \begin{cases} R_a, & T \geq T_g \\ \sqrt{2R_a - 1} + (R_a - \sqrt{2R_a - 1}) \left(\frac{T - \frac{T_g - 0.1}{2} - 0.1}{\frac{T_g - 0.1}{2}} \right), & 0.1 + \frac{(T_g - 0.1)}{2} \leq T \leq T_g \\ \sqrt{2R_a - 1}, & 0.1 \leq T \leq 0.1 + \frac{(T_g - 0.1)}{2} \\ \sqrt{2R_a - 1} + (\sqrt{2R_a - 1} - 1) \frac{(T - 0.1)}{0.08}, & 0.02 \leq T \leq 0.1 \\ 1.0, & T \leq 0.02 \end{cases} \quad (7)$$

其中：容许延性容量是 R_a ；场地土特征周期以及结构自振周期分别是 T_g 以及 T 。

综合分析上述过程可得，SD 法强调了混凝土高层建筑的总体性，综合分析了建筑结构强度同内力的耦合、变形性能及其对承载力的价值度^[9]和梁损伤对柱承载力的干扰等方面内容，对强震作用下混凝土高层建筑结构性能实施准确描述，为后续基于建筑构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估提供了可靠的分析依据^[10]。

1.2 多条地震波作用下高层建筑结构倒塌极限状态的分析规范

地震动拥有任意性特征，震源、传播路径以及场地特性等因素均会对其产生干扰。多条地震波作用下，混凝土高层建筑结构的抗倒塌表达式为：

$$P_{\text{倒塌}} = n_{\text{倒塌}} / N < [P_{\text{倒塌}}] \quad (10)$$

式中： $P_{\text{倒塌}}$ 是混凝土高层建筑在 N 条地震波作用下实现倒塌极限状态的概率； $n_{\text{倒塌}}$ 描述的是高层建筑实现倒塌破坏的地震波数； $[P_{\text{倒塌}}]$ 指倒塌概率，其值通常基于工程经验进行设置^[11]，一般情况下设置成 10%。多条地震波作用下，若混凝土高层建筑结构倒塌频率比 $[P_{\text{倒塌}}]$ 高，则说明该建筑结构达到了倒塌极限。

1.3 基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估

1.3.1 量化指标

增量动力分析 (incremental dynamic analy-

当成总体建筑楼层的延性比 R ，用式 (7) 描述，将构件的强度储备当成权重，采用式 (9) 描述的地震作用系数分析其对建筑楼层承载力的价值度。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_i^{C_i} (V_i^{C_i} - V_{DL}^{C_i})}{\sum_{i=1}^n (V_i^{C_i} - V_{DL}^{C_i})} \quad (7)$$

$$R_a = 1 + \frac{(R - 1)}{2} \quad (8)$$

$$T \geq T_g \quad (9)$$

$$0.1 + \frac{(T_g - 0.1)}{2} \leq T \leq T_g$$

$$0.1 \leq T \leq 0.1 + \frac{(T_g - 0.1)}{2}$$

$$0.02 \leq T \leq 0.1$$

$$T \leq 0.02$$

sis, IDA) 是指输入逐渐提升的相关强度地震动记录，实现对混凝土高层建筑结构的弹塑性时程研究，获取结构在差异强度地震动情况下的状态^[12]。本文采用 IDA 方法设置建筑结构抗倒塌能力系数 R ，采用其对混凝土建筑结构抗地震破坏的抗毁性能实施评估，且有：

$$R = IM_c / IM_{MCE} \quad (11)$$

式中： IM_c 用于描述多条地震波作用下建筑结构未实现倒塌极限情况下承受的最高地震动强度； IM_{MCE} 为 2010 版《抗规》中高强度地震下的地震动强度。

如果 $R \geq 1$ ，则说明混凝土高层建筑结构在高强度地震情况下倒塌概率不高于 $[P_{\text{倒塌}}]$ ， R 值越高，说明高层建筑结构的抗倒塌性能越大^[13]；如果 $R < 1$ ，则说明高层建筑结构在高强度地震情况下的倒塌概率高于 $[P_{\text{倒塌}}]$ ，结构的地震破坏抗毁性能差。

将地震动峰值加速度 a_{pg} 或建筑结构第 1 周期 T_1 的加速度反应谱值 $S_a(T_1)$ 当成地震动强度指标 IM 。

1.3.2 评估过程

基于倒塌极限状态分析规范以及倒塌性能系数 R ，获取基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估流程，并描述于图 1 中。

2 实验分析

实验基于 2010 版《抗规》设计一种钢筋混凝土框

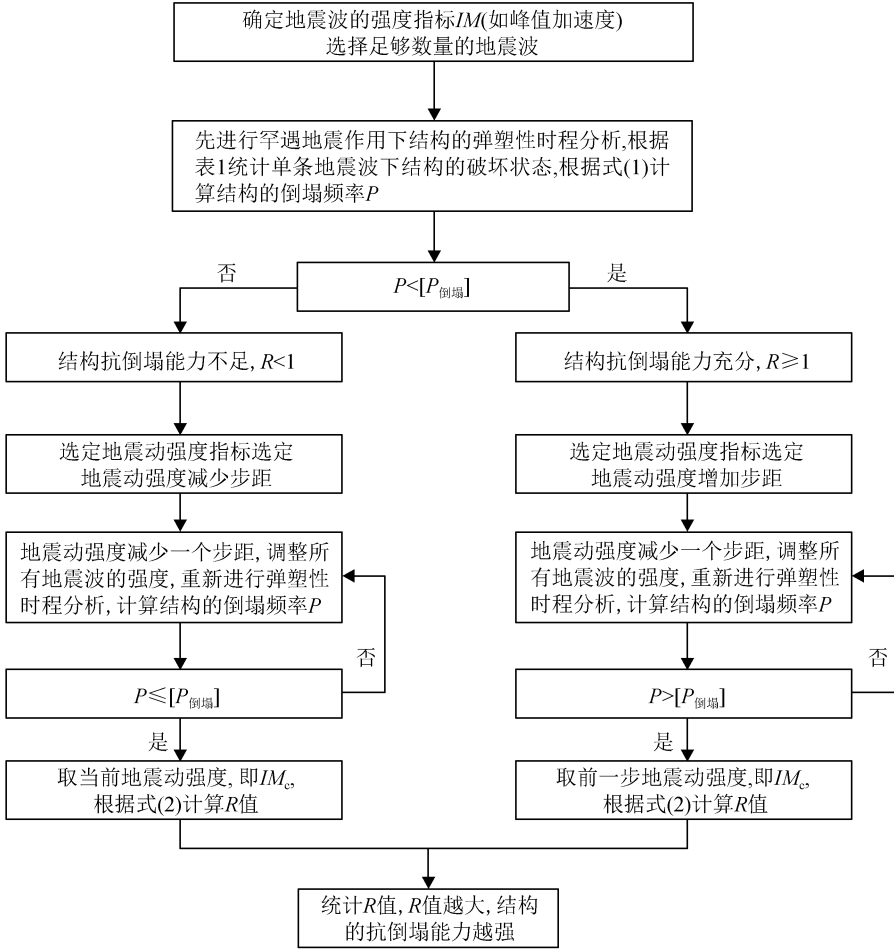


图 1 基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估流程

Fig.1 Evaluation process of earthquake damage and anti-destruction ability of concrete high-rise building structures based on component performance

架结构,采用本文方法对其实施地震破坏抗毁能力评估。

2.1 塑造 RC 框架结构

实验基于 2010 版《抗规》分析差异设防烈度、场地属性周期以及楼层高度,通过 PKPM 软件塑造 25 个钢筋混凝土框架结构,结构的主要参数如表 1 所列。该结构首层层高是 5 m,其他层层高是 4 m,通过“a-b-c”的方式对进该框架结构实施编号,其中设防烈度、结构楼层数以及场地特征周期分别用 a、b 以及 c 描述。

RC 框架结构内,柱以及板混凝土强度等级分别为 C35 以及 C30,纵筋以及箍筋分别是 HRB400 以及 HPB300。RC 柱顺着楼层波动截面。设置的基本风压是 0.33 kN/m²。楼面恒载规范值以及活载规范值都是 1.8 kN/m²,外墙以及内墙荷载规范值分别是 10 kN/m 以及 4 kN/m。修正模型确保其柱轴压比以及结构的弹性层剪位移角趋近规范阈

值^[14]。9 个 6 层混凝土框架结构设计用表 2 描述。

表 1 25 个框架结构关键参数

Table 1 Key parameters of 25 frame structure				
特征周期 T/s	7 度	7.5 度	8 度	结构高度 H/m
0.32	2 层	2 层	2 层	12
	5 层	5 层	5 层	22
	10 层	10 层	10 层	35
0.42	2 层	2 层	2 层	12
	5 层	5 层	5 层	22
	10 层	10 层	10 层	35
0.62	2 层	2 层	2 层	12
	5 层	5 层	5 层	22
	10 层	10 层	10 层	25

2.2 地震波的选取以及结构倒塌形态分析规范

各框架结构均选择 20 条地震波实施时程研究,采用高于 15 条天然波,如果天然波数量低于 20 条,则采用人工模拟地震波。实验基于地震烈度以及场地种类从美国太平洋地震工程研究中心的强震数据库内采集相关天然波,并对这些天然波实施运算,基

于 2010 版《抗规》以及 2010 版《高规》对于地震波选取的规定,获取符合需求的天然波。要求从相同地震事件产生的地震波低于 2 条。双向以及单向地震

动作用下混凝土高层建筑的响应相差较高,实验基于 1 : 0.74 的比例,顺着结构的两个关键方向输入地震波。

表 2 6 层框架抗震弹性运算结果

Table 2 Aseismic calculation results of 6-story frame									
结构编号	抗震等级	限值	最高值	限值	X 向	Y 向	1 阶(X 向)	2 阶(Y 向)	3 阶(扭转)
6-5-0.24	二	0.64	0.57		1/605	1/623	1.423 7	1.385 5	1.258 7
6.3-5-0.24	二	0.64	0.37		1/682	1/605	1.078 8	1.067 3	1.026 5
7-5-0.36	一	0.58	0.37		1/633	1/586	0.968 2	0.987 4	0.899 6
6-5-0.38	二	0.64	0.54		1/618	1/632	1.348 2	1.275 2	1.170 8
6.4-5-0.34	一	0.56	0.37	1/550	1/658	1/574	1.060 2	1.050 7	0.947 6
7-5-0.34	一	0.56	0.28		1/564	1/573	0.912 8	0.798 6	0.755 8
6-5-0.54	二	0.64	0.36		1/614	1/547	1.168 3	1.083 7	1.135 6
6.4-5-0.58	一	0.56	0.28		1/586	1/584	0.884 7	0.838 5	0.776 8
7-5-0.58	一	0.56	0.29		1/617	1/648	0.754 3	0.706 8	0.652 2

混凝土高层建筑的柱失效使得结构出现倒塌。柱是框结构的主要构件,如果柱失效,则说明框结构出现倒塌。实验设置多条地震波作用下高层建筑结构可考虑倒塌概率 $[P_{\text{倒塌}}]$ 的值是 5%。实验对 20 条地震波实施研究,若存在高于 2 条的地震波使得实验混凝土高层建筑得到倒塌极限,则说明该建筑结构不安全。实验要求若存在 2 条地震波确保混凝土高层建筑结构实现倒塌极限状态^[15],则说明该 2 条地震波存在于相同地震事件,说明建筑结构是安全的。

2.3 实验结果和分析

实验采用本文方法将峰值加速度当成地震动强度指标,对 25 个框架结构实施双向地震动输入的增量动力弹塑性时程研究,并获取其抗倒塌性能系数 R(表 3)。

分析表 3 可得,2 层以及 5 层混凝土高层建筑结构的 R 值都不低于 1,说明这两层框架结构符合“大震不倒”的需求。抗震等级为二级的 8 层框架结构的 R 取值区间是[0.3,0.7],说明结构在罕遇地震情况下的倒塌概率最高值比 5%大,结构不安全,需要提高建筑的抗震性能,进而抵抗 2010 版《抗规》中要求的罕遇地震强度的地震作用。抗震等级是一级的 8 层框架结构的 R 取值区间是[1.1,1.6],说明受到 1.1~1.6 倍 2010 版《抗规》中要求的罕遇地震强度地震干扰情况下,建筑结构是安全的,具有较高的抗毁性能。

综合分析上述实验结果可以得出,本文方法能够对实验塑造的 RC 框架建筑结构地震破坏抗毁能力实施有效评估。

4.4 对比分析结果

为了提高可比性,实验中将本文方法同 SCSCI

表 3 25 个框架结构的 R 值

Table 3 The R value of 25 frame structures				
结构编号	抗震等级	IM _{MCE} /gal	IM _C /gal	R
6-2-0.24	三	210	308	1.3
6.4-2-0.24	三	308	465	1.4
7-2-0.24	二	395	635	1.5
6-2-0.34	三	318	235	1.2
6.4-2-0.34	二	305	658	1.9
7-2-0.34	二	395	674	1.6
6-2-0.54	三	215	346	1.5
6.4-2-0.58	二	305	525	1.6
7-2-0.59	二	396	557	1.3
6-5-0.24	二	216	216	0.9
6.4-5-0.24	二	304	304	0.9
7-5-0.34	一	386	715	1.6
6.4-5-0.34	二	214	214	0.8
7-5-0.34	一	306	462	1.4
6-5-0.54	一	394	672	1.6
6.4-5-0.54	二	216	256	1.1
7-5-0.54	一	302	584	1.8
6-8-0.24	一	396	672	1.6
6.4-8-0.24	二	215	167	0.7
7-8-0.34	二	302	215	0.6
6.4-8-0.34	一	398	554	1.3
7-8-0.34	二	214	106	0.3
6-8-0.54	一	308	365	1.1
6.4-8-0.54	一	397	554	1.3
7-8-0.54	二	400	638	0.5

方法进行对比分析。两种方法选择相同的参数。设置本文方法的缺陷系数值是 1,梁、柱构件的最高延性比分别是 4.0 和 2.0。实验对某混凝土高层建筑实施现场监测。在实验中混凝土(C30)强度存在明显退化,采用的抗压强度规范值是 20.6 MPa,通过 SPESAB 软件对高层建筑结构的抗震性能实施评估。实验基于当前的抗震分析规范,分别采用上述两种方法对实验混凝土高层建筑的抗震性能实

施监测,结果如表 4 所列。基于有关标准,通过底部剪力法实现地震作用,设置实验高层建筑的自振周期是 1.76 s。

表 4 不同方法研究结果

Table 4 Research results of different methods					
楼层	本文方法 的楼层抗 震性能/g	SCSCI 方法 的楼层抗 震性能/g	小震 需求 /g	设防 地震 需求/g	大震 需求 /g
15	0.18	0.168	0.043	0.106	0.142
18	0.176	0.153	0.043	0.106	0.142
20	0.156	0.148	0.043	0.106	0.142
29	0.145	0.118	0.043	0.106	0.142
30	0.153	0.129	0.043	0.106	0.142

分析表 4 可得,两种方法下如果楼层最低抗震性能高于地震需求(小震 0.043g、设防地震 0.106g 以及大震 0.142g)的要求,说明不同方法下的高层建筑结构可抵抗对应的地震。分析该表还可得出,本文方法下的高层建筑结构对小震、设防地震以及大震的破坏具有较高的抗毁能力;SCSCI 方法下高层建筑的 15 层、18 层和 20 层对小震和设防地震破坏以及大震具有一定的抗毁能力,而第 29 层以及第 30 层的抗震性能(0.118g 以及 0.129g)不满足大震的需求(0.142g),说明 SCSCI 方法下的混凝土高层建筑结构对大震破坏抗毁能力较差。

3 结论

本文提出基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估方法,采用强度与延性法综合分析建筑结构强度同内力的耦合、变形性能以及其对承载力的价值度,对强震作用下混凝土高层建筑结构性能实施准确描述,进而采用基于构件性能的混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估方法,实现对建筑结构地震破坏抗毁能力的准确评估。

参考文献(References)

[1] 王鹏,吕西林,杨梓,等.钢筋混凝土框架—核心筒结构模拟地震倒塌试验研究[J].结构工程师,2014,30(1):122-129.
WANG Peng, LÜ Xilin, YANG Zi, et al. Shaking Table Test Study of Earthquake Collapse of a Reinforced Concrete Frame-Core Tube Structure[J]. Structural Engineers, 2014, 30(1): 122-129.

[2] 吕西林,姜淳,蒋欢军.超高层建筑结构 benchmark 模型的地震损伤分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):1-7.
LÜ Xilin, JIANG Chun, JIANG Huanjun. Seismic Damage Analysis of a Benchmark Model for Mega-tall Buildings[J].

Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 1-7.

[3] 王长青,肖建庄,孙振平.现浇再生混凝土框架模型结构地震损伤评估[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(2):167-174.
WANG Changqing, XIAO Jianzhuang, SUN Zhenping, Seismic Damage Assessment on Cast-in-situ Recycled Aggregate Concrete Frame Model Structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(2): 167-174.

[4] 郑晋阳,马克俭,魏艳辉,等.超高层装配式正交斜放空间网钢格盒式筒中筒混合结构在不同场地特征周期下的地震响应[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(6):83-88.
ZHENG Jinyang, MA Kejian, WEI Yanhui, et al. The Seismic Response of the Assembly Integral Spatial Steel Grid "Tube-in-Tube" Cassette Super High-rise Structures in Different Characteristic Period[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2016, 33(6): 83-88.

[5] 舒林,谭继可,贾善坡.高层建筑结构抗震性能评估实例[J].建筑技术,2016,47(4):371-374.
SHU Lin, TAN Jike, JIA Shanpo. Seismic Performance Assessment of a High-rise Building Structure[J]. Architecture Technology, 2016, 47(4): 371-374.

[6] 何政,张昊强.超高层建筑结构竖向地震响应的谱单元分析[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(8):72-77.
HE Zheng, ZHANG Haoqiang. Spectrum Elements for Simulating Responses of Ultra High-rise Building Structures Excited by Vertical Component of Impulse-type Strong Earthquakes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(8): 72-77.

[7] 安东亚,汪大绥,周德源,等.高层建筑结构刚度退化与地震作用响应关系的理论分析[J].建筑结构学报,2014,35(4):155-161.
AN Dongya, WANG Dasui, ZHOU Deyuan, et al. Theoretical Analysis about Relationship between Seismic Response and Structural Stiffness Degradation of High-rise Building[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 155-161.

[8] 袁辉辉,唐艺航,吴庆雄,等.部分填充混凝土薄壁带肋箱型钢桥墩拟动力试验[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):504-511.
YUAN Huihui, TANG Yihang, WU Qingxiong, et al. Pseudo-dynamic Test Study of Partially Concrete-filled Steel Bridge Piers with Thin-walled Ribbed Box Sections[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(6): 504-511.

[9] UEBAYASHI H, NAGANO M, HIDA T, et al. Evaluation of the Structural Damage of High-rise Reinforced Concrete Buildings Using Ambient Vibrations Recorded Before and After Damage[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(2): 213-228.

[10] 樊禹江,余滨杉,熊二刚,等.T 形 RAC 短肢剪力墙抗震性能试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):317-324.

of Large Span Steel Structure[J].Journal of Building Structures,2014,35(4):49-56.

[10] KIM H S,WEE H H.Separation Strain for Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Building Using Applied Element Method[J].Advances in Structural Engineering,2016,19(3):437-448.

[11] 黄华,刘伯权,张彬彬,等.钢筋混凝土抗震框架连续倒塌行为分析[J].建筑科学与工程学报,2014,31(4):35-44.
HUANG Hua,LIU Boquan,ZHANG Binbin,et al.Analysis of Progressive Collapse Behavior of Earthquake-resistant Reinforced Concrete Frame[J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2014,31(4):35-44.

[12] 周媛,李付勇,王社良.钢筋混凝土框架抗连续倒塌的仿真分析[J].建筑科学与工程学报,2016,33(5):64-69.
ZHOU Yuan,LI Fuyong,WANG Sheliang.Simulation Analysis of Progressive Collapse of Reinforced Concrete Frames [J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2016,33(5):64-69.

[13] 丁柱,张立翔.强地震作用下混凝土重力坝响应特性分析[J].水利水电技术,2016,47(10):1-5.
DING Zhu,ZHANG Lixiang.Analysis on Response Characteristics of Gravity Dam under Strong Earthquake Effect[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(10):1-5.

[14] 吴韬,王浩,易苗苗,等.村镇建筑砌体结构的动力特性分析[J].地震工程学报,2016,38(6):877-882.
WU Tao,WANG Hao,YI Miaomiao,et al.Dynamic Characteristics of Masonry Structures in Villages and Towns[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(6):877-882.

[15] 何庆锋,刘义仁,周超,等.冲击作用下钢筋混凝土框架抗连续倒塌数值模拟[J].振动与冲击,2016,35(23):56-64.
HE Qingfeng,LIU Yiren,ZHOU Chao,et al.Numerical Simulation for Progressive Collapse of a Reinforced Concrete Frame under Impact Load [J].Journal of Vibration and Shock,2016,35(23):56-64.



(上接第 19 页)

FAN Yujiang,YU Binshan,XIONG Ergang,et al.Experimental Study on Seismic Performance of T-shaped RAC Short-leg Shear Walls[J].Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(4):317-324.

[11] 韩小雷,崔济东,季静,等.强震作用下基于构件性能的钢筋混凝土框架结构抗倒塌能力评估[J].建筑结构学报,2015,36(12):27-34.
HAN Xiaolei,CUI Jidong,JI Jing,et al.Research on Component-performance-based Collapse Resistant Capacity Evaluation of Reinforced Concrete Frame Structures Under Strong Earthquake Actions[J].Journal of Building Structures,2015,36(12):27-34.

[12] 陈海霞,李凯,洪学娣.钢筋混凝土框架结构抗震能力评估研究[J].工业技术与职业教育,2016,14(2):7-9.
CHEN Haixia,LI Kai,HONG Xuedi.Evaluation of Earthquake-Resistant Capability of Reinforced Concrete Frame Structure[J].Industrial Technology and Vocational Education,2016,14(2):7-9.

[13] 程艳秋,商效瑛,郑山锁,等.考虑结构与地震动双重不确定性的混凝土框架建筑地震易损性研究[J].工业建筑,2017,47(1):68-72.
CHENG Yanqiu,SHANG Xiaoyu,ZHENG Shansuo,et al.Vulnerability Analysis of RC Buildings Considering Double Uncertainty of Structure and Ground Motion[J].Industrial Construction,2017,47(1):68-72

[14] 蒋欢军,朱剑眉,陈前,等.超高层钢-混凝土混合结构地震损伤模型研究[J].振动与冲击,2014,33(4):77-83.
JIANG Huanjun,ZHU Jianmei,CHEN Qian,et al.Seismic-Damage Model for Steel-Concrete Composite Structure of Ultra-tall Buildings[J].Journal of Vibration and Shock,2014,33(4):77-83.

[15] 王文明,李宏男,王德斌,等.应变率对钢筋混凝土框架结构地震作用下灾变过程影响研究[J].振动与冲击,2014,33(1):130-136.
WANG Wenming,LI Hongnan,WANG Debin,et al.Effect of Strain Rate on the Failure Process of Reinforced Concrete Frame Structure Under Earthquake[J].Journal of Vibration and Shock,2014,33(1):130-136.