

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.03.009

# 巨子型有控结构体系基于失效路径的结构抗震性态研究

吴昊<sup>1</sup>, 王砚<sup>1</sup>, 张洵安<sup>2</sup>, 李迪钊<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 过往对巨子型有控结构体系抗震性能的研究往往使用层间位移角作为性能指标,这对具有很多冗余构件的复杂结构体系来说是不够的。本文对此进行改进,将层间位移角与结构失效路径相结合,提出了结构抗震性态这一概念,用以描述结构在遭受地震破坏时的状态。最后建立了巨子型有控结构体系三维有限元模型,利用本文提出的方法进行了抗震性态研究,从不同尺度分析了结构的破坏过程,其结果可为结构的抗震设计提供更加合理的建议。

**关键词:** 巨子型有控结构体系; 加权秩和比法; 失效路径; 抗震性态

**中图分类号:** TU311.3; TU352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2018)03-0304-05

## Research on structural seismic behavior of mega-sub controlled structural system based on failure path

WU Hao<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Xun'an<sup>2</sup>, LI Dizhao<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an university of technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering & Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In the past, the story drift was often used as a performance index for the study of the seismic performance of the mega-sub controlled structural system (MSCSS), which is not enough for a complex structural system with many redundant components. In this paper, the concept of the structure seismic behavior is proposed by combining story drift with structural failure path to describe the state of the structure in the case of earthquake damage. Finally, the three-dimensional finite element model of the MSCSS is set up, with the seismic behavior of the structure studied by the method proposed in this paper. The failure process of the structure is analyzed from different scales, which can provide more reasonable suggestions for the seismic design of the structure.

**Key words:** MSCSS; weighted rank sum ratio method; failure path; seismic behavior

巨子型有控结构体系(Mega-Sub Controlled Structural System,简称 MSCSS)是一种将 TMD 减震思想与结构构造相融合的新型结构体系,具有比传统巨型框架更优异的振动控制能力<sup>[1-2]</sup>。然而,过往对 MSCSS 的研究缺少对其地震破坏机理的阐述,因此有必要详细深入地研究 MSCSS 从构件损伤、损伤发展直至结构丧失承载力的整个过程。

刘锐等<sup>[3]</sup>采用首超破坏机制和以层间抗力为标准的结构破坏界限,得出了其在四类场地土以及不同地震水平下的失效概率。李涛等<sup>[4-5]</sup>通过概率密度演化算法对 MSCSS 进行了非平稳地震作用随机

动力分析,并对地震可靠度进行了计算。李祥秀等<sup>[6]</sup>考虑了近场和远场地震动的不确定性,以最大层间位移作为工程需求参数,研究了 MSCSS 的地震易损性。谭平等<sup>[7]</sup>利用遗传算法对子结构的物理参数进行优化,并通过比较主、子结构顶部地震响应的边际谱强度,验证了 MSCSS 地震控制的有效性。

过往这些研究大多以层间位移角作为变形的宏观指标,这能综合体现出一个楼层整体的变形情况,但不能反映结构在强震下构件失效的具体过程,因此仅通过层间位移角来准确描述结构抗震性能是不够的。许立强<sup>[8]</sup>采用强度与延性法分析混凝土高层

收稿日期: 2017-08-24

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JQ5062);陕西省教育厅自然科学基金专项资助项目(16JK1547)

作者简介: 吴昊,男,讲师,博士,研究方向为工程结构抗震及其振动控制。E-mail: wuhaonwpu@163.com

建筑构件的强度和变形,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。白国良等<sup>[9]</sup>对主厂房结构进行了研究,通过分析层间位移角和梁柱单元的失效过程,对该类结构的抗震加固及设计提出了建议。张耀庭等<sup>[10]</sup>以结构损伤指标为地震需求参数,对钢筋混凝土框架结构进行了易损性分析,并结合基于最大层间位移角的分析结果,探讨了结构基于损伤的抗震性能评估方法的可行性。

为了克服仅采用层间位移角作为抗震性能指标的不足,本文拟从宏观变形和局部损伤两方面入手展开研究:首先,通过加权秩和比法来获得 MSCSS 的失效路径——即塑性铰的发展过程,并将统计结果与层间位移角相结合,提出结构抗震性能的概念;然后,使用抗震性能这一概念对 MSCSS 的地震破坏过程进行了更加全面的描述,并以此为基础,对结构的抗震设计提出针对性的优化意见。

## 1 基于加权秩和比法的统计方法

秩和比法(Rank Sum Ratio,简称 RSR)是一种用于评估多项指标的统计方法,RSR 评估方法的基本思路是:根据评价工作的实际情况,构筑一个评价对象数量为  $n$ 、评价指标数量为  $m$  的  $n \times m$  维矩阵,利用矩阵中的各个元素(即秩)进行转换计算,求出一个无量纲的统计量  $\zeta_{\text{RSR}}$ ,并依据该值的大小对评价对象的优劣进行排序,从而对评价对象作出综合评价。第  $i$  个被评价对象的  $\zeta_{\text{RSR},i}$  为:

$$\zeta_{\text{RSR},i} = \frac{1}{n \times m} \sum_{j=1}^m R_{ij} \quad (1)$$

式中, $i=1,2,\dots,n$ ;  $j=1,2,\dots,m$ ;  $R_{ij}$  表示第  $i$  个被

评价对象对应于第  $j$  个评价指标下所获得的秩。

$\zeta_{\text{RSR}}$  是一个非参数统计量,具有  $0 \sim 1$  连续变量的特征, $\zeta_{\text{RSR}}$  值越大,表明对该评价对象的评价结果越好。在式(1)中,各个评价指标拥有相同的权重,这点体现在式中用  $1/m$  对评价指标做了平均处理,而当各个评价指标所占的权重不同时,引入权重系数对秩和比进行改进,该方法称为加权秩和比法(WRSR),其统计量为  $\zeta_{\text{WRSR}}$ ,由此,改进后第  $i$  个被评价对象的  $\zeta_{\text{WRSR},i}$  为:

$$\zeta_{\text{WRSR},i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m W_j R_{ij} \quad (2)$$

式中, $W_j$  表示第  $j$  个评价指标的权重系数,且有  $\sum_{j=1}^m W_j = 1$ 。

## 2 地震作用下巨子型有控结构体系塑性铰发展过程研究

利用有限元分析软件 SAP2000 建立 MSCSS 的钢结构三维模型,如图 1 所示,构件尺寸和构造形式参考文献[2]设置。其中上面三个巨层的子结构设置为调频子结构,每个子结构均为 7 层 4 跨框架。通过将有限元模型的模态分析结果与锤击法得到的实验结果进行比较发现,结构前 5 阶自振频率吻合度较高,误差很小,这也验证了本文建立有限元模型的可靠性。

SAP2000 中的塑性变形用塑性铰来模拟,塑性变形都发生在点铰内,铰的塑性变形是通过对塑性应变或塑性变形曲率在假定铰长上进行积分求得。对于梁单元,考虑弯矩屈服产生塑性铰,即定义为程序中的 M3 铰。

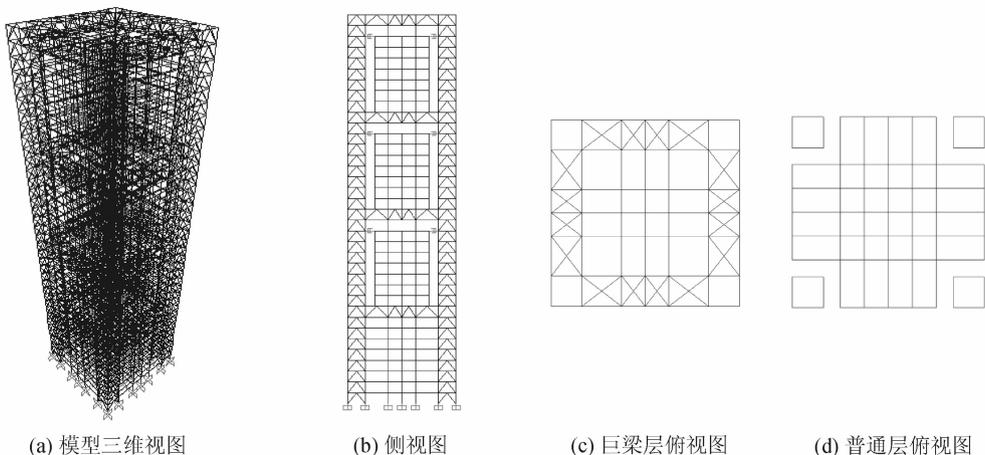


图 1 三维 MSCSS 模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D MSCSS model structure

在弹塑性时程分析中,采用以 El-Centro 南北向水平地震波为母波的 27 条人工地震波作为激励,

人工波编号从 E1-1 到 E1-27 进行设置。人工波的生成过程为:利用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang

Transformation, 简称 HHT) 提取母波非平稳功率谱, 然后通过非平稳地震波模型生成地震随机过程样本集合。生成的地震波样本在波形形状、时间和频率局部统计特性上均与母波符合良好<sup>[11]</sup>。其中

人工波加速度峰值取 200gal, 即模拟 8 度罕遇地震情况。为了简化分析过程, 本文只取塑性铰较多的最外侧一榀框架进行分析, 模型在部分地震波作用下塑性铰的发展情况如图 2 所示。

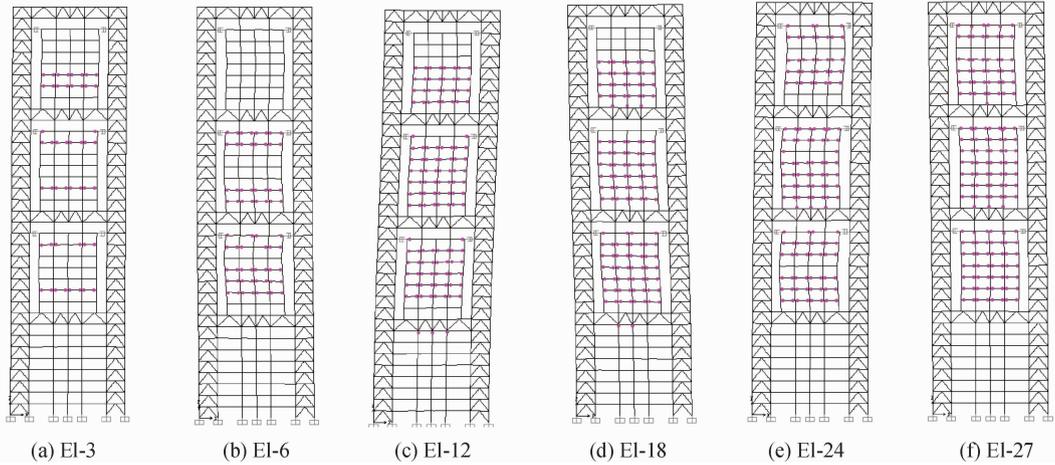


图 2 部分地震波作用工况下塑性铰分布情况

Fig. 2 Distribution of plastic hinge under partial seismic excitation conditions

通过对结果进行观察发现, 由于结构的对称性, 塑性铰总是左右对称出现在子结构梁上, 因此本文只对各子结构最外侧一榀框架的左边两跨梁进行研究。由于每个子结构都是 7 层 4 跨框架, 只研究左边两跨并且每根梁都只考虑左右两个端截面破坏的话, 每个子结构就是对 7 层 2 跨共 28 个端截面进行研究, 对这些端截面按从左往右、从下往上顺序进行编号, 因此第一调频子结构端截面编号从 1-1 到 1-28 进行设置, 第二、三调频子结构端截面编号分

别从 2-1 到 2-28、3-1 到 3-28 进行设置。

根据计算结果, 对每个截面在不同地震波作用下的屈服顺序进行编排, 同时采用截面屈服时的屈服加速度来体现不同地震波作用下的截面屈服状态。此时, 式(2)中的权重系数  $W_j$  表示某截面在第  $j$  条地震波作用下的屈服加速度与该截面在所有地震波作用下屈服加速度之和的比值。根据  $\zeta_{WRSR}$  的计算过程, 可得各截面的失效次序, 此处受篇幅所限, 仅列出第一子结构各截面的失效次序, 如表 1 所示。

表 1 第一子结构各截面  $\zeta_{WRSR}$  值计算结果及屈服顺序

Tab. 1 Calculation results of  $\zeta_{WRSR}$  values and yield order for each section of the first substructure

截面编号	平均相对次序数	屈服顺序	截面编号	平均相对次序数	屈服顺序	截面编号	平均相对次序数	屈服顺序
1-1	0.492 5	50	1-10	0.311 5	20	1-19	0.590 5	64
1-2	0.497 2	51	1-11	0.287 6	10	1-20	0.563 6	59
1-3	0.492 2	49	1-12	0.287 5	9	1-21	0.435 3	40
1-4	0.486 2	47	1-13	0.379 9	24	1-22	0.458 7	42
1-5	0.293 3	12	1-14	0.402 8	34	1-23	0.426 9	38
1-6	0.302 8	16	1-15	0.392 3	32	1-24	0.464 7	44
1-7	0.302 8	17	1-16	0.392 2	31	1-25	0.566 0	60
1-8	0.3038	18	1-17	0.490 6	48	1-28	0.588 2	63
1-9	0.2742	6	1-18	0.620 9	66			

### 3 结构抗震性态研究

#### 3.1 结构抗震性态的概念

结构抗震性态(简称结构性态)是指结构在地震作用下所展现的抗震性能与破坏状态, 采用结构性

能指标即各层弹塑性层间位移角与结构失效路径共同表示, 其数学表征为:

$$r = [[\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n]^T, [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m]^T] \quad (3)$$

式中,  $[\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n]^T$  为结构弹塑性层间位移角矢量, 其中  $\Delta_n$  为结构第  $n$  层弹塑性层间位移角, 由结

构在随机地震(多遇、设防、罕遇)各水平样本激励下的最大层间位移角统计分析得到; $[\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m]^T$ 为相应结构的灾变路径矢量,其中 $\delta_m$ 为第 $m$ 个失效构件的失效次序,可通过加权秩和比法计算获得。根据结构各自不同的情况,结构性能矢量可以扩充为:

$$r = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1m_1} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2m_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{k1} & \delta_{k2} & \dots & \delta_{km_k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $n$ 为楼层数; $\delta_{km_k}$ 表示在灾变路径矢量中所考察的第 $k$ 个楼层的第 $m_k$ 个截面的失效次序。当总楼层数跟失效路径所考察的楼层个数相同时, $k=n$ ;当各楼层考察的失效构件截面数相同时, $m_1=m_2=\dots=m_k=m$ 。因此结构性能矢量 $r$ 可写成 $n$ 行 $m+1$ 列的矩阵:

$$r = \begin{bmatrix} \Delta_1 & \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1m} \\ \Delta_2 & \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta_n & \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3.2 MSCSS 的结构抗震性能

首先针对结构的层间位移角进行统计分析,其中部分地震波工况下子结构各层的层间位移角如图3所示。

对27条地震波样本下各层间位移角取平均值,作为结构性能 $r$ 中的层间位移角矢量。计算所得各层层间位移角如图4和表2所示。

根据表2的统计结果并结合由加权秩和比法得到的MSCSS失效路径来构造性能矢量。由于所使用的计算模型有三个子结构,楼层总数较多,因此将三个子结构的性能矢量分开表示为 $r_1, r_2, r_3$ 。

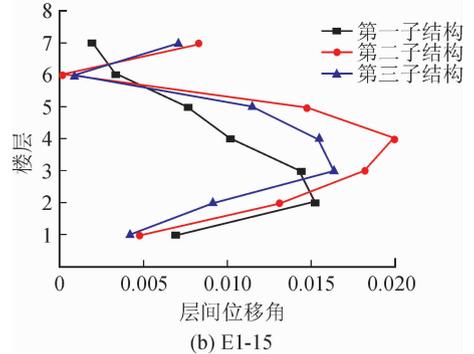
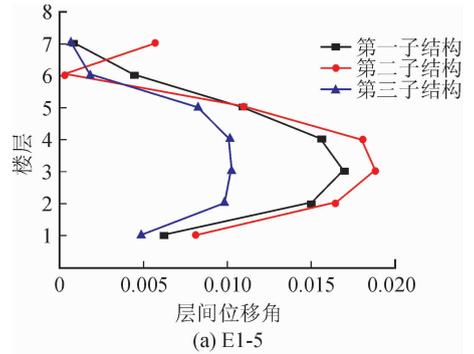


图3 部分地震波作用工况下子结构层间位移角  
Fig. 3 Story drift of substructure under partial seismic excitation conditions

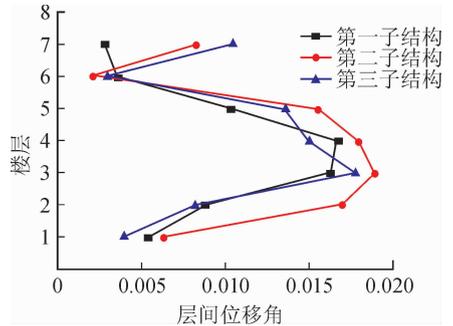


图4 子结构层间位移角统计值趋势图  
Fig. 4 Statistical trend diagram of story drift of substructure

表2 子结构层间位移角统计值  
Tab. 2 Statistical value of story drift of substructure

子结构	楼层数						
	1	2	3	4	5	6	7
第一子结构	0.005 30	0.008 71	0.017 23	0.016 67	0.010 30	0.003 54	0.002 74
第二子结构	0.006 27	0.016 91	0.018 86	0.017 87	0.015 48	0.002 08	0.008 21
第三子结构	0.003 93	0.008 15	0.017 69	0.014 97	0.013 54	0.002 96	0.010 43

$$r_1 = \begin{bmatrix} 0.005\ 30 & 50 & 51 & 49 & 47 \\ 0.008\ 71 & 12 & 16 & 17 & 18 \\ 0.017\ 23 & 6 & 20 & 10 & 9 \\ 0.016\ 67 & 24 & 34 & 32 & 31 \\ 0.010\ 30 & 48 & 66 & 64 & 59 \\ 0.003\ 54 & 40 & 42 & 38 & 44 \\ 0.002\ 74 & 60 & 0 & 0 & 63 \end{bmatrix}$$

$$r_2 = \begin{bmatrix} 0.006\ 27 & 43 & 45 & 39 & 30 \\ 0.016\ 91 & 1 & 4 & 3 & 2 \\ 0.018\ 86 & 7 & 13 & 11 & 8 \\ 0.017\ 87 & 25 & 35 & 27 & 26 \\ 0.015\ 48 & 37 & 56 & 58 & 57 \\ 0.002\ 08 & 21 & 22 & 36 & 41 \\ 0.008\ 21 & 52 & 0 & 0 & 61 \end{bmatrix}$$

$$r_3 = \begin{bmatrix} 0.003\ 93 & 68 & 67 & 65 & 62 \\ 0.008\ 15 & 5 & 19 & 14 & 15 \\ 0.017\ 69 & 23 & 33 & 28 & 29 \\ 0.014\ 97 & 46 & 53 & 55 & 54 \\ 0.013\ 54 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.002\ 96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.010\ 43 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对照式(5)中各元素的定义分析 MSCSS 的性态矢量  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ , 可得结论:

1) 通过比较发现, 第二子结构的层间位移角最大值以及平均值都要超过其它两个子结构, 因此第二子结构应当作为整个结构的重点设计对象;

2) 各子结构层间位移角较大的楼层均集中在 2~4 层, 因此这 3 个楼层应当重点设计;

3) 通过对性态矢量的对比分析可以看出, 每个子结构的构件失效都是从 2 层和 3 层开始的, 因此应当按照相应的权重对构件进行合理设计, 使结构在破坏时材料得到充分利用。

## 4 结 语

本文在传统的结构抗震设计指标基础之上, 着重研究了 MSCSS 在地震作用下的破坏过程, 利用加权秩和比法得出了一条具有统计意义的失效路径, 将失效路径的研究与建筑抗震设计中的层间位移角相结合, 提出结构抗震性态这一概念, 用以描述结构地震破坏时的状态, 并给出了结构性态的数学表征。

结构性态在结构抗震分析中的特点在于: 既能通过层间位移角展示出结构的薄弱楼层, 又能够通过失效路径中失效次序来确定各楼层的相对薄弱构件。结构性态从不同尺度分析了结构的破坏过程, 可以提供更为丰富的结构破坏信息, 其结果可为结构的抗震设计提供更加合理的建议。

### 参考文献:

- [1] LIAN Y D, ZHANG X A, SHELDON C. Damping characteristics of friction damped braced frame and its effectiveness in the mega-sub controlled structure system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 6(2): 171-181.
- [2] 蔡婷, 张洵安, 连业达, 等. 巨型有控结构体系模型设计及振动台试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 139-143.  
CAI Ting, ZHANG Xun'an, LIAN Yeda, et al. Research on model design and shaking table experiment of mega-sub controlled structure system [J]. Industrial Construction, 2016, 46(5): 139-143.
- [3] 邹玲, 张洵安, 刘锐. 巨-子型有控结构体系的抗震动力可靠度结构优化研究 [J]. 工程抗震与加固改造,

2011, 33(2): 16-21.

- ZOU Ling, ZHANG Xun'an, LIU Rui. Analysis of dynamic reliability and structure optimization for resisting seismic loading of mega-sub controlled structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(2): 16-21.
- [4] 李涛, 张洵安. 基于概率密度演化方法的随机 MSCSS 构造研究 [J]. 应用力学学报, 2011, 28(6): 576-582.  
LI Tao, ZHANG Xun'an. Research on the construction of the stochastic MSCSS based on the probability density evolutionary method [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(6): 576-582.
- [5] 李涛, 张洵安. 非平稳随机地震作用下 MSCSS 动力可靠性分析 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(6): 944-949.  
LI Tao, ZHANG Xun'an. Dynamic reliability analysis of MSCSS subjected to nonstationary random earthquake excitation [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(6): 944-949.
- [6] 李祥秀, 谭平, 刘良坤. 巨-子结构控制体系地震易损性分析 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 70-77.  
LI Xiangxiu, TAN Ping, LIU Liangkun. Seismic vulnerability analysis of mega-sub structure control system [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 70-77.
- [7] 谭平, 李祥秀, 刘良坤, 等. 巨-子结构控制体系的减震机理及性能分析 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 55-62.  
TAN Ping, LI Xiangxiu, LIU Liangkun, et al. Control mechanism and performance analysis of a mega-sub structure control system [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 55-62.
- [8] 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.  
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.
- [9] 单兵, 白国良, 牛帅. 基于 Pushover 方法框排架主厂房地震失效模式研究 [J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 203-209.  
SHAN Bing, BAI Guoliang, NIU Shuai. Pushover-based study on seismic failure modes of frame-bent structural main factory building [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 203-209.
- [10] 张耀庭, 杜晓菊, 杨力. RC 框架结构基于构件损伤的抗震性能评估研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 9-21.  
ZHANG Yaoting, DU Xiaoju, YANG Li. Research on seismic performance assessment based on component damage for RC frame structure [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(5): 9-21.
- [11] 吴昊, 张洵安. 基于 HHT 方法的非平稳人工地震动模拟 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 30-37.  
WU Hao, ZHANG Xun'an. Simulation of non-stationary artificial seismic ground motions based on HHT theory [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6): 30-37.