

李辉,张俊发.中强地震下建筑结构动力弹塑性损伤模型研究[J].地震工程学报,2019,41(4):840-844.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.840

LI Hui,ZHANG Junfa.A Dynamic Elastoplastic Damage Model of Building Structures under Moderate and Strong Earthquakes [J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(4):840-844.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.840

# 中强地震下建筑结构动力弹塑性损伤模型研究

李 辉<sup>1</sup>, 张俊发<sup>2</sup>

(1. 陕西铁路工程职业技术学院建筑工程系, 陕西 渭南 714000;

2. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 抗震性能是建筑设计中的一项重要指标,需要对地震作用下的建筑结构动力弹塑性损伤情况进行分析。提出一种中强地震下建筑结构动力弹塑性损伤模型研究方法。从有效应力与 Cauchy 应力张量、建筑材料损伤演化方程等方面对弹塑性损伤模型基本原理进行分析,以此为理论基础,分析建筑材料应变率与建筑结构损伤能释放率的相关关系,通过 Bonora 损伤模型获取失效建筑材料损伤指数,并计算整体建筑结构构件损伤指数,以建筑材料损伤指数和建筑结构构件损伤指数为依据,完成中强地震下的建筑结构动力弹塑性损伤模型构建。利用实例进行分析,地震加速度值为 0.3g 的情况下,该模型的建筑结构相对位移时程曲线与实际位移曲线拟合度较高,且具有较好的建筑结构动力弹塑性损伤模拟精度,表明该模型具有一定的可行性。

**关键词:** 中强地震; 建筑结构; 动力弹塑性; 损伤指数; 材料; 构件

**中图分类号:** TU352

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)04-0840-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.840

## A Dynamic Elastoplastic Damage Model of Building Structures under Moderate and Strong Earthquakes

LI Hui<sup>1</sup>, ZHANG Junfa<sup>2</sup>

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

**Abstract:** The anti-seismic performance is an important index in building design; therefore, analyzing the elastoplastic damage of a building structure under earthquake is necessary. In this paper, an elastic-plastic damage model of building structures under moderate and strong earthquakes is proposed. The basic principle of the elastic-plastic damage model is analyzed from the aspects of the effective stress, the Cauchy stress tensor, and the damage evolution equation of building materials. Based on this, the relationship between the strain rate of the building material and the damage energy release rate of the structure is analyzed. The damage index of failure of a

**收稿日期:** 2018-10-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(51505376)

**第一作者简介:** 李 辉(1983-),男,陕西渭南人,硕士研究生,讲师,研究方向:工程结构抗震分析。E-mail:307506591@qq.com。

**通信作者:** 张俊发(1961-),男,陕西白水人,博士,教授,研究方向:工程结构抗震分析。E-mail:hanxifay@163.com。

building material is obtained through the Bonara damage model, and the damage index of the building structural component is calculated. On this basis, the dynamic-plastic damage model of the building structure under moderate and strong earthquakes is constructed. When the seismic acceleration value is  $0.3g$ , the relative displacement time history curve of the building structure is fitted with the actual displacement curve, and the dynamic elastic-plastic damage simulation accuracy of the building structure is good. The results show that the model is feasible to a certain extent.

**Keywords:** moderate and strong earthquake; building structure; dynamic elastoplasticity; damage index; material; component

## 0 引言

地震以及地震引发的次生灾害会给人们带来巨大的伤亡和损失。近些年我国多次发生地震灾害,根据土木工程师对建筑结构的震害评估数据统计可知,许多建筑物的设计不符合抗震性能要求,加剧了建筑物的破坏速度和破坏程度。建筑设计中,应充分保障建筑物的抗震性能,消耗地震作用下产生的地震能,至少应当满足“小震不坏”的要求<sup>[1]</sup>。在外力作用下,建筑结构会产生一定的塑性变形,通过对建筑结构在中强地震作用下的动力弹塑性分析,能够判定出该建筑结构的耗能性能和动力承载性能等,但在一些复杂的条件下,很难用通常的弹塑性模型对建筑结构进行分析,比如建筑结构的弹性模量这一指标,其计算值会随着结构的损伤逐步降低,因此需要引用损伤力学概念进行研究。由此可见,对建筑结构的动力弹塑性损伤模型进行研究具有重要意义<sup>[2]</sup>。

文献[3]在对建筑物弹塑性进行分析时,在建筑物的水平轴和平动方向施加地震作用,得出建筑结构的非线性响应数值,对其形变特征、剪力特征和弹塑性进行分析,给出定量评估结果,得出了建筑结构的薄弱部位;文献[4]结合损伤力学基本内容,建立混凝土三维弹塑性损伤模型,从塑性变形、等效力学特征和刚度特征等方面对该模型进行了验证分析;文献[5]根据岩土接触面非线性变形和损伤特征,提出一种考虑接触面损伤演变的弹塑性损伤模型,针对接触面张开、闭合以及形变特性,完成岩土接触面的弹塑性模拟研究,但模拟精度尚存在不足。针对上述存在的问题,提出了一种中强地震下建筑结构动力弹塑性损伤模型,给出建筑材料与建筑构件的损伤指数,完成动力弹塑性损伤模型构建,实验结果表明,该模型性能优越。

## 1 弹塑性损伤模型基本原理

### 1.1 有效应力与 Cauchy 应力张量分析

连续损伤力学相关理论表明,在受到外部压力或者地震力作用下,建筑材料内部会发生微弱裂缝或微空洞等缺陷,可归类为损伤变量,用  $s$  表示。具体来讲,就是当应力状态从拉转变为压时,建筑材料拉裂纹闭合,建筑刚度慢慢恢复,但是当应力状态从压转变为拉时,建筑材料会发生损伤<sup>[6-7]</sup>。假定损伤为各向同性,则 Cauchy 应力张量可表示为:

$$\alpha = (1 - s)\beta \quad (1)$$

式中: $\alpha$  表示 Cauchy 应力张量; $\beta$  表示在建筑材料截面上的作用力,即有效应力。

式(1)是在基于建筑刚度完全恢复的情况下得出的应力公式,但一般受压情况下认为建筑刚度不会发生完全恢复的状态,因此,需要引入刚度因子  $g$ ,弥补受压损伤对建筑刚度产生的影响以及上述 Cauchy 应力计算的不足,则修正后的 Cauchy 应力张量  $\alpha'$  可表示为:

$$\alpha' = (1 - gs)\beta \quad (2)$$

其中,刚度因子  $g$  可用下式进行表示:

$$g = \begin{cases} 0, & \beta = 0 \\ \lambda \frac{\sum_{i=1}^3 \beta}{\sum_{i=1}^3 |\beta|}, & \beta \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda$  表示比例系数,取值范围界定为 $[0,1]$ ,当  $\lambda$  取值 0 时,表示受压损伤对建筑刚度完全不会产生影响,当  $\lambda$  取值 1 时,表示受压损伤对建筑刚度产生的影响扩大至最大程度<sup>[8]</sup>。

有效应力  $\beta$  也是弹塑性损伤模型中的关键作用力之一,根据应变等价原理<sup>[9]</sup>,可得到有效应力  $\beta$  的具体表达式:

$$\beta = E\kappa = E(b - c) \quad (4)$$

式中: $E$ 表示弹性模量; $\kappa$ 表示弹性应变; $c$ 表示塑性应变; $b$ 表示总应变。

### 1.2 建筑材料损伤演化方程

建筑材料的损伤演化为不可逆转的形变过程,考虑到建筑材料可能具备的拉压异性特点,采用拉压损伤变量 $s^+$ 和 $s^-$ 对建筑材料损伤演化方程进行描述,受拉损伤变量为:

$$s^+ = 1 - A \frac{c_0^+}{f^+} \quad (5)$$

受压损伤变量 $s^-$ 为:

$$s^- = 1 - A \frac{c_0^-}{f^-} \quad (6)$$

式中: $A$ 表示建筑材料参数; $c_0^+$ 表示受拉损伤阈值初始值, $c_0^-$ 表示受压损伤阈值初始值; $f^+$ 为拉力等效应力, $f^-$ 为压力等效应力。

## 2 建筑结构中强地震下的动力弹塑性损伤模型

当前高层以及超高层建筑结构增多。我国相关法律规定,当建筑高度大于150 m时,应在设计过程中对其进行弹塑性形变检验;当建筑高度在150~200 m时,可根据建筑结构的振动特性对其选择性进行静力弹塑性或动力弹塑性分析。在实际操作过程中,静力弹塑性本身具有一定的不完整性,所以有必要对建筑结构的动力弹塑性进行分析<sup>[10-11]</sup>。在中强地震条件下,建筑结构不应当出现较为明显的弹塑性形变,整体建筑结构的弹性形变和位移应处在可控制的范围内。

为实现在地震作用下的建筑结构形变及位移控制,需研究建筑结构受震下的损伤状况,建筑设计及建筑结构控制提供基础依据。为此,提出了建筑结构在中强地震作用下的动力弹塑性损伤模型,对地震下的建筑结构损伤状况进行量化分析。在假定损伤为各向同性的基础上,若损伤主轴与损伤主应力和损伤能量方向一致,且Cauchy应力张量与建筑主轴的方向一致,则可以通过分析建筑结构各因素损伤指数来完成中强地震下的建筑结构动力弹塑性损伤模型构建。

对于建筑结构而言,建筑材料以及结构构件等相关因素都可能会对建筑结构的损伤能释放率产生影响<sup>[12-13]</sup>,那么对于应变率较小的建筑材料,在中强地震情况下,建筑结构处于损伤累积状态,可以采用损伤能释放率阈值 $c$ 对损伤状态进行描述。损伤能

释放率阈值 $c$ 的演化过程如下:

$$\phi = \left(\frac{G}{c}\right)^a = \left(\frac{D}{c-1}\right)^a \quad (7)$$

式中: $\phi$ 表示损伤能释放率阈值流动函数; $G$ 表示建筑结构状态方程; $D$ 为当前时刻的损伤能释放率阈值; $a$ 为常数。

损伤能释放率阈值 $c$ 与阈值因子 $\delta$ 的关系可表示为:

$$c = \frac{\delta}{\phi} \quad (8)$$

根据式(8)能够看出,当阈值因子 $\delta$ 无限趋近于无穷大时,损伤能释放率阈值 $c$ 将与流动函数 $\phi$ 逐渐接近,由此可知损伤能释放率与建筑材料的应变率之间关联性较小。然而当建筑材料失效时,面对中强地震情况,建筑结构必定会产生一定的损伤,可通过Bonora损伤模型来表示建筑结构材料损伤指数 $s_1$ ,用下式表示:

$$s_1 = \frac{vf}{\ln(\theta_1 - \theta_2)} \quad (9)$$

式中: $v$ 表示建筑材料参数; $f$ 表示关联损伤变量; $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别表示建筑材料失效时的等效塑性变化和损伤出现时的累积塑性变化。

按照建筑构件的位置、尺寸和相关参数等因素,对建筑结构进行分析,假设各建筑构件的抗震性能相同,则建筑结构第 $n$ 层第 $m$ 个构件的损伤指数 $s_2$ 可表示为:

$$s_2 = \max_{nm} \quad (10)$$

式中: $s_{nm}$ 表示第 $n$ 层第 $m$ 个构件的损伤参量值。

由于各建筑构件之间采用串联的方式进行连接,则建筑构件损伤总指数 $s'_2$ 可用最大构件的损伤指数加权组合得到,如下:

$$s'_2 = \max_2 \frac{\sum_i \mu s_2}{\sum_i \mu} \quad (11)$$

式中: $\mu$ 表示构件重要性系数。

建筑结构的相对位移状况能够很好地反映建筑结构的弹塑性损伤状况。在以上分析的基础上,得到中强地震下的建筑结构动力弹塑性相对位移为 $M(s_1, s'_2)$ ,以此作为建筑结构动力弹塑性损伤模型,即:

$$M(s_1, s'_2) = a_1 \mu f \exp(a_2 s_1 + a_3 s'_2) \quad (12)$$

式中: $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 均为常量。

## 3 基于实例的分析

为验证中强地震下本文建筑结构动力弹塑性损

伤模型的有效性,需要进行实验分析。以中强地震下某 20 层的建筑为例,地震烈度为 7 度,地震加速度设置为  $0.3g$ ,该建筑底层层高为 5.5 m,其余各层层高为 3.95 m,纵横向各 5 跨,采用混凝土建筑材料,混凝土强度为 C40,弹性模型为 31.7 MPa,建筑平面布置图如图 1 所示。

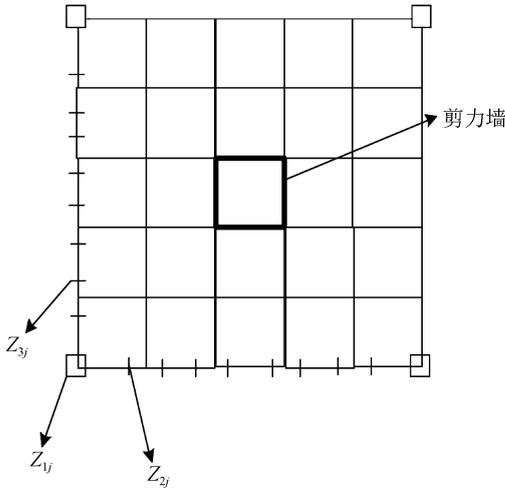


图 1 建筑平面布置图  
Fig.1 Building plan layout

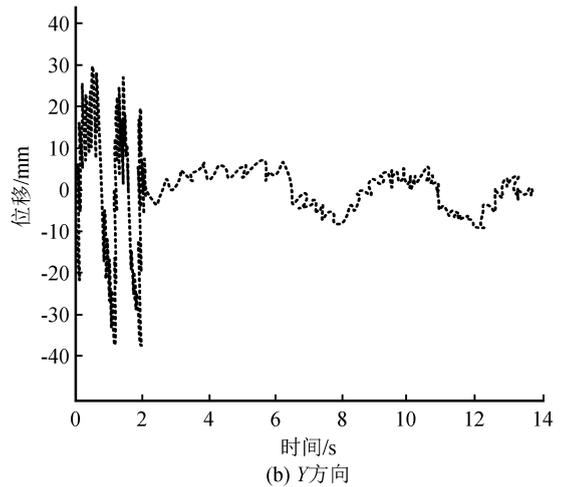
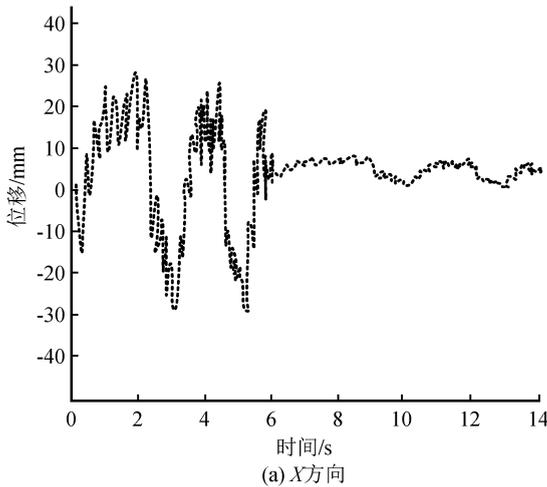


图 2 建筑结构相对位移时程

Fig.2 Relative displacement time history of building structure

根据图 2 可知,X 方向的相对位移在 30 mm 内,Y 方向的相对位移在 40 mm 内,结合该建筑的层高,可确定该建筑结构在地震作用下,结构依然可以保持其整体稳定性,结构整体性能满足“大震不倒”的设防水准要求。本文动力弹塑性损伤模型可以较好地模拟中强地震下的建筑结构损伤演化过程。

为进一步验证本文模型的可行性,对本文模型与文献[3]方法的整体建筑结构损伤模拟精度进行

结合式(11),对图 1 中的柱结构  $Z_{ij}$  重要性系数进行分析,如表 1 所列。

表 1 柱结构重要性系数

楼层	重要性系数
2	0.035
4	0.032
6	0.030
8	0.026
10	0.024
12	0.022
14	0.020
16	0.019
18	0.018
20	0.016

根据表 1 可知,柱结构重要性系数与楼层高低呈现负相关关系,随着楼层的增高,柱结构重要性系数降低,表明中强地震情况下,底层柱的损伤对整体建筑结构的影响最大。故在实际工程中,应重点关注底层柱的损伤,且对其进行修复。

中强地震激励下,相对位移数值模拟结果曲线如图 2 所示。

对比分析,结果如表 2 所示。

表 2 整体建筑结构损伤模拟精度对比

实验次数/次	本文模型/%	文献[3]方法/%
10	76	62
20	78	62
30	78	56
40	75	66
50	79	65

Table 2 Comparison of damage simulation accuracy of integral building structure

根据表 2 可知,本文模型的整体建筑结构损伤模拟精度平均处于 76% 以上,文献[3]方法的损伤模拟精度处于 60% 左右,相差约 10%,表明在中强地震条件下,本文模型的建筑结构动力弹塑性损伤模拟精度较高,效果较好,验证了本文模型的有效性,但其仍有待后续研究,进一步提高其精度。

## 4 结论

提出一种中强地震下建筑结构动力弹塑性损伤模型研究方法,主要从建筑材料和建筑构件两个因素入手,分析了应变率建筑材料以及失效建筑材料的损伤指数,同时计算得到了整体建筑构件的损伤指数,以此为基础,给出建筑结构动力弹塑性损伤模型。实验分析过程中,以中强地震下的某 20 层的建筑为例,分析该建筑柱结构重要性系数,得出底层柱的损伤对整体建筑结构的影响最大的结论;分析本文模型的整体建筑结构损伤模拟精度,得出本文模型具有较好的精度值。综上,可得出本文模型性能较好,应用性较强。

鉴于论文篇幅所限,有关详细的技术环节,在该文中没有能做更多详述,如有兴趣者可与作者联系。另外作者水平有限,文中错误难免,望阅者给予批评指正。

## 参考文献(References)

- [1] 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 Benchmark Model of Super-tall Building[J].Journal of Architectural Structures,2016,37(9):1-7.
- [2] 王东方.某超高层建筑罕遇地震下的结构弹塑性分析[J].山西建筑,2016,42(10):42-43.  
WANG Dongfang,WANG Dongfang.Dynamic Elastic-Plastic Analysis of a High-Rise Structure Exposed to Severe Earthquake[J].Shanxi Architecture,2016,42(10):42-43.
- [3] 任重翠,刘军进,徐自国,等.某三角形平面超限高层建筑结构动力弹塑性分析[J].建筑结构,2015(23):28-33.  
REN Chongcui,LIU Junjin,XU Ziguang,et al.Dynamic Elasto-Plastic Analysis of an Out-of-code High-rise Building Structure with Triangular Plane[J].Building Structure,2015,45(23):28-33.
- [4] 曹胜涛,李志山.约束混凝土单轴弹塑性损伤本构模型[J].工程力学,2017,34(11):116-125.  
CAO Shengtao,LI Zhishan.An Elastoplastic Damage Constitutive Model for Confined Concrete under Uniaxial Load[J].Engineering Mechanics,2017,34(11):116-125.
- [5] 邓建,肖明,谢冰冰.三维接触面单元弹塑性损伤数值模拟分析方法[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(7):2383-2389.  
DENG Jian,XIAO Ming,XIE Bingbing.Three-dimensional Elastic-plastic Damage Numerical Simulation and Analysis Method for Contact Elements[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(7):2383-2389.
- [6] 柳玉印,尹训强.考虑结构-土-结构动力相互作用的重力坝地震响应分析[J].水利水电技术,2018,49(10):52-58.  
LIU Yuyin,YIN Xunqiang.Structure-soil-structure Dynamic Interaction-considered Seismic Response Analysis of Gravity Dam[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(10):52-58.
- [7] 高少波,蒋克军,张德成,等.多遇地震下基于 PMSAP 和 MIDAS 计算对比对某大型综合性公共建筑进行结构分析[J].四川建筑,2016,36(4):128-130.  
GAO Shaobo,JIANG Kejun,ZHANG Decheng,etal.Structural Analysis of a Large Comprehensive Public Building Based on PMSAP and MIDAS Calculation Under Frequent Earthquakes[J].Sichuan Architecture,2016,36(4):128-130.
- [8] 田英侠,胡高兴,李志军,等.地震动特性对隔震结构弹塑性位移反应谱的影响研究[J].地震工程学报,2016,38(3):353-359.  
TIAN Yingxia,HU Gaoxing,LI Zhijun,et al.Influence of Ground Motion Characteristics on the Inelastic Displacement Spectra of Isolated Structures[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(3):353-359.
- [9] 蒋连接,魏剑,朱方之,等.远场长周期地震动作用下高层框剪结构地震反应分析[J].科学技术与工程,2017,17(29):332-337.  
JIANG Lianjie,WEI Jian,ZHU Fangzhi,et al.Analysis on Seismic Response of High-rise Frame-shear Wall Structure under Far-field Long-period Ground Motions[J].Science Technology and Engineering,2017,17(29):332-337.
- [10] 杜永峰,祁磊,包超,等.基于弹塑性地震响应的轻型消能摇摆架-框架结构损伤性能分析[J].工程抗震与加固改造,2016,38(1):98-104.  
DU Yongfeng,QI Lei,BAO Chao,et al.Damage Performance Analysis of Energy-Dissipative Light Rocking Frame Structure on the Basis of Elasto-Plastic Seismic Response[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2016,38(1):98-104.
- [11] 段瑾,余志伟,方礼凯.超高层结构动力弹塑性分析方法研究[J].建筑结构,2016(1):24-29.  
DUAN Jin,YU Zhiwei,FANG Likai.Dynamic Elastic-Plastic Analysis of Super-tall Structures[J].Building Structure,2016(1):24-29.
- [12] 张敏,李峰.振动环境下建筑工程抗震性检测系统的设计与实现[J].现代电子技术,2017,40(3):106-109.  
ZHANG Min,LI Feng.Design and Implementation of Building Engineering Anti-seismic Detection System under Vibration Environment[J].Modern Electronics Technique,2017,40(3):106-109.
- [13] 王晓飞,王鹏飞,贾虎,等.基于时变地震损伤模型的多龄期钢框架结构易损性分析[J].地震工程学报,2016,38(2):192-200.  
WANG Xiaofei,WANG Pengfei,JIA Hu,et al.Seismic Vulnerability Analysis of Multiage Steel Frame Structures Based on Time-varying Seismic Damage Model[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(2):192-200.