

李喜梅, 苏润田, 李明睿, 等. 2024. 主余震序列作用下考虑断层距的桥梁风险分析[J]. 地震研究, 47(2): 300–310, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0024.

Li X M, Su R T, Li M R, et al. 2024. Risk analysis of the bridge hit by the mainshock-aftershock sequence considering fault distance [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 300–310, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0024.

## 主余震序列作用下考虑断层距的桥梁风险分析\*

李喜梅<sup>1,2</sup>, 苏润田<sup>1,2</sup>, 李明睿<sup>1,2</sup>, 母渤海<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050; 3. 中国市政工程

西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为了提高震害预测和结构震后性能评估的准确性和合理性, 提出了一种考虑断层距衰减的主余震序列构造方法, 并使用该方法构造了 50 组相关场地的地震动; 以一座三跨连续梁桥为研究对象, 使用 OpenSees 抗震分析软件进行非线性动力分析, 采用改进的 Park-Ang 损伤指标建立易损性曲线, 分析断层距对连续梁桥在不同设防主余震序列下的损伤指数和破坏概率的影响; 提出震后危险性分析方法, 对比分析了考虑断层距的主余震序列对桥梁结构的震后风险性影响。结果表明: 余震的发生导致结构的损伤概率提高了 10 倍以上; 在断层距 10 km 范围内的结构发生中度及以上破坏的风险性较大; 提高设防地震等级能有效避免结构在主余震序列作用下发生严重或倒塌破坏; 在震后救援和重建时考虑断层距的影响可以防止造成二次伤害。

**关键词:** 桥梁结构; 主余震序列; 断层距; 易损性分析; 风险性分析

**中图分类号:** U448.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)02-0300-11

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0024

### 0 引言

各国地震工程学家和学者统计研究发现, 大多数地震是以地震序列的形式发生的(何顺龙, 符晓敏, 2021)。序列型地震相比孤立型地震来说, 对结构造成的损伤几乎呈成倍增加, 且余震发生的次数越多, 结构的损伤效应也会不断加剧, 因此将“余震不倒”纳入抗震性能目标(刘森鑫等, 2015), 在主震发生后快速研判该地震序列的类型及余震强度具有重要的减灾意义(解孟雨, 孟令媛, 2022)。另外, 断层距作为结构抗震分析的考虑因素之一, 对结构响应和地震动参数之间的相关性具有明显的影响(胡进军等, 2020), 而目前对不同断层区域的结构抗震性能的研究较为缺乏, 但很有必要(李帅, 2018)。因此, 考虑断

层距影响下的主余震序列对结构造成的损伤可以更全面地了解结构的抗震能力和破坏机理, 从而提高结构的安全储备, 这对于结构的防震减灾具有重要意义。

风险性分析是一种全面评估结构在主余震序列作用下受损状况的方法, 能够综合考虑结构的易损性、危险性以及地震造成的损失。近年来, 风险性分析已经成为研究热点, 在地震灾害防治领域具有重要的理论和实践意义, 如于晓辉等(2020)研究得出含多次余震的地震序列中具有最大峰值加速度的余震对结构起控制作用; 包旭(2020)考虑了结构的不确定性和余震致使结构增加的地震危险性; 袁万城等(2016)用云图法对比分析余震对结构的地震易损性的影响, 忽略余震会高估结构的抗震能力; 王通行(2019)对比研究不同损伤指标和不同构件对易损性的影响及

\* 收稿日期: 2022-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金(地区基金)(52268028).

第一作者简介: 李喜梅(1979-), 副教授, 博士, 主要从事桥梁结构减隔震分析及振动控制研究.

E-mail: mei611@163.com.

不同场地余震引起的超越概率最大增量；梁岩等（2019）认为随着桥梁服役时间和地震动峰值加速度的增大，同一损伤状态的超越概率也不断增大；黄明刚（2009）对钢混连续梁桥进行了易损性、危险性分析，在此基础上进行了风险性分析。除了以上因素，一些学者开展了关于断层距对地震易损性影响的分析，如夏长华和郭龙（2014）统计了2008年汶川8.0级地震中受损土石坝与震中距和断层距的相关性，认为大震中宜采用断层距作为现场震害评估的指标；傅杰（2019）通过绘制易损性云图，研究了断层距对桥墩易损位置和损伤概率的影响，但桥型的针对性太强，适应性有限。综合以上研究可知，将考虑断层距的主余震序列作为评价结构震后风险性的主要因素具有重要意义，可以为工程抗震设计提供科学依据，从而提高结构的抗震性能和安全储备，有效减缓地震灾害对后期救援重建所造成的二次伤害。

本文提出一种考虑断层距的主余震序列构造方法，并构造50组主余震序列；建立一座三跨连续梁桥的OpenSees模型进行非线性时程动力分析，依次计算和分析桥梁结构的易损性、危险性和风险性，同时，比较主余震序列和主震、设防等级以及断层距等因素对桥梁结构造成的损伤，探讨考虑余震和断层距对于评估桥梁结构震后损伤程度的影响。

## 1 主余震序列构造方法

### 1.1 常用的主余震序列构造方法

重复法由Hatzigeorgiou（2010）等提出，通过调整主震峰值加速度，将主震重复一次或多次来模拟余震。尽管该方法有时会导致结果误差较大，但仍被广泛应用于余震序列构造的研究中（Lee, Foutch, 2004）。

Li和Ellingwood（2010）提出将两条从不同地震事件中随机挑选的地震动进行随机组合以构造人工主余震序列，称为随机法。但余震的发生和主震有一定的相关性，因此使用此方法构造的主余震序列容易导致计算结果产生较大误差（任雪梅等，2009；吕晓健等，2010；朱瑞广，吕大刚，2019）。

衰减法是基于广义的大森定律（Goda, Taylor, 2012）提出的，该定律认为主震与余震之间

存在一定的衰减关系。因此，在衰减法中，通常将主震的震级以一定的规律作衰减来获得不同强度的余震。

对比3种主余震序列构造方法可以发现，采用重复法构造地震序列忽略了主余震序列地震动调幅前后的频谱变化，导致余震的强度大于真实情况，增量损伤附加值较大；随机法容易低估或高估余震带来的附加损伤；衰减法需要结合地区的地震统计规律才能构造出区域场地主余震序列的特征。

### 1.2 考虑断层距衰减的主余震序列构造方法

为了满足预测余震强度的真实性，本文将重复法和衰减法的优点相结合，提出考虑断层距衰减的主余震序列构造方法，给出主余震序列地震关于震级、烈度、衰减关系等的统计规律。具体步骤如下：首先，采用李喜梅等（2021）根据地震统计资料，利用震级与烈度之间的关系，结合重复法，考虑了余震的衰减变化给出余震震级与烈度的关系。其次，通过统计数据获得主余震序列震级的衰减关系（图1），根据研究对象的设防烈度，从《公路桥梁抗震设计规范》（JTGT 2231-01—2020）中选取烈度和峰值加速度。最后，已知主震的谱加速度，基于衰减法的原则，根据以断层距衡量的地震动烈度衰减关系式（1）（Joyner, Boore, 1982），利用样条插值法求得每次余震的峰值加速度，获得相应的余震记录，完成主余震序列的构造。

$$\lg(PGA) = 0.49 - 0.0027\sqrt{R_{jb}^2 + 8^2} + 0.23(m - 6) - \lg\sqrt{R_{jb}^2 + 8^2} \quad (1)$$

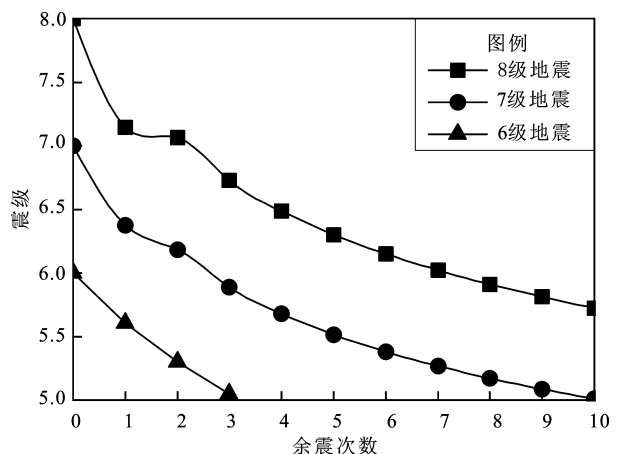


图1 余震震级衰减规律

Fig. 1 Attenuation law of the magnitude of aftershocks

式中： $PGA$  表示地震动峰值加速度； $R_{jb}$  是地震发生时结构距离震源断层最近处的地面直线距离； $m$  是地震震级。

本文提出的主余震序列构造方法考虑了余震烈度衰减，综合了衰减法和重复法各自的优点，利用它能够更加合理地挑选出可以预测桥梁结构损伤的主余震序列。因此，本文排除震源深度过深的地震事件和记录不全的地震事件，从太平洋地震工程研究中心（Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEERC）网站选取 3 个主余震事件的 10 条地震记录作为主震，见表 1（表中仅列出了 3 个主余震事件在不同台站的信息，另外 3 条是相同台站选取的其他震记录），采用考虑断层距衰减的主余震序列构造方法，构造了不同断层距的 50 组地震记录作为余震进行后续分析，其中一组主余震序列如图 2 所示。

表 1 主余震事件信息				
Tab. 1 Mainshock-aftershock event information				
序列	地震名称	台站	$R_{jb}/\text{km}$	$PGA/g$
1	Friuli, Italy-01 02	Codroipo	33. 20	0. 061
2	Chalfant Valley	Bishop-LADWP South St	14. 38	0. 248
3	ChiChi	TCU065	0. 57	0. 760
4	ChiChi	TCU059	17. 10	0. 160
5	ChiChi	CHY025	19. 70	0. 162
6	ChiChi	HWA014E	51. 50	0. 103
7	ChiChi	CHY065	85. 95	0. 052

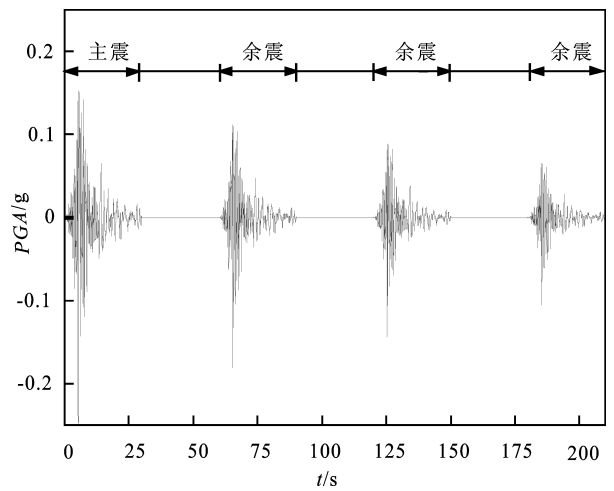


图 2 本文构造的主余震序列  
Fig. 2 Artificial mainshock-aftershock sequence

## 2 桥梁风险分析的理论方法

### 2.1 地震易损性理论

#### 2.1.1 损伤指标

采用合适的评价标准对于定性和定量评价结构在主余震序列作用后的损伤状态和通行能力有重要影响。Park – Ang 指标又称双参数损伤指标，最初由 Park 和 Ang（1985）提出。它同时考虑了结构的变形和累计耗能，经 Stone 和 Taylor（1993）改进，用弯矩和曲率替代广义力和广义位移，计算结构误差更小，与实际结构有更好的一致性。Park – Ang 不同损伤状态下的结构损伤指数  $DI$  表示为：

$$DI = \frac{\Delta_m - \Delta_0}{\Delta_n - \Delta_0} + \alpha \frac{\int dE}{M_y \Delta_n} \tag{2}$$

式中： $DI$  为结构损伤指数； $\Delta_m$  为地震作用下结构构件的最大曲率反应，对于主余震作用的情况，取多次地震作用后构件的最大变形； $\Delta_0$  为结构构件在单调荷载作用下的屈服曲率； $\Delta_n$  为结构构件在单调荷载作用下的极限曲率； $M_y$  为结构构件在单调荷载作用下的屈服弯矩； $dE$  为构件吸收的滞回能量，对于主余震序列情况，应取主余震地震序列作用后总的滞回耗能； $\alpha$  为耗能因子，根据 Park（1987）研究取 0. 15。

根据式（2）选取  $DI$ ，可合理体现余震对结构的累计损伤效应，结果见表 2。

表 2 不同损伤状态对应的损伤指数范围（据 Park，1987）

Tab. 2 The damage state corresponding to the damage index range (according to Park, 1987)		
破坏等级	损伤状态	损伤指数
基本完好	表面微小裂纹	0 ~ 0. 1
轻微破坏	部分区域出现贯通的微裂纹，纵筋进入屈服	0. 1 ~ 0. 25
中度破坏	部分区域的裂纹加剧，混凝土保护层开始脱落	0. 25 ~ 0. 4
严重破坏	裂纹急剧变宽，部分混凝土保护层全脱落，箍筋颈缩	0. 4 ~ 0. 8
倒塌破坏毁坏	箍筋断裂或者纵筋屈服断裂，核心混凝土压碎	$\geq 0. 8$

### 2.1.2 易损性分析方法

结构易损性分析，即分析在某强度的地震动作用下结构的损伤指数超过破坏状态指标的概率。在地震动强度条件下，地震需求服从对数正态分布，当结构的抗震能力与结构的地震需求均被描述为对数正态分布时，桥梁结构达到不同损伤程度的失效概率也是按对数正态分布的。设地震需求  $D$  和抗震能力  $C$  的均值为  $\mu_d$ 、 $\mu_c$ ，方差为  $\beta_d^2$ 、 $\beta_c^2$ ，则地震易损性分析函数可表示为：

$$P_f(Z \leq 0) = \Phi\left(-\frac{\ln \mu_d - \ln \mu_c}{\sqrt{\beta_d^2 - \beta_c^2}}\right) \quad (3)$$

统计计算数据并进行线性回归拟合代入式(3)可判定结构在某一地震强度参数下的地震需求是否大于抗震能力。直线回归法损伤指数的线性回归拟合比较简单，且精度基本满足计算要求，因此本文选取直线回归概率线性拟合法来完成结构的易损性分析，线性拟合表达式如下：

$$\ln(\mu_d) = a \ln(IM) + \ln b \quad (4)$$

式中： $IM$  表示地震动的强度； $a$ 、 $b$  是线性回归系数；根据 HAZUS99 (1999) 研究，以  $PGA$  为地震动强度指标时， $\sqrt{\beta_d^2 - \beta_c^2}$  取 0.5。

## 2.2 风险性分析理论

风险性分析通常包括场地危险性分析、结构易损性分析和地震损失分析 3 部分内容。地震风险 = 结构的地震危险性  $\times$  地震损失。

### 2.2.1 危险性分析方法

在地震作用下，结构的地震危险性 = 结构的地震易损性  $\times$  场地的危险性 (任文静, 2017)。桥梁的危险性是分析桥梁在遭受地震作用破坏后的承载性能和安全状态的基础，在一定程度上体现了一个地区的结构抵抗地震灾害能力的大小。地震发生后，危险性分析尤为关键，且震后较短时间内强余震发生的频率高、概率大，应引起重视。震前地震危险性评估受限于缺乏实测地震动数据、场地特征的不确定性等因素，存在一定的局限性，未考虑震后短期内场地可能发生余震的情况。本文根据危害分析的原理，提出震后的危险性分析计算方法如下：

$$F(S, IM) = F(S | R_{jb}, R_{jb} + \Delta R_{jb}) \times F(IM) \quad (5)$$

式中： $F(S, IM)$  为结构的损伤破坏概率，即桥梁的地震危险性； $F(S | R_{jb}, R_{jb} + \Delta R_{jb})$  是指在  $R_{jb}$  和  $(R_{jb} + \Delta R_{jb})$  之间桥梁发生损伤的超越概率，即桥梁的易损性，取  $R_{jb} = 0$ ， $\Delta R_{jb} = 20$  km； $F(IM)$  为不同地震指标下的概率密度函数。100 年基准期内的场地危险性公式 (任文静, 2017) 为：

$$P(A > a') = 1 - \exp\left[-0.2108 \left(\frac{a'}{A}\right)^{-k}\right] \quad (6)$$

式中： $A$  为设计基本地震峰值加速度； $k$  为场地相关系数； $a'$  为设防地震的峰值加速度。

### 2.2.2 地震损失计算

本文地震损失评估的是桥梁在完好状态下遭受地震作用破坏后的损伤状态，不涉及震后救援投入费用。不考虑社会损失和交通需求，本文通过桥梁结构的经济损失比来解释不同损伤状态下结构的损伤价值。结构经济损失比是指结构在不同破坏状态下，维护或重建结构单位面积所需费用与初始造价之比，其取值参考美国地震风险评估系统 (DHS, 2009) 所定义的损失比，见表 3，其中倒塌破坏状态的损失比为  $2/x$  ( $x$  为桥梁总跨数)。

表 3 不同破坏状态的损失比

Tab. 3 Loss ratios of different ultimate failure states

破坏等级	损失比范围	本文损失取值比
轻微破坏	0.01 ~ 0.03	0.03
中度破坏	0.02 ~ 0.15	0.08
严重破坏	0.10 ~ 0.40	0.25
倒塌破坏	0.30 ~ 1.00	0.33

## 3 工程概况及有限元模型

本文使用 OpenSees 有限元分析软件作为建模平台，以我国西北某桥梁为研究对象，该桥梁为一座跨径为 26 m + 27 m + 24 m 的连续梁桥 (图 3)，场地条件为 II 类，抗震设防烈度为 VIII 度。主梁混凝土采用 C30；2 号桥墩墩高 6.65 m，3 号桥墩墩高 7 m，桥墩直径为 1.6 m，桥墩混凝土为

C30, 纵筋和箍筋分别为直径 28 和 12 mm 的 HRB335 级钢筋; 主梁与桥墩的连接采用盆式橡胶支座 JPZ (Ⅲ)。

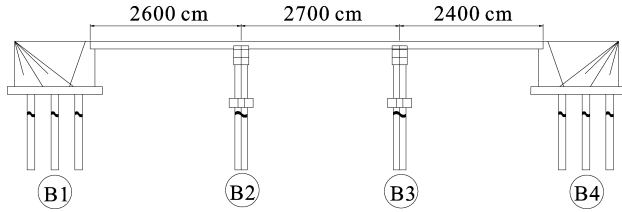


图3 连续梁桥立面图

Fig. 3 Elevation figure of a continuous beam bridge

在建模过程中, 桥梁上部被简化为弹性梁柱单元, 支座连接利用零长度单元模拟。考虑到支座竖向承载力较大且变形较小的特点, 采用 Steel01 材料本构来模拟支座竖向刚度。对桥墩进行时程分析时, 需考虑其弹塑性变形阶段。采用基于柔度法的弹塑性纤维梁柱单元来建立桥墩单元, 核心混凝土、保护层混凝土和钢筋的材料本构分别采用 Concrete02、Concrete01 和 Steel02 模拟, 使有限元模型在进行时程分析时更接近真实地震加载情况。

## 4 主余震序列作用下桥梁的风险性分析

### 4.1 不同断层距主余震序列作用下桥梁的易损性分析

#### 4.1.1 主震作用下考虑断层距变化的易损性分析

对算例连续梁桥的纵桥向进行时程分析, 选用改进的 Park - Ang 损伤指标为评估标准, 对在主震作用下的连续梁桥桥墩进行增量动力分析方法 (Incremental Dynamic Analysis, IDA) 分析, 绘制损伤指数与地震峰值加速度的对数散点回归线 (图 4), 线性拟合式为:

$$\ln(DI) = 2.946 \ln(PGA) - 0.31775 \quad (7)$$

根据不同的损伤状态指标将式 (7) 代入式 (3) 中, 得到主震作用下结构在不同损伤状态下的超越概率, 绘制连续梁桥桥墩在不同峰值加速度下的易损性曲线 (图 5)。由图 5 可以看出, 在遭遇罕遇地震 ( $PGA = 0.4 \text{ g}$ ) 时, 结构轻微损伤

概率为 5%, 而在遭遇特罕遇地震 ( $PGA = 0.58 \text{ g}$ ) 时, 结构发生倒塌的概率低于 1%, 符合我国基于性能要求的抗震设防目标。

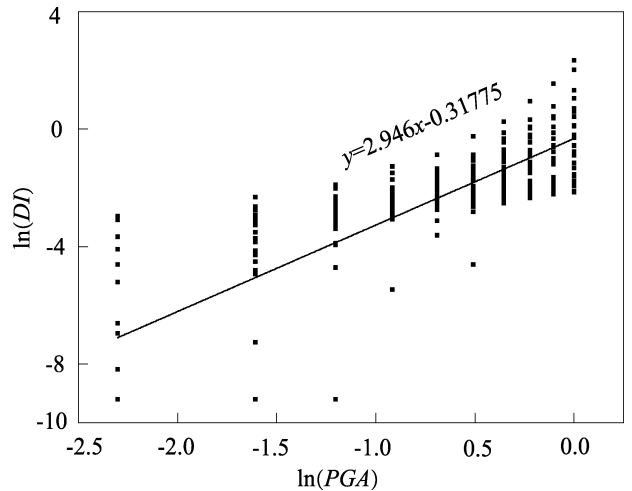


图4 主震作用下连续梁桥桥墩的损伤指数与 PGA 的回归分析

Fig. 4 Regression analysis between  $DI$  and  $PGA$  of the bridge piers subjected to the main shock

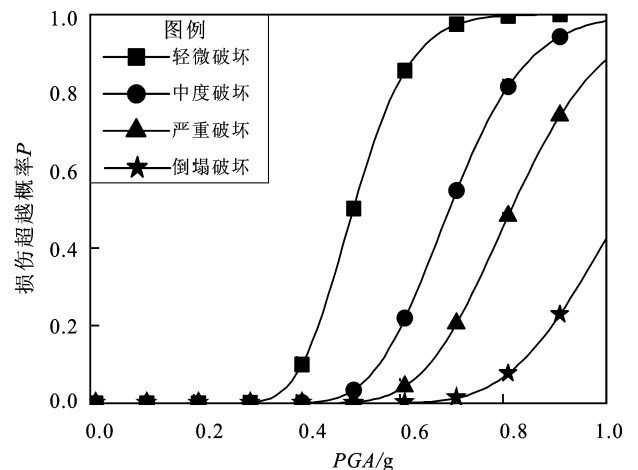


图5 主震作用下连续梁桥桥墩的易损性曲线

Fig. 5 Vulnerability curve of the bridge piers hit by main shock

把不同设防标准的地震动代入式 (1), 得到不同断层距下桥墩的地震动峰值加速度衰减曲线 (图 6), 对比设防地震动波形和 1999 年中国台湾集集 7.6 级大地震记录可以看出, 它们的衰减变化趋势较为吻合。将图 6 的数据代入式 (3) 中, 求出不同断层距下结构损伤状态的超越概率, 以罕遇地震为例, 结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,

遭遇罕遇地震时,震中区内桥梁桥墩发生轻微破坏的超越概率为 7.7%,中度破坏的概率 0.55%。在震中 10 km 范围内桥墩结构遭受轻微破坏概率较高,严重破坏概率小于 0.01%。

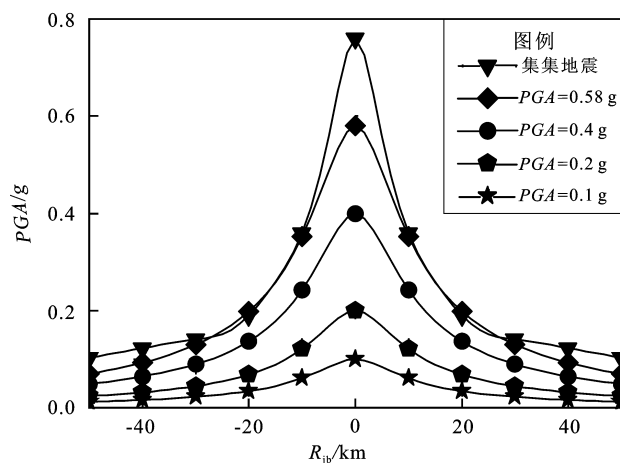


图6 不同断层距下桥墩的地震动加速度衰减曲线

Fig. 6 Attenuation of the ground motion acceleration at different fault distances

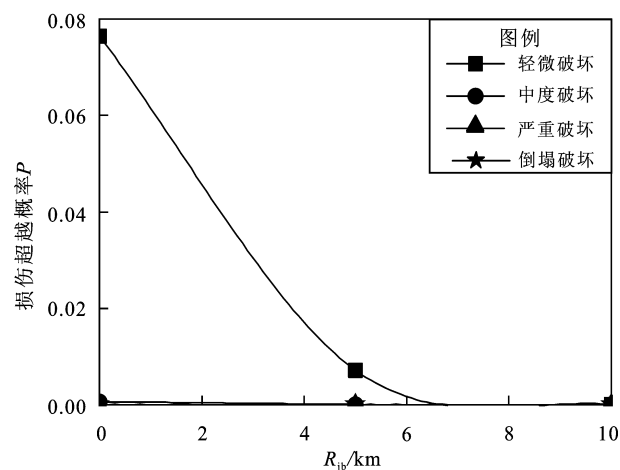


图7 遭遇罕遇主震时不同断层距下桥墩的破坏概率

Fig. 7 The probability of damage to bridge piers at different fault distances during a rare major earthquake

#### 4.1.2 主余震序列作用下断层距对损伤指数的影响

我国《破坏性地震应急条例》(中华人民共和国国务院, 1995) 第 22 条规定:“震后应急期一般为 10 日”, 因此, 本文以主震发生后第 10 日发生的余震对结构造成的累积损伤为研究对象, 采用式 (8) 进行回归拟合:

$$\ln(DI) = 2.946 \ln(PGA) + 0.55673 \quad (8)$$

结合不同断层距下桥墩的地震动加速度衰减规律 (图 6), 分析研究多遇地震、罕遇地震与特罕遇地震作用下结构损伤指数随断层距的变化规律, 结果如图 8 所示。由图 8 可以看出, 在地震作用下结构的损伤指数随断层距的增大而减小, 断层距增大到 30 km 后, 结构的损伤指数几乎减小到 0; 损伤指数随设防地震等级的提高而增大, 在近断层条件下, 设防地震等级地震动峰值加速度 PGA 由 0.2 g 增大到 0.58 g, 则损伤指数增大 20 倍。

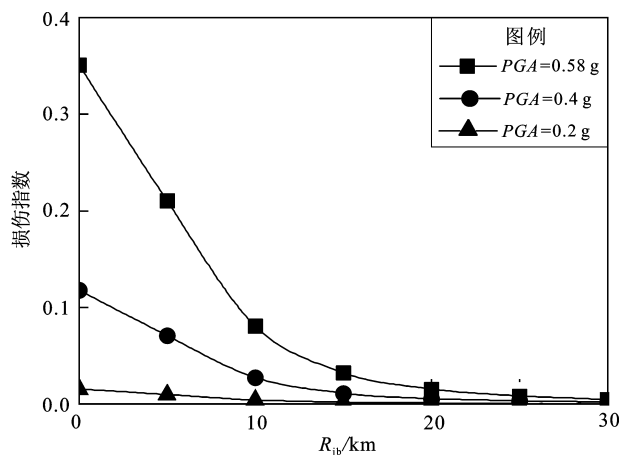


图8 多遇地震、罕遇地震、特罕遇地震作用下结构损伤指数随断层距的变化曲线

Fig. 8 The structural damage index vs the fault distance when the structure is hit by frequent earthquakes, rare earthquakes and very rare earthquakes

#### 4.1.3 主余震序列作用下桥梁破坏概率随断层距的变化

结合在遭遇多遇地震、罕遇地震、特罕遇地震 3 种不同设防等级地震作用时结构的损伤指数 (图 8)、超越概率公式 (式 3), 以及损伤指标 (表 2), 分别计算这 3 种设防等级的地震作用下桥梁发生轻微破坏、中度破坏、严重破坏和倒塌破坏的超越概率, 研究其在不同断层距下的变化规律, 结果如图 9 所示。

由图 9 可见, 在多遇地震作用下桥梁不易发生破坏; 在罕遇地震作用下桥梁有发生中度破坏的可能; 在特罕遇地震作用下震中 20 km 范围内的桥梁有发生损伤破坏的可能, 震中 10 km 范围内桥梁

发生严重破坏和倒塌破坏的概率较高,地震震级逐级增大导致桥梁发生轻微破坏的概率提高了  $1.2 \times 10^4$  倍,发生倒塌破坏的概率提高了  $4.2 \times 10^{13}$  倍。对比图 7 和图 9b 可得出,余震的发生会导致桥梁的损伤程度提高 10 倍以上。

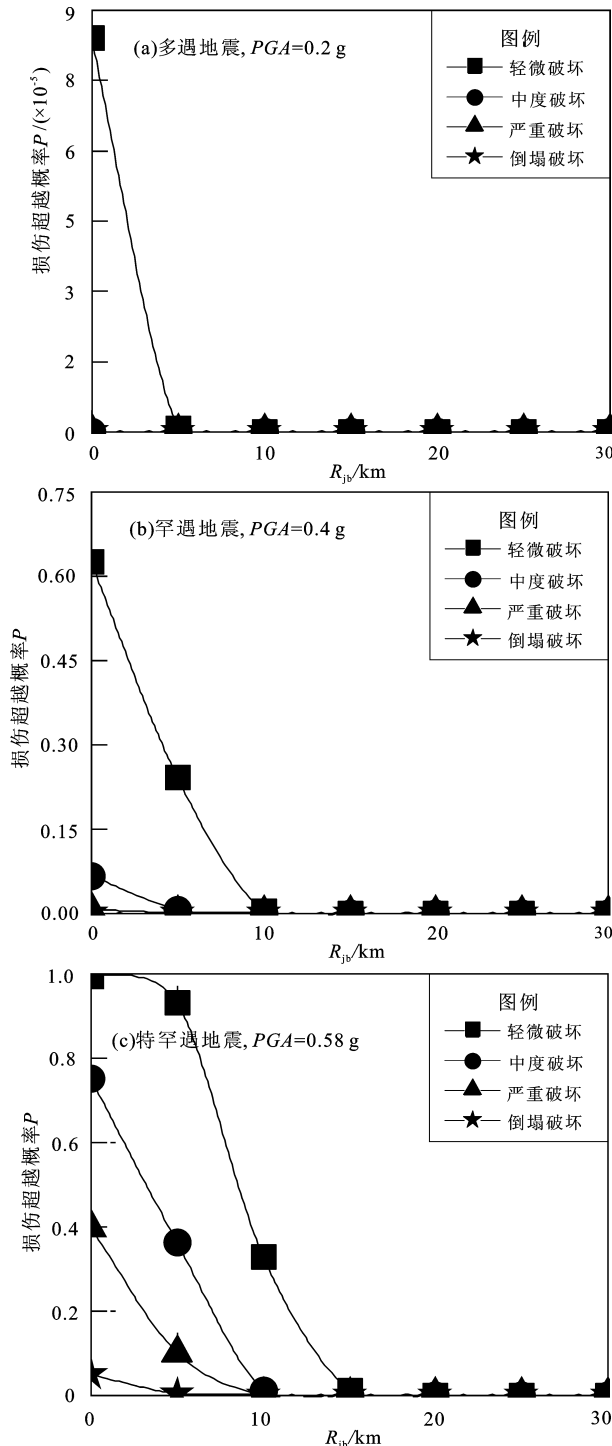


图 9 主余震序列作用下桥梁的破坏超越概率

Fig. 9 Exceeding probability of the bridge piers failure when piers are hit by the mainshock-aftershock sequence

## 4.2 主余震序列下桥梁风险分析

### 4.2.1 危险性分析

算例桥梁处于Ⅷ度抗震设防区,所以设计基本峰值加速度取  $0.2 \text{ g}$ ,场地相关系数取  $6.87$ ,设防地震的峰值加速度取  $0.1 \sim 1.0 \text{ g}$ ,代入式 (5) 可以求出不同设防地震所对应的超越概率。以损伤超越概率为纵坐标,以设防地震峰值加速度为横坐标,绘制算例桥梁场地的地震危险性曲线图 (图 10)。

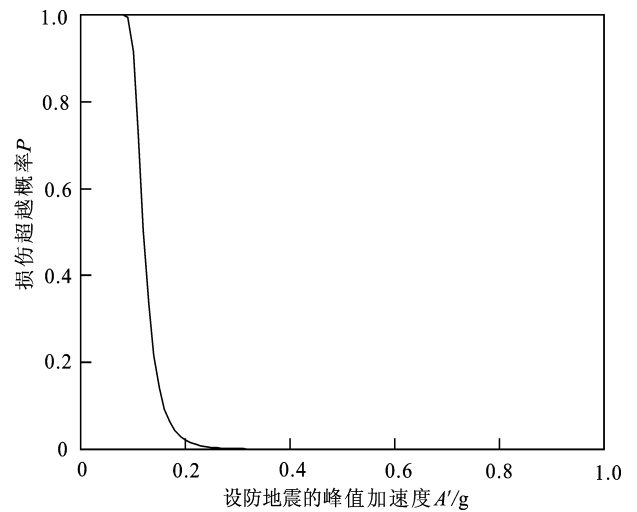


图 10 场地的地震危险性曲线图

Fig. 10 The seismic hazard curve of the site

结构的地震危险性 = 结构的地震易损性  $\times$  场地危险性。在图 10 中分别取多遇地震 ( $PGA = 0.2 \text{ g}$ )、罕遇地震 ( $PGA = 0.4 \text{ g}$ ) 和特罕遇地震 ( $PGA = 0.58 \text{ g}$ ) 对应的超越概率,将其代入图 9 的易损性曲线中,就可得到桥墩在遭受不同等级地震作用时发生轻微破坏、中度破坏、严重破坏和倒塌破坏的危险性概率,如图 11 所示。

由《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999) 可知,本算例桥梁的可靠度指标为  $1.3 \times 10^{-6}$ 。由图 11 可以看出,在遭遇罕遇地震时桥墩发生轻微破坏和中度破坏的危险性最高,且均大于可靠度指标  $1.3 \times 10^{-6}$ 。严重破坏及倒塌破坏的最危险情况是在遭遇特罕遇地震时,发生严重破坏的危险性也大于可靠度指标,发生倒塌破坏的危险性小于规范给出的可靠度指标,相对于其它 3 种破坏,倒塌破坏最不易发生;在震中  $10 \text{ km}$  范围内结构在主余震序列作用下发生破坏的危险性最高。

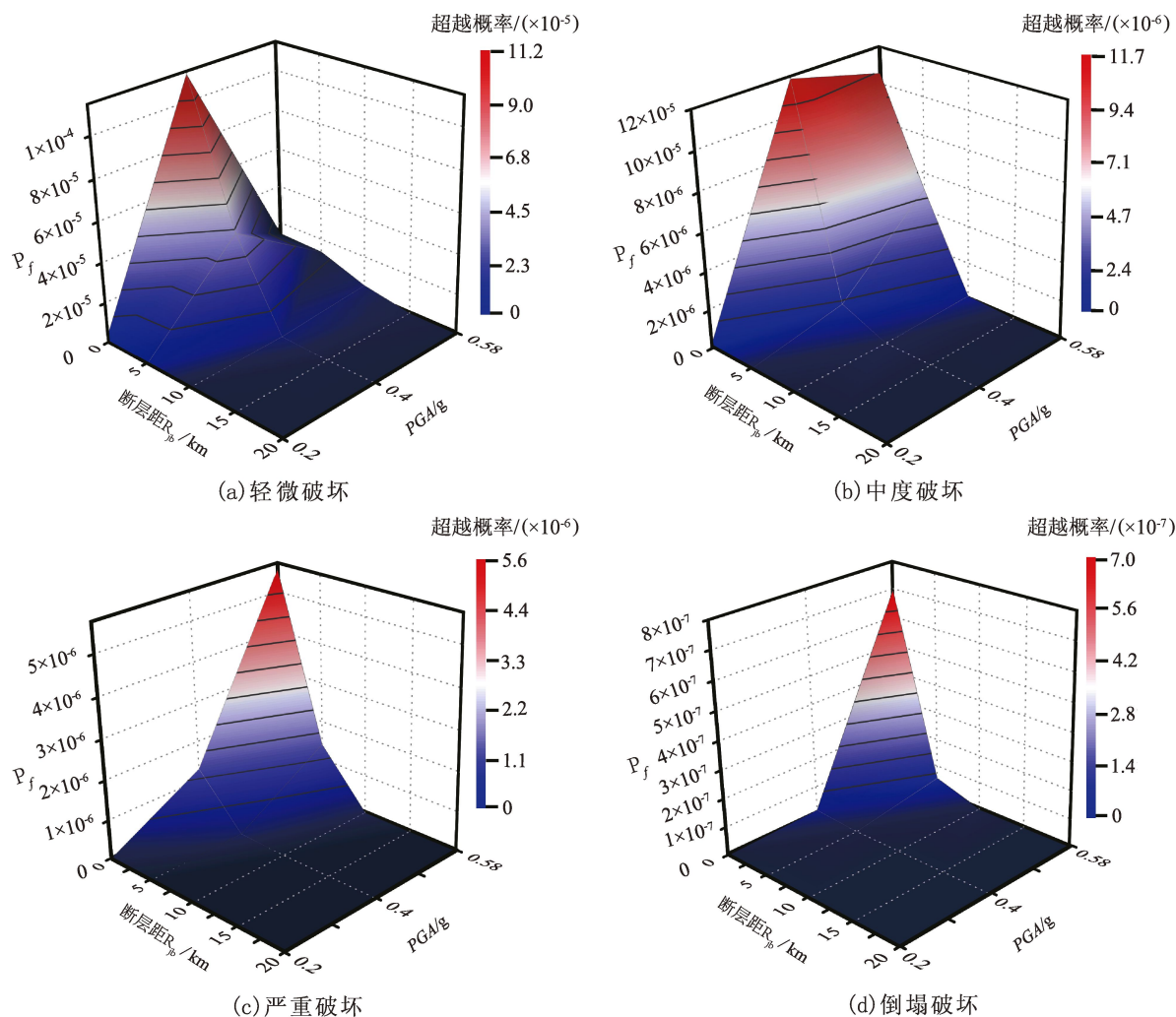


图 11 桥墩在各破坏状态下的危险性曲线

Fig. 11 Hazard curves for each damage state

#### 4.2.2 风险性分析

根据表 3 的经济损失比和图 11 的桥墩危险性计算桥梁模型在 100 年设计基准期内的地震风险概率，统计主余震序列作用下桥梁的地震风险概率随断层距的变化规律，以特罕遇地震为例，结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出，桥梁结构在主余震序列作用下发生破坏的风险性随着破坏程度的提高而减小，但随着断层距的减小而增大。其中，发生轻微破坏的风险概率最高，与实际情况相符合。所以，在进行桥梁设计时，要保证结构最多发生轻微破坏。距离震源越近的结构，余震所造成的二次增量损伤越明显，在震后救援和修复重建时，要根据断层距定制合理方案。

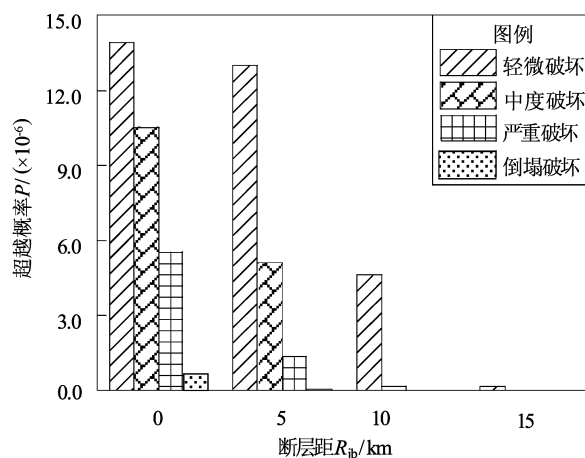
图 12 特罕遇主余震序列作用下  
桥梁破坏的风险性概率

Fig. 12 Hazard probability of the bridge failure subjected to the very rare mainshock-aftershock sequence



## 5 结论

本文提出一种考虑断层距衰减的主余震序列构造方法,以一座三跨连续梁桥为例,分析其主要抗震构件——桥墩在主余震序列作用下发生损伤破坏的易损性、危险性及风险性,得出以下结论:

(1) 相比仅考虑主震作用,主余震序列作用下,余震会导致结构的累积损伤提高 10 倍以上。因此,进行桥梁抗震能力设计时应充分考虑余震的影响。

(2) 将设防地震等级由多遇地震提高到特罕遇地震时,桥梁发生倒塌破坏的概率提高了  $4.2 \times 10^{13}$  倍。因此,提高设防地震等级对于结构抗震设计具有重要的应用价值。

(3) 断层距 10 km 范围内的结构在遭受主余震序列作用时,发生破坏的危险性最高。在特罕遇地震作用下,当断层距从 10 km 减小到 5 km 时,结构破坏的危险性从轻微破坏提升到倒塌破坏。

建议在震后救援和恢复重建时,在主震震中 10 km 范围内,要及时对受损结构进行加固以减小余震造成二次损伤。同时,还要定制安全系数较高的救援方案,以防止结构发生严重的倒塌破坏,避免造成二次伤亡。

## 参考文献:

- 包旭. 2020. 主余震序列作用下核电厂安全壳的动力响应分析和抗震安全评估[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- Bao X. 2020. Dynamic analysis and seismic safety assessment of nuclear power plant containment structures subjected to mainshock-aftershock sequences[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. (in Chinese)
- 傅杰. 2019. 断层距对连续刚构桥地震易损性的影响规律研究[D]. 成都:西南交通大学.
- Fu J. 2019. Research on the influence of fault distance on seismic vulnerability of continuous rigid frame bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 何顺龙,符晓敏. 2021. 主余震序列作用下结构损伤性能研究现状综述[J]. 四川建筑,41(1):174-176.
- He S L, Fu X M. 2021. Review on the research status of structural damage performance under the action of main aftershock sequence[J]. Sichuan Architecture, 41(1):174-176. (in Chinese)
- 胡进军,赵泽锋,谢礼立. 2020. 考虑场地类别和断层距的地震动及结构响应参数相关性分析[J]. 地震工程与工程振动,40(2):13-22.
- Hu J J, Zhao Z F, Xie L L. 2020. Correlation analysis of ground motion parameters and structural response parameters considering the site condition and fault distance[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 40(2):13-22. (in Chinese)
- 黄明刚. 2009. 钢筋混凝土连续梁桥的地震易损性、危险性及风险分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- Huang M G. 2009. Seismic fragility, hazard and risk analysis of reinforced concrete continuous girder bridges[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. (in Chinese)
- 李帅. 2018. 近断层地震动工程特性及其作用下大跨斜拉桥地震响应分析[D]. 南京:东南大学.
- Li S. 2018. Engineering characteristics of near-fault ground motion and seismic response analysis of long-span cable-stayed bridge under action[D]. Nanjing: Southeast University. (in Chinese)
- 李喜梅,李明睿,母渤海. 2021. 人工主余震作用下桥墩结构损伤预测评估分析[J]. 地震工程学报,43(6):1402-1408.
- Li X M, Li M R, Mu B H. 2021. Damage prediction and evaluation of bridge pier structure under artificial mainshock-aftershock sequences[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(6):1402-1408. (in Chinese)
- 梁岩,闫佳磊,牛欢,等. 2019. 考虑主余震作用的近海桥墩时变地震易损性分析[J]. 地震工程学报,41(4):887-894.
- Liang Y, Yan J L, Niu H, et al. 2019. Time-dependent seismic fragility analysis of offshore bridge piers under mainshock and aftershocks[J]. China Earthquake Engineering Journal, 41(4):887-894. (in Chinese)
- 刘森鑫,谭平,魏路. 2015. 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,38(3):480-485.
- Liu M X, Tan P, Wei L. 2015. Seismic design on energy dissipation structures under major and aftershocks earthquakes based on damage performance[J]. Journal of Seismological Research, 38(3):480-485. (in Chinese)
- 吕晓健,高孟潭,郝平,等. 2010. 中国大陆 7 级大地震强余震震级和空间分布特征[J]. 地震学报,30(2):61-70.
- Lyu X J, Gao M T, Hao P, et al. 2010. Magnitude and spatial distribution of strong aftershocks of M7 earthquakes in mainland China[J]. Acta Seismologica Sinica, 30(2):61-70. (in Chinese)
- 任文静. 2017. 近海桥梁地震易损性及风险分析[D]. 大连:大连理工大学.
- Ren W J. 2017. Seismic vulnerability and risk analysis of the offshore bridge[D]. Dalian: Dalian University of Technology. (in Chinese)
- 任雪梅,高孟潭,刘爱文,等. 2009. 1900 年以来我国西南地区强余震统计特征[J]. 震灾防御技术,4(2):200-208.
- Ren X M, Gao M T, Liu A W, et al. 2009. Statistical characteristics of strong aftershocks since 1900 in southwestern China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 4(2):200-208. (in Chinese)

- 王通行. 2019. 长持时主余震作用下钢筋混凝土连续梁桥易损性分析[D]. 西安: 长安大学.
- Wang T X. 2019. Vulnerability analysis of reinforced concrete continuous beam bridge under the action of main aftershock [D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese)
- 夏长华, 郭龙. 2014. 大地震震害与震中距或断层距的相关性[J]. 工业建筑, 44(1): 5-8.
- Xia C H, Guo L. 2014. The correlation of earthquake damage with epicentral distance and fault margins[J]. Industrial Construction, 44(1): 5-8. (in Chinese)
- 解孟雨, 孟令媛. 2022. 推定最大余震震级法在南北地震带的应用[J]. 地震研究, 45(3): 424-433.
- Xie M Y, Meng L Y. 2022. Application of the method of the inferred magnitude of the largest aftershock in the North-south Seismic Belt[J]. Journal of Seismological Research, 45(3): 424-433. (in Chinese)
- 于晓辉, 马富梓, 吕大刚. 2020. 考虑多次余震的钢筋混凝土框架结构地震损伤分析[J]. 建筑结构学报, 41(S2): 19-26.
- Yu X H, Ma F Z, Lyu D G. 2020. Seismic damage analyses of reinforced concrete frame structures considering multiple aftershocks[J]. Journal of Building Structures, 41(S2): 19-26. (in Chinese)
- 袁万城, 王征南, 庞于涛, 等. 2016. 连续梁桥在主震-余震序列波下的地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 37(12): 1671-1676.
- Yuan W C, Wang Z N, Pang Y T, et al. 2016. Seismic fragility analysis of a continuous girder bridge subject to an earthquake mainshock-aftershock sequence[J]. Journal of Harbin Engineering University, 37(12): 1671-1676. (in Chinese)
- 中华人民共和国国务院. 1995. 破坏性地震应急条例[Z].
- The State Council of the People's Republic of China. 1995. Emergency Regulations for Destructive Earthquakes[Z]. (in Chinese)
- 朱瑞广, 吕大刚. 2019. 基于 Copula 函数的主余震地震动强度参数相关性分析[J]. 工程力学, 36(2): 114-123.
- Zhu R G, Lyu D G. 2019. Copula-based correlation analysis of intensity measures of mainshock-aftershock ground motions[J]. Engineering Mechanics, 36(2): 114-123. (in Chinese)
- GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- GB/T 50283—1999, Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures[S]. (in Chinese)
- JTGT 2231-01—2020, 公路桥梁抗震设计规范[S].
- JTGT 2231-01—2020[S], Specifications for Seismic Design of Highway Bridges[S]. (in Chinese)
- DHS. 2009. HAZUS—MH MR4 earthquake model user manual [M]. Washington D C: Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division.
- 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 & Structural Dynamics, 41(15): 2311-2330.
- Hatzigeorgiou G D. 2010. Ductility demand spectra for multiple near- and far-fault earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(4): 170-183.
- HAZUS99. 1999. User's Manual [M]. Washington D C, USA. Federal Emergency Management Agency.
- Lee K, Foutch D A. 2004. Performance evaluation of damaged steel frame buildings subjected to seismic loads[J]. Journal of Structural Engineering, 130(4): 588-599.
- Li Q, Ellingwood B R. 2010. Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under mainshock-aftershock earthquake sequences[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(3): 405-427.
- Park Y J, Ang A H S. 1985. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 111(4): 722-739.
- Park Y J. 1987. IDARC: inelastic damage analysis of reinforced concrete; frame-shear-wall structures [M]. NCEER.
- Stone W C, Taylor A W. 1993. Seismic performance of circular bridge columns designed in accordance with AASHTO/CALTRANS standards [J]. National Institute of Standards and Technology, 170: 102-106.

## Risk Analysis of the Bridge Hit by the Mainshock-aftershock Sequence Considering Fault Distance

LI Ximei<sup>1,2</sup>, SU Runtian<sup>1,2</sup>, LI Mingrui<sup>1,2</sup>, MU Bohai<sup>3</sup>

(1. *Disaster Prevention and Mitigation Engineering Research Center of Western Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China*)

(2. *Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China*)

(3. *China Municipal Engineering Northwest Design & Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China*)

### Abstract

To improve the accuracy and rationality of the seismic damage prediction and estimation of the post-earthquake structural performance, a mainshock-aftershock construction method considering the fault distance attenuation is proposed, and 50 sets of the ground motion are constructed using this method. A three-span, continuous beam bridge is selected as the sample. Nonlinear dynamic analysis is carried out using OpenSees software, and an improved Park-Ang damage index is used to establish the vulnerability curve. The influence of the fault distance on the damage index and failure probability of the continuous beam bridge at different fortification levels when hit by the mainshock-aftershock sequence is analyzed. A post-earthquake risk analysis method is proposed, and the impact of the mainshock-aftershock sequence on the seismic risk of bridge structures considering fault distance is compared and analyzed. The results show that the probability of structural damage increases tenfold with the occurrence of aftershocks. The risk of moderate or higher damage to structures within a fault distance of 10 km is relatively high. Increasing the aseismic fortification level can effectively prevent structures from serious or total collapse under the action of the main aftershock. The fault distance plays an important role in preventing the secondary damage in the post-earthquake rescue and reconstruction.

**Keywords:** bridge structure; mainshock-aftershock sequence; the fault distance; vulnerability analysis; risk analysis