

考虑近场脉冲主余震地震动影响的 结构延性系数特性研究^{*}

卢智成¹, 温卫平², 李 圣¹, 李素超^{2,3,✉}, 张 谦¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 102401; 2. 哈尔滨工业大学
结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;
3. 哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 山东 威海 264209)

摘要: 研究了近场脉冲主余震地震动的延性系数特性, 通过修正随机组合构建方法构造了大量近场脉冲主余震地震动, 然后通过标准化周期来降低延性系数的离散性, 最后分析了平均延性系数特性和余震的影响。结果表明: 采用标准化周期能显著降低延性系数的离散性, 降低幅度最大可达 60%, 但随着余震强度的增大, 标准化周期对延性系数离散性的影响逐渐减弱。在短周期段内, 延性系数随着标准化周期的增大急剧减小, 直至在标准化周期等于 1.0 附近达到最小值, 采用标准化周期可以观察到近场脉冲主余震地震动的等位移现象。强余震对延性系数的影响可超过 20% 并达到 30%, 余震对非退化模型的影响大于退化模型。

关键词: 近场脉冲; 主余震; 延性系数; 离散性

中图分类号: P315.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0601-07

0 引言

历史地震资料表明主震发生之后往往会在短时间内发生大量余震。结构在主震作用下往往会发生破坏, 强余震的发生会增大结构的损伤, 产生累积损伤效应, 甚至会对已损伤的结构产生毁灭性的破坏。但是我国乃至全世界的抗震设计规范中通常仅考虑单次地震作用, 鲜少考虑余震对结构产生的影响, 这明显低估了地震序列的破坏能力。

有很多学者针对主余震地震动的破坏能力进行了研究。Hatzigeorgiou 和 Beskos (2009) 研究了主余震地震动作用下的非弹性位移比, 由于缺乏实际记录, 他们采用了随机组合的方法构造了主余震地震动, 但其采用主震地震动来模拟余震地震动, 导致得到的模拟结果高于实际情况; Goda 和 Taylor (2012) 研究了主余震地震动的延性系数

特性, 但是忽略了近场脉冲特性的影响; Zhai 等 (2015a, b) 研究了不同强度余震对非弹性位移比和强度折减系数的影响; Zhang 等 (2017) 研究了主余震地震动的等损伤强度折减系数, 并给出了相应的预测模型; 温卫平 (2016) 和 Wen 等 (2018a, b) 采用实际主余震地震动研究了硬土地地的损伤谱, 提出了修正随机组合构造方法构造软土地地的主余震地震动, 研究了软土地地的主余震地震动的损伤谱特性, 结果表明采用修正后的方法更能反应实际主余震地震动的破坏能力。

以上研究采用不同的指标来研究主余震地震动的破坏能力, 但是往往忽略了主余震序列中包含脉冲特性的情况, 而历次地震如 1999 年中国台湾集集地震、2010 年新西兰地震序列中均记录到了近场脉冲主余震地震动。在脉冲地震动作用下, 结构会在短时间内遭受很大地震能量的作用, 因此结构的损伤也会大于普通地震动, 而当主余震序列中包含脉冲地震动时, 将会使得结构同时遭

^{*} 收稿日期: 2019-07-23.

基金项目: 国家电网公司工程专项科技项目 (SGSD0000JJJS1800508, SGDK0000GCJS1903039) 资助.

✉ 通讯作者: 李素超 (1981-), 讲师, 博士, 主要从事地震工程与减震研究. E-mail: lisuchao@hit.edu.cn.

受主余震序列所致累计损伤和脉冲地震动的作用。因此考虑近场脉冲特性研究主余震地震动的破坏能力对于结构性态评估和设计至关重要。综上所述, 本文将考虑近场脉冲特性影响研究主余震地震动的延性系数特性, 采用延性系数来表征主余震地震动的破坏能力。首先采用 Wen 等 (2018b) 提出的修正随机组合构造方法构造近场主余震地震动, 然后研究周期标准化对延性系数离散性的影响, 最后分析了平均谱的特性以及余震的影响, 相关结果可为主余震作用下结构的性态评估提供依据。

1 地震动构造

虽然历次地震中均记录到了近场脉冲主余震地震动, 但是数量仍然过少, 无法进行有效的统计分析, 因此采用构造的近场脉冲主余震地震动就成为一个合理的选择。目前常用的构造方法为随机组合方法, 即选取一定数量的实际主震地震动, 然后在这个数据库中随机选取 2 条记录, 一条作为主余震序列中的主震地震动, 另一条作为主余震序列中的余震地震动。采用这种方法构造的主余震地震动去除了重复构造方法 (即将同一条记录重复多次来模拟主余震地震动) 的缺点, 尤其是当主余震序列数量较少时, 随机组合方法能够很好地避免重复构造方法易导致的主余震频谱特性相同的问题。

然而, 当所构造的主余震序列数量较多时, 由于构造同一组主余震地震动时选用的地震记录均来自一数据库, 传统的随机组合方法在系统意义上会出现主余震频谱特性相仿情况。Wen 等 (2018b) 在研究软土地场损伤谱时提出了主余震地震动的修正随机组合构造方法, 在这种方法中, 首先选取 2 组地震动用于构造主余震地震动, 其中第一组由实际主震地震动构成, 第二组由实际余震地震动构成, 并且第二组记录的反应谱要在统计意义上小于第一组, 然后再随机组合第一组和第二组中的记录, 生成构造的主余震地震动。采用这种方法, 对于单条和一组主余震地震动, 余震地震动的频谱特性均与主震不同, 更

吻合实际情况。

本文采用 Wen 等这种修正随机组合构造方法来构造近场脉冲主余震地震动, 首先选取 2 组脉冲记录, 其中第一组由实际主震脉冲记录构成, 第二组由实际余震脉冲记录构成。图 1 为第二组记录与第一组记录的标准化反应谱比值, $Group2/Group1$ 表示实际余震脉冲记录的标准化反应谱 ($Group1$) 与实际主震脉冲记录的标准化反应谱 ($Group2$) 的比值, 其中标准化反应谱是加速度反应谱与 PGA 的比值。

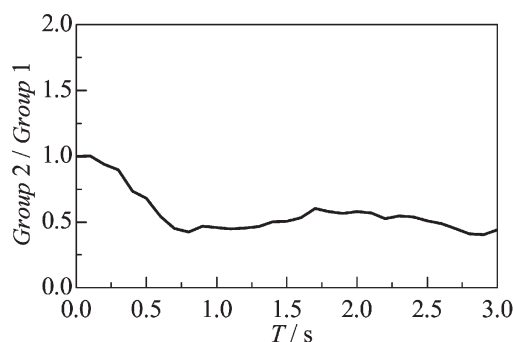


图 1 第二组记录与第一组记录的
标准化反应谱比值

Fig. 1 Ratio of normalized response spectrum
between the 2nd and 1st records

由图 1 可以看出, 第二组记录的标准化反应谱小于第一组记录, 与实际主余震地震动的统计结果 (Wen *et al*, 2018a; Goda, 2015; Shin, Kim, 2017) 相吻合。其中, 第一组记录中包含 30 条实际主震脉冲记录, 第二组包含 20 条实际余震脉冲记录, 通过随机组合构造了 600 条近场脉冲主余震地震动。对于每一条主余震地震动, 余震与主震之间增加 30 s 的时间间隔来模拟实际情况, 使得结构在余震作用之前能停止振动。为了研究不同强度余震的影响, 定义余震地震动的相对谱加速度 ∇S_a :

$$\nabla S_a = \frac{S_{a,as}}{S_{a,ms}} \quad (1)$$

式中: $S_{a,as}$ 和 $S_{a,ms}$ 分别为余震地震动和主震地震动的谱加速度。

2 延性系数计算

在计算主余震地震动的延性系数时，单自由度系统的周期为 0.1 ~ 3.0 s，结构阻尼比为 5%，采用强度折减系数 R 来衡量结构的侧向强度：

$$R = \frac{m \cdot S_{a,ms}}{F_y} \quad (2)$$

式中： m 为结构质量，这里假定为 $m = 1.0$ ； F_y 为结构屈服强度。

结构延性系数定义为：

$$\mu = \frac{x_m}{x_y} \quad (3)$$

式中： x_m 为结构在地震动作用下的最大位移； x_y 为结构屈服位移。

采用 2 个不同的滞回模型：理想弹塑性（Elastic - perfectly plastic, EPP）模型和修正（Modified Clough, MC）模型来模拟结构出现刚度退化的现象。其中 EPP 模型为非退化模型、MC 模型为退化模型。

3 统计结果分析

3.1 周期标准化的影响

类似于软土地地震动，近场脉冲地震动有着明显的低频特性，其频谱特性可通过地震动的卓越周期 T_g 或脉冲周期 T_p 来表征。已有研究表明采用 T_g 来对结构周期进行标准化，可明显降低反应谱的离散性（Wen *et al.*, 2014）。因此本文采用主震地震动的卓越周期 $T_{g,ms}$ 来对结构周期进行标准化。

图 2 为标准化周期对于 EPP 模型反应谱变异系数与非标准化周期对于 EPP 模型反应谱变异系数的比值， COV 为统计结果的标准差与均值的比值。由图 2 可以看出， COV 值最小小于 0.4，可见标准化周期能显著降低延性系数的离散性，且降低的幅度可能超过 60%。将 ∇S_a 分别调幅至 0.5, 0.8 和 1.0，图 2a, b 中的 COV 值均小于 1.0，图 2c 中开始出现 COV 值大于 1.0 的情形，图 2d 中 COV 值则有更多大于 1.0 的情形出现，这说明随着 ∇S_a 的增大，余震的频谱特性开始影响主余震地震动延性系数的离散性。但总体来看，标准化周

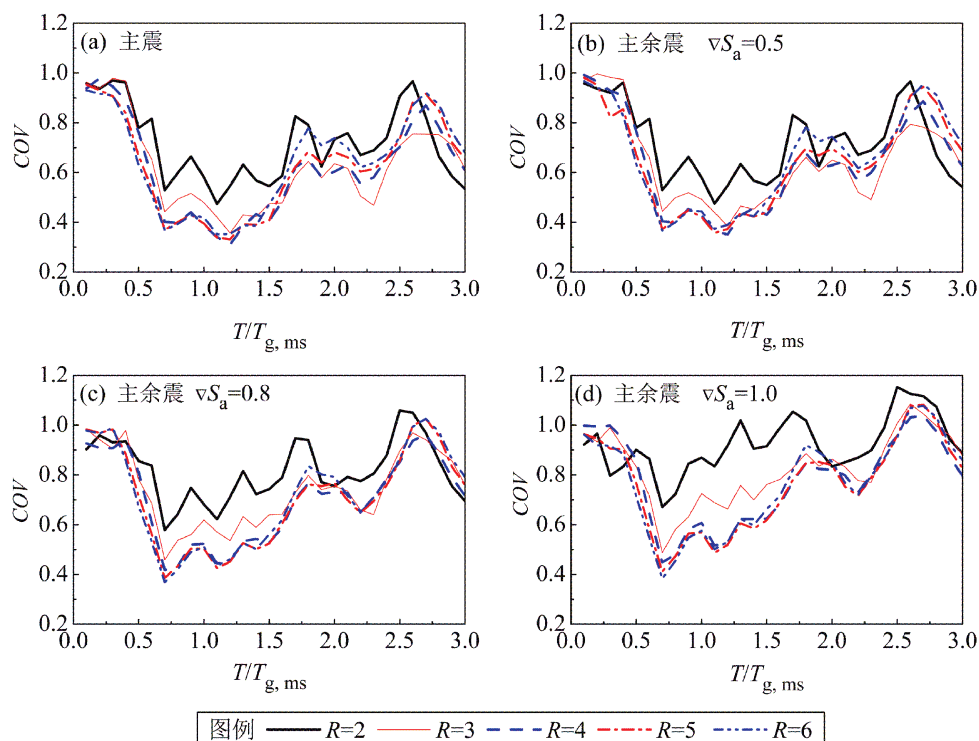


图 2 标准化周期对 EPP 模型结构延性系数离散性的影响

Fig. 2 The effect of period normalization on the dispersion of EPP ductility factor

期对于减小延性系数离散性的效果仍然非常明显,因此本文在研究主余震地震动延性系数时采用主震地震动卓越周期 $T_{g,ms}$ 对结构周期 T 进行标准化。

3.2 平均延性系数特性

图3为近场脉冲主余震作用下EPP模型和MC模型的平均延性系数(μ)。为了便于比较分析,图3分别给出了标准化周期和非标准化周期对应的平均延性系数。

由图3可以发现,标准化周期会显著改变平均延性系数的谱形状。由于近场脉冲地震动的低频

特性的影响,对于非标准化周期的情形,中等周期段的延性系数会显著大于非脉冲记录,同时这会导致在近场脉冲地震动作用下需要结构周期很大才能满足等位移原理。由于近场脉冲的影响,图3a和3c无法观察到等位移现象。对于标准化周期的结果,在短周期段内,延性系数随着标准化周期的增大急剧减小,直至在标准化周期等于1.0附近达到最小值。然后随着标准化周期的增大,延性系数趋于稳定值,可以观察到明显的等位移原理(即延性系数近似等于强度折减系数)。

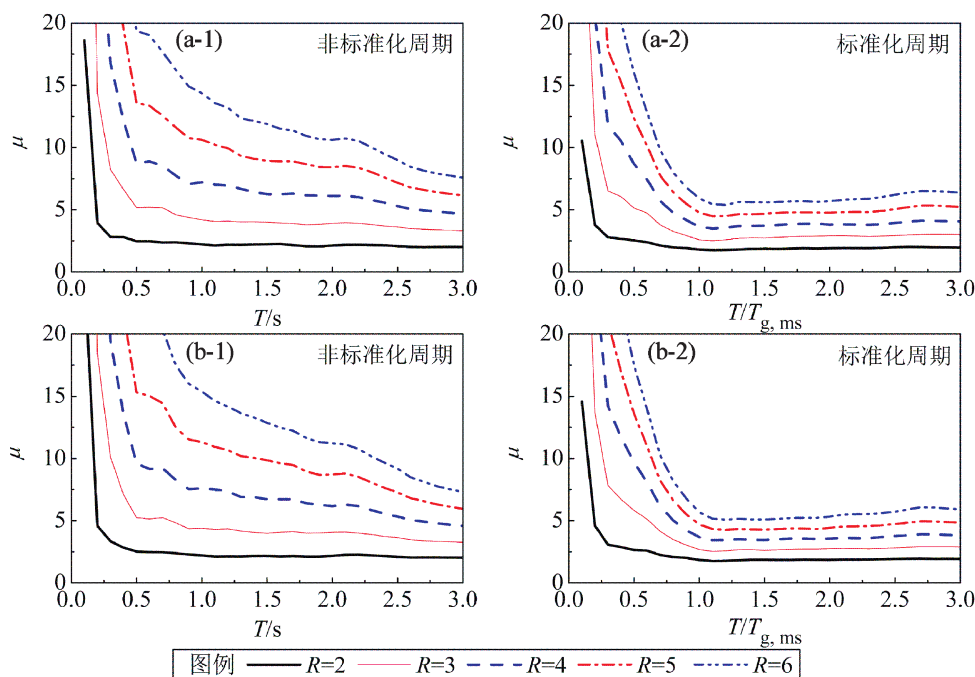


图3 近场脉冲主余震作用下EPP模型(a)和MC模型(b)的平均延性系数

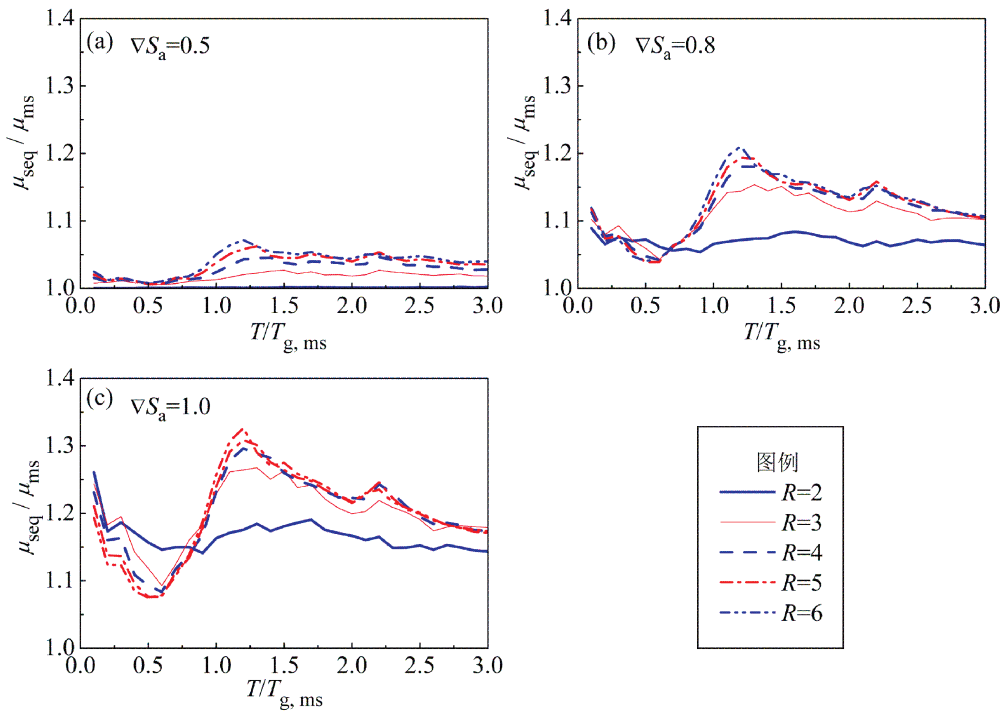
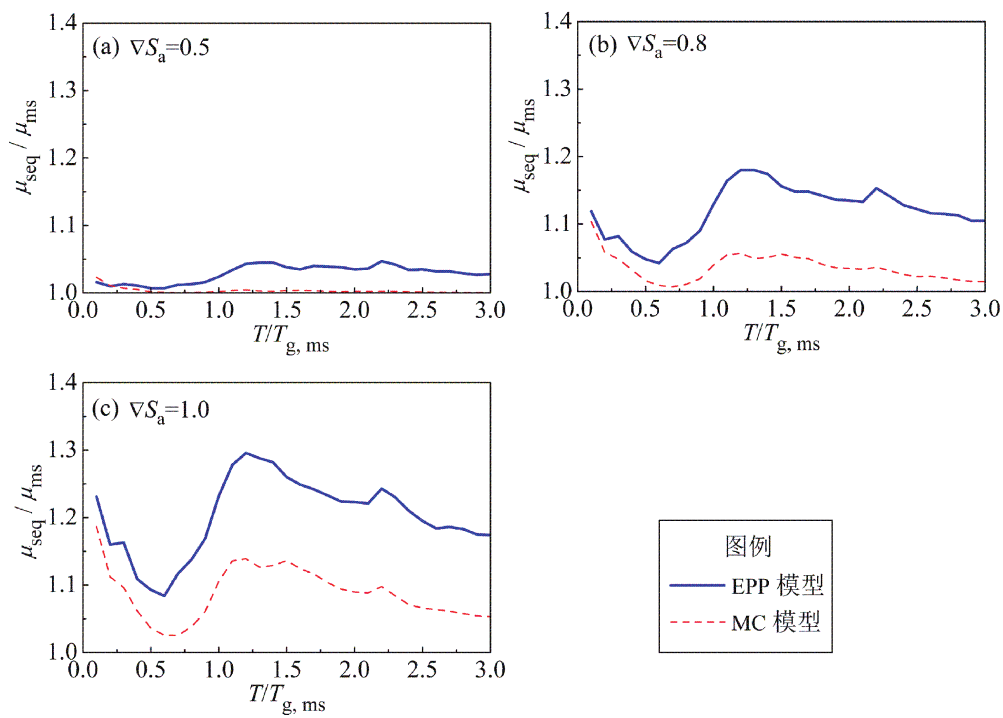
Fig. 3 The averaged ductility factor of EPP model (a) and MC mode (b) under mainshock - aftershock sequences during near - field fault earthquake

3.3 余震的影响

通过计算主余震地震动延性系数 μ_{seq} 与主震地震动延性系数 μ_{ms} 的比值来量化余震的影响,图4为 R 取值不同时,不同 ∇S_a 下余震对EPP模型延性系数的影响。由图4a可以看出 μ_{seq}/μ_{ms} 均小于1.1,说明 $S_a=0.5$ 的余震对延性系数的影响均小于10%。图4b中 μ_{seq}/μ_{ms} 大部分在1.1~1.2,表明 $\nabla S_a=0.8$ 的余震对延性系数的影响达10%~20%。图4c中的 μ_{seq}/μ_{ms} 在1.2~1.3,表明 $\nabla S_a=1.0$ 的余震对延性系数的影响达20%~

30%。由于周期标准化的影响,在标准化周期1.0附近余震的影响最大,这是因为在这个区域平均延性系数的值要小于其他区域(见图3b, d),相同强度余震作用下会对该区域的延性系数产生更大的影响。

为了对比余震对不同滞回模型的影响,本文主要分析了 $R=4$ 时,余震对EPP和MC模型延性系数的影响规律,如图5所示。由图5可以看出,余震对EPP模型延性系数的影响要显著大于MC模型,EPP模型对应的比值要显著大于MC模型,且随着余震强度的增大,2种模型之间的差别也逐渐增大。

图4 R 取值不同时, 不同 ∇S_a 下余震对 EPP 模型延性系数的影响Fig. 4 The effect of aftershocks on ductility factor of EPP mode under different ∇S_a and R 图5 $R=4$ 时, 不同 ∇S_a 下余震对 EPP、MC 模型延性系数的影响Fig. 5 The effect of aftershocks on ductility factor of EPP and MC mode under different ∇S_a in the case of $R=4$

4 结论

本文研究了近场脉冲主余震地震动的延性系数特征,首先采用修正随机组合构造方法构造了 600 条近场脉冲主余震地震动,然后研究了周期标准化对延性系数离散性的影响,最后分析了平均延性系数的特性以及余震的影响,得到了以下结论:

(1) 标准化周期会显著降低延性系数的离散性,且降低的幅度可能超过 60%;随着余震强度的增大,标准化周期对延性系数离散性的影响逐渐减弱。

(2) 在短周期段内,延性系数随着标准化周期的增大急剧减小,直至在标准化周期等于 1.0 附近达到最小值。采用标准化周期可以观察到近场脉冲主余震地震动的等位移现象,而非标准化周期对应的结果则需要很大的周期才可能观察到。

(3) 余震对延性系数的影响随着余震强度的增大逐渐增大, $\nabla S_a=0.5$ 的余震对延性系数的影响小于 10%, $\nabla S_a=0.8$ 的余震对延性系数的影响为 10%~20%, $\nabla S_a=1.0$ 的余震对延性系数的影响为 20%~30%。

(4) 在标准化周期为 1.0 左右时余震的影响最大,余震对非退化模型(EPP 模型)的影响要大于退化模型(MC 模型)。

参考文献:

温卫平. 2016. 主余震地震动参数特征及损伤谱研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.

- Goda K, Taylor C A. 2012. Effects of aftershocks on peak ductility demand due to strong ground motion records from shallow crustal earthquakes [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41 (15): 2311–2330.
- Goda K. 2015. Record selection for aftershock incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44 (7): 1157–1162.
- Hatzigeorgiou G D, Beskos D E. 2009. Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated Earthquakes [J]. *Engineering Structures*, 31 (11): 2744–2755.
- Shin M, Kim B. 2017. Effects of frequency contents of aftershock ground motions on reinforced concrete (RC) bridge columns [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97: 48–59.
- Wen W P, Zhai C H, Li S, *et al.* 2014. Constant damage inelastic displacement ratios for the near-fault pulse-like ground motions [J]. *Engineering Structures*, 59: 599–607.
- Wen W, Ji D, Zhai C, Li X, *et al.* 2018b. Damage spectra of the mainshock-aftershock ground motions at soft soil sites [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115: 815–825.
- Wen W, Zhai C, Ji D. 2018a. Damage spectra of global crustal seismic sequences considering scaling issues of aftershock ground motions [J]. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 47 (10): 2076–2093.
- Zhai C, Wen W, Ji D, *et al.* 2015a. The influences of aftershocks on the constant damage inelastic displacement ratio [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79: 186–189.
- Zhai CH, Wen W P, Li S, *et al.* 2015b. The ductility-based strength reduction factor for the mainshock-aftershock sequence-type ground motions [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (10): 2893–2914.
- Zhang Y, Chen J, Sun C. 2017. Damage-based strength reduction factor for nonlinear structures subjected to sequence-type ground motions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92: 298–311.

Study on the Characteristics of Structural Ductility Factor for Mainshock – Aftershock Sequences Considering the Effect of Near – Fault Pulse – Like Features

LU Zhicheng¹, WEN Weiping², LI Sheng¹, LI Suchao^{2,3}, ZHANG Qian¹

(1. China Electric Power Research Institute Co, Ltd, Beijing 102401, China)

(2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

(3. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract

Many earthquakes have shown that mainshock – aftershock (MSAS) sequences would include the near – field fault pulse – like records, and pulse – like records would further increase the danger of earthquake sequences. This paper analyzes the ductility factor for near – field fault pulse – like MSAS ground motions. The revised randomization method is used to generate lots of near – fault pulse – like MSAS ground motions, and then normalizing the period to decrease the dispersion of ductility factor. The mean ductility factor and the effects of aftershocks are finally analyzed. The results indicate that period normalization can decrease the dispersion of results with the maximum level of 60%. However, the strong aftershock would decrease the advantage of period normalization. In the short period region, ductility factor decreased sharply with the increase of period, until the minimum value reached around the normalized period of 1.0 s. The equal displacement rule can be observed when the period normalization is used. The effects of strong aftershocks on the ductility factor can exceed 20% and reach 30%, and aftershocks have larger effects on the ductility factor for un – degrading systems than that for degrading systems.

Keywords: near – field fault pulse – like; mainshock – aftershock; ductility factor; dispersion