

适用于区域震害模拟的混凝土高层结构 损伤预测方法

熊琛¹, 许镇², 曾翔¹, 陆新征¹, 叶列平¹

(1. 清华大学 土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 城市区域高层结构的地震损伤模拟有着重要的意义。考虑到当前适用于区域高层结构地震损伤预测的研究较少, 提出了一套适用于区域震害模拟的高层结构地震损伤预测方法。该方法以弹塑性弯剪模型时程分析得到的结构响应结果为基础, 是一套基于构件损伤的结构损伤预测方法。本方法将高层结构中的抗侧力构件分为层间位移角敏感型构件和曲率敏感型构件。对于层间位移角敏感的框架以及连梁构件, 分别给出了基于位移限值的损伤预测方法; 对于曲率敏感的剪力墙墙肢构件, 提出了基于构件能力曲线关键点的损伤预测方法。为了验证所提的损伤预测模型, 对5栋高层结构开展了对比分析。将提出的方法与精细有限元模型进行了对比, 结果表明所提区域高层结构损伤预测方法能较好地预测高层结构中各构件的损伤程度。最后对北京CBD高层区域进行了模拟, 进一步展示了所提方法的效果。

关键词: 高层结构; 损伤预测; 区域震害模拟; 时程分析; 弹塑性弯剪模型

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Damage prediction method suitable for regional seismic damage simulation of concrete highrise building structures

XIONG Chen¹, XU Zhen², ZENG Xiang¹, LU Xinzheng¹, YE Lieping¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: It is of great significance to simulate the seismic damage of highrise building structures in urban areas. Considering the limited research on regional seismic damage prediction of highrise building structures, a damage prediction method for regional seismic damage simulation of highrise building structures was proposed. Taking advantage of the structural seismic response results generated by the time-history analysis of the elastoplastic flexural shear model, the structural damages were predicted through the damage states of each type of component. Specifically, lateral force resisting components were divided into inter-story drift angle sensitive components and curvature sensitive components. For the interstory drift angle sensitive frame and coupling beam components, interstory drift limits were recommended for such type of components; for curvature sensitive shear wall pier components, damage limits based on the key points of the component capacity curve were also proposed. To verify the proposed damage prediction method, comparative analysis of 5 highrise building structures was conducted between the proposed method and fine FEM model. Results show that, the proposed method may reasonably estimate the damage states of each

收稿日期: 2016-02-16; 修回日期: 2016-04-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAK14B02)

Supported by: National Key Technology R&D Program (Grant No. 2015BAK14B02)

作者简介: 许镇(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事城市区域震害模拟、虚拟现实相关研究. E-mail: martin31567@163.com

type of component. The method is also applied to the highrise building area of Beijing central business district (CBD), which shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: highrise structures; damage prediction; regional seismic damage simulation; time-history analysis; elastoplastic flexural shear model

随着城市化进程的不断推进,城市中高层结构的数量迅速增加。并且,城市中高层结构通常承载了大量的人员、资金与功能,一旦遭遇地震灾害,将导致严重的后果。因此有必要对城市区域中高层结构的地震损伤风险进行充分的评估和细致的考虑。高层结构通常经历了较为完备的结构设计,倒塌风险较低,然而高层结构仍有较大的地震损伤风险。例如,在 2011 年新西兰基督城地震中,基督城 CBD 地区最高的 51 栋建筑中有 37 栋由于严重损伤而被迫拆除^[1],造成了极大的直接经济损失。此外还有更多的建筑由于损伤导致长时间停工,造成了严重的间接经济损失。因此,合理预测城市区域中高层结构的损伤程度,对评估城市高层结构的地震损失风险,发现潜在高损失风险环节,进而降低地震损失有着非常重要的意义。

高层建筑结构复杂,以往通常采用精细有限元模型进行分析。分析方法根据需求不同有静力弹塑性方法^[2],弹塑性时程方法^[3-4]和增量动力分析方法^[5]。基于精细模型的高层结构地震损伤分析方法已经取得了长足的发展,这些方法已经在结构设计,超限审查等领域得到了广泛的应用。然而基于精细模型的高层结构地震损伤分析方法计算建模工作量大,需要详细的设计图纸等信息,并不适用于区域大范围的震害预测。

目前常用的区域结构损伤预测方法包括(1)易损性矩阵方法^[6], (2)易损性分析方法^[7], (3)能力需求方法^[8]和(4)时程分析方法^[9-11]。易损性矩阵方法基于历史震害数据,给出不同地震烈度下的结构损伤概率。然而由于高层结构历史震害数据较少,无法获得较为完备的震害数据。易损性分析方法通过预先对结构精细模型进行震害分析,得到不同地震动强度指标下结构的损伤概率。然而高层结构形式复杂,其结构抗震能力受多项结构特性参数影响,不同参数的组合较多(不同设防烈度,不同周期,不同场地类型),而且高层建筑结构复杂,单体计算量大,对多种参数组合进行易损性分析计算工作量极大。Hanus 等方法基于能力需求分析,能考虑地震输入的频谱特性以及结构抗震能力的差异,然而能力需求分析方法基于单自由度体系,无法考虑高层结构中非常显著的高阶振型贡献,并且无法考虑地震动的时域特性以及结构的损伤集中等情况。随着计算能力的发展,基于多自由度模型以及时程分析的方法被逐渐用于区域建筑的响应模拟^[9-11]。该方法能很好的考虑地震动的幅值、频域和时域特性以及高层结构的动力特性。然而已有的研究主要讨论了区域结构地震响应工程需求参数(EDP)的计算方法,并没有给出适用于区域高层结构的损伤预测方法。

随着性能化抗震设计的发展,现有基于结构响应 EDP 的高层结构构件的损伤预测方法很多,根据所采用 EDP 种类的不同,主要分为(1)基于层间位移角的方法(2)基于有害层间位移角的方法。基于层间位移角的方法使用简单,应用广泛。Shome 等^[12]采用层间位移角方法对 9 栋高层结构进行了损伤分析,并预测了其直接经济损失情况。Ji 等^[13]采用有害层间位移角方法对一栋高层结构进行了分析,计算得到了该结构的易损性曲线。然而,如果将以上两种方法运用于区域结构损伤预测将会遇到以下两个问题:(1)高层结构由于其较为显著的弯曲变形形态,层间位移角中有较大比例刚性转动导致的无害层间位移角。例如 Ji 等^[13]对一栋 54 层高层结构的研究发现,在该结构 10 层处,层间位移角中 97% 为刚体转动贡献的无害层间位移角,因此基于层间位移角的损伤预测方法可能显著高估结构的损伤情况。(2)基于有害位移角的损伤预测方法能有效排除刚体转动的影响。但是研究发现,剪力墙墙肢构件的损伤预测可靠性高度依赖损伤限值的选取,不同轴压比、墙肢长度、配筋率的构件其损伤限值差异能达到 10 倍^[14]。而区域建筑损伤分析中通常无法获得每栋建筑非常详细的墙肢构造信息,简单采用文献推荐的层间位移角限值将导致较大误差。

为了克服以上两个问题,本文提出了一种新的区域高层结构损伤预测方法。该方法将区域高层结构的结构构件分为层间位移角敏感型构件和曲率敏感型构件,并分别讨论了这两类构件的损伤预测方法。对于层间位移角敏感型构件,采用传统位移角限值的方法。对于曲率敏感型构件,提出了基于构件能力骨架线的损伤预测方法。该方法根据高层结构设计过程,获取各层构件的能力骨架线,并以此作为损伤限值的基准,从而大大降低了直接采用位移角限值导致的不确定性。为了验证提出方法的准确性,采用精细有限元模型作为基准进行了对比分析。结果表明,本文提出的方法能较好的模拟高层结构中各类构件的损伤情况。最后将该方法应用在了北京 CBD 高层区域,充分展示了该方法的效果。

1 区域混凝土高层结构损伤预测方法

中国目前广泛建设的混凝土高层结构主要为框架剪力墙结构和框架核心筒结构,因此本文主要针对这两种类型的结构进行讨论。熊琛等^[1]提出的弹塑性弯剪模型及其标定方法能较好的把握区域中这两类高层结构的地震响应。因此本文采用该模型对区域高层结构进行模拟,并输出结构各层的EDP进行损伤预测。具体流程如图1所示,主要分为模型建立、时程分析以及损伤预测3个部分。首先,根据城市GIS数据以及高层结构设计流程可以确定区域中每栋建筑其弯剪模型的弹塑性参数^[1]。之后,根据生成的弯剪模型进行弹塑性时程分析,得到每栋建筑各层的EDP。最后,根据时程分析得到的EDPs对结构进行损伤分析。本文将简单介绍弯剪模型及其标定方法,详见第1.1节。本文提出的损伤预测方法将在第1.2节详细介绍。

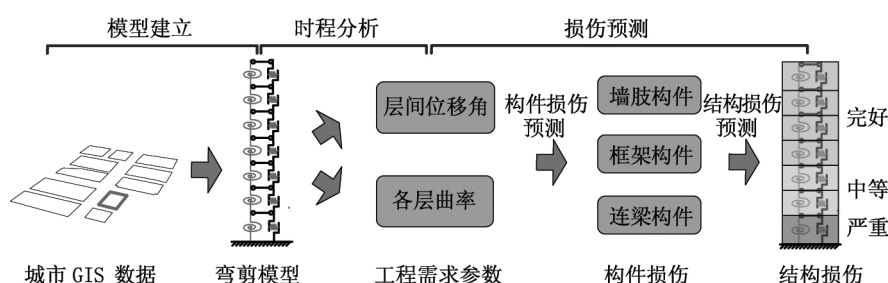


图1 区域高层结构损伤预测流程图

Fig. 1 Flowchart of damage prediction of regional highrise buildings

1.1 弯剪模型及其标定方法

混凝土高层框剪结构由于框架部分和剪力墙部分共同工作,通常表现出明显的弯剪变形特性,可以采用弯剪模型进行模拟。弯剪模型的示意图如图2(a)所示,模型每层由一根弯曲梁以及一根剪切梁组成,并由一根刚性链杆连接共同抗侧。弯剪模型通过弹塑性弯曲梁模拟剪力墙的弹塑性行为,通过弹塑性剪切梁模拟框架部分的弹塑性行为。弯剪模型各层的弯曲梁以及剪切梁采用如图2(b)所示的三线性骨架线,该三线性骨架线包含设计点、屈服点、峰值点以及极限点4个特征点^[8]。其中设计点为根据抗震规范设计的结构承载力设计值对应的点。弯剪模型各层弯曲弹簧和剪切弹簧的设计承载力可以根据振型分解反应谱法进行计算^[11,13]。弯剪模型各层弯曲梁和剪切梁的屈服承载力以及峰值承载力可以根据式(1)、(2)确定。

$$V_{\text{yield}} = V_{\text{design}} \Omega_{\text{yield}}; \quad (1)$$

$$V_{\text{peak}} = V_{\text{yield}} \Omega_{\text{peak}}. \quad (2)$$

式中: V_{design} , V_{yield} , V_{peak} 分别为构件的设计、屈服与峰值承载力; Ω_{yield} , Ω_{peak} 分别为屈服超强系数与峰值超强系数。

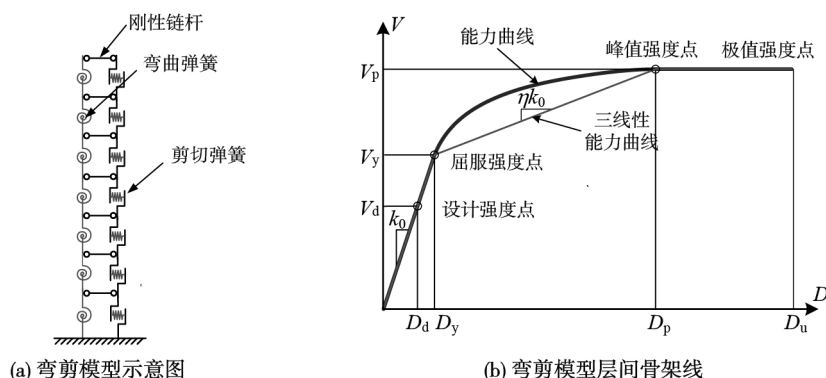


图2 弯剪模型

Fig. 2 Flexural-shear model

由于区域建筑信息较少,分别获取结构各层弯曲梁和剪切梁的超强系数难度较大。为了简化计算,假设

弯曲梁和剪切梁构件与整体结构拥有相同的超强系数^[1]。整体结构的超强系数可以根据大量高层结构静力弹塑性分析的结果进行预测。为了获得较为可靠的结构整体超强系数,本研究采用 MSC. MARC 通用有限元分析软件,对 5 栋高层结构进行了静力弹塑性分析,分别获取了这 5 栋结构的超强系数,这 5 栋结构的基本信息如表 1 所示^[6-18]。此外还收集了 12 栋高层结构静力弹塑性分析的结果^[9-34]。

对这 17 栋结构分析发现,整体结构的超强系数与设防烈度有一定的相关性,因此回归了这 17 栋结构骨架线峰值承载力 V_{peak} 和设计承载力 V_{design} 的比值与设防烈度的关系,如图 3 中灰色圆点所示。图中的趋势可以看出,随着设防烈度的增加,结构的超强系数逐渐减小。这主要是由于设防烈度较低的结构其配筋主要是由重力以及其他荷载控制,因此其抗侧能力与设计地震作用的比值更大。屈服承载力 V_{yield} 和设计承载力 V_{design} 的比值同样随着设防烈度增加而减少,如图 3 中的菱形白点所示。根据式(1)(2)对屈服超强系数 Ω_{yield} 与峰值超强系数 Ω_{peak} 的定义,结合图 3 中的统计结果,屈服超强系数 Ω_{yield} 与峰值超强系数 Ω_{peak} 可以根据公式(3)(4)进行计算。

$$\Omega_{yield} = -0.162\ 3DI + 2.702\ 8; \quad (3)$$

$$\Omega_{peak} = (-0.691\ 9DI + 8.338\ 6) / (-0.162\ 3DI + 2.702\ 8). \quad (4)$$

其中 DI 为结构的设防烈度。

表 1 结构基本信息汇总

Table 1 Summary of basic information of structures

	层 数	年 代	设防等级	结构类型	屈服超强	峰值超强
Blg1	27	2013	8	框架核心筒	1.31	1.38
Blg2	15	2010	7	框架剪力墙	1.56	1.83
Blg3	45	2010	8	框架核心筒	1.47	2.40
Blg4	42	2013	8.5	框架核心筒	1.38	1.40
Blg5	12	2003	8	框架剪力墙	1.31	2.25

1.2 结构损伤预测方法

美国 Hazus 报告等对结构的损伤状态进行了分类,划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏以及倒塌五个状态^[3]。我国《建筑抗震设计规范》^[13]也对结构的性能水准做了建议。考虑到混凝土高层结构中剪力墙墙肢是主要的抗侧力构件,是抗震的第一道防线,因此,本文建议以剪力墙墙肢的地震损伤作为结构损伤的主要判别依据,其他构件的损伤状态可以辅助整体结构的损伤预测。例如连梁构件破坏较早出现,连梁的屈服可以作为结构轻微破坏和中等破坏判别的参考。框架构件作为 RC 高层结构抗侧力的第二道防线,在墙肢出现破坏之后逐渐发挥作用。框架的破坏程度可以作为判别结构严重破坏和倒塌的参考。基于以上考虑,RC 高层结构各损伤等级的描述如表 2 所示。

表 2 本文建议的 RC 高层结构损伤描述

Table 2 RC highrise structure damage discription proposed in this paper

名称	《建筑抗震设计规范》破坏描述 ^[13]	本文建议的 RC 高层结构损伤描述
基本完好	承重构件完好;个别非承重构件轻微损坏;附属构件有不同程度破坏	剪力墙墙肢无损坏,个别连梁构件轻微损坏
轻微损坏	个别承重构件轻微裂缝(对钢结构构件指残余变形),个别非承重构件明显破坏;附属构件有不同程度破坏	剪力墙墙肢轻微损坏,部分连梁构件轻微损坏,个别连梁构件中度损坏,个别框架构件轻微损坏。
中等破坏	多数承重构件轻微裂缝,部分明显裂缝(或残余变形);个别非承重构件严重破坏	剪力墙墙肢中度损坏,多数连梁构件轻微损坏,部分连梁构件中度损坏,个别框架构件中度损坏。
严重破坏	多数承重构件严重破坏或部分倒塌	剪力墙墙肢严重损坏,多数连梁严重损坏,多数框架构件中度损坏
倒 塌	多数承重构件倒塌	剪力墙墙肢严重损坏,框架构件严重损坏

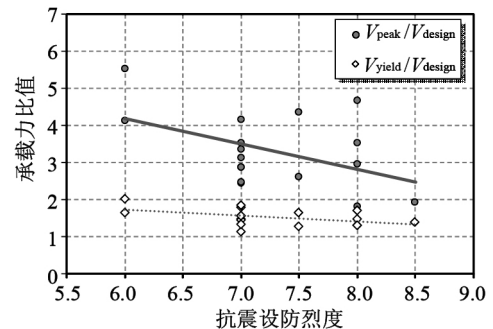


图 3 高层结构超强系数统计结果

Fig. 3 Statistics of overstrength factors of highrise building structures

1.3 构件损伤预测方法

RC 高层结构通常由框架、剪力墙墙肢、连梁等抗侧力构件组成。由于抗侧的机理不同,不同类型构件宜采用的损伤判别位移指标也不尽相同。根据宜采用的位移指标类型可以将抗侧力构件分为:(1) 层间位移角敏感型构件和(2) 曲率敏感型构件。

框架的破坏主要受层间位移角控制,控制连梁破坏的弦转角也和层间位移角有直接的相关关系^[6],因此称这两种构件为层间位移角敏感型构件;而剪力墙墙肢通常表现出明显的弯曲变形,其层间位移角之中很大部分是弯曲变形贡献的无害层间位移角。以层间位移角作为弯曲型剪力墙墙肢的损伤判别指标将产生较大误差。而弯曲型剪力墙墙肢的损伤与该层的墙肢曲率直接相关,所以称剪力墙墙肢为曲率敏感型构件。以下将分别讨论这 3 种类型构件的损伤预测方法。

(1) 剪力墙墙肢

《建筑结构抗倒塌设计规范》^[3]建议,对于压弯型构件,其损伤状况可根据图 4 确定。其中,B 点、C 点和 D 点分别代表结构的屈服点、峰值点和极限点。根据这 3 个点可以分别确定压弯构件的四个损伤状态,如表 3 所示。

本文第 1.1 节提出了弹塑性弯剪模型及其参数标定方法,根据该方法,可以获得各层弯曲梁的三折线骨架线。由于弯剪模型中各层的弯曲梁能较好的代表高层结构中墙肢弹塑性行为^[3],因此可以采用弯剪模型中弯曲梁的骨架线作为剪力墙墙肢损伤判别的基准。即按《建筑结构抗倒塌设计规范》的表 5.4.4-2(即本文表 3)确定剪力墙墙肢的损伤等级^[3]。

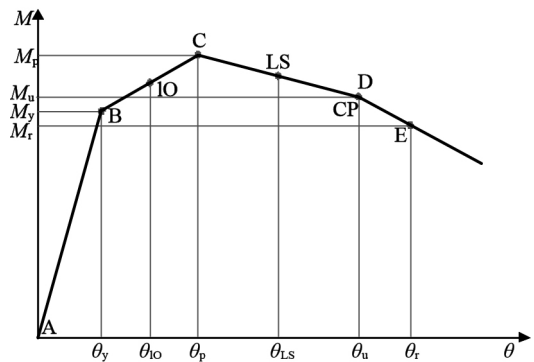


图 4 压弯构件骨架线关键点与损坏程度的对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship between key points of skeleton curve of compression-bending component and damage degree

表 3 剪力墙墙肢转角的地震损坏等级判别标准
Table 3 Judgement criteria of seismic damage grade of shear wall pier rotation angle

损坏等级	判别标准	损坏程度
1 级	$\theta \leq \theta_y$	无损坏
2 级	$\theta_y < \theta \leq \theta_{10}$	轻微损坏
3 级	$\theta_{10} < \theta \leq \theta_p$	
4 级	$\theta_p < \theta \leq \theta_{LS}$	
5 级	$\theta_{LS} < \theta \leq \theta_u$	中度损坏
6 级	$\theta > \theta_u$	严重损坏

其中 θ_y 、 θ_p 、 θ_u 分别为剪力墙的屈服、峰值以及极限层间转角。剪力墙各层位置的屈服层间转角 θ_y 和峰值层间转角 θ_p 可以根据各层弯曲梁骨架线关键点对应的屈服曲率 ρ_y 与峰值曲率 ρ_p 乘以层高 l 进行确定。为了确定剪力墙的极限层间转角 θ_u ,收集了国内 39 片墙片的实验结果^[34-39],得到剪力墙的极限层间转角均值为 $\theta_u = 3.89 \theta_p$ 。

(2) 连梁

史庆轩等^[40]通过对 84 个不同高跨比、不同配筋的连梁进行统计分析,推荐连梁的轻微损坏(即初始开裂)对应的层间位移角为 1/1 000,中度损坏(严重开裂或者部分钢筋屈服)的层间位移角为 1/300。连梁严重损坏的层间位移角为 1/60。

(3) 框架

郭子雄等^[41]通过对 34 榀框架实验以及大量实际工程进行统计分析,认为框架结构达到 1/800 层间位移角之后,框架开裂,因此采用该限值作为框架达到轻微损坏的限值。

钟益村等^[42]通过对 270 余根柱试验资料进行统计分析,推荐框架结构的屈服层间位移角大约为 1/200,因此采用该限值作为框架达到中度损坏的限值。

《建筑抗震设计规范》^[43]建议钢筋混凝土结构的弹塑性位移角限值为 1/50,以此作为框架严重损坏限值。

2 单体算例分析及校验

为了验证以上提出的方法对高层结构损伤预测的效果,对几栋高层单体建筑进行了分析。由于高层结构震害较少,无法和实际震害进行对比。因此本文采用精细有限元模型的计算结果作为基准,验证本方法的合理性。

选取 5 栋典型 RC 高层结构进行算例分析,这 5 栋结构的基本信息如表 1 所示。首先对这 5 栋结构按照第 1.1 节中介绍的参数标定方法确定每栋结构的弯剪模型。之后分别对弯剪模型和精细模型进行静力弹塑性分析和弹性时程分析。精细模型采用 MSC. MARC 有限元软件进行分析,梁柱采用纤维梁单元,剪力墙采用分层壳单元进行模拟^[3]。

首先对 Blg1 的弯剪模型与精细有限元模型采用一阶振型进行推覆,其推覆结果如图 5 所示。可以看出弯剪模型中的弯曲梁以及剪切梁能很好的模拟精细模型中剪力墙和框架部分的弹塑性特性。之后采用 400Gal 的 El Centro 地震动时程记录对 Blg1 的弯剪模型与精细有限元模型进行弹塑性时程计算,两者的顶点位移时程结果以及层间位移角包络结果同样有较好的吻合(如图 6 所示)。因此采用弯剪模型计算的 EDPs 可以用于预测高层结构的损伤情况。

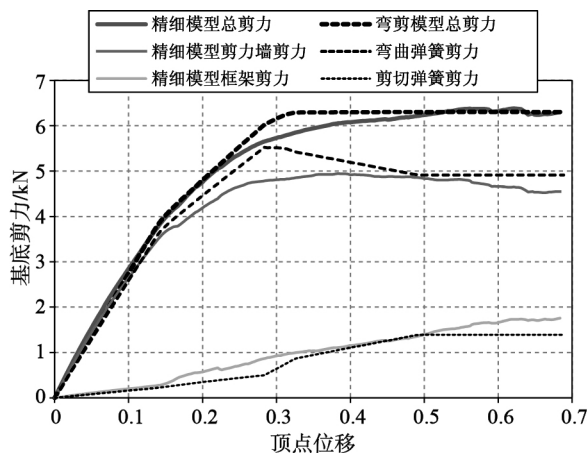


图 5 Blg1 精细模型与弯剪模型能力曲线对比

Fig. 5 Comparison of capacity curves between fine model and flexure-shear model for Blg 1

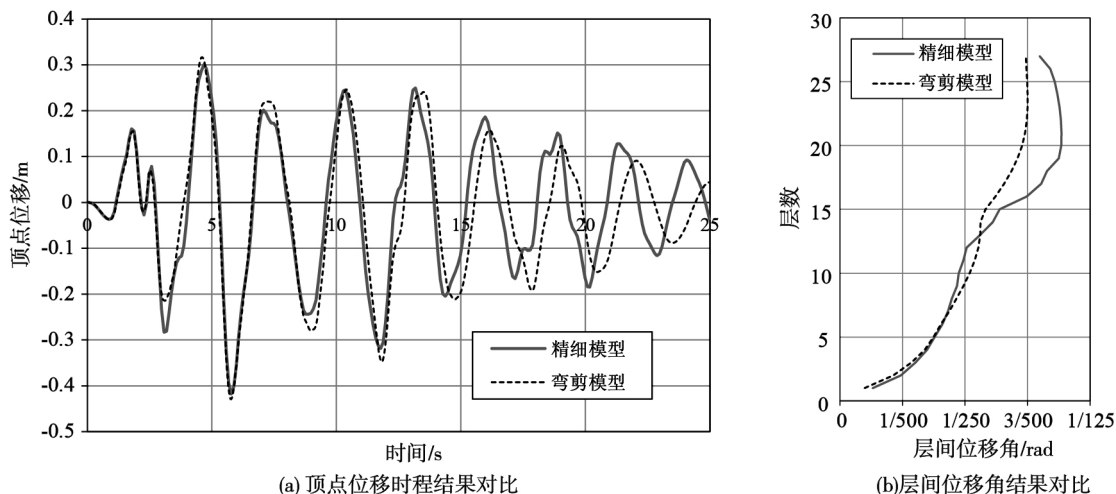


图 6 Blg1 精细模型与弯剪模型弹塑性时程分析结果对比

Fig. 6 Comparison of elastoplastic time-history analysis results between fine model and the flexure-shear model for Blg 1

之后对 Blg1 的弯剪模型与精细有限元模型进行损伤预测对比。采用 100 Gal、200 Gal、400 Gal 以及 800 Gal 的 El Centro 地震动时程记录进行弹塑性时程分析。精细模型能较好的反映结构的真实破坏情况,因此以精细模型的结果作为基准。对于弯剪模型,采用本文第 1.3 节提出的损伤预测方法计算各层框架、连梁和墙肢的损伤情况,结果如图 7 所示。可以看出,本文提出的方法能很好的预测精细模型各构件的损伤情况。尤其是对于墙肢构件,如图 7(c) 中 800Gal 的结果所示,弯剪模型不但预测到了墙肢最底部的中度损坏,同时也能模拟出高层结构墙肢腰部因为高阶振型引起的破坏。

为了进一步验证本文方法的效果,对表 1 中其他 4 栋不同高度,不同设防等级的高层结构进行了损伤分析。由于混凝土高层结构的损伤很大程度上取决于墙肢构件的损伤,因此以下主要给出了这 4 栋结构墙肢

的损伤情况,如图 8 所示。可以看出对于这 4 栋结构,本方法同样有较好的预测效果。

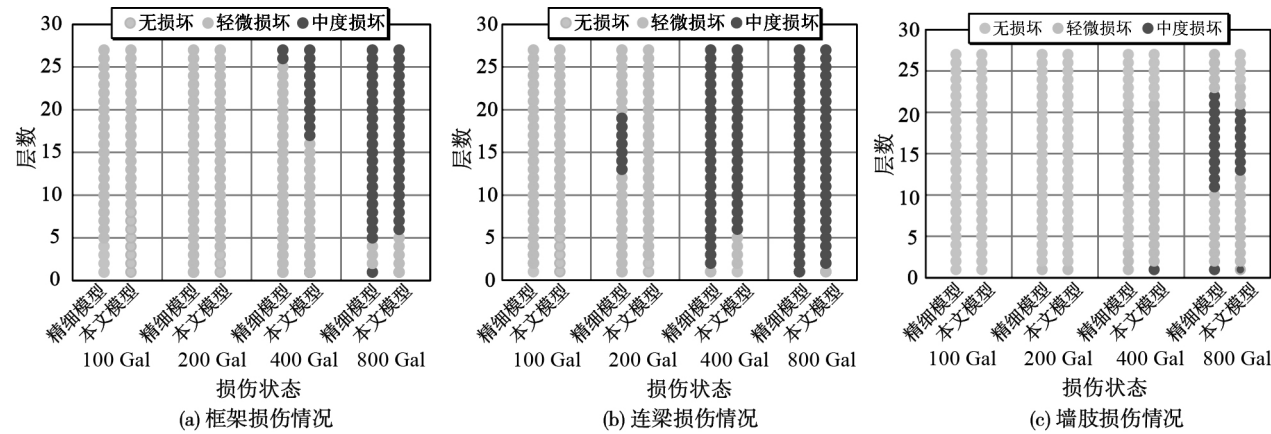


图 7 Blg1 损伤情况对比

Fig. 7 Comparison of damage states of Blg 1

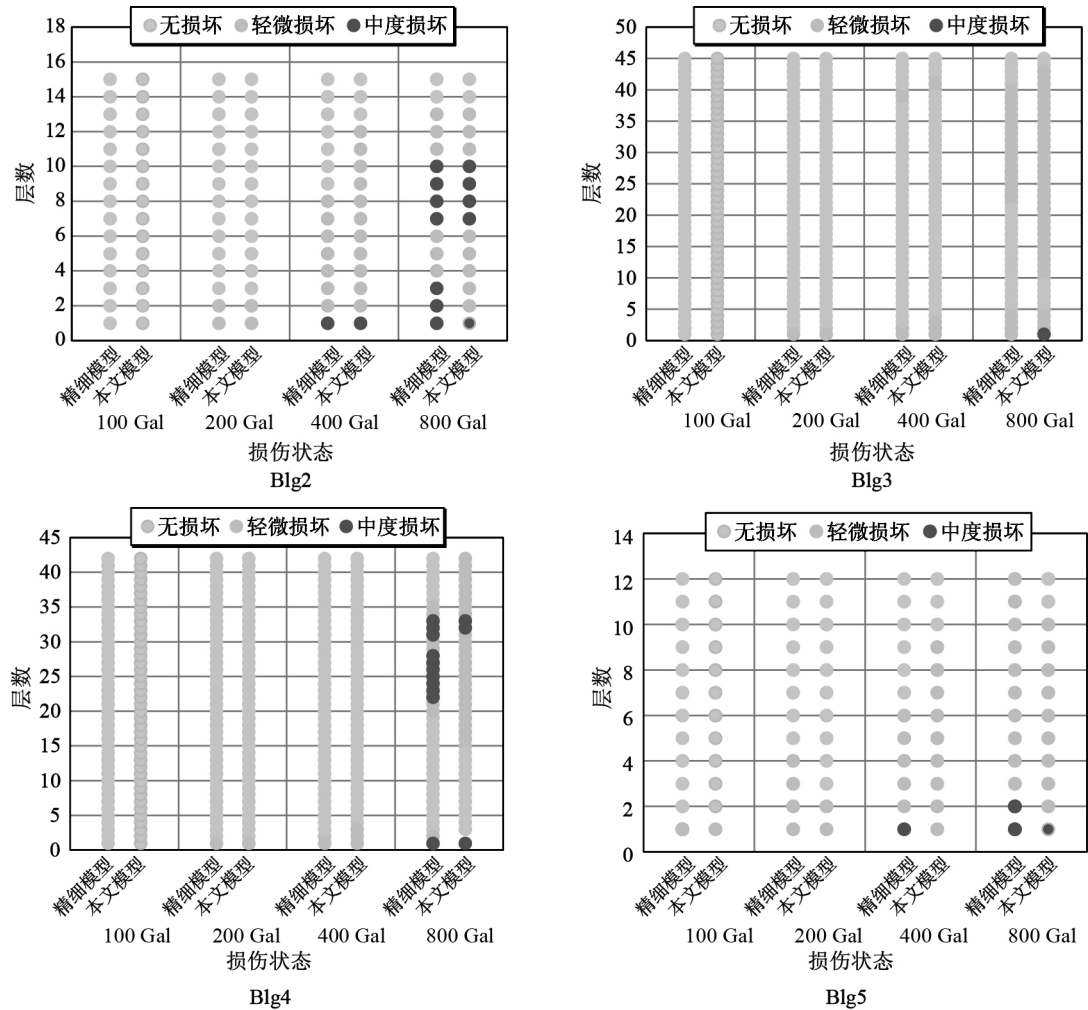


图 8 Blg2 - Blg5 墙肢损伤情况对比

Fig. 8 Comparison of damage states of shear wall piers of Blg2 - Blg5

3 区域算例展示

为了展示以上方法对区域高层结构的计算效果,以北京 CBD 高层建筑群作为研究对象,分别选取峰值加速度调幅至 100Gal,200Gal,400Gal 及 800Gal 的 El Centro 地震动时程记录进行模拟。结合前文提出的方

法,可以方便的计算得到每栋建筑各层的损伤情况,结合区域建筑高真实感的可视化方法^[4],可以清晰的展示每栋建筑各层的损伤情况,如图 9 所示。

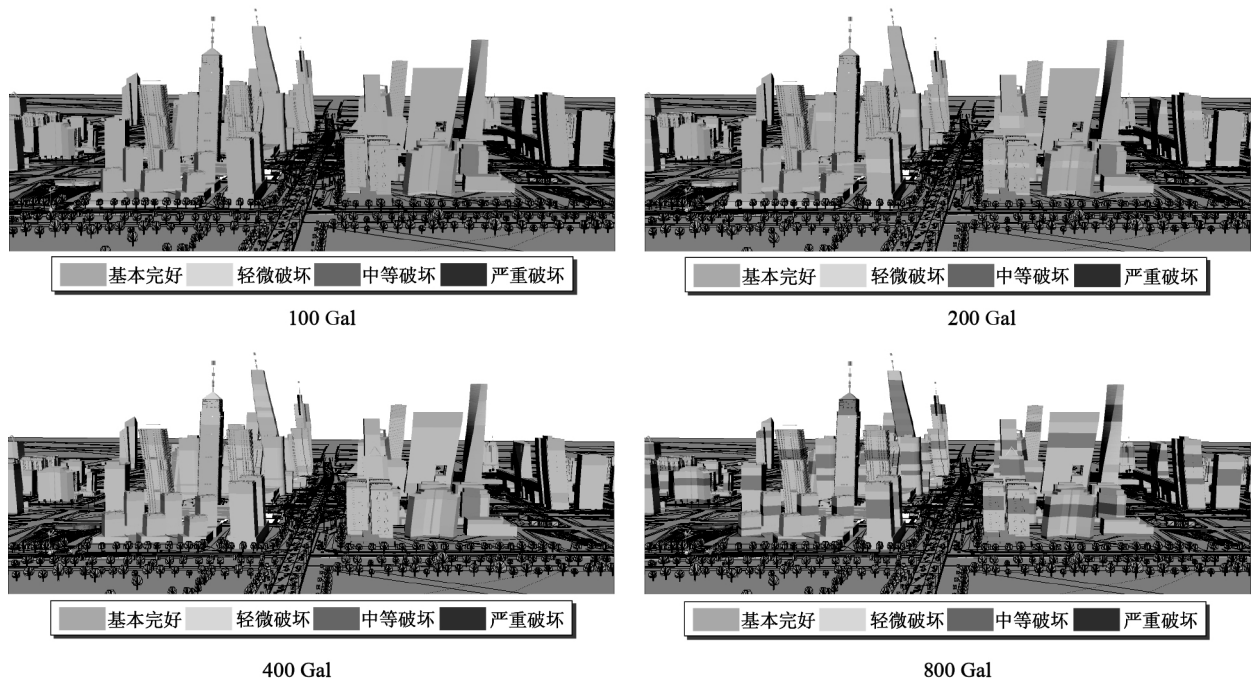


图 9 区域建筑损伤预测结果展示

Fig. 9 Demonstration of regional buildings damage prediction results

4 结论

本文基于弹塑性弯剪模型计算的结构工程需求参数(EDP),提出了一套区域高层结构的地震损伤预测方法。该方法能考虑高层结构中的层间位移角敏感型构件和曲率敏感型构件的损伤,并且相应地分别提出了高层结构中框架构件、连梁构件和墙肢构件的损伤预测方法。将提出的方法与精细有限元模型进行了对比,结果证明提出的区域高层结构损伤预测方法不但能很好的考虑损伤的分布规律,同时也能准确把握破坏程度。本文成果期望服务于更精确的区域高层结构损伤预测和损失预测,为城市抗震防灾规划和灾后救援奠定基础。

参考文献:

- [1] Wikipedia. List of tallest buildings in Christchurch [EB/OL]. (2013-01-26) [2016-01-19]. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_in_Christchurch.
- [2] ATC. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40) [R]. Redwood, California: Applied Technology Council, 1996.
- [3] Lu X, Lu X Z, Guan H, et al. Collapse simulation of reinforced concrete high-rise building induced by extreme earthquakes [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(5): 705-723.
- [4] 解琳琳, 黄羽立, 陆新征, 等. 基于 OpenSees 的 RC 框架-核心筒超高层建筑抗震弹塑性分析 [J]. 工程力学, 2014, 31(1): 64-71. XIE Linlin, HUANG Yuli, LU Xinzhen, et al. Elasto-plastic analysis for super tall RC frame-core tube structures based on OpenSees [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 64-71. (in Chinese)
- [5] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [6] ATC. Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13) [R]. Redwood, California: Applied Technology Council, 1985.
- [7] Kiril M S, Polat Z. Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings [J]. Engineering Structures, 2006, 28(9): 1335-1345.
- [8] FEMA. Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, Hazus-MH 2.1 Technical Manual [R]. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [9] Hori M. Introduction to Computational Earthquake Engineering [M]. London: Imperial College Press, 2006.
- [10] 韩博, 熊琛, 陆新征, 等. GPU/CPU 协同粗粒度并行计算及在城市区域震害模拟中的应用 [J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 582-

- 589.
- HAN Bo, XIONG Chen, LU Xinzhen, et al. GPU/CPU cooperative coarse-grained parallel computing and its application to regional seismic damage prediction [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 582-589. (in Chinese)
- [1] 熊琛, 许镇, 陆新征, 等. 适用于城市区域震害预测的高层建筑计算模型 [J]. 工程力学. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.08.0713
- XIONG Chen, XU Zhen, LU Xinzhen, et al. A urban seismic damage analysis model for tall building groups [J]. Engineering Mechanics. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.08.0713 (in Chinese)
- [2] Shome N, Jayaram N, Krawinkler H, et al. Loss estimation of tall buildings designed for the PEER tall building initiative project [J]. Earthquake Spectra, 2013, 31(3): 1309-1336.
- [3] Ji J, Elnashai A S, Kuchma D A. Seismic fragility relationships of reinforced concrete high-rise buildings [J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2009, 18(3): 259-277.
- [4] 王晶, 刘文锋, 吕静. 钢筋混凝土剪力墙位移角统计分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(3): 15-21.
- WANG Jing, LIU Wenfeng, LV Jing. Statistical analysis of displacement angles of reinforced concrete shear walls [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(3): 15-21. (in Chinese)
- [5] GB50011-2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010. (in Chinese)
- [6] 胡舒. 高烈度地区钢筋混凝土框架-核心筒结构抗震性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- HU Yu. Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame-core Tube Structures on High Seismicity Zones [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [7] Ren P Q, Li Y, Guan H, et al. Progressive collapse resistance of two typical high-rise RC frame shear wall structures [J]. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities 2015, 29(3): 04014087. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000593
- [8] Lu X Z, Li M K, Guan H, et al. A comparative case study on seismic design of tall RC frame-core-tube structures in China and USA [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2015, 24(9): 687-702.
- [9] 王来玮. 基于性能抗震设计的超高层框架-核心筒结构的抗震性能分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- WANG Laiwei. Performance Based Seismic Design and Seismic Behavior Analysis of the Super-high-rise Frame-core Tube Structures [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] 刘鹏飞, 王健, 王慧. 青岛财富中心超限高层结构概念设计 [J]. 建筑结构, 2008(5): 1-5.
- LIU Pengfei, WANG Jian, WANG Hui. Ultra limit high-rise construction concept design of Qingdao Fortune Center Building [J]. Building Structure, 2008(5): 1-5. (in Chinese)
- [11] 吴礼华, 程绍革, 史铁花, 等. 基于不同剪力墙模拟单元的框剪结构 pushover 分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(5): 8-14.
- WU Lihua, CHENG Shaoge, SHI Tiehua, et al. Pushover analysis of frame-shear wall structures based on different simulated elements of the shear walls [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(5): 8-14. (in Chinese)
- [12] 袁雅光, 陈春晖, 花更生. 高宝金融大厦型钢混凝土框架-核心筒结构设计 [J]. 结构工程师, 2009, 25(3): 1-6.
- YUAN Yaguang, CHEN Chunhui, HUA Gengsheng. Design of the steel-concrete composite frame-tube structure in global financial plaza [J]. Structural Engineers, 2009, 25(3): 1-6. (in Chinese)
- [13] 黄云勇, 费金祖, 程柯. 某高层剪力墙结构的静力弹塑性分析 [J]. 低温建筑技术, 2010, 32(11): 56-57.
- WANG Yunyong, FEI Jinzu, CHENG Ke. Pushover analysis of a shear wall tall structure [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(11): 56-57. (in Chinese)
- [14] 李展. 高层框架-剪力墙结构在罕遇地震下的静力弹塑性分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- LI Zhan. Nonlinear Static Analysis of a Tall Frame-shear Wall Structure under Maximum Considered Earthquake [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013. (in Chinese)
- [15] 李兰文. 含较多短柱高层框架-剪力墙结构静力弹塑性分析 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- LI Lanwen. Push-over Analysis for Tall frame-shear Wall Structure with Reinforced Concrete Short Columns [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [16] 张琳, 李晶. 某超高层结构静力弹塑性分析 [J]. 广东土木与建筑, 2008(11): 7-10.
- ZHANG Lin, LI Jing. Nonlinear static analysis of a super tall building [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2008(11): 7-10. (in Chinese)
- [17] 高宗来. 某超高层结构的静力弹塑性分析 [J]. 工程与建设, 2015, 29(2): 204-206.
- GAO Zonglai. Nonlinear static analysis of a super tall building [J]. Engineering and Construction, 2015, 29(2): 204-206. (in Chinese)
- [18] 王燕燕, 莫海鸿. 基于 MIDAS-Building 的某超限高层结构静力弹塑性分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(6): 181-185.
- WANG Yanyan, MO Haihong. Pushover analysis of a tall building using MIDAS-Building [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(6): 181-185. (in Chinese)
- [19] 李帼昌, 邵文帅, 王占飞, 等. 基于不同侧向加载模式下超限高层的静力弹塑性分析 [J]. 建筑结构, 2012, 42(S2): 168-171.
- LI Guochang, SHAO Wenshuai, WANG Zhanfei, et al. Pushover analysis of an out-of-code high-rise building based on different types of loading modes [J]. Building Science, 2012, 42(S2): 168-171. (in Chinese)

- [60] 张元凯, 杨宝山. 基于 MIDAS 的双塔连体高层结构静力弹塑性分析 [J]. 建筑结构, 2012, 42(S2): 141–144.
ZHANG Yuankai, YANG Baoshan. Nonlinear static analysis of concrete twin – towers high structure based on MIDAS [J]. Building Science, 2012, 42(S2): 141–144. (in Chinese)
- [61] 钱稼茹, 徐福江. 钢筋混凝土框架 – 核心筒结构的变形解耦规则 [J]. 建筑结构, 2006, 36(S1): 5.33–5.36.
QIAN Jiaru, XU Fujiang. Deformation decomposition rule of RC frame core tube structures [J]. Building Science, 2006, 36(S1): 5.33–5.36. (in Chinese)
- [62] CEC392 – 2014 建筑结构抗倒塌设计规范 [S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2014.
CEC392 – 2014 Code for Anti – collapse Design of Building Structures [S]. Beijing: Association for Engineering Construction Standardization, 2014. (in Chinese)
- [63] Paulay T, Priestley M J N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings [M]. New York, USA: John Wiley, 1992.
- [64] 钱稼茹, 吕文, 方鄂华. 基于位移延性的剪力墙抗震设计 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20(3): 42–49.
QIAN Jiaru, LV Wen, FANG Ehua. Displacement ductility based shear wall seismic design [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(3): 42–49. (in Chinese)
- [65] 邓明科, 梁兴文, 张思海. 高性能混凝土剪力墙延性性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2009(S1): 139–143.
DENG Mingke, LIANG Xingwen, ZHANG Sihai. Experimental study on ductility of high performance concrete shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2009(S1): 139–143. (in Chinese)
- [66] 剡理祯, 梁兴文, 徐洁, 等. 钢筋混凝土剪力墙变形能力计算方法研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(11): 92–98.
YAN Lizhen, LIANG Xingwen, XU Jie, et al. Research on calculation method of deformation capacity of reinforced concrete shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(11): 92–98. (in Chinese)
- [67] 章红梅, 吕西林, 杨雪平, 等. 边缘构件配箍对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响 [J]. 结构工程师, 2009, 24(5): 100–104.
ZHANG Hongmei, LV Xilin, YANG Xueping, et al. Influence of boundary stirrup on seismic behavior of reinforced concrete shear walls [J]. Structural Engineers, 2009, 24(5): 100–104. (in Chinese)
- [68] 刘志伟. 高性能混凝土剪力墙抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003.
LIU Zhiwei. Study on the Seismic Performance of High Performance Reinforced Concrete Shear Walls [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [69] 郑山锁, 侯丕吉, 李磊, 等. RC 剪力墙地震损伤试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 51–59.
ZHENG Shansuo, HOU Piji, LI Lei, et al. Experimental study of the damage of RC shear walls under low cycle reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 51–59. (in Chinese)
- [40] 史庆轩, 侯炜, 田园, 等. 钢筋混凝土核心筒性态水平及性能指标限值研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 88–95.
SHI Qingxuan, HOU Wei, TIAN Yuan, et al. Study on seismic performance levels and performance index limit values of reinforced concrete core wall structure [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6): 88–95. (in Chinese)
- [41] 郭子雄, 吕西林, 王亚勇. 建筑结构抗震变形验算中层间弹性位移角限值的研讨 [J]. 工程抗震, 1998(2): 1–6.
GUO Zixiong, LV Xilin, WANG Yayong. Study on elastic inter – story drift limits for seismic deformation checking of building structures [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1998(2): 1–6. (in Chinese)
- [42] 钟益村, 王文基, 田家骅. 钢筋混凝土结构房屋变形性能及容许变形指标 [J]. 建筑结构, 1984(2): 38–45.
ZHANG Yicun, WANG Weiji, TIAN Jiahua. The deformation performance and allowable deformation indexes of reinforced concrete building structures [J]. Building Structures, 1984(2): 38–45. (in Chinese)
- [43] Xiong C, Lu X Z, Hori M, et al. Building seismic response and visualization using 3D urban polygonal modeling [J]. Automation in Construction, 2015, 55: 25–34.