

主余震序列型地震动对 RC 框架结构 地震反应定量影响研究

雍 飞, 公茂盛, 霍逸文

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150000;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为探讨主余震作用下结构地震反应特征, 量化主余震序列型地震动对结构地震反应参数的影响, 采用 OpenSEES 有限元软件建立了一个 3 层典型 RC 框架结构模型, 并选取 594 条实际台站记录到的真实主余震地震动记录作为结构反应分析的输入激励, 开展了结构地震反应计算, 分析了余震与主震相对强度、场地条件和地震动输入强度对结构地震反应的定量影响。结果表明: 余震地震动对结构地震反应影响显著, 最大可达 90%, 余震地震动对结构响应影响程度与其对主震的相对强度相关性较大, 与场地条件相关性较小, 规律不明显, 余震强度对结构地震损伤影响明显。本文结果可供考虑主余震作用的结构抗震设计参考。

关键词: 主余震序列型地震; RC 框架结构; 地震反应

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)03-0380-05

Quantitative influence of mainshock-aftershock sequence ground motion on seismic response of RC frame structure

YONG Fei, GONG Maosheng, HUO Yiwen

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150000, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to evaluate the structural seismic response under the action of mainshock-aftershock and quantify the influence of aftershock on structural seismic response parameters, a typical 3-story RC frame structure was numerically modeled by using OpenSEES software, and the seismic response under the excitation of 594 actual mainshock-aftershock strong motions was performed and analyzed. The influences of relative strength, site conditions and ground motion input intensity on the calculation results are discussed according to analysis results. It is found that the aftershock earthquake has a significant influence on structural seismic response, especially on the seismic damage state. The influence of aftershock earthquake on structural response is mainly related to the strong motion relative strength, but has low correlation with site condition. The results can be used as a reference for seismic design of structures considering mainshock-aftershock effects.

Key words: mainshock-aftershock ground motion; RC frame structure; seismic response

强震发生后往往伴随着多次余震, 结构在主震后遭遇余震更容易发生破坏, 如 2019 年 11 月 25 日广西靖西发生 5.2 级地震, 主震区某些房屋结构仅出现微裂缝、掉灰等轻微震害现象, 随后 11 月 29 日发生的 4.6 级余震却造成了房屋严重破坏^[1]。

造成这种结果的可能原因是结构遭遇主震后很多构件会进入非线性状态, 此时构件损失了部分强度和刚度, 结构承载力也随之降低, 导致结构无法再承受余震地震作用^[2], 因此有必要研究主余震作用对结构地震反应的影响。针对此问题, 近年来大量学者开展了相关研究, 韩建平^[3]基于

收稿日期: 2022-09-18

修回日期: 2023-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(U2139209, 52178514, 51678514); 国家重点研发计划课题(2017YFC1500601)

第一作者: 雍 飞(1997—), 男, 硕士生, 主要从事地震工程研究。E-mail: yongfei_cn@163.com

通信作者: 公茂盛(1976—), 男, 博士生, 研究员, 主要从事地震工程研究。E-mail: gmshiem@163.com

Ebrahimian 模型研究了结构在两次地震作用下的损伤特征,表明结构损伤与一次地震作用相比增加了 1.58 倍. 于晓辉等^[4]研究了结构在人工构造主余震地震动和真实主余震地震动的作用下损伤特征,表明前者造成的损伤要高于后者. 杜云霞^[5]研究表明尽管第二次地震作用较小,结构经历两次地震作用的累积损伤仍然十分明显. ZHAI 等^[6]研究了单自由度体系(SDOF)体系在主余震作用下附件损伤特征,发现余震对结构滞回耗能的影响要大于延性参数. 陶静^[7]研究了 SDOF 体系在主余震作用下的增量反应,发现选取不同的地震反应指标,结构增量反应随周期的变化规律不相同. 鉴于此,本文以某 3 层典型钢筋混凝土(RC)框架为算例,以筛选的 594 条实际主余震地震动及其主震地震动记录作为输入,对结构开展了地震反应模拟分析,并采用结构最大加速度、最大层间位移角、滞回耗能和 Park-Ang 损伤指数等 4 个指标,分析了主余震序列对结构造成的影响及大小.

1 地震动记录

为得到序列型地震动记录用于结构地震反应

分析,本文从 NGA-West2 强震记录数据库选取主余震序列型地震动记录作为输入激励,选取原则如下:(1)主震和余震的矩震级 M_w 均大于 5.0,且震级之差在 0.6 到 2.4 之间;(2)主震地震动记录和余震地震动记录均来自同一台站;(3)主震地震动记录和余震地震动记录的两个水平分量 PGA 均值大于 0.04 g,峰值速度(PGV)均值大于 1 cm/s;(4)台站所在场地的剪切波速 V_{s30} 在 100 m/s 到 1 000 m/s之间;(5)一个台站记录到多次余震时,只选取震级最大的余震地震动记录;(6)地震序列时间定为从主震发生起 3 个月内. 根据上述筛选原则建立了本文主余震地震数据集,其基本信息如表 1 所示,将每个台站的主震地震动及其对应余震地震动拼接构成主余震序列地震动记录,主震和余震之间增加了 60 s 时间间隔,共得到 594 条主余震地震动记录,图 1 给出了某台站的一条主余震地震动记录示例. 另外,根据文献^[8]研究结果,将所有主余震序列型地震动按照我国抗震规范分为三类场地,如表 2 所示,其中 II 类场地地震动记录数量较多.

表 1 主余震序列型地震动基本信息

Tab. 1 Basic information of mainshock-aftershock sequence ground motion

主震			余震			主余震地
地震名称	时间	矩震级	地震名称	时间	矩震级	震动数量
Managua, Nicaragua-01	1972-12-23	6.24	Managua, Nicaragua-02	1972-12-23	5.20	2
Friuli, Italy-01	1976-05-06	6.50	Friuli(aftershock 1), Italy	1976-05-07	5.20	2
Imperial Valley-06	1979-10-15	6.53	Imperial Valley-07	1979-10-15	5.01	30
			Imperial Valley-08	1979-10-16	5.62	2
Irpinia, Italy-01	1980-11-23	6.90	Irpinia, Italy-02	1980-11-23	6.20	14
Coalinga-01	1983-05-02	6.36	Coalinga-05	1983-07-22	5.77	2
Whitter Narrows-01	1987-10-01	5.99	Whitter Narrows-02	1987-10-04	5.27	100
			Northridge-02	1994-01-17	6.05	22
Northridge-01	1994-01-17	6.69	Northridge-04	1994-01-17	5.93	4
			Northridge-06	1994-03-20	5.28	48
			Chi-Chi, Taiwan-02, China	1999-09-20	5.90	2
			Chi-Chi, Taiwan-03, China	1999-09-20	6.20	16
Chi-Chi, Taiwan, China	1999-09-20	7.62	Chi-Chi, Taiwan-04, China	1999-09-20	6.20	4
			Chi-Chi, Taiwan-05, China	1999-09-22	6.20	104
			Chi-Chi, Taiwan-06, China	1999-09-25	6.30	218
			Chi-Chi, Taiwan(aftershock 5), Taiwan, China	1999-09-25	6.30	12
L'Aquila, Italy	2009-04-06	6.30	L'Aquila(aftershock 1), Italy	2009-04-07	5.60	8
			L'Aquila(aftershock 2), Italy	2009-04-09	5.40	4

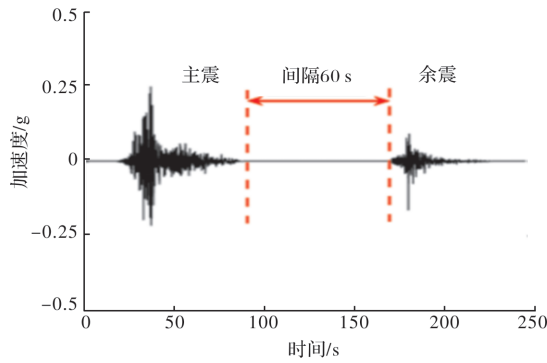


图 1 台站 CHY-035 记录的主余震地震动记录
Fig. 1 Mainshock-aftershock ground motion records of station CHY-035

表 2 不同场地的地震动数量
Tab. 2 Number of ground motions at different sites

场地类别	土层剪切波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	地震动数量
I 类场地	>510	146
II 类场地	$(260, 510]$	312
III 类场地	$(150, 260]$	136

2 结构模型及反应指标

2.1 结构模型

依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[9]设计了一个 3 层 RC 框架结构并开展地震反应分析, 结构设防烈度 8 度, 设计地震分组第二组, 设计基本加速度 0.2 g , 梁柱混凝土强度等级 C30, 受力钢筋 HRB400, 箍筋 HPB335, 基本周期 0.63 s . 选取其中一榀框架结构进行分析, 通过调幅主震地震动计算结构在不同地震动输入强度下地震响应, 图 2 给出了结构相关信息, 采用 OpenSEES 建立有限元模型, 其中混凝土本构模型采用 Concrete 01, 钢筋本构模型采用 Steel 02.

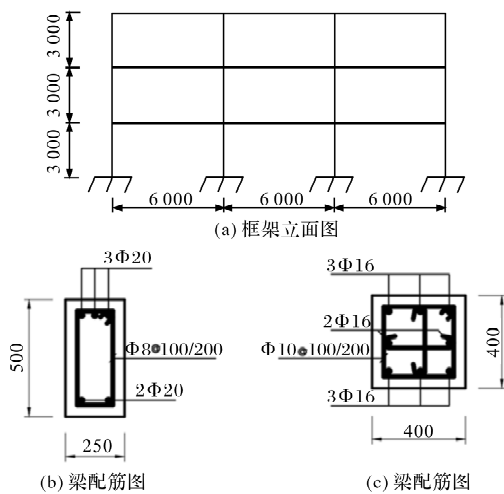


图 2 算例 3 层 RC 框架结构信息(单位: mm)

Fig. 2 Information of a 3-story RC frame structure (Unit: mm)

2.2 结构地震反应指标

本文使用和分析的结构地震反应指标包括最大加速度、层间位移角、滞回耗能 and Park-Ang 损

伤指数, 以 $accMax$ 表示结构最大反应加速度, E 表示结构整体滞回耗能, θ 表示结构层间位移角. 其中 Park-Ang 损伤模型^[10] 定义为

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta \times E_H}{Q_y \times \delta_u} \quad (1)$$

式中: δ_m 为构件在地震作用下的最大变形; δ_u 为构件在单调荷载作用下的极限变形; β 为组合系数; Q_y 为构件的屈服强度; E_H 为构件的累积滞回耗能; 各构件滞回耗能 E_H 之和为结构整体滞回耗能 E . 对结构整体损伤而言, 通过 Chung 加权方法^[11] 得到结构整体损伤指数.

为了能够定量分析余震对结构地震响应影响, 以结构地震反应参数的比值(主余震作用下的结构响应参数与主震作用下结构响应参数之比)来量化余震对结构地震响应的影响. 具体为最大加速度比, 即主余震作用下结构最大加速度 $accMax_{MA}$ 与主震作用下结构最大加速 $accMax_M$ 之比; 最大层间位移角比, 即主余震作用下结构最大层间位移角 θ_{MA} 与主震作用下结构最大层间位移角 θ_M 之比; 滞回耗能比, 即主余震作用下结构总滞回耗能 E_{MA} 与主震作用下结构总滞回耗能 E_M 之比; 损伤指数比, 即主余震作用下结构整体损伤指数 DI_{MA} 与主震作用下结构损伤指数 DI_M 之比. 本文主要采用这些地震响应参数比来探究主余震序列型地震动对结构的定量影响, 即结构经历主震后再经历余震结构地震反应参数会如何变化.

3 结果分析

在对结构进行地震反应分析时, 以主震地震动记录峰值加速度(PGA)作地震动强度控制参数, 即以主震 PGA 为基准调幅, 将 594 条主震记录调幅至 0.1 g 、 0.15 g 、 0.2 g 、 0.3 g 、 0.4 g , 对应的主余震地震动的也乘以相应的调幅系数使其主震部分达到相同的峰值加速度. 将调幅后的地震动依次输入到结构有限元模型中, 得到结构在 5 个地震动输入强度下对应的 4 个反应指标的 23 760 个统计数据(594 254), 以此作为分析的基础数据. 首先按照表 2 将地震动进行场地分类, 对三类场地地震动作用下结构的响应比进行标准化, 即 I 类、II 类、III 类场地下结构响应比均除以 I 类场地的结构响应参数比, 计算所得对 I 类场地标准化的响应比如图 3 所示. 由图 3 可知: I 类、II 类、III 类这三类场地之间的标准化响应比两两差值均在 10% 以内, 表明场地条件对结构响应比有一定影响, 但影响不大, 且场地条件与结构响应比没有表现出很好的规律性, 因此, 在后续分析中忽略了场地类型的影响, 将所有场地统一考虑.

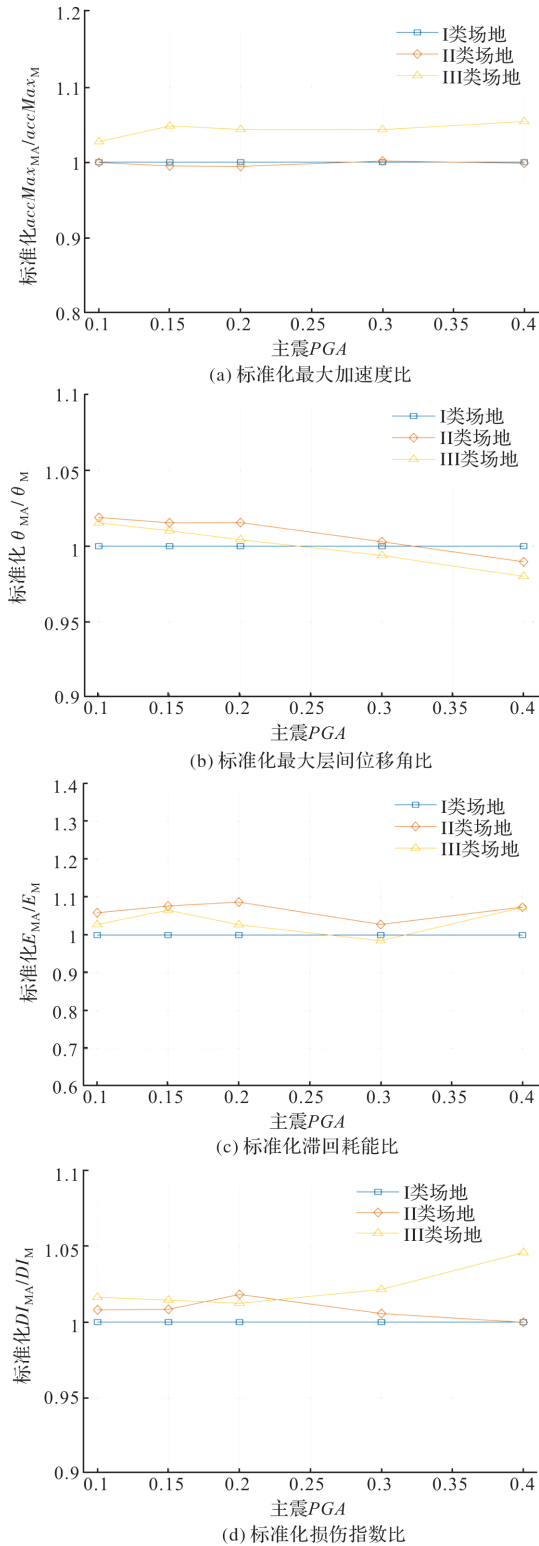


图3 场地条件对结构地震响应比影响

Fig. 3 Influence of site conditions on structural seismic response ratio

为考察主余震相对强度 PGA_a/PGA_m (PGA_a 表示余震地震动加速度峰值, PGA_m 表示主震地震动加速度峰值) 与结构响应比之间关系, 将计算结果按不同相对强度区间进行分类再计算区间内均值, 由于场地条件对计算结果影响不大, 故不区分场地条件进行分析。需要说明的是, 本文主震

PGA 衡量的是地震动输入强度, 而主余震相对强度 PGA_a/PGA_m 表征的是余震地震动峰值加速度与主震地震动峰值加速度之间相对强弱。图 4 给出了不同主余震相对强度下结构 4 个反应指标的响应比值情况, 相对强度区间从小到大的地震动数量分别是 43、168、149、96、74、64。

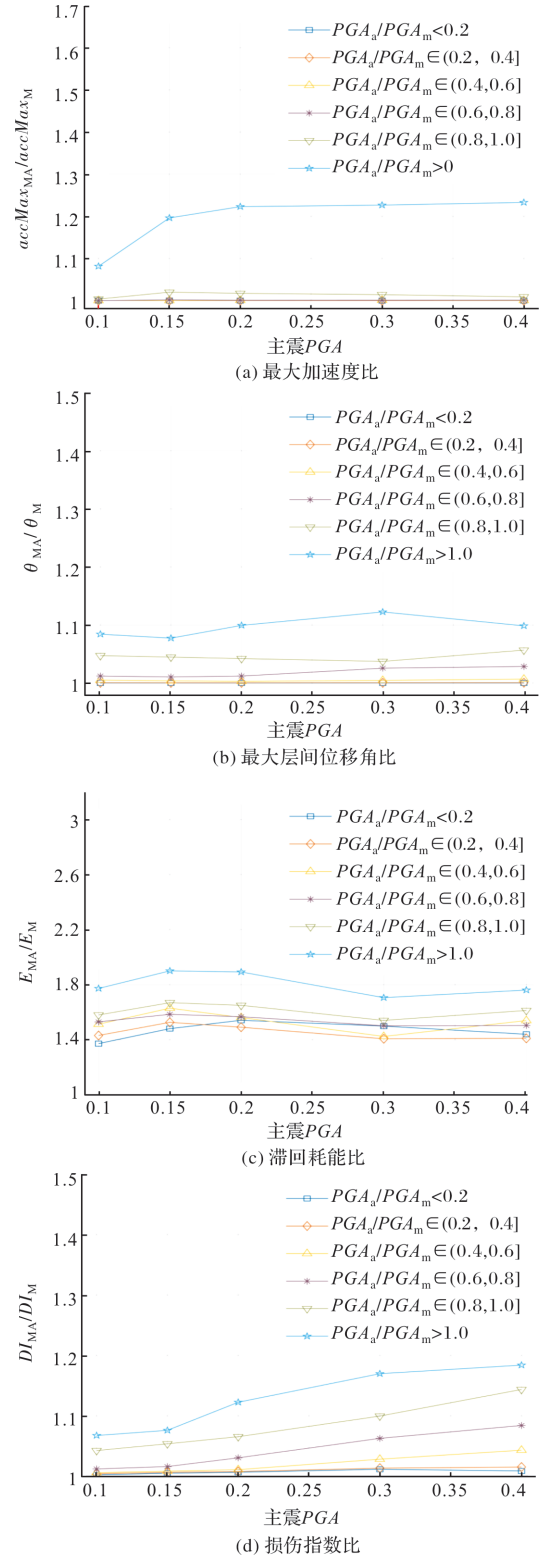


图4 主余震相对强度对结构地震响应比影响

Fig. 4 Influence of mainshock and aftershock relative strength on structure seismic response ratio

图中可以看出随着主余震相对强度逐渐增大, 响应比也随之增大, 当度 PGA_a/PGA_m 大于 1 时, 最大加速度比、最大层间位移角比、结构滞回耗能比和损伤指数比分别达到了 1.2、1.1、1.9、1.2。由此可见, 余震会增大结构的各类地震反应参数, 特别是余震对结构地震反应影响最大的是滞回耗能, 增大幅度达到 90%, 影响最小的是层间位移角, 最大只增加了 10%, 结构最大反应加速度和损伤指数, 各增加了 20% 左右。

4 结论

建立了一个典型 3 层 RC 框架结构数值模型, 以 594 条主余震地震动及其对应的主震地震动作为输入, 分别计算了结构在主余震地震动和主震地震动下的地震反应, 以结构最大加速度、最大层间位移角、滞回耗能、Park-Ang 损伤指数作为结构反应指标, 分析了主余震序列型地震动对结构地震反应的影响。主要结论如下:

(1) 余震对结构地震反应的影响程度随反应指标不同而有所差异, 但整体会增大结构的地震反应, 对结构滞回耗能影响最大, 增大幅度达到 90%, 其次为结构最大加速度和整体损伤指数, 增大幅度为 20% 左右, 对最大层间位移角影响最小, 仅增大了 10% 左右, 建议在分析主余震对结构地震反应影响时, 可优先采用滞回耗能及损伤指数;

(2) 余震对结构地震反应的影响与主余震相对强度密切相关, 随着相对强度增大, 余震对结构地震反应影响也增大; 主余震与主震地震动下结构的损伤指数比与地震动输入强度呈正相关性, 即输入地震动输入峰值加速度越大, 主余震与主震地震动下结构的损伤指数之比也越大;

(3) 地震动的场地条件对主余震与主震地震动下结构的地震反应参数比影响不大, 并且没有很好的规律性, 即各类场地主余震地震动对结构地震反应的影响程度相似。

仅以一个 3 层典型 RC 框架结构为例进行了分析, 所得结论可能具有一定局限性, 下一步将采用更多类型结构进行分析, 以更好了解余震对结构地震反应的定量影响。

参考文献 References

[1] 周琦杰, 朱土凤, 谭劲先, 等. 广西靖西 MS5.2 主余震震害调查对比[J]. 华北地震科学, 2020, 38(S2): 114-122.
ZHOU Qijie, ZHU Tufeng, TAN Jinxian, et al. Earthquake damage investigation and comparison of MS5.2 mainshock-aftershock in Jingxi, Guangxi[J]. North China Earthquake Science, 2020, 38(S2): 114-122.

[2] 谢礼立. 汶川地震的教训[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 1-8.
XIE Lili. Lessons from Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2009, 31(1): 1-8.

[3] 韩建平, 魏世昱, 李一明. 考虑损伤累积的两次续发地震作用下钢筋混凝土框架结构整体损伤评估[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S2): 74-79.
HAN Jianping, WEI Shiyu, LI Yiming. Global damage assessment of reinforced concrete frame structures under two successive earthquakes considering damage accumulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S2): 74-79.

[4] 于晓辉, 代旷宇, 周洲, 等. 主余震序列作用下钢筋混凝土框架结构损伤分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 127-133.
YU Xiaohui, DAI Guanyu, ZHOU Zhou, et al. Damage analysis of reinforced concrete frame structure under the action of mainshock-aftershock sequence[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 127-133.

[5] 杜云霞, 公茂盛, 谢礼立. 两次地震作用下 RC 框架结构抗震能力分析研究方法研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 75-83.
DU Yunxia, GONG Maosheng, XIE Lili. Research on seismic capacity analysis method of RC frame structure under two earthquakes[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 75-83.

[6] ZHAI C H, WEN W P, LI S, et al. The damage investigation of inelastic SDOF structure under the mainshock-aftershock sequence-type ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 59: 30-41.

[7] 陶静. 主余震序列作用下 SDOF 体系的增量损伤与抗倒塌能力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
TAO Jing. Study on incremental damage and collapse resistance of SDOF system under the action of mainshock-aftershock sequence[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[8] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007(1): 67-76, 114.
LÜ Hongshan, ZHAO Fengxin. Amplification coefficient of ground motion response spectrum for Site classification in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007(1): 67-76, 114.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010[S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010.

[10] PARK Y J, ANG A H S. 1985. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 111(4): 722-739.

[11] CHUNG Y S, MEYER C, SHINOZUKA M. Modeling of concrete damage[J]. Structural Journal, 1989, 86(3): 259-271.