

陈锦晶,周荃,宋颜培,等.近、远场地震下钢筋混凝土梁桥抗震韧性对比[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3): 323-332.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240078

CHEN Jinjing,ZHOU Quan,SONG Yanpei,et al.Comparison of seismic resilience of RC girder bridges subjected to near-fault and far-field ground motions[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3): 323-332. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240078

## 近、远场地震下钢筋混凝土梁桥抗震韧性对比

陈锦晶<sup>1</sup>,周荃<sup>1</sup>,宋颜培<sup>1</sup>,黄坤<sup>2</sup>

(1.南昌交通学院土木建筑学院,江西南昌330100;2.江西庚远工程科技有限公司,江西南昌330100)

**摘要:**为揭示近、远场地震下公路钢筋混凝土梁桥抗震韧性的差异,基于云图法分别建立桥梁在近、远场地震作用下的概率地震需求模型和易损性曲线。以此为基础,采用基于概率的抗震韧性评估方法对比分析了桥梁在两类地震下的功能恢复曲线,以及抗震韧性随地震动强度的变化规律。研究表明:近、远场地震下桥梁的抗震韧性及使用功能的差异性与地震动强度有关。研究结论揭示了近、远场地震下公路钢筋混凝土梁桥的地震响应规律,为该类桥梁抗震韧性设计提供了参考。

**关键词:**抗震韧性;近断层地震动;远场地震动;连续梁桥;易损性曲线

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)03-0323-10

### Comparison of seismic resilience of RC girder bridges subjected to near-fault and far-field ground motions

CHEN Jinjing<sup>1</sup>, ZHOU Quan<sup>1</sup>, SONG Yanpei<sup>1</sup>, HUANG Kun<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Jiaotong Institute, Nanchang 330100, China; 2. Jiangxi Gengyuan Engineering Technology Company Limited, Nanchang 330100, China)

**Abstract:** In order to reveal the difference of seismic resilience of highway reinforced concrete girder bridges under near-field and far-field earthquakes, the probabilistic seismic demand model and vulnerability curve of bridges under near-field and far-field earthquakes are established based on the cloud map method. On this basis, the probability-based seismic resilience evaluation method is used to compare and analyze the function recovery curve of the bridge under two types of earthquakes, and the variation law of seismic resilience with ground motion intensity. The research results show that the difference of seismic resilience and service function of bridges under near-field and far-field earthquakes is related to the intensity of ground motion. The research conclusions reveal the seismic response law of highway reinforced concrete girder bridges under near-field and far-field earthquakes, and provide a reference for the seismic toughness design of such bridges.

**Keywords:** seismic resilience; near-fault ground motions; far-field ground motions; continuous bridges; fragility curves

## 0 引言

中国公路桥梁建设蓬勃发展,截至2021年底,国内已建成的公路桥梁约96.11万座。中国作为地震多发国家,在历次地震中,桥梁结构往往受到严重破坏<sup>[1]</sup>。近50年来,学者们相继提出延性抗震设计方法、减隔震抗震设计方法以及基于性能的抗震设计方法等,以降低桥梁结构的震害风险。

随着人口密度、建筑规模和社会财富的持续增加,人们对灾害预警、灾害响应、灾后恢复,以及重建能力提出了更高、更全面的要求。在此背景下,桥梁抗震目标已从生命安全优先的抗震和减震,转向震后结构功能快速恢复和修复的更高维度,使得桥梁抗震韧性成为当前研究的重点<sup>[2]</sup>。

近年来,针对公路桥梁抗震韧性的研究逐步

收稿日期:2024-04-03 修回日期:2024-11-04 接受日期:2024-11-12 责任编辑:焦丽

基金项目:江西省教育厅科学技术基金项目(GJJ2203120)

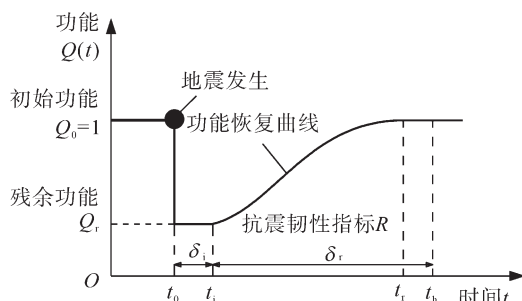
作者简介:陈锦晶(1991-),女,安徽无为,人,硕士,讲师,主要从事桥梁工程方面的研究。E-mail:1055447064@qq.com

展开。DECÒ等<sup>[3]</sup>考虑桥梁损伤状态以及恢复过程的不确定性,提出一种基于概率的桥梁抗震韧性评估方法。BIONDINI等<sup>[4]</sup>提出一种桥梁全寿命期内考虑氯离子锈蚀影响的概率抗震韧性评估方法。SOLEIMANI等<sup>[5]</sup>借助机器学习技术,采用集成学习方法预测桥梁的抗震韧性。VENKITTARAMAN等<sup>[6]</sup>从抗震韧性的角度出发,提出桥梁的加固策略。李宁等<sup>[7]</sup>针对特定桥梁维修或改造案例,提出用于评估桥梁震后恢复和可持续性的方法框架。刘洋等<sup>[8]</sup>提出同时考虑期望修复时间和初建时间的可恢复性指数表达式,以及对应的可恢复性曲线,并通过座钢筋混凝土连续梁桥验证了该评价方法的可行性。已有研究在桥梁抗震韧性评估方面取得了较大进展,但选取的地震动记录多为远场地震动。由于地形及区域交通发展规划需要,一些桥梁不可避免地建在近断层区域。近断层地震动一般有长周期的脉冲成分<sup>[9]</sup>,地震发生时,桥梁承受较高能量的冲击而严重受损<sup>[10]</sup>。

综上,现有研究对近断层地震动作用下桥梁抗震韧性评估的相关研究较少,对近、远场地震动作用下钢筋混凝土梁桥的抗震韧性缺乏针对性的比较分析。因此,本文以一座典型钢筋混凝土连续梁桥为研究对象,选取近、远场地震动记录各30条,对2类地震动作用下桥梁的风险与韧性进行对比分析,为公路钢筋混凝土梁桥的抗震韧性设计提供参考。

## 1 桥梁抗震韧性评估方法

抗震韧性指桥梁系统在受到地震灾害的干扰后,保持或恢复使用功能的能力<sup>[3]</sup>。图1(a)直观地展示了抗震韧性的定义,通过对地震发生后功能恢复曲线与时间轴围成的面积,得到韧性指标为



(a) 抗震韧性的定义

$$R = \frac{1}{t_h - t_0} \int_{t_0}^{t_h} Q(t) dt, \quad (1)$$

式中： $t_0$ 为地震动发生时刻； $t_h$ 是恢复过程结束后调研时刻； $Q(t)$ 为桥梁在时刻 $t$ 的使用功能。

图1(a)中， $\delta_i$ 为系统功能开始恢复前的准备时段， $t_i$ 为恢复过程开始时刻， $t_r$ 为恢复过程结束时刻， $\delta_r$ 为恢复过程的总时长， $\delta_r = t_r - t_i$ 。假定恢复过程结束后，桥梁恢复到原始功能，即 $Q(t) = 1$ ， $Q_r$ 代表地震发生后系统的残余功能， $Q_i$ 为系统修复后达到的目标功能。桥梁在损伤状态 $k$ 下的功能恢复模型<sup>[4,11]</sup>可表示为

$$Q^{(k)}(t) = Q_r + H(t - t_0 - \delta_i) \times R_f\left(\frac{t - t_0 - \delta_i}{\delta_r}\right) \cdot (Q_i - Q_r), \quad (2)$$

式中： $k$ 分别取1、2、3、4，对应轻微、中等、严重和完全损伤； $H(\cdot)$ 为单位阶跃函数； $R_f(\cdot)$ 为恢复函数，其函数类型需根据结构的重要程度、拟恢复的极限状态等因素综合选定。

根据文献[4]分别选取负指数函数、正弦函数、正指数函数为恢复函数，如式(3)~式(5)所示。

$$R_f^1(\tau) = 1 - e^{-\omega\tau}, \quad (3)$$

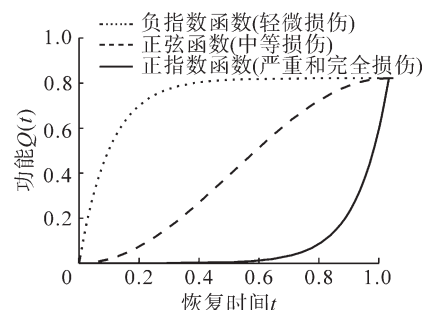
$$R_f^2(\tau) = \frac{1 - \cos(\pi\tau)}{2}, \quad (4)$$

$$R_f^3(\tau) = e^{-\omega(1-\tau)}, \quad (5)$$

式中， $\omega$ 为形状系数，取10。

式(3)代表快速的修复过程，用于轻微损伤状态下功能计算；式(4)代表按正常速度完成功能恢复，对应于中等损伤状态；式(5)代表缓慢的功能恢复过程，对应于严重和完全损伤状态。各函数曲线如图1(b)所示。

桥梁系统功能恢复过程与结构损伤状态和资源调配等诸多因素相关，具有较强的随机性，式(2)中主要参数的概率分布<sup>[3,11]</sup>见表1。



(b) 功能恢复函数

图1 桥梁抗震韧性定义及不同损伤状态所对应的恢复函数

Fig.1 definition of seismic resilience of bridges and recovery functions for different damage states

表 1 不同损伤状态下功能恢复函数主要参数的概率分布

Tab.1 probability distribution of main parameters for the recovery function under different damage states

关键参数	参数分布		损伤状态				
	分布类型	分布参数	无损伤	轻微	中等	严重	完全
残余功能 $Q_r$	三角	下限	1.000	0.500	0	0	0
		峰值	1.000	0.750	0.250	0.100	0
		上限	1.000	1.000	0.500	0.200	0
准备时间 $\delta_i$ /month	均匀	下限		1.000	1.000	1.000	1.000
		上限		2.000	2.000	2.000	2.000
恢复持时 $\delta_r$ /month	三角	下限		0.333	0.667	2.000	2.500
		峰值		2.667	3.667	5.167	6.250
		上限		5.000	6.667	8.333	10.000
目标功能 $Q_t$	三角	下限		1.000	1.000	1.000	1.000
		峰值		1.000	1.000	1.000	1.000
		上限		1.000	1.000	1.000	1.000

利用表 1 中的参数, 采用蒙特卡罗抽样方法抽取参数样本 1 万个, 由样本得到功能恢复曲线的期望, 作为最终的分析结果。由此, 结构在给定地震动强度下的功能<sup>[11]</sup>可表示为

$$Q(t|IM) = P_f^0(IM) \cdot 1 + \sum_{k=1}^4 P_f^{(k)}(IM) \cdot Q^{(k)}(t), \quad (6)$$

式中: IM (intensity measure) 为地震动强度指标;  $P_f^0(IM)$  为桥梁体系在强度为 IM 的地震动作用下未发生损伤的概率;  $P_f^{(k)}(IM)$  为桥梁在强度为 IM 的地震动作用下处于损伤状态  $k$  的概率。基于文献 [12] 中体系易损性曲线建立方法得到  $P_f^0(IM)$  和  $P_f^{(k)}(IM)$ 。

## 2 工程概况与有限元模型

### 2.1 桥例背景

选取一座典型的四跨公路钢筋混凝土连续梁桥为工程背景, 其几何布置见图 2。全桥总长为 120 m, 每跨长为 30 m。主梁材料为 C50 混凝土, 采用单箱单室箱梁, 梁宽为 8.5 m, 梁高为 1.9 m。全桥采用球钢支座, 约束条件如图 2 (a) 所示。桥墩采用 C40 混凝土, HRB400 钢筋。墩高均为 8 m, 梁端位置处采用双柱墩 (P1、P2、P6、P7), 墩径为 1.2 m; 其余桥墩为单柱墩, 墩径为 1.5 m。承台采用 C35 混凝土长为 5.6 m, 宽为 4.4 m, 高为 1.8 m。桩基采用群桩基础, 单桩桩径为 0.6 m。

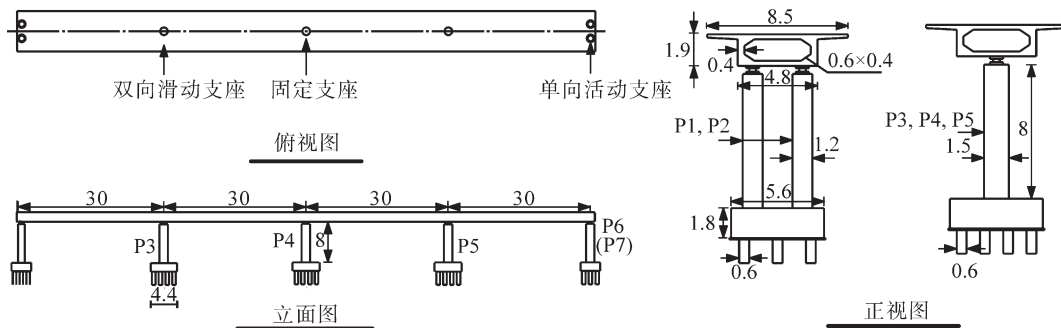


图 2 桥例几何布置 (单位: m)

Fig.2 geometric configuration of the bridge example ( unit: m)

### 2.2 数值模拟

基于原桥的几何尺寸和材料类型, 在 OpenSees 中建立其对应的有限元模型<sup>[13]</sup>见图 3。主梁采用弹性梁柱单元模拟<sup>[14-16]</sup>, 根据主梁截面和材料属性, 以及节点对应的单元长度, 将主梁的质量均匀分配给各个节点。支座通过零长度单元模拟, 并根据支座的约束情况设置不同的单轴材料,

如图 3 (a) 所示。在水平滑动方向, 设置支座零长度单元为理想弹塑性单轴材料, 初始刚度为

$$k_c = \mu F_v / d_y, \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为摩擦系数, 取 0.02<sup>[17]</sup>;  $F_v$  为支座竖向反力, kN;  $d_y$  为起滑位移, 取 0.003 m。

对于水平和垂直方向的固定约束, 设置为零长度单元弹性单轴材料, 取刚度为  $10^8$  kN/m<sup>[18]</sup>, 使

支座在对应方向上产生极小的变形。

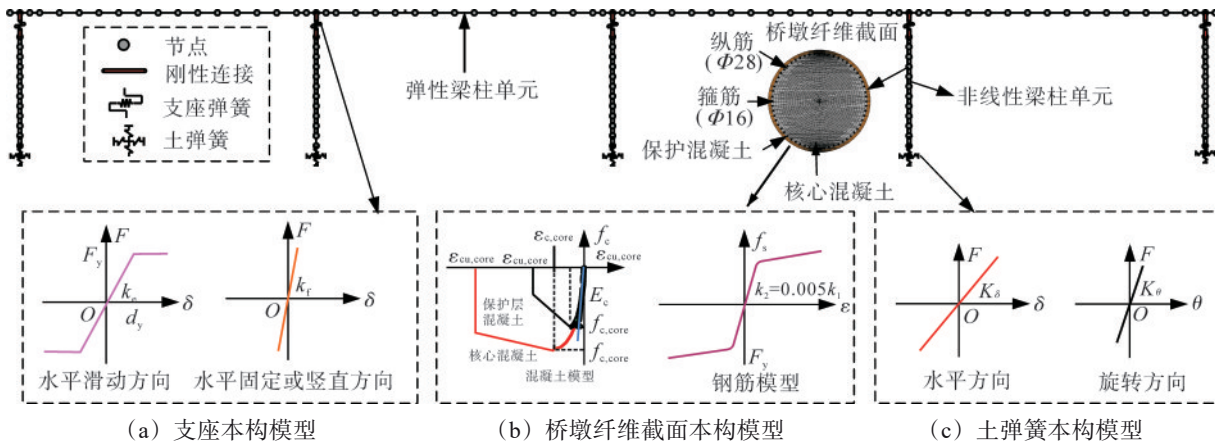


图3 桥梁有限元模型

Fig. 3 finite element model of the bridge

桥墩采用非线性梁柱单元模拟，以考量其非线性弯曲变形特性，将单元赋予纤维截面。在纤维截面中，保护层混凝土和核心混凝土的力学性能通过 Concrete04 材料模拟，其本构关系基于 Mander 模型确定<sup>[18]</sup>；钢筋的力学性能通过 Steel02 材料模拟<sup>[19]</sup>，硬化率取 0.005<sup>[20]</sup>，具体情况如图 3 (b) 所示。此外，桥梁桩-土的相互作用采用“六弹簧”模型模拟，如图 3 (c) 所示。

受环境、施工等因素的影响，实际桥梁的材料力学参数具有较强的随机性，与其设计值之间具有一定的偏差。因此，在有限元建模过程中考虑了主要材料参数的不确定性，其概率分布<sup>[21]</sup>见表 2。利用表 2 中的数据，采用拉丁超立方抽样方法抽取材料样本<sup>[22]</sup>，样本组数与地震波条数一致，形成地震动-桥梁模型样本对，在此基础上对有限元模型进行非线性时程分析。

表 2 材料不确定性参数及其概率分布

Tab. 2 probability distributions for the material

parameter			
参数	分布	均值	变异系数
纵筋率 $\rho_l$	均匀	0.02	0.30
配箍率 $\rho_t$	均匀	0.009	0.33
混凝土抗压强度 $f_c$ /MPa	正态	40	0.12
钢筋屈服强度 $f_y$ /MPa	正态	448	0.08
独柱墩基础平动刚度 $K_{tp}$ /( $MN \cdot m^{-1}$ )	对数正态	350.3	0.21
独柱墩基础转动刚度 $K_{tr}$ /( $MN \cdot m \cdot rad^{-1}$ )	对数正态	9 040	0.21
双柱墩基础平动刚度 $K_{td}$ /( $MN \cdot m^{-1}$ )	对数正态	175.1	0.21
双柱墩基础转动刚度 $K_{td}$ /( $MN \cdot m \cdot rad^{-1}$ )	对数正态	1 360	0.21

### 3 地震动选取与工程需求参数

根据文献[23]，从太平洋地震工程中心数据库<sup>[24]</sup>选取远场和近场地震动各 30 条。所选地震动震级为 6~8 级，土表面以下 30m 处的剪切波速为 400~700 m/s。特别地，所选近场地震动断层距均在 10 km 以内。所选地震动反应谱见图 4，其中远场、近场地震动反应谱为水平双向地震动的几何平均谱，每条地震动记录的物理信息见文献[23]。选取桥墩漂移率（即墩顶位移与墩高的之比）和支座位移作为工程需求参数进行桥梁的风险和韧性评估。

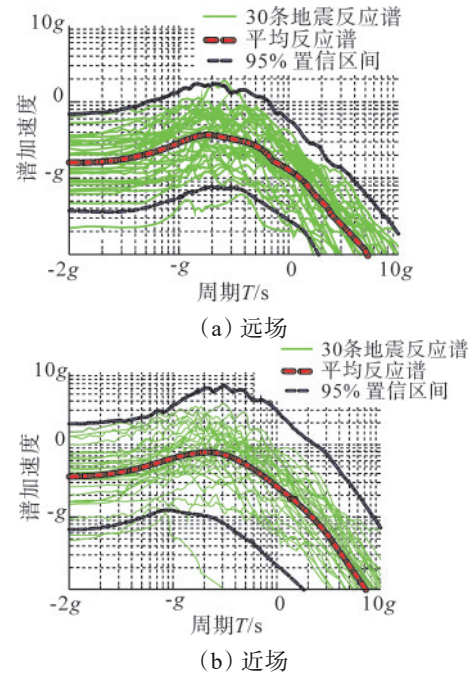


图4 地震动记录反应谱

Fig.4 response spectra for the ground motion records

## 4 结果与讨论

### 4.1 概率地震需求分析

基于近、远场地震动记录,对桥梁有限元模型进行非线性时程分析,统计每条地震动作用下各桥墩和支座的响应峰值。基于云图法<sup>[12]</sup>,对桥墩在远场、近场地震作用下的响应进行概率地震需求分析。假定构件需求均值 $S_D$ 与IM在对数空间内呈线性关系,可表示为

$$\ln S_D = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{IM}, \quad (8)$$

式中: $\alpha_0$ 为截距; $\alpha_1$ 为斜率。

在给定的IM下,结构的地震需求 $D$ 服从对数正态分布,则概率地震需求模型可表示为

$$P\{D \geq d | \text{IM}\} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln D - \ln S_D}{\beta_{D|\text{IM}}}\right), \quad (9)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布变量的累积分布函数; $\beta_{D|\text{IM}}$ 为对数标准差。

$$\beta_{D|\text{IM}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln D_i - \ln S_D)^2}{N-2}}, \quad (10)$$

式中, $N$ 为非线性时程分析的总次数。

表3 近、远场地震下各IM相对于不同工程需求参数的 $\beta_{D|\text{IM}}$ 值

Tab.3  $\beta_{D|\text{IM}}$  values for each IM relative to different engineering demand parameters under near and far-field earthquakes

需求参数	$\beta_{D \text{IM}}$						
	$v_{\text{PGA}}$	$v_{\text{PGV}}$	$v_{\text{PGD}}$	$S_{a-1s}$	$S_{v-1s}$	$S_{d-1s}$	
近场地震动	中墩P4漂移率	1.304	0.515	0.592	0.538	0.574	0.539
	边墩P7漂移率	0.452	0.552	0.79	0.618	0.582	0.619
	中支座B5位移	1.001	0.512	0.609	0.559	0.578	0.562
	边支座B7位移	0.852	0.493	0.601	0.552	0.549	0.555
远场地震动	中墩P4漂移率	0.825	0.494	0.578	0.423	0.481	0.422
	边墩P7漂移率	0.404	0.401	0.574	0.48	0.438	0.482
	中支座B5位移	0.896	0.524	0.661	0.424	0.491	0.424
	边支座B7位移	0.679	0.394	0.536	0.42	0.429	0.42

远、近场地震作用下中墩P4、边墩P7的概率地震需求分析结果见图5、图6。由图5可知,近场地震动作用下中墩的漂移率为0.018,远场地震动作用下中墩的漂移率为0.005。由图6可知,近场地震动作用下边墩平均漂移率为0.0016,远场地震动作用下边墩平均漂移率为0.0005。对比图6和图5可知,中墩的漂移率明显大于边墩,中墩漂移率与 $v_{\text{PGV}}$ 之间的相关性明显强于边墩(通过确定系数 $R^2$ 衡量)。在远场和近场地震动作用下中墩漂移率与 $v_{\text{PGV}}$

为对模型进行可靠的概率地震需求分析,得到准确的易损性和抗震韧性评估结果,选取6个常用的IM<sup>[25]</sup>,分别为峰值地面加速度 $v_{\text{PGA}}$ 、峰值地面速度 $v_{\text{PGV}}$ 、峰值地面位移 $v_{\text{PGD}}$ ,以及周期为1.0s所对应的加速度 $S_{a-1s}$ 、速度 $S_{v-1s}$ 和位移反应谱值 $S_{d-1s}$ 。以各IM对应的概率地震需求模型的 $\beta_{D|\text{IM}}$ 值作为量化的衡量指标, $\beta_{D|\text{IM}}$ 值越小,说明给定地震动强度下结构实际需求与需求模型估计值之间的变异性越小,IM的适用性越优<sup>[12]</sup>。选取中墩P4、边墩P7的漂移率以及中支座B5、边支座B7的位移作为代表性的工程需求参数(桥墩和支座位置和编号见图2)。

近、远场地震作用下各IM针对不同工程需求参数的 $\beta_{D|\text{IM}}$ 值见表3。由表3可知,近场地震动下, $v_{\text{PGV}}$ 所对应的 $\beta_{D|\text{IM}}$ 整体上明显小于其他IM所对应的 $\beta_{D|\text{IM}}$ ;在远场地震动下,尽管在少数特定的工程需求参数下, $v_{\text{PGV}}$ 所对应的 $\beta_{D|\text{IM}}$ 略大于谱加速度相关的IM,但总体表现仍保持优势。综上,选取 $v_{\text{PGV}}$ 作为地震动强度指标,这与文献[26]研究结论一致。

之间的 $R^2$ 分别为0.70和0.89,而边墩漂移率与 $v_{\text{PGV}}$ 之间的 $R^2$ 则为0.64和0.73,说明相比于边墩, $v_{\text{PGV}}$ 能够更准确地预测中墩的响应。此外,近场地震动下中墩、边墩概率地震需求模型的 $R^2$ 较远场地震动下更大,即近场地震动下桥墩漂移率峰值与 $v_{\text{PGV}}$ 之间的相关性较远场地震动更强,桥墩实际漂移率峰值更贴近基于 $v_{\text{PGV}}$ 回归得到的桥墩漂移率均值。因此,相比于远场地震动, $v_{\text{PGV}}$ 能够更准确地预测近场地震动作用下桥梁的峰值响应。

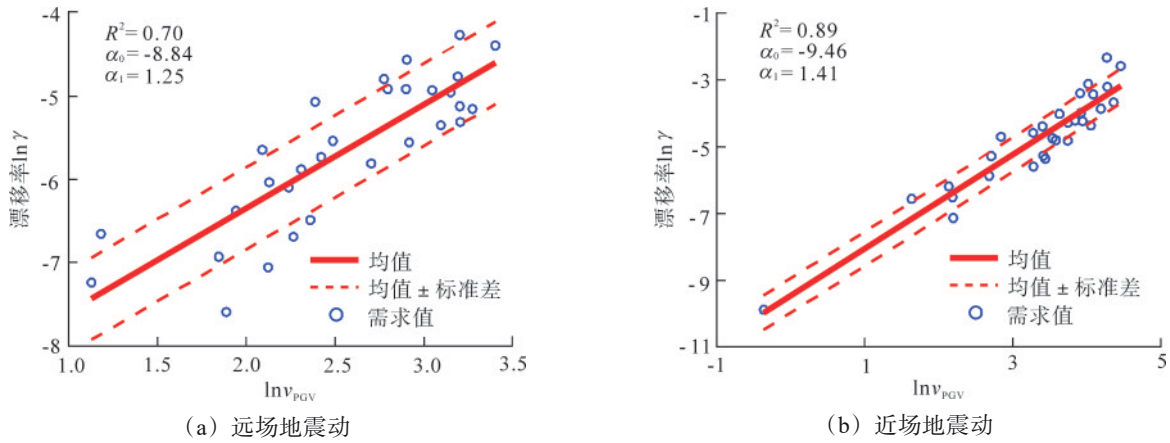


图 5 中墩 P4 概率地震需求模型

Fig.5 probabilistic seismic demand model of the pier P4

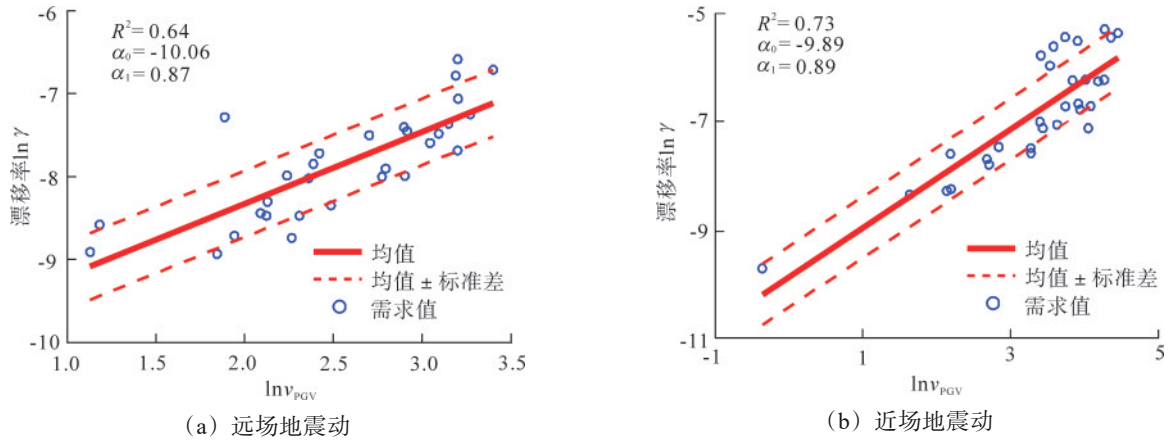


图 6 边墩 P7 概率地震需求模型

Fig.6 probabilistic seismic demand model of the pier P7

远、近场地震下中支座 B5、边支座 B7 的概率地震需求模型见图 7、图 8。与桥墩地震响应结果类似，近场地震作用下中支座、边支座的位移明显大于远场地震作用下的结果。近场地震下中支座 B5、边支座 B7 的位移分别为远场地震动下的

3.8 倍和 3.6 倍。相比于远场地震动，近场地震下支座位移与  $v_{PGV}$  具有更好的相关性，而近场（或远场）地震作用下中支座和边支座的位移相差较小，近、远场地震下边支座位移分别为中支座位移的 1.21 倍和 1.32 倍。

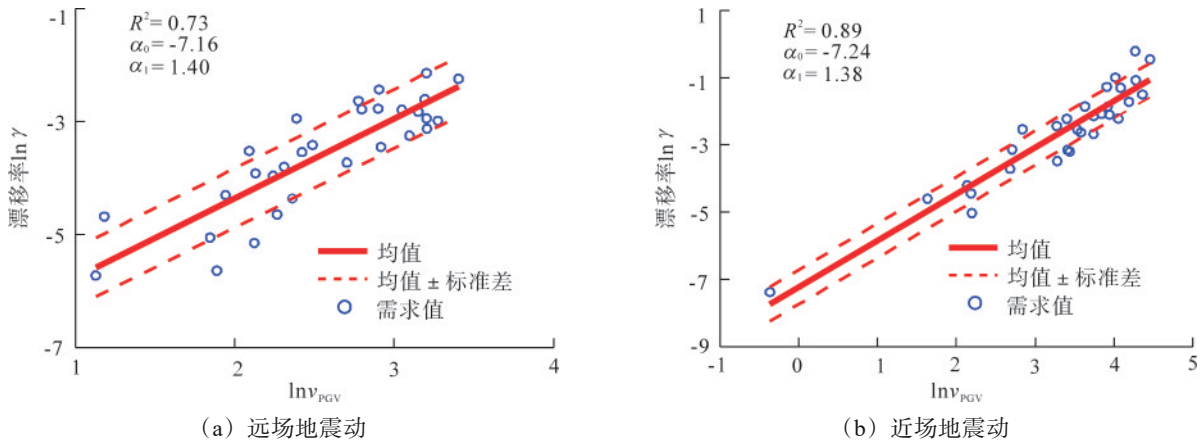


图 7 中支座 B5 概率地震需求模型

Fig.7 probabilistic seismic demand model of the bearing B5

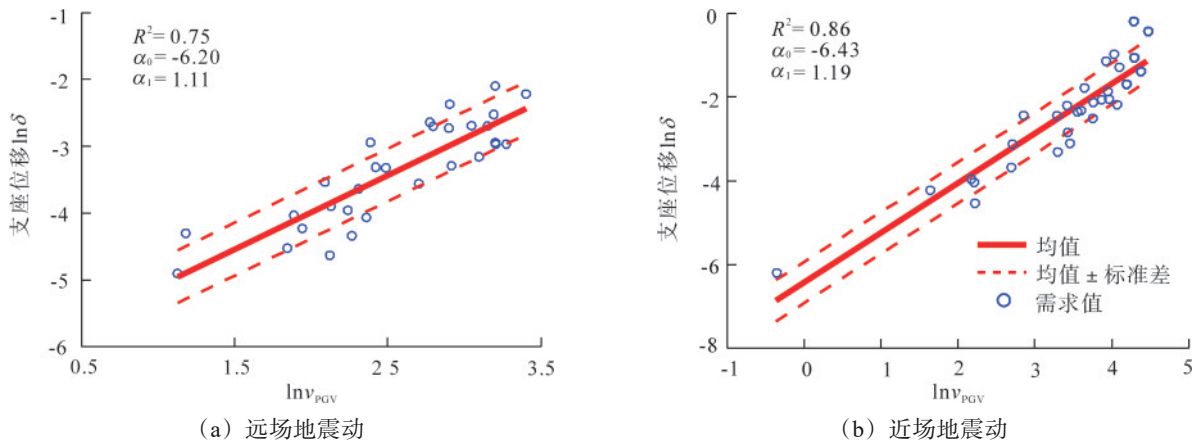


图 8 边支座 B7 概率地震需求模型

Fig.8 probabilistic seismic demand model of the bearing B7

4.2 易损性分析

在进行易损性分析前, 需要确定桥墩和支座的损伤状态。根据 NING 等<sup>[27]</sup>的研究, 构件的损伤状态定义需先将构件分为主要构件和次要构件。主要构件影响桥梁的垂直稳定性和承载能力, 该类构件完全损坏可能导致桥梁完全丧失使用功能; 次要构件的损伤不会对桥梁垂直稳定性产生影响, 其失效不会严重影响桥梁的长期使用功能。主要构件主要控制桥梁的严重损伤和倒塌状态, 次要构件主要影响轻微和中等损伤状态。根据工程情况将桥墩定义为主要构件, 支座定义为次要构件。假定桥墩和支座的各损伤状态的临界值服从对数正态分布, 桥墩漂移率<sup>[28]</sup>和支座位移<sup>[29]</sup>在各个损伤状态下的临界值均值  $S_C$  及对数标准差  $\beta_C$  见表 4。

表 4 桥墩和支座的损伤状态定义

Tab.4 damage state definition for the pier and bearing			
损伤类型	需求参数	桥墩漂移率	支座位移/m
轻微损伤	均值	0.007	0.037
	对数标准差	0.350	0.350
中等损伤	均值	0.015	0.104
	对数标准差	0.350	0.350
严重损伤	均值	0.025	
	对数标准差	0.350	
完全损伤	均值	0.050	
	对数标准差	0.350	

结合第 4 节的概率地震需求分析结果和构件的损伤状态定义, 构件易损性<sup>[12]</sup>可表示为

$$P_{\text{comp}} = \Phi \left( \frac{\ln(S_D/S_C)}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad (11)$$

选中墩 P4 的漂移率和边支座 B7 的位移作为代表性响应参数, 对比近、远场地震下桥梁的构件

易损性, 结果见图 9。

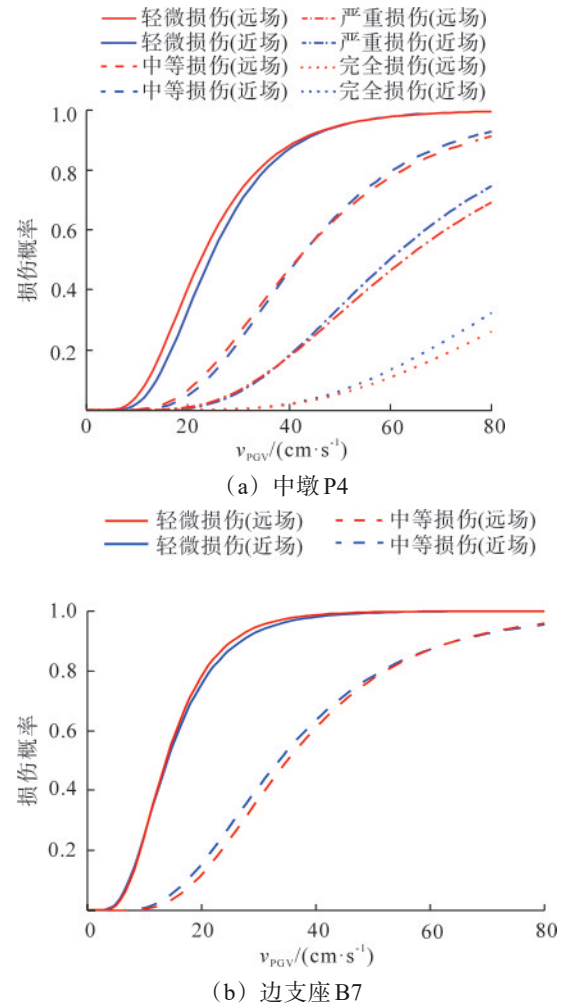


图 9 近、远场地震下桥梁构件易损性曲线对比

Fig.9 comparison of the component fragility curves under near and far-field earthquakes

由图 9 (a) 可知, 轻微损伤状态下, 桥墩在远场地震下的损伤概率高于近场地震动, 二者损伤概率最大相差 0.074。随着损伤状态的加剧, 桥

梁在近场地震下的损伤概率逐渐超越远场地震作用下的损伤概率。特别地,近场地震下桥墩达到完全损伤状态的概率比远场地震高0.063。由图9(b)可知,轻微损伤状态下,近、远场地震作用下支座的易损性相近;中等损伤状态下,近场地震下支座的损伤概率高于远场地震动下的结果,最大相差0.043。

结合全桥各构件的概率地震需求分析结果和能力模型,采用文献[12]中的方法生成桥梁体系易损性曲线。首先根据各个地震需求均值和标准差,得到结构体系的联合概率地震需求模型,假设该模型服从多维正态分布。然后采用蒙特卡罗方法进行 $10^5$ 次模拟,根据构件需求的均值矩阵和协方差矩阵抽样得到需求样本,根据表4中桥墩能力的均值和对数标准差抽样得到能力样本。对每次蒙特卡罗模拟所得到的需求和能力样本进行比较,确定特定地震动强度水平下结构体系达到某一损伤状态时的失效概率。假定桥梁体系为串联体系,各构件相互独立,当结构第*i*个构件达到某一损伤状态时,结构体系达到了相同的损伤状态。

近、远场地震作用下桥梁不同损伤状态下的体系易损性曲线见图10。

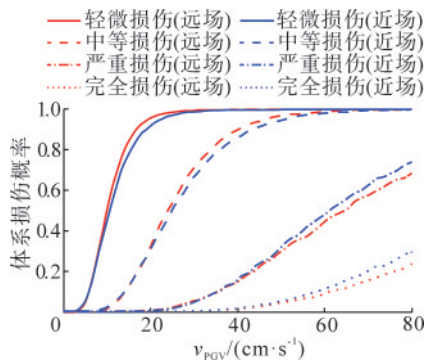


图10 近、远场地震作用下桥梁的体系易损性曲线

Fig.10 system fragility curves of bridges under near-field and far-field earthquakes

由图10可知,当地震动强度较小时,近、远场地震作用下,桥梁体系的损伤概率相近。其中,轻微损伤状态下,远场地震动的损伤概率高于近场地震作用下的损伤概率。随着地震动强度的增大,近场地震动作用下桥梁的体系易损性逐渐超过远场地震动,特别是在严重和完全损伤状态下,近场地震动作用下的损伤概率明显高于远场。当 $v_{PGV}$ 为80 cm/s时,近场地震动作用下桥梁体系在严重和完全损伤状态下的失效概率比远场地震动大0.07。

### 4.3 抗震韧性分析

由图10得到桥梁体系在强度为IM的地震动下未发生损伤的概率为 $P_f^0(IM)$ ,处于损伤状态*k*的概率为 $P_f^{(k)}(IM)$ ,以及桥梁在损伤状态*k*下的功能恢复模型 $Q^{(k)}(t)$ ,将上述变量代入式(6)可得到不同地震动强度下桥梁在近、远场地震作用下的功能恢复曲线,见图11。

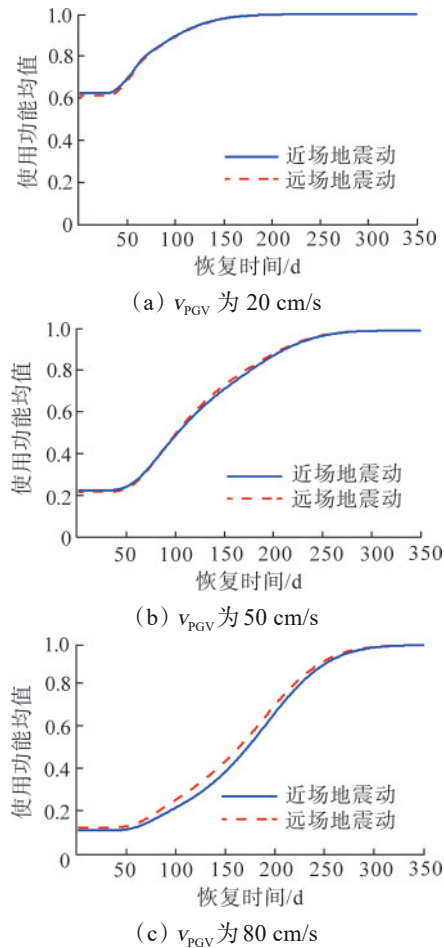


图11 不同地震动强度下桥梁在近、远场地震作用下的功能恢复曲线

Fig.11 functionality recovery curves of bridges under near-field and far-field earthquakes with different ground motion intensities

由图11可知,随着地震动强度的增大,桥梁的功能损失逐渐增大,功能完全恢复所需要的时间逐渐增加。不同地震动强度所对应的平均功能损失分别为0.4( $v_{PGV}$ 为20 cm/s)、0.8( $v_{PGV}$ 为50 cm/s)和0.9( $v_{PGV}$ 为80 cm/s);桥梁恢复到目标功能(使用功能均值为1)所需要时间分别为170 d( $v_{PGV}$ 为20 cm/s)、300 d( $v_{PGV}$ 为50 cm/s)和350 d( $v_{PGV}$ 为80 cm/s)。当地震动强度较小时,远场地震动作用下桥梁功能损失较近场更多,而随着地震动强度的增加,近场地震动造成的功能损失更大,

功能恢复所需时间更长。

由上述结果可知,近、远场地震下桥梁的使用功能及恢复时间与地震动强度有关。进一步根据式(1)对不同地震动强度下桥梁在近、远场地震作用下的功能恢复曲线进行积分,得到近、远场地震作用下桥梁抗震韧性 $R$ 随地震动强度的变化曲线,见图12。与图11所得结论一致,当地震动强度较小时,近场地震动作用下桥梁体系具有较好的抗震韧性;随着地震动强度的增大,近场地震动工况的韧性下降更快;当地震动强度较强时,远场地震动作用下桥梁体系相比于近场地震动作用下,具有更好的抗震韧性。这主要是因为当地震动强度较高时,近场地震动会使桥梁结构体系的易损性更高。

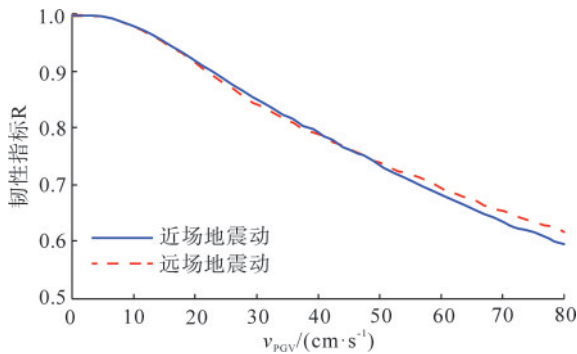


图12 近、远场地震作用下桥梁抗震韧性随地震动强度的变化

Fig. 12 variation of seismic resilience of bridges with the ground motion intensity under near-field and far-field earthquakes

## 5 结论

以典型的钢筋混凝土连续梁桥为工程背景,建立了近、远场地震动作用下桥梁桥墩和支座的概率地震需求模型。分析了近、远场地震动作用下,桥梁在不同损伤状态的构件和体系易损性,不同地震动强度下桥梁在近、远场地震动作用下的功能恢复曲线,以及抗震韧性随地震动强度的变化规律,主要结论如下。

(1) 在近场地震动作用下,构件的需求显著高于远场地震动作用下的需求。近场地震下的中墩漂移率平均为远场地震的3.8倍,边支座位移则为远场地震的3.6倍。与远场地震动相比,峰值地面速度能更精确地预测构件在近场地震动下的地震需求。

(2) 在轻微损伤状态下,远场地震下桥梁的构件易损性高于近场地震,但随着损伤程度的加

重,近场地震下的构件易损性逐渐超过远场地震。

(3) 当地震动强度较小时,近、远场地震下桥梁的体系易损性相近,且轻微损伤时远场地震下易损性更高。随着震动强度增加,近场地震下体系易损性逐渐超过远场,在严重和完全损伤状态下,强震时近场地震下的体系易损性明显高于远场。

(4) 桥梁的使用功能和抗震韧性与地震动强度密切相关。随着地震动强度的增加,桥梁的功能损失加剧,完全恢复所需时间延长。在低强度地震下,近场地震对桥梁功能的影响小于远场,桥梁展现出更好的抗震韧性;然而,随着地震强度增大,近场地震导致的功能损失和恢复时间均超出远场,桥梁表现出较低的抗震韧性。

## 参考文献(References):

- [1] 李立峰,吴文朋,黄佳梅,等.地震作用下中等跨径RC连续梁桥体系易损性研究[J].土木工程学报,2012,45(10):152-160.  
LI Lifeng, WU Wenpeng, HUANG Jiamei, et al. Study on system vulnerability of medium span reinforced concrete continuous girder bridge under earthquake excitation[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(10):152-160.
- [2] 袁万城,王思杰,李怀峰,等.桥梁抗震智能与韧性的发展[J].中国公路学报,2021,34(2):98-117.  
YUAN Wancheng, WANG Sijie, LI Huaifeng, et al. Development of intelligence and resilience for bridge seismic design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021,34(2):98-117.
- [3] DECÒ A, BOCCHINI P, FRANGOPOL D M. A probabilistic approach for the prediction of seismic resilience of bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(10): 1469-1487.
- [4] BIONDINI F, CAMNASIO E, TITI A. Seismic resilience of concrete structures under corrosion[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(14): 2445-2466.
- [5] SOLEIMANI F, HAJIALIZADEH D. Bridge seismic hazard resilience assessment with ensemble machine learning[J]. Structures, 2022,38:719-732.
- [6] VENKITTARAMAN A, BANERJEE S. Enhancing resilience of highway bridges through seismic retrofit[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(8): 1173-1191.
- [7] 李宁,史伟,谢礼立.考虑修/改造方案优选的桥梁震后可恢复性和可持续性研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(1):1-9.  
LI Ning, SHI Wei, XIE Lili. Research on post-earthquake resilience and sustainability performance of bridge considering bridge retrofit schemes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1):1-9.
- [8] 刘洋,林均岐,刘金龙,等.RC梁桥震后可恢复性评价方法研究[J].灾害学,2017,32(4):224-229.  
LIU Yang, LIN Junqi, LIU Jinlong, et al. Seismic resilience

- assessment method for RC beam bridge[J]. *Journal of Catastrophology*,2017, 32(4): 224-229.
- [9] 刘启方,袁一凡,金星,等. 近断层地震动的基本特征[J]. *地震工程与工程振动*,2006,26(1): 1-10.  
LIU Qifang, YUAN Yifan, JIN Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(1): 1-10.
- [10] 孙永江. 近场地震作用下大跨高墩连续刚构桥易损性分析[J]. *中外公路*,2024,44(1):161-165.  
SUN Yongjiang. Fragility analysis of continuous rigid frame bridge with high piers and long span subjected to near-field earthquakes[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2024, 44(1): 161-165.
- [11] PANG Y T, WANG X W. Cloud-IDA-MSA conversion of fragility curves for efficient and high-fidelity resilience assessment[J]. *Journal of Structural Engineering*,2021,147(5):04021049.
- [12] NIELSON B G, DESROCHES R. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007, 36(6): 823-839.
- [13] MCKENNA F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2011, 13(4): 58-66.
- [14] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 3版. 北京:人民交通出版社, 2017:43.
- [15] JEON J S, DESROCHES R, KIM T, et al. Geometric parameters affecting seismic fragilities of curved multi-frame concrete box-girder bridges with integral abutments[J]. *Engineering Structures*, 2016, 122: 121-143.
- [16] TASKARI O, SEXTOS A. Multi-angle, multi-damage fragility curves for seismic assessment of bridges[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(13): 2281-2301.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020 [S]. 北京:人民交通出版社,2020:55.
- [18] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [19] SRIVASTAVA C, PANDIKKADAVATH M S, MANGALATHU S, et al. Seismic response of RC bridges under near-fault ground motions: a parametric investigation[J]. *Structures*, 2024, 61: 106033.
- [20] LIMBERT J, AFSHAN S, KASHANI M M, et al. Compressive stress-strain behaviour of stainless steel reinforcing bars with the effect of inelastic buckling[J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112098.
- [21] FENG R W, DONG Y, YE A J, et al. Average spectral acceleration (AvgSa) for high-confidence probabilistic seismic demand modeling of urban highway bridge portfolios: what period range and damping ratio shall we use? [J]. *Engineering Structures*, 2024, 309: 118063.
- [22] ZHOU L X, ALAM M S, YE A J. Probabilistic postearthquake vertical load-carrying capacity loss model and rapid functionality assessment for reinforced concrete circular bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2024, 150(7): 04024076.
- [23] PANG Y T, CAI L, ZHONG J. Seismic performance evaluation of fiber-reinforced concrete bridges under near-fault and far-field ground motions[J]. *Structures*,2020, 28:1366-1383.
- [24] ANCHETA T D, DARRAGH R B, STEWART J P, et al. NGA-west2 database[J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 989-1005.
- [25] ZHOU L X, ALAM M S, WANG X W, et al. Optimal intensity measure selection and probabilistic seismic demand model of pile group supported bridges in sandy soil considering variable scour effects[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285: 115365.
- [26] JIANG L W, ZHONG J, HE M, et al. Optimal seismic intensity measure selection for isolated bridges under pulse-like ground motions[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019(1): 3858457.
- [27] NING C X, XIE Y Z, BURTON H, et al. Enabling efficient regional seismic fragility assessment of multi-component bridge portfolios through Gaussian process regression and active learning [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2024, 53(9): 2929-2949.
- [28] KIM S H, SHINOZUKA M. Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2004, 19(1/2): 105-112.
- [29] 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.