

李喜梅, 杨天宇, 李明睿. 主余震序列作用下基于时间维度的连续梁桥易损性分析[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1291-1299. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211128001

LI Ximei, YANG Tianyu, LI Mingrui. Vulnerability analysis of continuous girder bridges based on time dimension under mainshock-aftershock sequences [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1291-1299. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211128001

主余震序列作用下基于时间维度的 连续梁桥易损性分析

李喜梅^{1,2}, 杨天宇^{1,2}, 李明睿^{1,2}

(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)

摘要: 为研究连续梁桥在主余震序列作用下基于时间维度的易损性情况, 以一座三跨连续梁桥为研究对象, 基于 OpenSees 有限元软件进行非线性动力分析。选取符合区域场地类型的地震动, 通过改进的大森定律和区域主余震统计关系, 构建基于时间的主余震序列。以改进的 Park-Ang 损伤指数作为结构的损伤指标, 运用直接回归概率线性拟合的方法建立主震后短期内各时间节点桥墩在不同损伤状态下的地震易损性曲线, 研究区域时间范围内主余震序列对连续梁桥抗震性能的影响。结果表明: (1) 余震会给桥梁结构带来明显的增量损伤; (2) 各种损伤状态的超越概率随着 PGA 的增大和时间的推移而不断增大, 且主震造成的损伤状态等级越高, 其超越概率越低, 余震作用时超越概率增大越明显。超越概率在震后第 1 日增幅最大, 随着时间的推移逐渐减小, 第 10 日趋于平稳, 因此在分析地震给桥梁带来的损伤时, 要充分考虑主余震序列的时间效应。

关键词: 主余震序列; 易损性分析; 连续梁桥; 增量损伤; 超越概率; 时间维度

中图分类号: TU352.1; U441⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1291-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211128001

Vulnerability analysis of continuous girder bridges based on time dimension under mainshock-aftershock sequences

LI Ximei^{1,2}, YANG Tianyu^{1,2}, LI Mingrui^{1,2}

(1. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in 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)

Abstract: This study examines the vulnerability of continuous girder bridges based on time dimension under the action of mainshock-aftershock sequences. A three-span continuous girder bridge was taken as the research object, and the nonlinear dynamic analysis was performed based on the OpenSees finite element software. By selecting ground motions corresponding to the

收稿日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(青年基金)(51808274)

第一作者简介: 李喜梅(1979-)女, 博士, 副教授, 研究方向: 桥梁抗震及振动控制研究。E-mail: mei611@163.com。

通信作者: 杨天宇, 男, 硕士研究生, 研究方向: 桥梁与隧道工程。E-mail: 995608853@qq.com。

regional site type, the time-based mainshock-aftershock sequences were constructed through the improved Omori's law and the statistical relationship of regional mainshock-aftershock sequences. The improved Park-Ang damage index was used for the structure. The linear fitting method of direct regression probability was used to establish the seismic vulnerability curves of piers at different time points in a short term after the mainshock, and the influence of mainshock-aftershock sequences on the seismic performance of the continuous girder bridge in regional time domain was studied. The results show that aftershocks will bring obvious incremental damage to the bridge structure. The exceedance probability of each damage state increases with the increase of peak ground acceleration and time. The higher the level of damage caused by the mainshock, the lower the exceedance probability, and the greater the exceedance probability under the action of aftershocks. The exceedance probability shows the largest increase on the first day after the mainshock, and then, it gradually decreases over time and becomes stable on the tenth day. Therefore, the time effect of the mainshock-aftershock sequence should be fully considered when analyzing the damage caused by the earthquake to the bridge.

Keywords: mainshock-aftershock sequence; vulnerability analysis; continuous girder bridge; incremental damage; exceedance probability; time dimension

0 引言

历史地震资料表明地震常以序列的形式发生,主震过后往往伴随着余震。例如:2008年5月12日汶川发生8.0级地震,截至同年9月12日,固定及流动台站共记录到余震949次,连续的余震给桥梁结构造成严重的二次损伤,导致交通中断,增加了人员伤亡数量和抗震救灾的难度^[1];2010年9月3日,新西兰克赖斯特彻奇市附近发生7.1级地震,地震中并无人员伤亡,但在该地区于2011年2月21日发生的6.3级余震却造成了146人死亡,300人失踪,市中心许多建筑物倒塌或遭到严重破坏^[2]。由上述震害调查统计可以发现,在强主震作用下多数结构仅发生一定程度的损伤而未达到完全破坏状态,但在余震作用下遭受了较为严重的“二次损伤”,从而加剧了人民生命及财产损失。目前,国内外结构抗震设计规范大都是基于单次地震,并未考虑大量余震对结构造成的二次损伤,致使结构在主余震作用下发生无法预测及控制的破坏^[3],同时余震发生时间存在不确定性,结构在不同时间节点遭受余震作用时会展现出不同的抗震性能。桥梁作为交通生命线系统的枢纽,其抗震能力与地震安全性直接关系到震后交通路线是否畅通,以及抢险救灾工作能否顺利开展,因此有必要对主震后余震随时间的发展进行评估。研究余震在时间维度下对桥梁易损性的影响,对震后桥梁加固和抢险救灾具有重要的指导意义。

相比于钢筋混凝土框架结构,关于主余震序列波对桥梁结构的地震易损性研究较少。柳春光等^[4]对大跨斜拉桥进行了连续两次地震作用下的时程分析,指出大跨斜拉桥在主余震作用后的内力和变形明显增大。袁万城等^[5]以一座三跨连续梁桥为研究对象,使用云图法建立概率地震需求模型,通过对比分析认为余震会增大桥梁结构的地震需求和地震易损性。陈彦江等^[6]分别绘制了单独主震和主余震作用时双肢薄壁高墩刚构桥的易损性曲线,结果表明余震会增加结构的受损程度,此现象对已经严重破坏的结构尤为明显。陈炫维等^[7]利用增量动力分析和地震易损性方法分析了近海桥墩的抗震性能,认为服役时间和主余震序列对桥墩地震易损性有很大影响。梁岩等^[8-9]通过建立不同服役时间桥墩的易损性曲线,指出氯离子侵蚀和主余震作用会增大桥墩的超越概率。目前,在分析主余震作用下结构损伤时,都是基于主余震作用下结构的最终易损性进行的,而并未充分考虑主余震序列的时间效应,实际上,主震后短时期内余震发生频率加大可能会使结构的地震需求超过主震时期。而对于震后受灾地区的抢险救灾工作而言,时间等同于生命,充分考虑震后不同时间段主余震序列波对桥梁结构地震易损性的影响,有助于震后救灾工作的科学部署。

本文基于OpenSees建立连续梁桥模型,根据修正的大森定律对汶川地震的余震进行时间维度的预测统计,构建不同时间段的主余震序列。以改进的Park-Ang损伤模型对桥梁结构进行主余震序列

下的时程分析,研究主余震序列作用下不同损伤状态连续梁桥的时变易损性。

1 基于时间构造人工主余震序列

当前人工主余震地震波的构造方法包括重复法、随机法和衰减法。重复法^[10-12]假设余震和主震的地震动特性一致,将主震时程重复一次或多次构成余震,此方法忽略了主余震震级和地震峰值之间的差异,因此有一定局限性。随机法^[13]是从主震记录库中随机挑选地震动作为余震记录,考虑了主震和余震在地震动特性上存在的差异,但是忽略了主余震之间的物理相关性^[14-17],在对结构进行模拟计算时容易出现较大误差。预测余震强度时要利用地震动强度的衰减关系,衰减法^[18]综合考虑了多方面因素,能够较好地模拟真实主余震序列,但要结合实际地区的地震统计规律才能构造出区域场地的余震特征。

从 PEER 强震数据库中选取符合区域场地要求的地震动记录,利用主余震序列关于震级、烈度、衰减关系等统计规律^[19-21],将上述构造人工主余震序列的重复法和衰减法相结合,并在各条地震动的主震和余震之间加入 30 s 的时间间隔以确保结构在经历下一次地震前能恢复静态。其具体的构造过程可参考文献[22],所构造的人工主余震地震波见图 1。

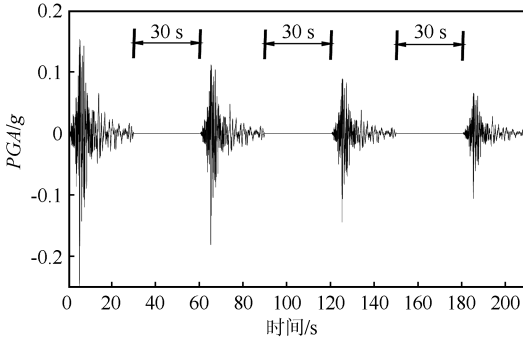


图 1 人工主余震地震波

Fig.1 Seismic waves of mainshock-aftershock sequence

研究连续梁桥在主余震作用下的时变易损性,除构造人工主余震地震波外,还需在时间维度构造人工主余震序列。文献[18,23]给出了主震发生后震级大于等于某最小震级的余震发生次数,证明了余震预测的可行性。

为了在时间维度构造主余震序列,假定地震事件中主震服从泊松分布且平稳,余震是非平稳的。 m_m 级主震发生后 t 时刻平均每日发生的震级大于等于 m 级的余震事件次数可由“修正 Omori 定

律”^[24]计算:

$$\gamma(t, m, m_m) = \frac{10^{a+b(m_m-m)}}{(t+c)^p} \quad (1)$$

式中: a, b, c 和 p 是根据以往真实地震事件所求得的区域参数^[25],此区域发生过的地震事件越多,相关统计数据得到的式(1)的回归曲线就越适用于此地区。

本文通过统计汶川地震的相关数据(表 1),对余震为 5 级以上的地震进行计算,得到式(1)中相关系数: $a = -0.249 4, b = 0.588 35, c = 1.619 4, p = 1.035 35$ 。实际日均发生的余震与统计的回归曲线如图 2 所示。

表 1 震后不同时间内 5 级以上余震发生的次数

Table 1 Number of $M > 5.0$ aftershocks at different times after the earthquake

时间/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9
余震次数	12	18	20	21	22	24	25	26	27

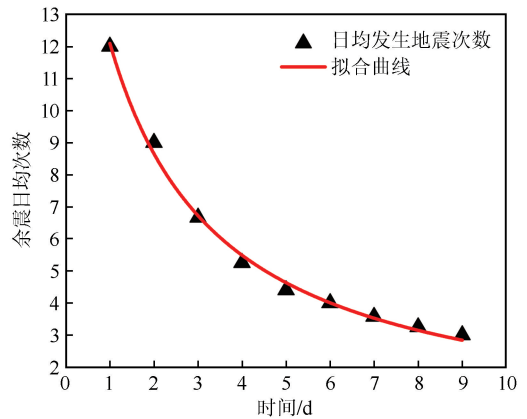


图 2 拟合震后 5 级以上余震日均发生次数

Fig.2 Fitting curve of the daily average number of $M > 5.0$ aftershocks after the earthquake

根据震级为 m 的余震在区间 $[m_1, m_m]$ 发生次数的统计关系,确定需要计算的余震次数。在实际工程中,综合考虑后最小余震震级 m_1 取 5 级^[23],余震震级大于 m 的日平均数量为^[26]:

$$\gamma(t, m, m_m) = \gamma_0(t, m_1, m_m) \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta m_m}}{e^{-\beta m_1} - e^{-\beta m_m}} = \gamma_0(t, m_1, m_m) [1 - F_m(m)] \quad (2)$$

$$\gamma_0(t, m_1, m_m) = \frac{10^{a+b(m_m-m_1)-10^a}}{(t+c)^p} \quad (3)$$

$$\gamma(t, T, m_m) = \int_t^{t+T} \gamma_0(t, m_1, m_m) dt = \frac{10^{a+b(m_m-m_1)-10^a}}{p-1} \cdot [(c+t)^{1-p} - (c+t+T)^{1-p}] \quad (4)$$

式(2)中: $\beta = b \ln 10$; $\gamma_0(t, m_1, m_m)$ 是 t 时刻 $m_1 < m < m_m$ 事件的平均数目; $F_m(m)$ 为累积分布函

数。因此在给定主震 m_m 后的时间区间 $[t, t + T]$ 内,可由式(4)求得发生 m 级余震的平均次数。由式(1)和式(4)可计算不同震级的主震发生后 10 天内余震发生的次数。下面以主震 8 级时为例,计算主震后 10 天内余震发生的次数,如图 3 所示。

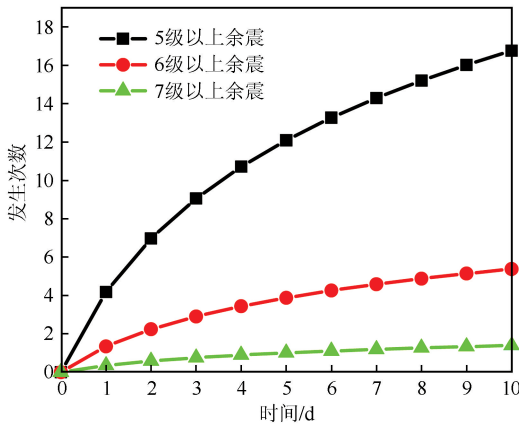


图 3 不同时间内余震发生的次数

Fig.3 Number of aftershocks in different periods of time

2 有限元模型的建立与验证

选取某三跨连续梁桥为研究对象,基于 OpenSees 软件建立有限元模型。桥长 (26+27+24) m,其平面图如图 4 所示。本文主要研究 3[#] 固定墩的损伤,墩高 7 m,桥墩直径 1.6 m,混凝土材料等级为 C50,箍筋和纵筋分别为直径 12 mm 和 28 mm 的 HRB335 级钢筋。场地条件为 II 类,抗震设防烈度为 8 度。

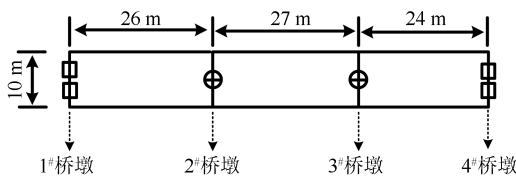


图 4 连续梁桥平面图

Fig.4 Plan view of continuous girder bridge

将桥梁上部结构简化为弹性单元,利用零长度单元来模拟主梁对墩顶的约束。采用盆式橡胶支座 JPZ(III),在建模中利用 Steel01 材料本构模拟支座的竖向刚度。对桥墩进行时程分析时需要考虑其弹性变形阶段,采用 OpenSees 中基于柔度法的弹性纤维梁柱单元来建立桥墩单元,3[#] 桥墩采用 DispBeamColumn 单元。对桥墩保护层混凝土、核心区混凝土和钢筋材料进行精细化建模以区分其不同的力学性能。分别采用 Concrete01、Concrete02

和 Steel02 材料本构,将纤维截面划分为核心混凝土纤维、混凝土保护层纤维和钢筋纤维(图 5)。纤维截面划分越细,桥墩的计算精度越高,但计算效率也会相应下降,对于常见的截面形式,纤维数量达到 40 以上就可以满足计算精度的要求。

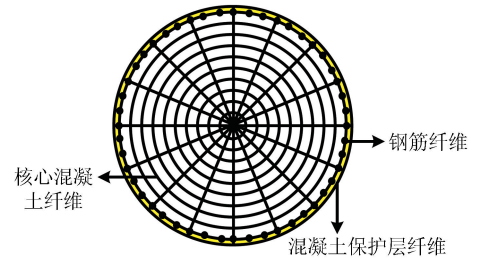


图 5 桥墩截面纤维划分

Fig.5 Fiber division of pier section

为验证模型的准确性,对桥墩进行水平向的拟静力试验,采用往复推覆的方式,在加载后,提取 3[#] 桥墩墩顶位移和墩顶支座反力,绘制滞回耗能曲线(图 6),将绘制好的滞回曲线与文献[27]中墩柱的滞回曲线相对比。结果表明,本文选取的墩柱单元所模拟出来的骨架曲线与文献中的骨架曲线近似,从而证明了本文模型的可靠性。

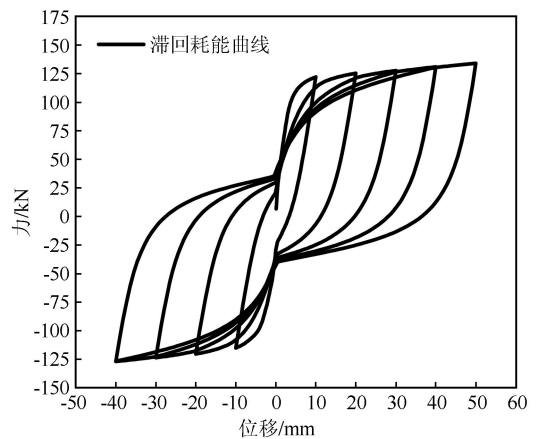


图 6 连续梁桥 3[#] 桥墩滞回耗能曲线

Fig.6 Hysteretic energy dissipation curve of 3[#] pier of continuous girder bridge

将 3[#] 桥墩损伤模型的参数输入 X-TRACT 软件中进行弯矩-曲率分析,获取改进的 Park-Ang 损伤指标中关于墩底截面曲率和弯矩的相关数据(表 2)。

表 2 3[#] 桥墩墩底截面弯矩-曲率分析

Table 2 Bending moment-curvature analysis of section at the bottom of 3[#] pier

等效屈服曲率/m	极限曲率/m	等效屈服弯矩/(kN/m)
0.002 178	0.039 76	6 872

3 连续梁桥桥墩地震易损性分析

3.1 结构损伤指标

考虑到结构的破坏涉及变形和累计耗能两个方面,本文采用文献[28]提出的双参数损伤指标——改进的 Park-Ang 损伤模型。此损伤模型用弯矩和曲率替代了广义力和广义位移,其计算如式(5),损伤状态以及对应的损伤指数范围如表 3 所列:

$$DI = \frac{\varphi_m - \varphi_y}{\varphi_u - \varphi_y} + \beta \frac{\nabla = \int dE}{M_y \varphi_u} \quad (5)$$

式中:DI 为结构损伤指数; φ_m 为核心混凝土压碎时的曲率; φ_y 为屈服曲率; φ_u 为极限曲率; M_y 为屈服弯矩;dE 为主余震作用下结构总的滞回耗能; β 为耗能因子,本文取 0.15^[29-31],用来衡量滞回耗能对结构最终损伤的贡献。

表 3 损伤状态及对应的损伤指数范围

Table 3 Damage state and corresponding damage index range

损伤状态	基本完好	轻微破坏	中度破坏	严重破坏	倒塌破坏
损伤指数	[0,0.1)	[0.1,0.25)	[0.25,0.4)	[0.4,0.8)	≥ 0.8
状态描述	出现微裂纹	局部出现贯通的微裂纹,纵筋屈服	裂纹显著发展,混凝土保护层开始脱落	裂纹急剧变宽,局部混凝土保护层全部脱落,箍筋颈缩	箍筋断裂或纵筋屈服断裂,核心和混凝土压碎

3.2 地震易损性分析方法

结构的地震易损性是指在给定强度地震动作用下,结构地震响应达到或超越某一极限状态抗震能力的损伤条件概率。其表达式为:

$$F_i(x) = p[D \geq C | I = X]; i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中:D、C 分别为结构的地震需求和抗震能力。

由文献[32]可知,特定损伤状态下结构抗震能力概率函数 C 和地震需求概率函数 D 满足对数正态分布。定义功能函数 Z 为:

$$Z = \ln C - \ln D \quad (7)$$

Z 服从正态分布,因此地震易损性函数可以转化为结构功能函数 Z 的失效概率,如式(8)所示:

$$P(LS/IM) = P_f(Z \leq 0) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\mu_\delta}\right) \quad (8)$$

式中: μ_Z 和 μ_δ 分别为结构功能函数变量的均值和方差,两者之比的负数称为可靠指标。式(8)可由随机变量 D、C 等效表示。

$$P_f(Z \geq 0) = \Phi\left[\frac{\ln \mu_d - \ln \mu_c}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right] = \Phi\left[\frac{\ln a + b \ln(PGA) - \ln \hat{C}}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right] \quad (9)$$

式中: μ_d 和 β_d 分别表示地震需求的均值和方差; μ_c 和 β_c 分别表示抗震能力的均值和方差; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布累积概率函数。根据文献[33]的研究结果,当以峰值加速度 PGA 为自变量时 $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$ 取 0.5; \hat{C} 为结构的损伤状态值。式(9)中的参数 a、b 按式(10)计算。

$$\ln(\mu_d) = \ln a + b \ln(PGA) \quad (10)$$

式中:a 和 b 通过采用直接回归概率线性拟合法,将结构 IDA 分析的数据对数化后进行线性回归拟合获得。

按照我国《破坏性地震应急条例》第 22 条规定,震后应急期一般为 10 日,因此主要分析震后 10 日内余震作用下结构的易损性。提取震后不同时间桥墩的最大弯曲曲率和滞回耗能,通过改进的 Park-Ang 损伤指标公式计算连续梁桥桥墩的损伤指数,将结构损伤指标 DM 和地震动强度 IM 通过对数线性拟合,建立结构的地震需求概率函数关系。其峰值加速度和损伤指数的对数散点如图 7。

根据图 7 可知,震后不同时间维度下桥梁结构的损伤指数的均值增加。1~10 日线性拟合方程的斜率相同,表明在主余震序列作用后桥梁结构的损伤指标在对数化后存在相关性。

4 主余震作用下连续梁桥桥墩地震时变易损性分析

本文利用重复法和衰减法相结合的方式构造人工主余震地震波,根据修正的大森定律对汶川地震后的余震进行时间维度的预测统计,构建不同时间段的主余震序列。在 OpenSees 有限元模型的基础上,对连续梁桥的 3# 固定墩进行主余震序列下的时程分析和 IDA 分析,获取改进的 Park-Ang 损伤指标计算公式中的各项参数,从而计算结构损伤指数 DI。采用直接回归概率拟合法建立结构的概率地震需求模型,将图 7 中的拟合方程分别代入式(9),得到结构各损伤状态下的失效概率。因此,根据从时间维度构造主余震序列,可以绘制出以峰值加速度(PGA)为横坐标的时变地震易损性曲线。

根据不同的破坏状态,将单独主震和主余震序列作用下桥墩的时变易损性曲线绘制在同一图中进行对比(图 8)。

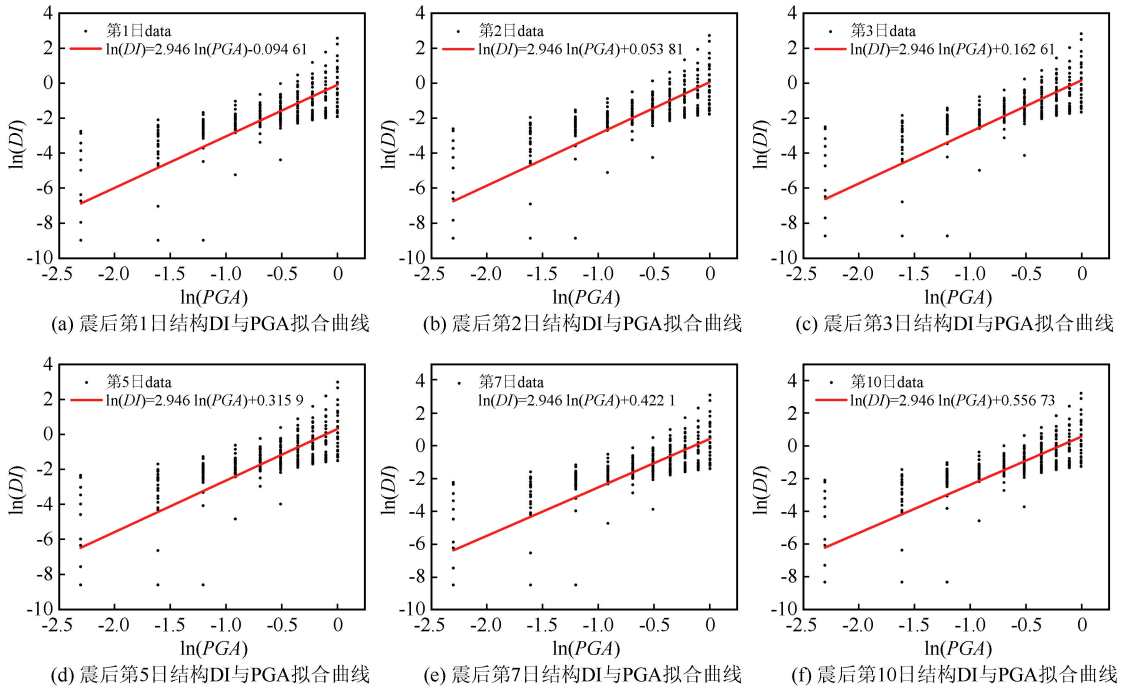


图7 震后不同时间桥墩损伤指数与峰值加速度的对数线性拟合

Fig.7 Log-linear fitting of pier damage index and peak acceleration at different times after the earthquake

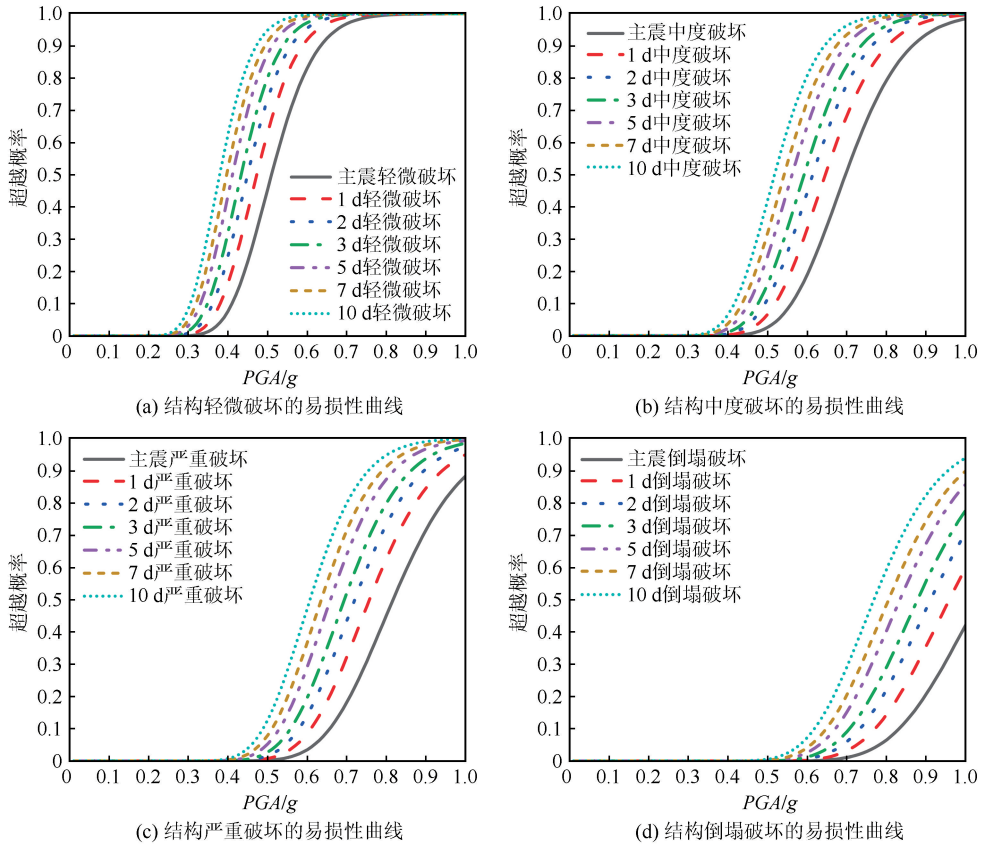


图8 主余震作用下结构不同损伤状态的易损性曲线

Fig.8 Vulnerability curves of different damage states of the structure under the action of mainshock-aftershock sequence

将以上不同损伤状态桥墩的易损性曲线进行对比分析,通过主震和主余震分别作用于桥墩时绘制

出的易损性曲线可以看出:连续梁桥各损伤状态下桥墩的超越概率均随着PGA的增大而不断增大。

余震会增大桥墩的超越概率且增幅效果与主震后桥墩的损伤状态有关。在轻微损伤状态下,连续梁桥桥墩在主震单独作用和主余震序列作用下的超越概率最为接近;在中等破坏、严重破坏和倒塌破坏状态下,桥墩在主余震序列作用下的超越概率明显大于单独主震作用下。这主要是由于在轻微损伤状态下桥墩的地震响应仍处于线弹性范围内,而中等及以上破坏状态下主震已经使桥墩产生了不可恢复的损伤,后续的余震作用就更容易扩大这种损伤,从而大幅提高桥墩的超越概率。

从时间维度看,主震后短期内发生余震作用会增大桥墩的超越概率。为了更加清晰地描述余震在不同时间节点发生时桥墩超越概率的变化趋势,对各破坏状态易损性曲线取某一确定的 PGA 值,以余震发生对应的时间节点为横坐标,余震超越概率 P_i 与主震超越概率 P 的比值为纵坐标,绘制曲线(图 9)。主震后各损伤状态桥墩在未来几日遭受余震作用时,桥墩的超越概率均增加,且主震损伤状态越严重,超越概率的增长幅度越大。相同的是,各损伤状态桥墩在震后第1日遭受余震作用,其

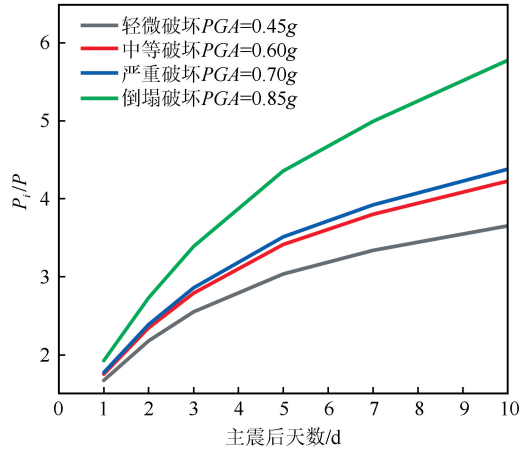


图 9 余震发生时间节点与主余震概率关系曲线
Fig.9 Relationship curve between the occurrence time node of aftershocks and the probability of mainshock-aftershock

超越概率增长速度最快,随后逐渐降低,第 10 日趋于平稳。

绘制桥梁结构受到所在场地设防地震 0.2g、罕遇地震 0.4g 和特罕遇地震 0.58g 作用时各损伤状态桥墩的时变超越概率于图 10。

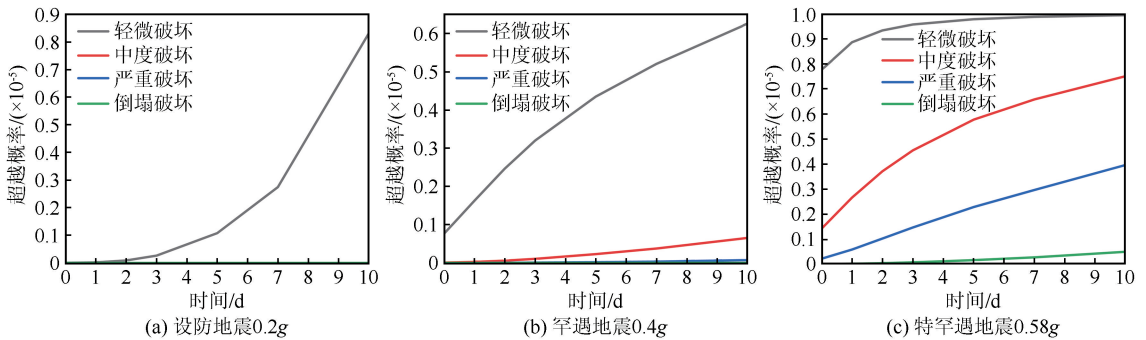


图 10 损伤桥墩时变超越概率

Fig.10 Time-varying exceeding probability of damaged pier

由图 10 可以看出,在区域场地设防地震、罕遇地震和特罕遇地震作用下,随着时间的推移超越概率逐渐增大。尤其是在特罕遇地震作用下,轻微破坏的概率趋近于 1,中度破坏由 0.15 增长到 0.75,增幅达到 400%,且破坏状态越严重增幅越大,因此在抗震设计中不能只考虑主震作用,短期内余震的发生也会大幅增加桥梁的损伤概率。

综上所述,主余震序列作用下连续梁桥桥墩的损伤程度与单独主震作用时存在明显差异,考虑余震作用后桥墩的超越概率明显提高。如果在桥梁的抗震设计中仅考虑主震而忽略余震的作用,将会高估桥梁在实际地震作用下的抗震能力,特别是在桥

墩破坏状态比较严重的情况下,余震所造成的增量损伤更加明显。从时间角度观察,余震给受损桥墩超越概率造成的增长幅度不同,震后第 1 日增长最快,随后逐渐降低。因此在抗震救灾和桥梁检测与维护工作中,应充分考虑主余震序列的时间效应。

5 结论

本文以一座三跨连续梁桥为例,研究主余震序列作用下连续梁桥的时变易损性。根据修正的大森定律对汶川地震后的余震进行时间维度的预测统计,构建主震后 10 日内的主余震序列,对有限元模型进行非线性时程分析,运用直接回归概率线性拟

合的方法,建立主震后短期内各时间节点桥墩控制截面在不同损伤状态下的地震易损性曲线,研究时间范围内主余震序列对连续梁桥桥墩抗震性能的影响。其主要结论如下:

(1) 连续梁桥桥墩在各种损伤状态下的超越概率随着 PGA 的增大和时间的推移而不断增大,主震后桥墩损伤状态越严重,短期遭受余震作用时超越概率增幅越明显,其结构破坏的可能性越大。

(2) 桥墩的服役时间和损伤状态相同时,主余震序列作用下连续梁桥桥墩的超越概率明显大于单独主震作用下。各损伤状态桥墩在设防地震、罕遇地震和特罕遇地震作用下的超越概率随着时间的推移逐渐增大,且增大效果明显。因此在进行桥梁抗震设计和地震易损性分析时不可忽略余震给结构带来的“增量损伤”,且要充分考虑主余震的时间效应。

(3) 各损伤状态桥墩在震后第 1 日遭受余震作用时超越概率增长速度最快,随后逐渐降低,第 10 日趋于平稳。因此震后 24 小时之内进入灾区救援,交通线路中的桥梁破坏情况相对较轻,在震后 10 日对桥梁进行损伤检测评估,其损伤状态最接近实际。

参考文献(References)

- [1] 韩建平,徐金玉.汶川地震强余震统计特性及地震动衰减关系[J].世界地震工程,2019,35(1):9-16.
HAN Jianping, XU Jinyu. Statistical characteristics of strong aftershocks of Wenchuan earthquake and ground motion attenuation relationship[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(1): 9-16.
- [2] 张晁军,侯燕燕,胡彬,等.新西兰 2010 年 M7.1 地震与 2011 年 M6.3 地震活动和灾害分析[J].国际地震动态,2011,41(4):44-51.
ZHANG Chaojun, HOU Yanyan, HU Bin, et al. Analysis on the seismic activities and hazards of M7.1 earthquake, 2010 and M6.3 earthquake, 2011 in New Zealand[J]. Recent Developments in World Seismology, 2011, 41(4): 44-51.
- [3] 翟长海,谢礼立,温卫平.主余震地震动特征及结构损伤分析[M].北京:科学出版社,2017.
ZHAI Changhai, XIE Lili, WEN Weiping. Mainshock-aftershock earthquake ground motion characteristics and structural damage analysis[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] 柳春光,贾玲玲.大跨度斜拉桥在接连两次地震作用下的响应分析[J].振动与冲击,2010,29(3):189-192,214.
LIU Chunguang, JIA Lingling. Response analysis of long span cable-stayed bridge subjected to two successive earthquakes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 189-192, 214.
- [5] 袁万城,王征南,庞于涛,等.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,2016,37(12):1671-1676.

- YUAN Wancheng, WANG Zhengnan, PANG Yutao, et al. Seismic fragility analysis of a continuous girder bridge subject to an earthquake mainshock-aftershock sequence[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(12): 1671-1676.
- [6] 陈彦江,郝朝伟,何浩祥,等.考虑主余震序列的高墩刚构桥地震易损性分析[J].工程抗震与加固改造,2015,37(4):132-138,146.
CHEN Yanjiang, HAO Chaowei, HE Haoxiang, et al. Seismic vulnerability analysis of continual rigid-bridge with high piers considering mainshock-aftershock earthquake sequences[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(4): 132-138, 146.
- [7] 陈炫维,李宏男,王东升,等.主余震下近海钢筋混凝土桥墩全寿命抗震分析[J].地震工程与工程振动,2015,35(4):145-154.
CHEN Xuanwei, LI Hongnan, WANG Dongsheng, et al. Life-cycle seismic performance analysis of offshore RC bridge piers under mainshock and aftershock[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(4): 145-154.
- [8] 梁岩,闫佳磊,牛欢,等.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,2019,41(4):887-894.
LIANG Yan, YAN Jialei, NIU Huan, et al. Time-dependent seismic fragility analysis of offshore bridge piers under mainshock and aftershocks[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 887-894.
- [9] LIANG Y, YAN J L, CHENG Z Q, et al. Time-varying seismic fragility analysis of offshore bridges with continuous rigid-frame girder under main aftershock sequences[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 04020055.
- [10] HATZIGEORGIOU G D. Ductility demand spectra for multiple near- and far-fault earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(4): 170-183.
- [11] JOYNER W B, BOORE D M. Prediction of earthquake response spectra[R]. Menlo Park: US Geological Survey, 1982.
- [12] GUTENBERG B, RICHTER C F. Seismicity of the Earth and associated phenomena[J]. MAUSAM, 1950, 1(2): 174-176.
- [13] LI Q W, ELLINGWOOD B R. Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(3): 405-427.
- [14] KIM B, SHIN M. A model for estimating horizontal aftershock ground motions for active crustal regions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 165-175.
- [15] RUIZ-GARCÍA J, NEGRETE-MANRIQUEZ J C. Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshock-aftershock seismic sequences[J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 621-634.
- [16] RUIZ-GARCÍA J. Mainshock-aftershock ground motion features and their influence in building's seismic response[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(5): 719-737.
- [17] 朱瑞广,吕大刚.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,2019,36(2):114-123.
ZHU Ruiguang, LÜ Dagang. Copula-based correlation analysis

- of intensity measures of mainshock-aftershock ground motions[J].*Engineering Mechanics*, 2019, 36(2): 114-123.
- [18] SUNASAKA Y, KIREMIDJIAN A S. A method for structural safety evaluation under mainshock-aftershock earthquake sequences[R]. Stanford, California: John A. Blume Earthquake Engineering Center, 1993.
- [19] ABRAHAMSON N A, SILVA W J, KAMAI R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions[J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 1025-1055.
- [20] ABRAHAMSON N, SILVA W. Summary of the abrahamson & silva NGA ground-motion relations[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 67-97.
- [21] 蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1110-1117.
JIANG Haikun, QU Yanjun, LI Yongli, et al. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese Mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1110-1117.
- [22] 李喜梅, 李明睿, 毋渤海. 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*, 2021, 43(6): 1402-1408.
LI Ximei, LI Mingrui, MU Bohai. Damage prediction and evaluation of bridge pier structures under artificial mainshock-aftershock sequences[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43(6): 1402-1408.
- [23] 张沛洲, 康谨之, 欧进萍. 主余震序列作用下钢混框架结构损伤与抗震性能分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(3): 1-8.
ZHANG Peizhou, KANG Jinzhi, OU Jinping. Damage and seismic performance analysis of RC frame structures under mainshock-aftershock earthquake sequences[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(3): 1-8.
- [24] UTSU T, OGATA Y, RITSUKO S, et al. The centenary of the omori formula for a decay law of aftershock activity[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1995, 43(1): 1-33.
- [25] REASENBERG P A, JONES L M. Earthquake hazard after a mainshock in California[J]. *Science*, 1989, 243(4895): 1173-1176.
- [26] VENTURE S A C J. Recommended post-earthquake evaluation and repair criteria for welded steel moment-frame buildings: FEMA 352[S]. Sacramento, California: Guidelines Development Committee, 2000.
- [27] 王通行. 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, 2019.
WANG Tongxing. Vulnerability analysis of reinforced concrete continuous beam bridge under the action of main aftershock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [28] STONE W, TAYLOR A W. Seismic performance of circular bridge columns designed in accordance with AASHTO/CALTRANS standards[J/OL]. *Engineering*, 1993; 107019786. <https://doi.org/10.6028/NIST.BSS.170>.
- [29] WEN W P, ZHAI C H, LI S, et al. Constant damage inelastic displacement ratios for the near-fault pulse-like ground motions[J]. *Engineering Structures*, 2014, 59: 599-607.
- [30] WARNITCHAI P, PANYAKAPO P. Constant-damage design spectra[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 1999, 3(3): 329-347.
- [31] PANYAKAPO P. Evaluation of site-dependent constant-damage design spectra for reinforced concrete structures[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(12): 1211-1231.
- [32] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 491-514.
- [33] 李谦. 增量动力分析方法的研究及其应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
LI Qian. Study and application of incremental dynamic analysis method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.

(本文编辑:张向红)