赵全斌,师煜,邹秋元,等.基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型设计[J].地震工程学报,2019,41(1);227-232.doi;10.3969/j.issn,1000-0844,2019,01.227

ZHAO Quanbin, SHI Yu, ZOU Qiuyuan, et al. Design of a BIM-based Model for Assessing the Degree of Building Damage after an Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1):227-232.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.227

基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型设计

赵全斌1,师 煜2,邹秋元2,王 成2

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 中交第四公路工程局有限公司, 北京 100022)

摘要:由于在变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型,是将建筑划分为五个状态水平,未研究建筑环境性能,评估结果误差较大。因此设计基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型,采用基于 BIM 的建筑环境研究与评估方法,考虑建筑环境性能,基于这个思路,依据混凝土单轴 Mazars 损伤模型,获取三轴状态中的损伤演化方程,得到应变大于损伤阈值时损伤演化方程增量形式,构建混凝土损伤评估模型。经实验证明,所设计模型在地震峰值加速度小于 0.31g 时,建筑结构大致无缺,在峰值加速度是 0.61g 时,建筑地震受损指数超过 0.8,建筑倒塌;所设计模型评估的平均误差低于 0.03,平均评估时间是 2.86 s,说明所设计模型能够有效评估建筑地震受损程度,且精度和效率较高。

关键词: BIM; 建筑; 地震受损程度; 评估模型; 建筑环境; 损伤演化方程

中图分类号: TP391.41

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0227-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.227

Design of a BIM-based Model for Assessing the Degree of Building Damage after an Earthquake

ZHAO Quanbin¹, SHI Yu², ZOU Qiuyuan², WANG Cheng²

(1.Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2.CCCC Fourth Highway Engineering Co., Ltd, Beijing 100022 China)

Abstract: While using the assessment model of the degree of earthquake damage to buildings based on deformation and accumulated energy consumption, the buildings were divided into five state levels, and the environmental performance of the buildings was not studied, resulting in large errors in the evaluation results. A building information modeling (BIM)-based assessment model was designed in this study for evaluating the degree of building damage after an earthquake. The BIM-based evaluation method of the building environment was used to study the environmental performances of buildings. On this basis, the damage evolution equation was obtained based on the Mazars damage model of concrete under the triaxial condition, and the increment equation of damage evolution was obtained when the strain was greater than the damage threshold. Further, the concrete damage assessment model was constructed. It has been experimentally proved that the building structure is generally intact when the peak acceleration of the earthquake is less than 0.31g; however, when the peak acceleration is 0.61g, the building earth-

收稿日期:2018-03-25

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2016JL006)

第一作者简介:赵全斌(1976一),男,山东德州人,博士,副教授,研究方向:复杂结构设计与 BIM 技术应用。

quake damage index exceeds 0.8, and the building collapses. The average error of the designed model was less than 0.03; the average evaluation time was 2.86 s, indicating that the designed model can effectively assess the degree of earthquake damage for a building and that the accuracy and efficiency are relatively high. **Keywords**: BIM; building; earthquake damage degree; evaluation model; building environment; damage evolution equation

0 引言

地震是严重危害人民生命财产安全的自然灾害,建筑物受地震影响后通常会产生各种程度的损伤,严重时会出现建筑结构整体倒塌^[1]。这些建筑损伤本质上是受建筑材料的微观损伤或建筑结构的整体损伤所影响的^[2]。因此,准确评估建筑材料受地震作用的受损程度成为准确评估建筑安全性能及灾后重建的主要问题。

当代社会,各国对地震造成的建筑损伤已非常 重视,各国的研究人员针对各国近代发生震害的现 场资料,研究导致建筑材料与结构受损的因素,并提 出了较多的建筑地震受损程度评估模型,但均存在 不同程度的问题,例如文献[3]对17个试件反复荷 载试验,设计基于变形和累积耗能的混凝土柱地震 受损程度评估模型,将混凝土柱划分为五个状态水 平,忽略了建筑环境研究,评估结果误差较大;文献 [4]通过引入组合系数设计了适用于 SRC 异形柱框 架节点地震受损程度评估的 Park-Ang 修正模型, 评估混凝土异形柱框架节点的地震损伤程度,此模 型只适用于异形建筑建构,实用性能较低;文献[5] 针对历次地震中破坏最为严重的砖混结构设计了废 墟救援安全评估模型,此模型没有考虑建筑物在正 常使用过程中出现的损伤,评估结果不准确;文献 [6]设计基于小波包脊的时变频率提取方法,在此基 础上依据结构频率的变化可计算出结构时变损伤指 标,并最终实现结构多维地震损伤评估,评估过程耗 时较长,结果呈现较为复杂。

针对上述文献中存在的问题,本文设计基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型,实现精准、快 速的建筑地震受损程度评估。

1 基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型

1.1 基于 BIM 的建筑环境研究与评估流程

在建筑设计过程中,研究建筑环境时需参考不同学科及设计阶段情况,并实施汇总,此时 BIM 模型的优势性能得以凸显。BIM 模型中包含建筑不同专业的设计内容,能够加快建筑环境研究的速度,对建筑设计人员的决策提供帮助,使设计结果更加

完善^[7]。当下多数的 BIM 软件都具有将模型数据信息以建筑研究的特有格式导出的功能,此功能获取的数据信息有助于建筑环境的研究计算和建筑评估^[8]。图 1 中描述的是基于 BIM 的建筑环境研究流程:构建 BIM 模型的基础是建筑设计方案,首先将 BIM 模型内的数据信息以特有的环境研究的格式导出^[9];其次使用专业建筑环境研究工具模拟研究导出的数据;然后依照研究结果调整建筑设计方案,以此实现建筑设计及评估的过程。

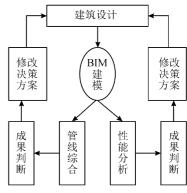


图 1 建筑环境研究工作流程

Fig.1 Workflow of building environment research

- (1) 构建 BIM 模型。BIM 模型作为建筑设计过程中不同指标研究的基础,依照设计方案内的建筑结构、材料、设备等不同参数在 BIM 软件内构建建筑三维信息化模型。在建筑有效使用周期内的不同阶段,建筑结构发生改变时,BIM 模型内空间数据、材料数据等信息在建筑有效使用周期内持续波动和集聚的信息也有所改变。
- (2)确定边界条件[10]。对建筑环境研究有所作用的条件即边界条件,包括建筑物距离、结构和附近气候等。建筑的环境性能同建筑所处地理区域的气候条件息息相关,故 BIM 模型依照建筑所处地理区域的气候信息,使用特定工具研究建筑所在地理区域的气候,获取的数据信息作为建筑环境性能研究的数据支持。
- (3) 研究建筑环境性能。利用数据转换,将 BIM 模型中的建筑环境性能信息以特有的格式导出,再将信息导入专门的研究软件内;通过专业研究 工具修正分析模型的局部,添加缺失的信息;汇总气

象信息、建筑最基本的边界条件,依照现实条件获取 初步的影响建筑环境较明显的条件[11];依照建筑所 在地理区域气候条件模拟研究建筑的采光、环境等。

(4) 呈现结果。通过三维模型,集成数据图、表等呈现基于 BIM 的建筑环境性能的研究结果,具有清晰、直观、形象等特点,同时建筑设计人员能够依照研究结果修改建筑设计方案[12],使设计更加完善。

基于 BIM 模型建筑环境性能研究的结果,构建建筑地震受损程度评估模型,实现不同建筑结构的地震受损程度评估。

1.2 建筑地震受损程度评估中混凝土损伤模型构建

混凝土是当下建筑中使用最为广泛的土木工程 建筑材料,因此通过建筑地震受损程度评估模型,评 估混凝土的地震受损程度。

式(1)~式(4)中描述的是混凝土单轴 Mazars 损伤模型,其中式(1)、(2)和式(3)、(4)分别描述单轴拉伸条件下和单轴压缩条件下建筑模型的损伤方程:

$$K_{t} = 0, \theta_{t} \leqslant \theta_{tf}$$

$$K_{t} = 1 - \frac{\theta_{tf}(1 - A_{t})}{\theta_{t}} - \frac{A_{t}}{\exp[B_{t}(\theta_{t} - \theta_{tf})]}, \theta_{t} \geqslant \theta_{tf}$$

$$(2)$$

$$K_{c} = 0, \theta^{*} \leqslant \theta_{cf}$$

$$K_{c} = 1 - \frac{\theta_{cf}(1 - A_{c})}{\theta^{*}} - \frac{A_{c}}{\exp[B_{c}(\theta^{*} - \theta_{cf})]}, \theta^{*} \geqslant \theta_{cf}$$

$$(3)$$

上述公式中, K_{ι} 表示受拉损伤变量, K_{c} 表示受压损伤变量; A_{ι} 和 B_{ι} 表示受拉条件下材料常数, A_{c} 和 B_{c} 表示受压条件下材料常数,材料常数通过试验获取; θ_{ι} 、 θ^{*} 、 $\theta_{\iota f}$ 和 $\theta_{c f}$ 分别表示单轴受拉应变、等效受压应变、单轴受拉损伤应变阈值和单轴受压损伤应变阈值,其中 $\theta^{*}=-\sqrt{2}\,\mu\theta_{1}$, μ 和 θ_{1} 分别表示混凝土 泊松比和最大受压主应力。

依据损伤面的定义,将上述混凝土单轴损伤模型扩展至三轴损伤模型^[18],通过式(5)和式(6)获取初始损伤面。

式(5) 描述的是符合岩石材料的双剪应变面:
$$P = \gamma_{13} + \gamma_{23} + \beta(\theta_{13} + \theta_{23}) = C, \gamma_{12} + \beta\theta_{12} \geqslant \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$
 (5)

式(6) 中描述的是符合混凝土材料的双剪应变面:

$$P' = \gamma_{13} + \gamma_{13} + \beta(\theta_{13} + \theta_{12}) = C, \gamma_{12} + \beta\theta_{12} < \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$
(6)

式(5)、(6)中: β 和C表示材料常数, β 通过混凝土的单轴拉应力-应变曲线获取,C通过混凝土的单轴

压应力- 应变曲线获取^[14]。 γ_{12} 、 γ_{23} 、 γ_{13} 表示三轴间受拉损伤应变力, θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} 表示三轴件受压主应力,其中:

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2} (\theta_1 - \theta_2), \gamma_{23} = \frac{1}{2} (\theta_2 - \theta_3), \gamma_{13} = \frac{1}{2} (\theta_1 - \theta_3)$$
(7)

$$\theta_{12} = \frac{1}{2} (\theta_1 + \theta_2), \theta_{23} = \frac{1}{2} (\theta_2 + \theta_3), \theta_{13} = \frac{1}{2} (\theta_1 + \theta_3)$$
(8)

$$\beta = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \frac{1-\alpha}{1+\alpha}, C = \frac{2(1+\mu)\theta_{tf}}{1+\alpha}, \alpha = \frac{\theta_{tf}}{\theta_{ef}}$$
(9)

其中: α 表示单轴损伤应变系数; θ_2 、 θ_3 表示其他两轴的最大受压主应力。

通过上述公式能够获取三轴状态中的损伤演化 方程为:

$$P < C, P \geqslant C,$$
 $K = 0$ (10)

$$K = 1 - \frac{C(1-A)}{P} - \frac{A}{\exp[B(P-C)]}$$

$$\gamma_{12} + \beta\theta_{12} \geqslant \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$
(11)

$$K = 1 - \frac{C(1-A)}{\exp[B(P'-C)]}$$
 (12)

$$\gamma_{\scriptscriptstyle 12} + \beta\theta_{\scriptscriptstyle 12} < \gamma_{\scriptscriptstyle 23} + \beta\theta_{\scriptscriptstyle 23}$$

在此基础上获取应变大于损伤阈值情况下的损伤演化方程的增量形式为^[15]:

$$kK = \left(\frac{C(1-A)}{P^2} - \frac{AB}{\exp[B(P-C)]}\right) kP,$$

$$\gamma_{12} + \beta\theta_{12} \geqslant \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$
(13)

$$kK = \left(\frac{C(1-A)}{P'^2} - \frac{AB}{\exp[B(P'-C)]}\right)kP',$$

$$\gamma_{12} + \beta\theta_{12} < \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$
(14)

式(13)、(14) 中:A、B 表示模型参数,k 表示增量因子,为别为: $A = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2$, $B = \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2$, $\alpha_3 = \alpha_4 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_1 + \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_3$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_3$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_2$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_3$, $\alpha_5 = \alpha_5 A_3$

$$1-\alpha_{\rm t}$$
, $\alpha_{\rm t}=\frac{\langle \theta_1 \rangle + \langle \theta_2 \rangle + \langle \theta_3 \rangle}{|\theta_1|+|\theta_2|+|\theta_3|}$,其中, $\alpha_{\rm c}$ 表示单轴受

压损伤应变系数, α_t 表示单轴受拉损伤应变系数, A_c 、 B_c 分别表示受压模型参数, A_t 、 B_t 分别表示受拉模型参数, $\langle \rangle$ 表示 Macaulay 括号。材料的损伤演化为等效应变大小所控制,当前的损伤程度对损伤速率有着复杂的影响。

根据上述过程能够获取混凝土损伤评估模型如式 $(15) \sim (18)$:

$$P < C, P \geqslant C,$$
 $K = 0$ (15)

加载条件:

$$kK = \left(\frac{C(1-A)}{P^{2}} - \frac{AB}{\exp[B(P-C)]}\right) kP,$$

$$\gamma_{12} + \beta\theta_{12} \geqslant \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$

$$kK = \left(\frac{C(1-A)}{P'^{2}} - \frac{AB}{\exp[B(P'-C)]}\right) kP',$$

$$\gamma_{12} + \beta\theta_{12} < \gamma_{23} + \beta\theta_{23}$$

$$(16)$$

$$kK = 0 (18)$$

2 实验分析

卸载条件:

实验为验证本文设计的基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型的有效性,以我国某地区某个固定建筑物为实验对象,分析该建筑在不同地震强度下的受损情况,使用本文方法与传统基于变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型两种方法与实际的受损情况进行对比,结果如图 2 所示。

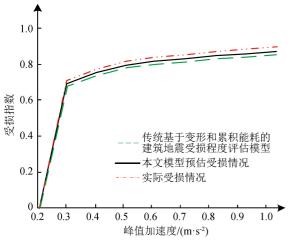


图 2 损伤指数与峰值加速度的变化关系 Fig. 2 Relationship between damage index and peak acceleration

分析图 2 能够得到,建筑受地震影响后,在峰值加速度小于 0.3 m/s² 的条件下,本文方法和传统基于变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型方法与实际受损情况基本一致,误差率接近于 0,建筑处于弹性工作状态,建筑结构大致无缺;峰值加速度逐步提升时,建筑顶部位移及弯矩也逐步增长,建筑顶部屈服产生塑性铰,建筑受损程度逐渐加剧,实际情况下峰值加速度达到 0.6 m/s² 时,建筑地震受损指数超过 0.8,建筑倒塌,本文提出方法在峰值加速度为 0.61 m/s² 的条件下,建筑地震受损指数超过 0.8,建筑倒塌。传统基于变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型在峰值加速度为 0.72 m/s² 的条件下,建筑地震受损指数超过 0.8,建筑倒塌。实验结果表明,使用本文模型能够有效分析建筑物的地震受损

程度,与实际受损情况基本相符,误差率较低。

实验为方便比较研究结果和测试本文模型的评估精度,在相同的实验环境中,分别采用基于变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型和本文模型评估实验对象的地震受损程度,并将不同模型获取的结果与实际结果相对比,结果如图 3 所示。

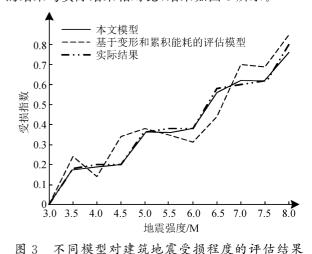


Fig.3 Assessment results of seismic damage degree of building by different models

分析图 3 能够得到,与传统基于变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型相比,本文模型对建筑地震受损程度评估结果与实际结果更为相近,平均误差低于 0.03,传统评估模型的平均误差为 0.12。实验结果表明,使用本文模型评估建筑地震受损程度的精度更高。

实验为验证本文模型的应用性,设置地震加速度为 0.32 m/s²,分别采用本文模型和传统基于变形和累积耗能的建筑地震受损程度评估模型评估 5 层均匀框架建筑(结构 1)、9 层偏心框架建筑(结构 2)、15 层均匀框架建筑(结构 3)和 4 层不完全对称框架建筑(结构 4)等 4 种建筑结构地震受损程度。不同建筑结构地震受损程度评价指标如表 1 所列,表 2 和表 3 分别描述不同模型对不同结构建筑地震受损程度评估的误差及时间。

表 1 不同建筑结构地震受损程度评价指标

Table 1 Evaluation indexes of earthquake damage degree for different building structures

建筑结 构序号	结构损伤指标					
	整体损伤 指数	最大层间 位移角	滞回能耗 循环次数	楼层能量 集中指数		
		,— IS 7.14	VH / V *//*	71. 1 147.		
结构 1	0.772	0.018	0.777 6	4.110		
结构 2	0.850	0.042	0.943 3	4.505		
结构3	0.751	0.024	0.922 1	5.223		
结构 4	0.715	0.016	0.867 4	4.127		

表 2 不同模型的受损程度评估误差

Table 2 Assessment error of damage degree of different models

地震加速度 - /(m·s ⁻²)	结构 1		结构 2		结构 3		结构 4	
	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型
0.2	0.062	0.017	-0.049	0.007	0.039	0.003	0.040	0.001
0.3	0.034	0.009	0.066	0.021	0.064	-0.008	0.052	-0.001
0.4	-0.091	0.004	0.072	-0.004	-0.057	0.010	0.077	0
0.5	-0.037	-0.011	-0.065	0	0.102	0.004	-0.060	0
0.6	0.113	-0.016	-0.069	0.010	-0.078	0	-0.041	0.004
0.7	-0.075	0.020	0.134	-0.013	-0.081	-0.007	-0.053	0.004
0.8	0.122	-0.022	0.093	0.016	0.119	0.021	0.110	-0.008

表 3 不同模型的受损程度评估时间(单位:s)

Table 3 Damage assessment time of different models (Unit; s)								
地震加速度 - /(m·s ⁻²)	结构 1		结构 2		结构 3		结构 4	
	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型	基于形变和累积 能耗的评估模型	本文 模型
0.2	7.93	1.86	9.37	2.04	11.24	2.59	8.24	2.00
0.3	8.42	2.41	9.28	2.37	11.37	2.47	7.90	2.68
0.4	9.61	2.06	9.66	3.06	12.00	2.90	7.97	2.22
0.5	8.77	2.63	10.45	3.37	12.96	3.22	8.09	2.93
0.6	9.46	2.52	9.93	3.40	13.55	3.04	8.41	3.01
0.7	9.83	2.94	11.22	3.22	12.66	3.66	8.66	2.99
0.8	10.24	3.30	11.21	3.97	13.80	3.98	8.90	3.26
平均值	9.18	2.53	10.16	3.06	12.51	3.12	8.31	2.73

分析表 2 可得,评估建筑结构 1 地震受损程度 时,基于变形和累积耗能的评估模型评估建筑地震 受损程度的误差在-0.091~0.122 之间,本文模型 评估建筑地震受损程度的误差在-0.022~0.020 之 间;评估建筑结构3地震受损程度时,基于变形和累 积耗能的评估模型评估建筑地震受损程度的误差在 -0.069~0.134之间,本文模型评估建筑地震受损 程度的误差在-0.013~0.021 之间:评估建筑结构 3 地震受损程度时,基于变形和累积耗能的评估模 型评估建筑地震受损程度的误差在-0.081~0.119 之间,本文模型评估建筑地震受损程度的误差在一 0.008~0.021 之间;评估建筑结构 4 地震受损程度 时,基于变形和累积耗能的评估模型评估建筑地震 受损程度的误差在-0.060~0.110之间,本文模型 评估建筑地震受损程度的误差在-0.008~0.004之 间。对比分析这些实验结果可得,使用本文模型评 估不同建筑结构地震受损程度的精度更高,实用性 更高。

分析表 3 能够得到,评估结构 1 的地震受损程 度时,本文模型所需的平均时间比基于变形和累积 耗能的评估模型低 9.18~2.53 s=6.65 s,同理可以 看出评估结构 2、3、4 的地震受损程度时,本文模型 所需的平均时间比基于变形和累积能耗的评估模型 分别低 7.1 s、9.39 s、5.58 s,对比分析这些数据可以 得出;本文模型对四种建筑结构地震受损程度评估 的平均时间是(2.53 s + 3.06 s + 3.12 s + 2.73 s)/4=2.86 s。使用本文模型评估建筑地震受损程度的 速度较快。

3 结论

当前抗震评估、加固以及能力设计中,建筑地震 受损程度评估方法的应用越来越广泛。传统建筑地 震受损程度评估模型已经无法满足当下的评估要 求,BIM 技术广泛应用于土木工程界[16],因此本文 设计基于 BIM 的建筑地震受损程度评估模型, BIM 模型中包含建筑不同专业的设计内容,能够加快建 筑环境研究的速度,对建筑设计人员的决策提供帮 助。通过三维模型,集成数据图、表等呈现基于 BIM 的建筑环境性能的研究结果,具有清晰、直观、 形象等特点,使设计结果更加完善。基于设计结果 调整建筑结构设计方案,提高建筑结构的抗震性能; 并构建混凝土损伤评估模型,实现对建筑地震受损 程度的有效评估。实验结果表明,使用本文模型能 够有效评估不同建筑结构的地震受损程度,平均误 差低于 0.03,平均评估时间为 2.86 s,实验结果表明 本文模型具有较高的精度、速度和实用性。

参考文献(References)

- [1] 赵士达,张楠,张斯文,等.基于 LM-BP 神经网络的地震直接经济损失快速评估方法研究[J].地震研究,2016,39(3):500-506. ZHAO Shida,ZHANG Nan,ZHANG Siwen,et al.Research on Rapid Evaluation Method of Earthquake Direct Economic Loss based on LM-BP Neural Network[J].Journal of Seismological Research,2016,39(3):500-506.
- [2] 汪小平,高伦浩,李桅,等.建筑结构地震损伤模型的研究进展 [J].四川建筑科学研究,2015,41(4):1-6. WANG Xiaoping,GAO Lunhao,LI Wei,et al.The Advances of Studies on Seismic Damage Model of Building Structures[J]. Sichuan Building Science,2015,41(4):1-6.
- [3] 马辉,郭婷婷,薛建阳,等.基于变形和累积耗能的型钢再生混凝土柱地震损伤模型研究[J].实验力学,2017,32(4):525-534. MA Hui,GUO Tingting,XUE Jianyang,et al.Study of Seismic Damage Model of Steel Reinforced Recycled Concrete Column Based on Deformation and Accumulated Energy Dissipation [J].Journal of Experimental Mechanics,2017,32(4):525-534.
- 凝土异形柱框架节点地震损伤研究[J].建筑结构学报,2015,36(8):90-98.

 CHEN Zongping, XU Jinjun, CHEN Yuliang, et al. Seismic Damage of SRC Special Shaped Column Frame Joints Based on Modified Park-Ang Model[J]. Journal of Building Structures, 2015,36(8):90-98.

[4] 陈宗平,徐金俊,陈宇良,等.基于修正 Park-Ang 模型的型钢混

- [5] 王东明,刘欢,李永佳.砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型研究[J].灾害学,2016,31(2):10-14.

 WANG Dongming, LIU Huan, LI Yongjia. Research on Security Evaluation BP Model of Brick-concrete Structure Ruins[J].

 Journal of Catastrophology, 2016, 31(2):10-14.
- [6] 何浩祥,陈奎,闫维明.基于小波包变换和时变频率的结构地震损伤评估[J].振动与冲击,2016,35(7);23-30.
 HE Haoxiang, CHEN Kui, YAN Weiming, et al. Structural Seismic Damage Assessment Based on Wavelet Packet Transformation and Time-varying Frequencies[J]. Journal of Vibration and Shock,2016,35(7);23-30.
- [7] 马少雄,李昌宁,徐宏,等.基于 BIM 技术的大跨度桥梁施工管理平台研发及应用[J].图学学报,2017,38(3):439-446.

 MA Shaoxiong, LI Changnin, XU Hong, et al. Research and Application of Construction Management Platform for Longspan Bridge on BIM-based Technology[J].Journal of Graphics, 2017,38(3):439-446.
- [8] 刘淼鑫,谭平,魏路.基于损伤性能并考虑主余震作用的消能减震结构抗震设计[J].地震研究,2015,38(3):480-48.

 LIU Miaoxin, TAN Ping, WEI Lu. Seismic Design on Energy Dissipation Structures under Major and Aftershocks Earthquakes Based on Damage Performance[J]. Journal of Seismological Research,2015,38(3):480-48.
- [9] 杨党辉,苏原,孙明.基于 BIM 技术的结构设计中的数据转换

问题分析[J].建筑科学,2015,31(3):31-36.

- YANG Danghui, SU Yuan, SUN Ming. Analysis of Data Exchange Issues in Structural Design Based on BIM[J]. Building Science, 2015, 31(3); 31-36.
- [10] 史华.基于复杂网络的建筑物强震下抗毁性估计模型[J].地震工程学报,2017,35(61):135-138.

 SHI Hua. Nvulnerability Estimation Model of Buildings with Complex Networks under Strong Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,35(61):135-138.
- [11] 黄树松,窦爰霞,王晓青,等.基于震后机载激光雷达点云的建筑物破坏特征分析[J].地震学报,2016,38(3):467-476.
 HUANG Shusong,DOU Aixia,WANG Xiaoqing,et al.Building Damage Feature Analyses Based on Post-earthquake Airborne LiDAR Data[J].Acta Seismologica Sinica,2016,38(3):467-476.

[12] 宋平,聂高众,邓砚,等.基于现场调查的地震灾害损失预评

- 估——以云南省德宏傣族景颇族自治州为例[J].地震地质, 2016,38(4):1148-1159. SONG Ping,NIE Gaozhong,DENG Yan,et al.Pre-assessment of Earthquake-induced Losses Based on Field Survey and Kilometer Grid Dataset: A Case Study from Dehong Dai-Jingpo Autonomous Prefecture[J].Seismology and Geology,2016,38 (4):1148-1159.
- 及其建筑受损情况调查[J].文物保护与考古科学,2016,28 (4):40-47.
 GONG Mengting, WEI Quan, FENG Pingli, et al. Survey on the Damaged Levels of the Movable Cultural Relics and Buildings During the 5·12 Wenchuan Earthquake in Sichuan Province[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(4):40-47.

[13] 巩梦婷,韦荃,冯萍莉,等.5·12汶川地震中四川可移动文物

[14] 陈豪,张万昌,邓财,等.基于 WEBGIS 的地震空间减灾信息 化平台建设研究[J].灾害学,2016,31(4):139-144. CHEN Hao,ZHANG Wanchang,DENG Cai, et al. Construction of Information Platform for Earthquake Disaster Mitigation Based on WEBGIS Study[J].Journal of Catastrophology, 2016,31(4):139-144.

[15] 杜家兵,陈衍鹏,梁满发.基于分布式实时调度策略的智能电

- 网控制系统的设计与实现[J].电子设计工程,2018,26(7): 119-122. DU Jiabing, CHEN Yanpeng, LIANG Manfa. Design and Implementation of Smart Grid Control System Based on Distributed Real-time Scheduling Strategy[J]. Electronic Design Engineering, 2018,26(7):119-122.
- [16] 孙潇.基于建筑信息模型技术的展览建筑过渡空间三维仿真系统设计[J].科学技术与工程,2018,18(22):216-221.
 SUN Xiao.Design of Three-dimensional Simulation System of Exhibition Building Transition Space Based on Building Information Modeling Technology[J].Science Technology and Engineering,2018,18(22):216-221.