

考虑行波效应的在役连续梁桥抗震性能提升

高泽亮¹, 王晓明¹, 王炳玉², 史一哲¹, 张 恒¹, 吴 骞¹

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘 要:为研究不同抗震加固方式对服役梁桥的抗震性能提升效果,基于增量动力分析(IDA)的易损性分析方法对多遇、罕遇和极罕遇地震时桥梁的墩柱与支座进行抗震性能评估。设计了3种抗震加固方式供工程比选,包括对桥墩包裹纤维增强复合材料(FRP)材料、布置金属阻尼器和布设拉索限位装置。借助OpenSees平台建立全桥有限元动力分析模型,模拟3种抗震加固方式下桥梁的地震响应,综合考虑地震动的不确定性和行波效应,选取130条地震动用于IDA,得到地震一致激励和地震多点激励的IDA曲线簇。基于能力需求比模型,以曲率和位移为损伤指标,分别定义墩柱和支座地震损伤状态,绘制地震易损性曲线,对不同抗震加固方式下桥梁的抗震性能进行易损性对比分析。研究结果表明:包裹FRP材料对提升桥梁墩柱抗震性能效果显著,采取FRP加固方案后,墩柱在极罕遇地震下处于轻微损伤状态的超越概率降低幅值可达53.73%;布置金属阻尼器可有效控制支座损伤程度,在巨震作用下,支座阻尼减震后超越轻微损伤状态的概率仅为13.57%,支座大概率处于完好状态;布设拉索限位装置对提升桥梁抗震性能收益不大;考虑行波效应会降低墩柱的损伤超越概率,相比较一致激励下墩柱的损伤超越概率,采取FPR抗震加固措施前后,墩柱多点激励下损伤超越概率降低幅值分别为19.88%和22.07%,行波效应对支座的损伤超越概率影响不大。

关键词:桥梁工程;抗震加固;FRP加固;金属阻尼器;拉索限位装置;易损性分析

中图分类号:U24 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)09-2382-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250162

Improving seismic performance of in-service continuous beam bridges considering traveling wave effect

GAO Ze-liang¹, WANG Xiao-ming¹, WANG Bing-yu², SHI Yi-zhe¹, ZHANG He¹, WU Qian¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: To study the improvement effect of different seismic reinforcement methods on the seismic performance of service beam bridges, the seismic performance of piers and bearings of bridges during frequent ground motion, rare ground motion and very rare ground motion is evaluated based on the vulnerability analysis method of incremental dynamic analysis (IDA). Three seismic reinforcement methods

收稿日期: 2025-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52678179); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2026JC-YBMS-0469).

作者简介: 高泽亮(1994-), 男, 博士研究生. 研究方向: 桥梁结构减隔震技术及韧性提升.

E-mail: gao_zeliang@qq.com

通信作者: 王晓明(1983-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 桥梁结构抗震加固及减隔震技术. E-mail: wxm@chd.edu.cn

have been designed for engineering comparison, including wrapping fiber reinforced polymer (FRP) materials around piers, installing metal dampers, and installing cable restrainer. The finite element dynamic analysis model of the whole bridge was established with the help of OpenSees platform. Considering the uncertainty of ground motion and traveling wave effects, 130 ground motions were selected for IDA to obtain IDA curve clusters of uniform excitation and non-uniform excitation ground motion. Based on the capacity-demand ratio model, the curvature and displacement are used as damage measures to define the seismic damage states of piers and bearings respectively, and the seismic vulnerability curves are plotted to conduct a vulnerability comparison analysis of the seismic performance of bridges under different seismic strengthening methods. The research results show that: wrapping FRP materials has a significant effect on improving the seismic performance of bridge piers. After adopting the FRP reinforcement scheme, the probability of pier being slightly damaged under very rare ground motion can be reduced by 53.73%; The installation of metal dampers can effectively control the degree of bearing damage. Under major earthquake, the probability of the bearing exceeding a slight damage state after shock absorption is only 13.57%, and the bearing is likely to be in intact state; The installation of cable restrainer has little benefit in improving the seismic performance of bridges; Considering the traveling wave effect will reduce the damage exceeding probability of the pier, Compared with the damage exceeding probability of the pier under uniform excitation ground motion, before and after adopting FPR seismic reinforcement measures, the reduction amplitude of damage exceeding probability under non-uniform excitation ground motion of the pier is 19.88% and 22.07%, respectively. The traveling wave effect has little effect on the damage exceeding probability of the bearing.

Key words: bridge engineering; seismic reinforcement; FRP strengthened; metal dampers; cable restrainer; vulnerability analysis

0 引言

目前,中国在役公路桥梁有96.11万座,其中,中小跨径桥梁数量占比高达85%^[1],中小跨径公路桥梁普遍采用双柱式排架墩。然而,桥梁双柱式排架墩在长期服役过程中频遭地震灾害,震后损伤和破坏严重,例如美国Cypress高架桥和日本Hansui高架桥都因早期设计强度不足,分别在1989年Loma Prita地震和1995年Kobe地震中倒塌^[2,3],2008年汶川大地震中更有20%简支梁桥和40%连续梁桥的双柱墩均因早期设计问题遭到严重破坏^[4]。研究者们基于桥梁震害的新认识,对桥梁抗震设计规范进行修订更新,但早期修建的桥梁无法满足现行规范的抗震要求,因此,高烈度区公路桥梁抗震加固与改造工作亟待开展。

桥梁抗震加固与改造工作可从两个方面入手,一是提升桥梁自身的抗震能力,二是降低桥梁结构的地震需求^[5,6]。提升桥梁抗震能力主要通过增强桥墩的强度和延性来实现,常用方法有增大截面加固法、外包套夹加固法和横向预应力加固法等。降低桥梁结构地震需求一般采用减隔震

装置实现,减震和隔震是两种抗震思路,减震是通过增加结构阻尼耗散地震能量,隔震则通过调整结构自身周期以减小地震动输入,常用的减隔震装置有摩擦摆支座、金属阻尼器和屈曲约束支撑等^[7-9]。

科研工作者们在桥梁抗震加固与改造方面做出许多研究工作。高性能材料在桥梁抗震应用研究方面,林元峥等^[10]和田石柱等^[11]采用纤维增强复合材料(Fiber reinforced polymer, FRP)对桥墩塑性铰区进行抗震加固,有效提升了钢筋混凝土(RC)梁桥的抗震性能,但试验模型均未考虑墩底预留间隙的问题;韩强等^[12]通过模型试验阐述了碳纤维增强聚合物布(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固RC空心桥墩的弯曲延性、耗能和耗能能力,试验结果表明,CFRP布加固可改变空心墩柱的破坏机理,显著提升桥墩抗震性能。桥梁减隔震新技术研究方面,朱立华等^[13]针对位移型阻尼器屈服后刚度不足的问题,研发了新型格栅式摩擦阻尼器,拟静力试验发现该阻尼器屈服后刚度硬化行为明显,多阶段耗能特性显

著;Zhou等^[14]对安装金属阻尼器的斜拉桥进行振动台试验,研究结果表明不同屈服强度金属阻尼器在多次地震激励后仍具有良好的低周疲劳性能,不会出现疲劳失效;李建中等^[15]提出允许支座滑移和横向限位装置的损伤或牺牲等多种减隔震设计方法,控制墩梁相对位移,保护桥梁震后免遭破坏。上述研究中,前者致力于将高性能材料应用于桥梁抗震,后者则聚焦于减隔震装置的设计研发与性能测评。目前,桥梁双柱式排架墩存在无法满足现行抗震设计规范要求的情况,高烈度区桥梁双柱式排架墩抗震性能严重不足,然而,不同抗震加固方法在桥梁双柱式排架墩中的应用及抗震性能对比分析鲜有报道。为此,本文通过数值模拟将多种加固方案应用于桥梁双柱式排架墩,对比分析不同加固方案在桥梁抗震性能方面的提升效果。

综上,本文借助 OpenSees 平台建立全桥有限元动力分析模型,综合考虑地震动的不确定性和行波效应,输入 260 条地震动对依托工程进行增量动力分析(IDA),考察全桥弹塑性演化过程,据此制定 3 种桥梁抗震加固改造方案,即:桥墩包裹 FRP 材料,布置金属阻尼器和布设拉索限位装置。通过数值模拟将 3 种抗震加固方案应用于依托工程,基于 IDA 的易损性分析方法,从概率角度对桥梁抗震加固性能提升效果进行对比分析。

1 基于 IDA 的地震易损性分析方法

1.1 地震需求概率模型

地震易损性分析方法从概率角度定量描述工程结构的抗震性能,反映地震动强度与结构破坏程度之间的关系,为确定结构薄弱环节、抗震加固与结构风险评估等研究提供必要依据。桥梁地震易损性分析的关键环节是建立易损性曲线,常用方法有频数分析法、线性拟合法和曲线拟合法,频数分析方法需要处理大量非线性动力时程分析结

果,工作量大且效率低,而回归统计分析可以兼顾计算精度与工作效率,相比较线性拟合法,曲线拟合法可以有效降低回归曲线的离散程度,故本文选用能力需求比模型的曲线拟合法,计算公式如下:

$$P_i = P\left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(1) - \lambda}{\sigma}\right] = \Phi\left(\frac{\lambda}{\sigma}\right) \quad (1)$$

$$\lambda = a(\ln(\text{PGA}))^2 + b \ln(\text{PGA}) + c \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{S_r/(n-2)} \quad (3)$$

式中: P_i 为结构达到对应极限状态的超越概率; S_d 为结构对应极限状态的地震反应需求; S_c 为结构对应极限状态的抗震能力; λ 为结构达到极限状态的需求能力比对数回归均值; σ 为标准差; a 、 b 、 c 为回归系数; S_r 为各离散点对于回归曲线的残差平方和; n 为离散点个数。

1.2 损伤指标与极限状态

地震易损性分析需要先定义各构件的损伤状态,本文墩柱采用曲率为量化指标,并通过 Xtract 软件对墩柱底部截面进行弯矩-曲率分析,得到墩柱各损伤状态的损伤限值,需要强调,由于墩柱在外包 FRP 后,改变了原墩柱的力学性能,故需要重新标定 FRP 加固后墩柱的损伤限值;支座损伤状态以支座处墩梁相对位移为量化指标,参考文献[16],确定滑动支座与固定支座各损伤状态的位移限值。详细信息列于表 1。

1.3 行波效应分析

地震动按一定速度在空间中进行运动,到达桥梁各个墩柱存在时间差,会使各个墩柱的地震激励不同步,这种地震动的空间变异现象称为行波效应。地震动到达小跨度桥梁各个墩柱的延时间短,视为一致激励,但对于大跨度桥梁而言,由于地震动到达不同墩柱的延时长,将视为多点激励,使得各墩柱所输入的时程函数存在相位差。本文

表 1 损伤状态定义

Table 1 Definition of damage states

损伤状态	原桥桥墩/(m^{-1})		FRP 加固桥墩/(m^{-1})		滑动支座/mm		固定支座/mm	
	顺桥向	横桥向	顺桥向	横桥向	顺桥向	横桥向	顺桥向	横桥向
轻微损伤	0.001 84	0.001 85	0.005 99	0.005 98	90	40	48	48
中等损伤	0.014 48	0.014 45	0.018 95	0.018 98	135	60	72	72
严重损伤	0.021 35	0.021 31	0.079 05	0.079 02	180	80	96	96
完全破坏	0.023 30	0.023 26	0.107 15	0.107 13	225	100	120	120

依托工程为三联连续梁桥,有 13 个墩柱,并且服役期近 20 年,为进一步准确评估老旧桥梁抗震性能,对比桥梁加固前后的抗震性能提升效果,应进一步考虑行波效应对桥梁的影响。

1.4 地震动输入

以设防标准生成目标反应谱,根据目标反应谱和工程实际场地条件,并综合考虑地震动的不确定性^[17],从太平洋地震数据库(PEER)选取 13 条天然地震记录,13 条地震动记录的反应谱和目标反应谱如图 1 所示,详细信息列于表 2。选取峰值加速度(PGA)为地震动强度指标,地震易损性分析需要将地震动强度从 0.1 g(g 为重力加速度)同比例调幅至 1.0 g,调幅步长 0.1 g,一致激

励时沿横桥向输入地震动,多点激励时沿顺桥向输入地震动,对全桥进行地震时程分析。

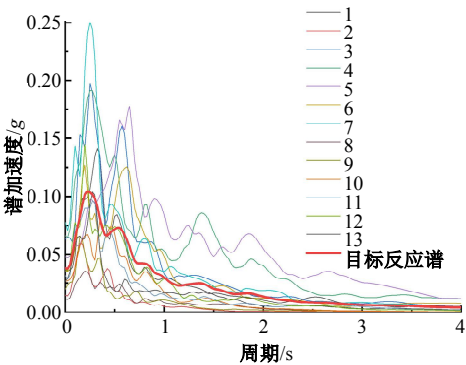


图 1 加速度反应谱
Fig. 1 Acceleration response spectrum

表 2 地震波记录参数

Table 2 Recording parameters of seismic waves

序号	地震事件	时间/年份	记录台站	震级	PGA/ g
1	Humbolt Bay	1937	Ferndale City Hall	5.8	0.036
2	Imperial Valley-01	1938	El Centro Array #9	5	0.015
3	Northwest Calif-02	1941	Ferndale City Hall	6.6	0.063
4	Borrego	1942	El Centro Array #9	6.5	0.066
5	Kern County	1952	Pasadena-CIT Athenaeum	7.36	0.048
6	Southern Calif	1952	San Luis Obispo	6	0.036
7	Northern Calif-04	1960	Ferndale City Hall	5.7	0.078
8	Parkfield	1966	San Luis Obispo	6.19	0.012
9	Lytle Creek	1970	Castaic-Old Ridge Route	5.33	0.020
10	San Fernando	1971	Anza Post Office	6.61	0.027
11	San Fernando	1971	Colton-So Cal Edison	6.61	0.032
12	San Fernando	1971	Hemet Fire Station	6.61	0.037
13	San Fernando	1971	Wheeler Ridge-Ground	6.61	0.026

2 抗震加固方案与数值模拟方法

2.1 算例概况

依托工程桥梁全长 356.5 m,上部结构采用 14~25 m 预应力混凝土先简支后连续箱梁,下部结构采用双柱式排架墩、多柱框式桥台和钻孔灌注桩基础,桥墩编号如图 2 所示。需要指出,该桥在设计修建时地震区划图为Ⅶ区,随着第 5 代《中国地震动参数区划图》实施,目前该桥地震区划烈度为Ⅷ度区,场地条件为Ⅱ类场地,基本地震动峰值加速度为 0.2 g。鉴于依托工程无法满足现行规范的抗震要求,本文拟采用粘贴 FRP、布置金属阻尼器和布设拉索限位装置 3 种方案对桥梁进行抗震加固改造,探讨不同加固方案对桥梁抗震

性能的影响,下面介绍 3 种加固方案的设计原理。

2.2 抗震加固方案

2.2.1 包裹 FRP 材料

FRP 加固法是将 FRP 材料包裹粘贴于桥墩外侧,二者形成受力整体,提高墩柱核心混凝土抗压强度,改善墩柱抗震性能,具体如图 3 所示。参考文献[18],选用 UT70-30 型单向纤维布,宽度为 500 mm,厚度为 0.167 mm,包裹 6 层 FRP 材料,沿桥墩环向铺设。

2.2.2 布置金属阻尼器

金属阻尼器利用金属材料屈服强度低和延性好的特点,耗散地震能量,保护桥梁免遭破坏。参考文献[19],采用 X 型钢阻尼器为减震耗能装置,横桥向每个支座部位均布置阻尼器,顺桥向仅在

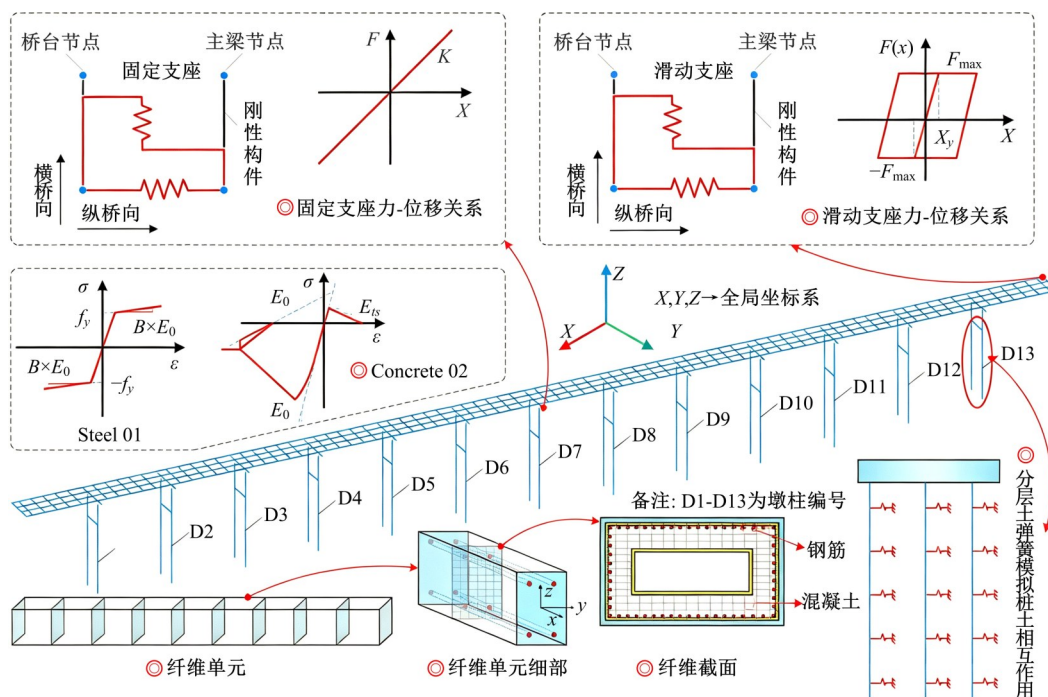


图 2 桥梁有限元模型

Fig. 2 Finite element model of bridge

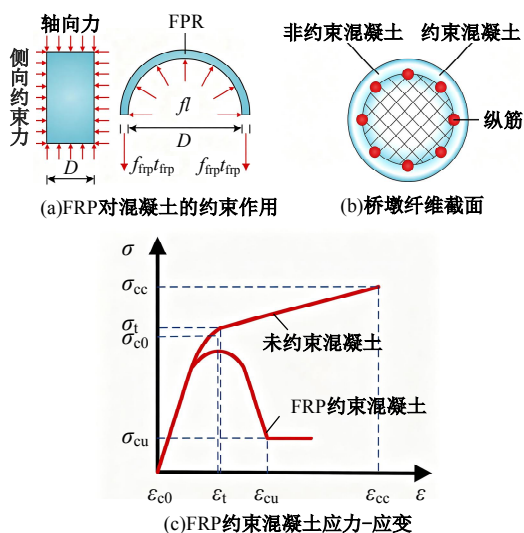


图 3 FRP 材料作用机理与模拟方法

Fig. 3 Function mechanism and simulation method of FRP material

滑动支座处布置阻尼器。阻尼器屈服力取恒载下支座竖向承载力需求的 10%。金属阻尼器布置如图 4 所示。

2.2.3 布设拉索限位装置

拉索限位装置将拉索两端分别安装在主梁和桥墩(或盖梁),以此控制桥梁上部结构连接处的相对位移,防止发生落梁震害,拉索限位装置布设与作用机理示意图分别如图 5 和 6 所示,图 6 中: f 为拉索限位装置所受拉力; gap 为拉索限位装置的缓冲

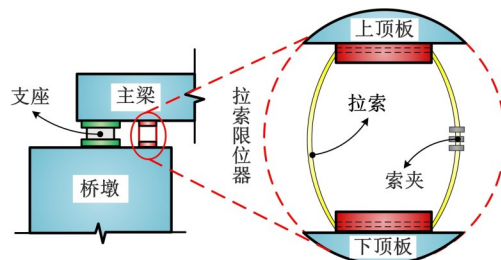


图 4 布置金属阻尼器

Fig. 4 Layout of metal dampers

间隙; K 为拉索限位装置的刚度; d 为拉索限位装置的位移量。参考文献[20],仅在横桥向布设拉索限位装置,拉索材料选取预应力钢绞线,规格为 $7\Phi 5$,拉索束数取 100,拉索限位自由程取 0.5 m。

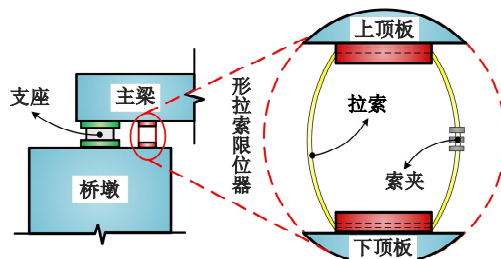


图 5 拉索限位装置布设

Fig. 5 Layout of cable restrainer

2.3 数值模拟方法

基于 OpenSees 有限元建立全桥地震反应分析模型,为考虑桥梁上部结构的刚度和质量分布,采用梁格法建立模型,通过 Mass command 将结

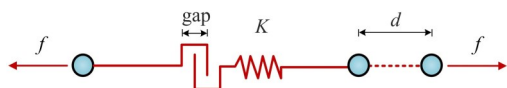


图6 拉索限位装置作用机理

Fig. 6 Function mechanism of cable restrainer

构自重和二期恒载赋予相应节点,主梁、盖梁、系梁和桩基础均采用弹性梁柱单元模拟;墩柱采用非线性纤维梁柱单元模拟,单元设置5个高斯积分点个数,考虑重力二阶效应,钢筋和混凝土材料分别采用 steel 02 和 concrete02 本构模型。支座力学性能通过零长度单元搭配 steel01 本构模拟,支座上节点与主梁连接,墩顶与盖梁采用刚臂连接,均采用 RigidLink command 实现。桩土相互作用采用等代土弹簧模拟,依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T2231—01—2020)^[21] 条文 6.2.8 确定等代土弹簧的刚度。

假设地震波的波速为 100 m/s, OpenSees 平台模拟行波效应需要转换地震动的输入方式,通过 Seismo Signal 软件对一致激励的加速度时程曲线进行二次积分,得到位移时程曲线作为地震

动输入,采用 Pattern Multiple Support command 模拟多点激励。

FRP 加固方案有限元模拟采用文献[22]的双线性模型,计算出峰值点与极限点后赋予 concrete01 Material,用于模拟 FRP 约束混凝土的力学行为;金属阻尼器通过 steel01 Material 搭配两节点单元模拟;拉索限位装置则采用 Elastic-Perfectly Plastic Gap Material 搭配零长度单元模拟。有限元模型如图 3 所示。

3 抗震性能提升效果对比分析

3.1 地震时程分析结果

由于桥墩与支座的 IDA 曲线形状相近,限于篇幅,典型的 IDA 曲线如图 7 和图 8 所示,彩图参见电子版,以下同。

3.1.1 桥墩 IDA 曲线

如图 7 所示, D4 号墩柱关键截面单条 IDA 曲线的斜率随地震动强度不断增大而逐渐减小,且部分 IDA 曲线有明显的屈服拐点,表明在地震动强度递增中 D4 号墩柱经历了弹塑性损伤演化过

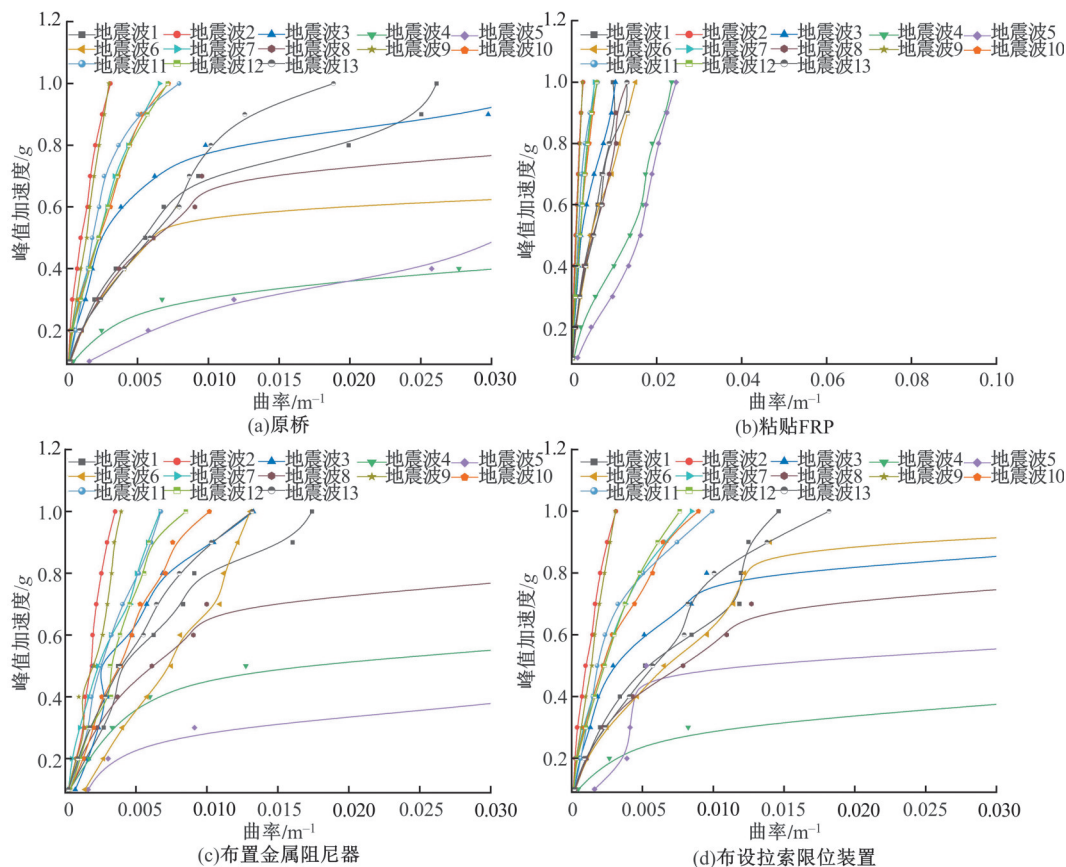


图7 D4号桥墩 IDA 曲线

Fig. 7 IDA curve of pier D4

程;多条 IDA 曲线则呈现出一定的差异性与离散性,原因在于地震激励的随机性与结构自身的非线性动力特性。与原 D4 号桥墩 IDA 曲线相比较,三种抗震加固方案对 D4 号桥墩抗震性能提升明显,其中,粘贴 FRP(Fiber reinforced polymer)加固后 D4 号桥墩的 IDA 曲线基本呈线性变化,说明桥墩在 FRB 加固后始终处于弹性工作状态;布置金属阻尼器或布设拉索限位装置后,D4 号桥墩 IDA 曲线的线性分布程度增强,表明布置金属

阻尼器或布设拉索限位装置均会抑制桥墩的塑性发展。

3.1.2 支座 IDA 曲线

如图 8 所示,支座单条 IDA 曲线大致呈线性变化,曲线簇同样具有一定离散性,与原桥支座 IDA 曲线相比较,支座在阻尼减震后 IDA 曲线的离散性较小,且在相同地震动强度作用下,阻尼减震后的支座位移明显变小,说明金属阻尼器过滤地震能量,控制墩梁相对位移效果显著。

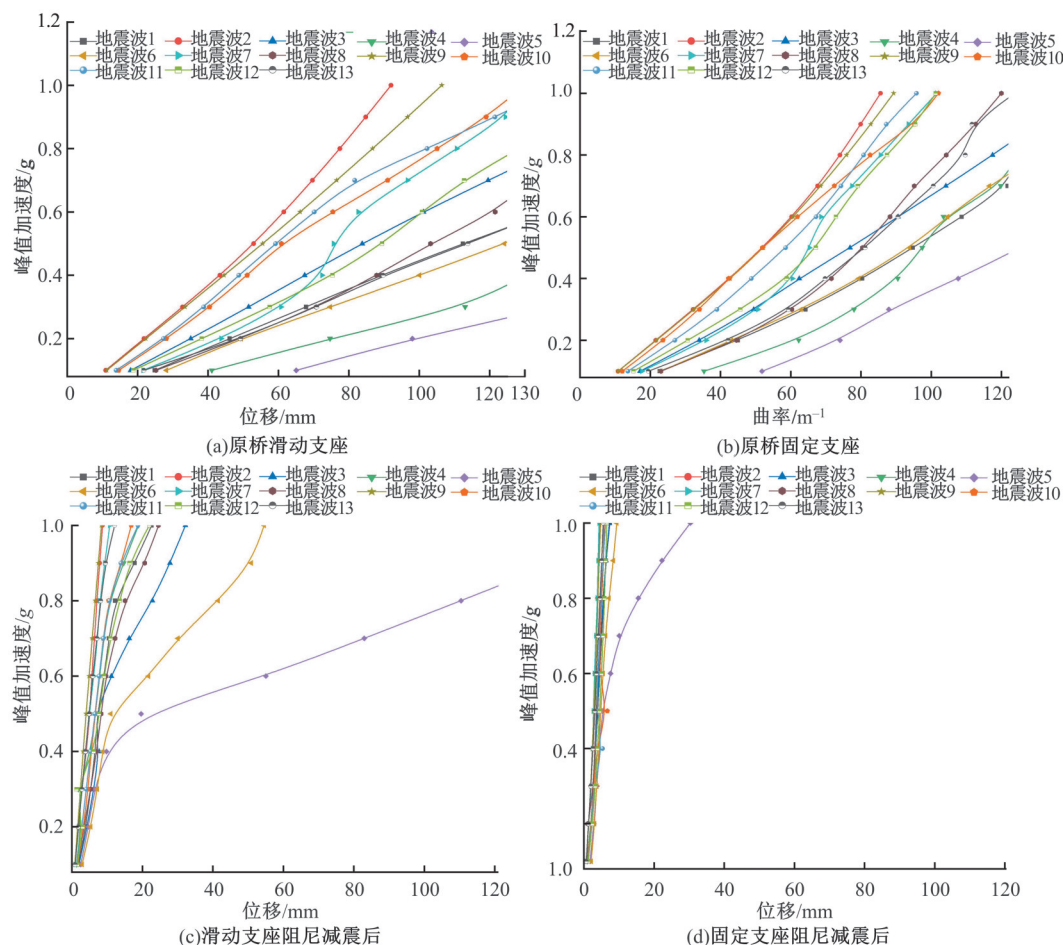


图 8 支座 IDA 曲线

Fig. 8 IDA curve of bearing

3.2 地震易损性分析结果

3.2.1 一致激励下桥梁抗震性能提升分析

基于大量非线性地震时程分析结果,运用最小二乘法对 $\ln(S_d/S_c)$ 与 $\ln(\text{PGA})$ 进行回归分析,得到均值 λ 和标准差 σ ,根据式(1)计算桥墩和支座在各损伤状态的超越概率并建立地震易损性曲线。

按照《中国地震动参数区划图》条文 6.2 规定,取多遇地震动、罕遇地震动和极罕遇地震动峰值加速度分别为 0.1、0.4 和 0.6 g,参考文献[23]提出“小震及中震不坏,大震可更换、可修复,巨震

不倒塌”的四水准抗震设防目标思想,本文近似取巨震峰值加速度为 1.0 g,并以多遇地震、基本地震、罕遇地震、极罕遇地震和巨震为基准,对不同加固方案下桥梁地震损伤状态进行评估。

大量非线性地震时程分析结果表明,各级地震动强度作用下,D2 号、D4 号和 D13 号桥墩的地震响应更为不利,故选取 D2 号、D4 号和 D13 号桥墩作为易损桥墩,用于揭示桥墩与支座损伤超越概率的变化规律,图 9 为 D2 号、D4 号和 D13 号桥墩的地震易损性曲线,图 10 为滑动支座和固定支

座的地震易损性曲线,桥墩与支座的损伤超越概 率分别汇总于表 3 和表 4。

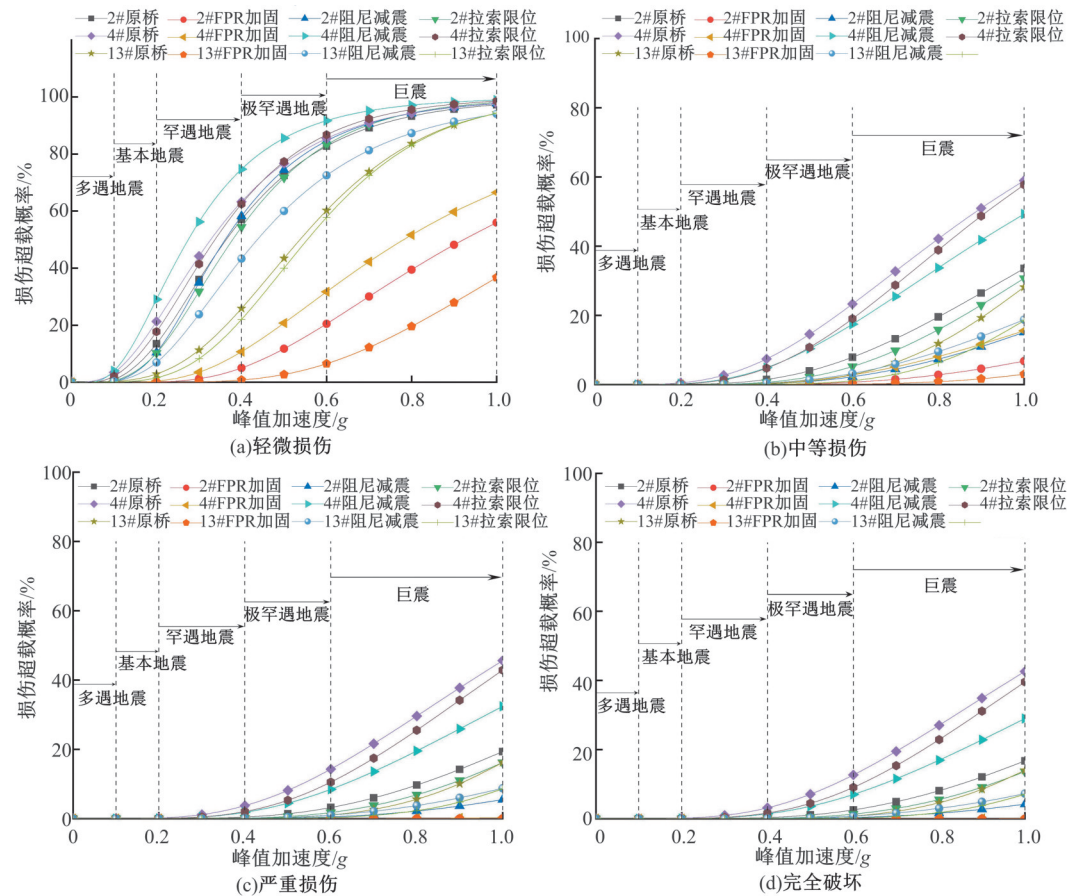


图 9 桥墩地震易损性曲线
Fig. 9 Seismic vulnerability curves of bridge piers

表 3 墩柱损伤超越概率

		D2号桥墩				D4号桥墩				D13桥墩				%
损伤状态	PGA/ g	原桥	FRP加固	阻尼减震	拉索限位	原桥	FRP加固	阻尼减震	拉索限位	原桥	FRP加固	阻尼减震	拉索限位	
轻微损伤	0.1	0.95	0	0.24	0.54	3.42	0	4.00	2.13	0.28	0	0.26	0.07	
	0.2	13.47	0.08	10.44	10.23	21.28	0.39	29.02	17.71	2.89	0	6.92	1.56	
	0.4	57.00	5.00	58.25	54.41	63.29	10.71	74.69	62.51	25.86	0.77	43.32	22.00	
	0.6	82.74	20.49	84.62	83.22	85.45	31.72	91.72	86.74	60.23	6.48	72.54	57.81	
	1.0	97.32	55.95	97.70	98.14	97.79	66.51	98.94	98.56	94.37	36.70	94.11	94.37	
中等损伤	0.1	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	
	0.2	0.03	0	0	0.01	0.49	0	0.20	0.18	0	0	0	0	
	0.4	1.47	0.05	0.24	0.66	7.40	0.37	4.86	4.72	0.25	0	0.44	0.06	
	0.6	7.90	0.68	2.23	5.20	23.25	2.77	17.44	19.02	2.84	0.11	3.19	1.11	
	1.0	33.53	6.75	15.07	30.71	58.95	15.54	49.28	57.72	28.16	2.96	18.73	18.48	
严重损伤	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0.2	0	0	0	0	0.17	0	0.05	0.05	0	0	0	0	
	0.4	0.44	0	0.04	0.15	3.72	0	1.80	2.03	0.06	0	0.10	0.01	
	0.6	3.20	0	0.50	1.74	14.29	0.01	8.46	10.51	1.03	0	1.01	0.29	
	1.0	19.33	0.02	5.48	16.15	45.59	0.26	32.41	42.83	16.18	0.01	8.75	8.58	
完全破坏	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0.2	0	0	0	0	0.14	0	0.03	0.04	0	0	0	0	
	0.4	0.33	0	0.02	0.11	3.15	0	1.41	1.65	0.05	0	0.07	0.01	
	0.6	2.55	0	0.34	1.32	12.64	0	7.03	9.05	0.80	0	0.77	0.21	
	1.0	16.71	0	4.20	13.62	42.60	0.07	28.94	39.53	14.01	0	7.23	7.03	

表 4 支座损伤超越概率
Table 4 Damage exceeding probability of bearing

%

极限 状态	PGA/ g	滑动支座				固定支座			
		原桥	FRP加固	阻尼减震	拉索限位	原桥	FRP加固	阻尼减震	拉索限位
轻微 损伤	0.1	6.16	5.98	0	3.72	0.12	0.14	0	0.05
	0.2	51.37	49.14	0	47.55	17.04	16.09	0	13.87
	0.4	94.24	93.44	0.04	94.43	81.37	80.11	0	80.42
	0.6	99.31	99.19	0.77	99.43	96.86	96.72	0	96.89
	1.0	99.98	99.98	13.57	99.99	99.85	99.87	0	99.86
中等 损伤	0.1	0.55	0.54	0	0.20	0	0	0	0
	0.2	16.65	15.55	0	12.53	1.14	1.08	0	0.56
	0.4	71.67	69.78	0	69.31	33.23	32.19	0	27.72
	0.6	92.76	92.10	0.1	92.51	70.40	70.31	0	66.16
	1.0	99.47	99.44	3.74	99.51	94.98	95.59	0	93.96
严重 损伤	0.1	0.06	0.06	0	0.01	0	0	0	0
	0.2	4.66	4.30	0	2.74	0.06	0.06	0	0.02
	0.4	44.50	42.65	0	39.47	8.48	8.22	0	5.28
	0.6	77.24	76.07	0.02	74.81	34.30	34.66	0	27.07
	1.0	96.75	96.66	1.18	96.51	75.88	78.16	0	70.00
完全 破坏	0.1	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.29	1.19	0	0.59	0	0	0	0
	0.4	24.52	23.24	0	19.34	1.77	1.74	0	0.79
	0.6	57.74	56.47	0	52.78	12.85	13.26	0	7.96
	1.0	90.20	90.10	0.42	88.77	48.93	52.30	0	39.26

(1) 桥墩

如图 9 所示,相比较未采取任何抗震加固措施的原桥易损性曲线,采取 FRP 加固后,桥墩易损性曲线明显远离原桥易损性曲线,各损伤状态下的超越概率降低显著,而布置金属阻尼器和布设拉索限位装置后,桥墩易损性曲线与原桥易损性曲线基本重合,各损伤状态下的超越概率相差不大。

以典型 D4 号桥墩为例,结合表 3 可知,在罕遇地震 PGA 为 0.4 g 、极罕遇地震 PGA 为 0.6 g 和巨震 PGA 为 1.0 g 作用下,D4 号原桥墩柱超越轻微损伤状态的概率分别为 63.29%、85.45% 和 97.79%,采取 FRP 加固方案后,D4 号桥墩超越轻微损伤状态的概率分别为 10.71%、31.72% 和 66.51%,超越轻微损伤概率降低幅值最大为 53.73%,D4 号原桥仅在巨震下处于中等损伤状态的概率较大,其他地震强度下大概率处于轻微损伤状态,说明 FRP 加固方案提升桥墩抗震性能显著。布置金属阻尼器和布设拉索限位装置后,D4 号桥墩超越各损伤状态概率存在上下略微波动的情况,波动幅值最大分别为 11.40% 和

—4.23%,桥墩抗震性能提升不明显。D2 号桥墩和 D13 号桥墩结果相似,故不做赘述。

(2) 支座

为研究滑动支座和固定支座两种不同支座类型在抗震加固改造前后的地震易损性,分别建立了桥梁在经过 FRP 加固、阻尼减震和拉索限位后支座的地震易损性曲线,其中滑动支座与固定支座分别采用 HD 和 GD 表示,下文类同,再不做赘述。如图 10 所示,滑动支座超越各损伤状态的概率明显大于固定支座。采取 FRP 加固后,滑动支座和固定支座的易损性曲线和原桥易损性曲线基本重合,损伤超越概率相差不大;布置金属阻尼器后,滑动支座和固定支座在各损伤状态的易损性曲线明显远离其他易损性曲线,损伤超越概率下降显著;相比较原桥易损性曲线,布设拉索限位装置对滑动支座的易损性曲线影响不大,但固定支座在严重损伤和完全破坏状态下易损性曲线的斜率会变小。

由表 4 可知,在多遇地震 PGA 为 0.1 g 、基本地震 PGA 为 0.2 g 、罕遇地震 PGA 为 0.4 g 、极罕

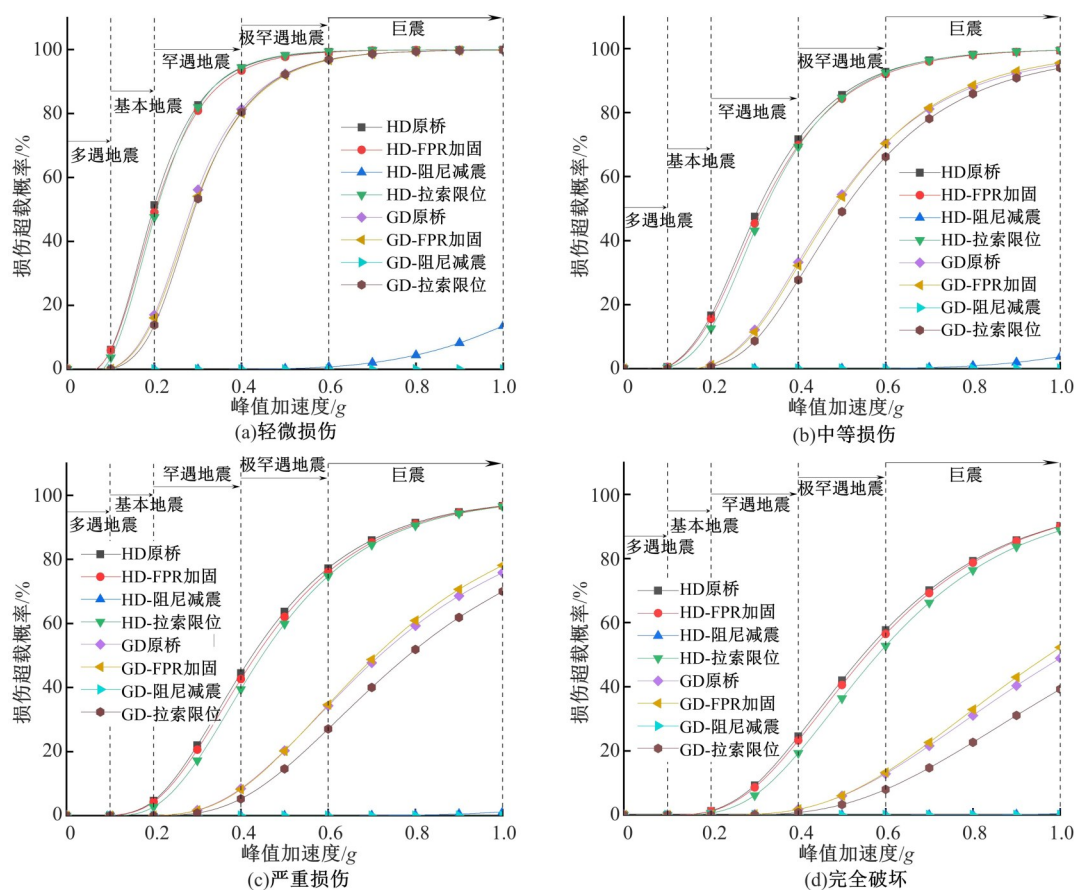


图10 支座地震易损性曲线

Fig. 10 Seismic vulnerability curve of bearing

遇地震PGA为0.6g和巨震PGA为1.0g分别作用下,原桥滑动支座超越轻微损伤状态的概率分别为6.16%、51.37%、94.24%、99.31%和99.98%,布置金属阻尼器后,滑动支座在巨震作用下超越轻微损伤状态的概率仅为13.57%,固定支座在各损伤状态的超越概率则均为0,说明布置金属阻尼器对支座抗震性能提升效果显著;而采取FRP加固方法或布设拉索限位装置,滑动支座和固定支座在各损伤状态的超越概率降低幅值均在10%以内,抗震提升效果不明显。

综上,FRP加固方案对墩柱抗震性能提升效果显著,对支座损伤变形则影响较小;布置金属阻尼器可以有效控制支座损伤程度,而对墩柱抗震性能影响较小;布设拉索限位装置对墩柱和支座的震后响应有略微波动,震后损伤控制收益不高。

3.2.2 行波激励下桥梁抗震性能提升分析

因FRP加固方案对墩柱抗震性能提升显著,并考虑到FRP桥墩套箍法在工程实践中应用广泛,且限于篇幅,本节以FRP加固方案为例,探讨行波效应对桥梁抗震性能提升效果的影响。

图11为考虑行波效应后桥墩与支座的抗震易损性曲线,FRP加固方案对墩柱抗震性能提升依旧显著,对滑动支座抗震性能影响不大,但考虑行波效应后,FRP加固方案使固定支座超越各损伤状态的概率变大,抗震性能降低。

结合表5可知,考虑行波效应后桥墩的损伤超越概率会有一定程度的降低,以典型D4号桥墩为例,巨震PGA为1.0g时,原桥在地震一致激励和多点激励下超越中等损伤状态的概率分别为30.69%和10.81%,降低幅值为19.88%;考虑行波效应后支座的损伤超越概率则存在一定的波动,波动幅值在-10%~2%之间。

采取FRP加固方案,巨震PGA为1.0g时,D4号墩柱在地震一致激励和多点激励下超越轻微损伤状态的概率分别为44.81%和22.74%,降低幅值为22.07%,说明未考虑行波效应会高估墩柱评估损伤状态。采取FRP加固方案,支座在考虑行波效应的损伤超越概率同样存在一定波动,波动幅值在-10%~3%之间。

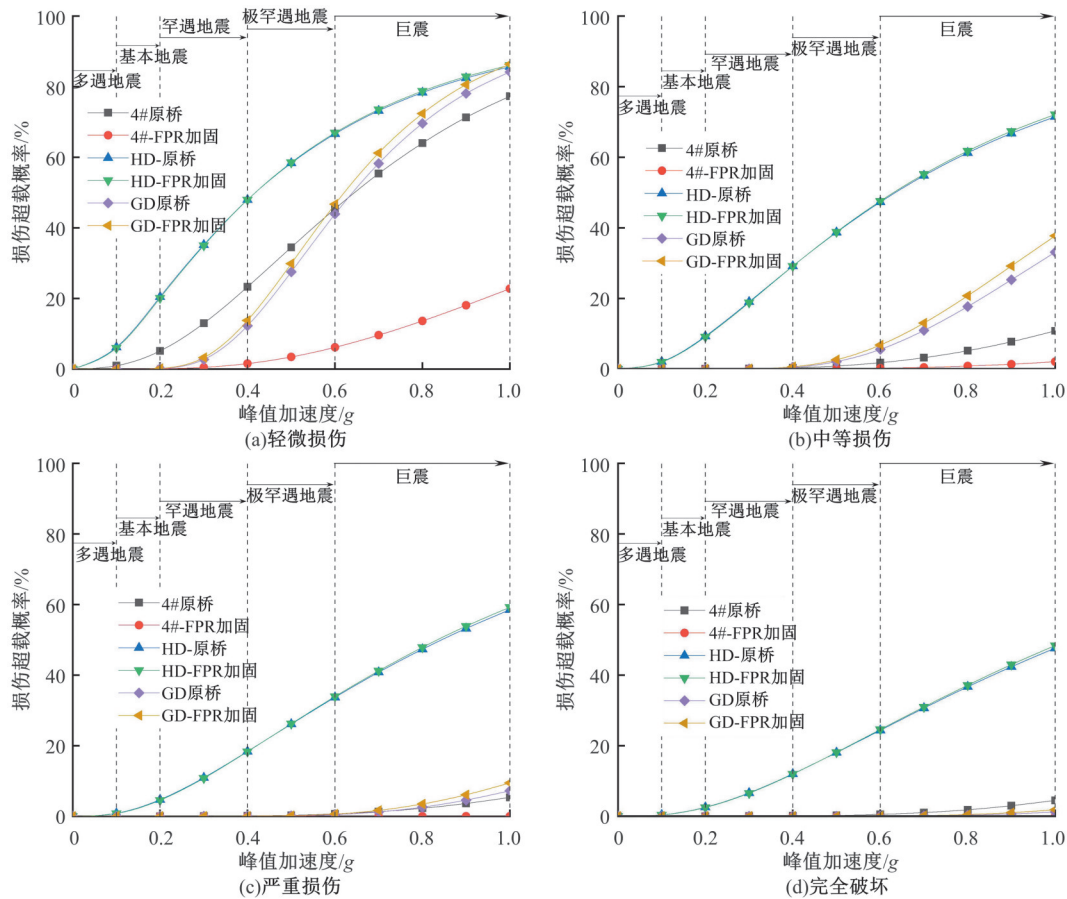


图11 行波激励易损构件地震易损性曲线

Fig. 11 Seismic vulnerability curve of vulnerable components considering traveling wave effect

表5 易损构件损伤超越概率

Table 5 Damage exceeding probability of vulnerable components

损伤状态	PGA/g 激励方式	D4号桥墩				滑动支座				固定支座			
		原桥		FRP加固		原桥		FRP加固		原桥		FRP加固	
		一致	多点	一致	多点	一致	多点	一致	多点	一致	多点	一致	多点
轻微损伤	0.1	3.72	0.93	0.03	0	5.05	6.16	4.59	5.94	0	0	0	0
	0.2	13.80	5.11	0.65	0.07	20.95	20.43	20.50	20.10	0.10	0.11	0.08	0.15
	0.4	41.38	23.26	6.66	1.54	54.86	47.94	54.68	47.92	14.57	12.26	13.81	13.74
	0.6	64.57	45.39	18.28	6.13	76.17	66.61	75.95	66.89	50.24	43.88	50.61	46.69
	1.0	88.59	77.28	44.81	22.74	93.35	85.63	93.09	86.08	88.74	84.16	90.43	86.35
中等损伤	0.1	0.02	0	0	0	1.24	2.08	1.09	1.98	0	0	0	0
	0.2	0.26	0.01	0.01	0	7.88	9.28	7.64	9.08	0	0	0	0
	0.4	2.70	0.33	0.39	0.03	31.46	29.16	31.25	29.11	0.37	0.46	0.31	0.62
	0.6	9.08	1.78	1.93	0.23	54.25	47.29	53.92	47.56	5.30	5.56	5.11	6.78
	1.0	30.69	10.81	9.79	2.06	81.53	71.46	80.97	72.11	34.11	33.07	36.57	37.71
严重损伤	0.1	0.01	0	0	0	0.37	0.84	0.32	0.79	0	0	0	0
	0.2	0.09	0	0	0	3.27	4.68	3.14	4.56	0	0	0	0
	0.4	1.22	0.1	0	0	18.08	18.36	17.91	18.31	0.01	0.01	0	0.02
	0.6	4.86	0.67	0.02	0	37.35	33.70	37.01	33.92	0.28	0.45	0.25	0.63
	1.0	20.40	5.36	0.32	0.01	68.02	58.48	67.24	59.20	5.93	7.23	6.50	9.46
完全破坏	0.1	0.01	0	0	0	0.13	0.39	0.11	0.36	0	0	0	0
	0.2	0.07	0	0	0	1.48	2.56	1.41	2.48	0	0	0	0
	0.4	1.01	0.08	0	0	10.65	12.00	10.52	11.94	0	0	0	0
	0.6	4.17	0.52	0.01	0	25.61	24.37	25.29	24.55	0.01	0.03	0.01	0.05
	1.0	18.41	4.50	0.12	0	55.38	47.63	54.49	48.35	0.71	1.22	0.77	1.84

4 结 论

(1)未采取任何抗震加固措施时,墩柱在罕遇地震、极罕遇地震和巨震一致激励下超越轻微损伤状态的概率分别为63.29%、85.45%和97.79%,墩柱大概率处于中等损伤状态;采取FRP加固方案后,墩柱超越轻微损伤概率降低幅值最大为53.73%,墩柱处于轻微损伤状态的概率较大,FRP加固方式对墩柱抗震性能提升效果显著,布置金属阻尼器和布设拉索限位装置对墩柱抗震性能提升不明显。

(2)未采取任何抗震加固措施时,支座在极罕遇地震和巨震一致激励下超越中等损伤状态的概率均在70%以上,支座处于严重损伤状态的概率极大;布置金属阻尼器后,支座超越中等损伤状态的概率趋于0,金属阻尼器对支座保护起到关键性作用,而FRP加固和拉索限位装置对支座保护则收益不大。

(3)行波效应对连续梁桥的抗震性能评估影响显著,考虑行波效应后,墩柱的损伤超越概率降低幅值最大可达19.88%,支座的损伤超越概率则呈现出较大的波动性变化;采取FRP加固方案后,墩柱的损伤超越概率降低幅值最大可达22.07%。未考虑行波效应会高估墩柱的损伤状态,影响支座抗震性能评估的准确性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2025-01-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html.
- [2] Kunnath S K, Gross J L. Inelastic response of the cy-press viaduct to the loma prieta earthquake[J]. Engineering Structures, 1995, 17(7): 485-493.
- [3] Marini A, Spacone E. Analysis of reinforced concrete elements including shear effects[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103: 645-655.
- [4] 陈乐生, 庄卫林, 赵河清. 汶川大地震公路震害调查:桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] 苏伟, 李晓波, 王雨权, 等. 铁路桥梁典型减隔震设计显式计算方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(2): 712-722.
Su Wei, Li Xiao-bo, Wang Yu-quan, et al. Explicit analytical method for typical isolated system of railway bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(2): 712-722.
- [6] 李立峰, 唐嘉豪, 胡睿, 等. 基于易损性的中等跨径连续梁桥合理抗震体系评估方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3665-3677.
Li Li-feng, Tang Jia-hao, Hu Rui, et al. Evaluation method of reasonable aseismic system for medium-span continuous girder bridges based on fragility[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3665-3677.
- [7] Li Jian-ning, Yu Lu-song, Li Zi-qi, et al. Study on seismic performance of long-span railway continuous girder bridges in high seismic intensity region[J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2020, 16(4): 310-327.
- [8] Xia Xiu-shen, Wu Sui-wen, Wei Xing-han, et al. Experimental and numerical study on seismic behavior of a self-centering railway bridge pier[J]. Earthquakes and Structures, 2021, 21: 173-183.
- [9] 户东阳, 李聪林, 陈克坚, 等. 减震榫在高烈度地震区高速铁路连续梁桥中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2255-2263.
Hu Dong-yang, Li Cong-lin, Chen Ke-jian, et al. Research on application of damping tenon in high-speed railway continuous beam bridges in high-intensity seismic area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2255-2263.
- [10] 林元铮, 田石柱. FRP加固RC连续梁桥抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 21-26, 38.
Lin Yuan-zheng, Tian Shi-zhu. Tests for aseismic performances of a RC continuous girder bridge retrofitted by FRP jacket[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 21-26, 38.
- [11] 田石柱, 贾红星, 林元铮. FRP加固混凝土连续梁桥抗震混合试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(5): 92-98.
Tian Shi-zhu, Jia Hong-xing, Lin Yuan-zheng. Hybrid simulation of a continuous RC girder bridge retrofitted by FRP[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(5): 92-98.
- [12] 韩强, 温佳年, 杜修力, 等. CFRP布加固RC空心桥墩的抗震性能[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 90-100.
Han Qiang, Wen Jia-nian, Du Xiu-li, et al. Seismic performance of hollow bridge columns retrofitted with carbon FRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 90-100.
- [13] 朱立华, 李钢, 董志骞, 等. 格栅式摩擦阻尼器的试验研究与数值模拟[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4):

- 96-105.
- Zhu Li-hua, Li Gang, Dong Zhi-qian, et al. An experimental study and numerical simulation of lattice-shaped friction devices[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(4): 96-105.
- [14] Zhou L X, Wang X W, Ye A J. Low cycle fatigue performance investigation on transverse steel dampers for bridges under ground motion sequences using shake-table tests[J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: No. 109328.
- [15] 李建中, 汤虎. 中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震设计研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(11): 69-78.
- Li Jian-zhong, Tang Hu. Study on transverse seismic design of small and medium span bridges with elastomeric bearing pads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(11): 69-78.
- [16] 李悦, 李治, 李冲. 支座摩擦滑移和挡块力学性能退化影响下桥梁易损性研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(增刊2): 280-287.
- Li Yue, Li Zhi, Li Chong. Bridge vulnerability under the influence of bearing friction-slip and performance degradation of stoppers[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(Sup. 2): 280-287.
- [17] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31: 491-515.
- [18] 韩璐璐. 基于地震易损性的既有简支梁桥抗震加固研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2020.
- Han Lu-lu. Research of reinforcement of existing simply supported girder bridge based on seismic vulnerability[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2020.
- [19] 项长生, 赵竞. 不同阻尼器对连续梁桥横向抗震性能的影响[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2022, 38(1): 102-110.
- Xiang Chang-sheng, Zhao Jing. Influence of different dampers on transverse seismic performance of continuous beam bridges[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2022, 38(1): 102-110.
- [20] 谷屹童, 袁万城, 党新志. 拉索限位装置对跨断层桥梁地震响应的影响[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2020, 48(9): 1256-1263.
- Gu Yi-tong, Yuan Wan-cheng, Dang Xin-zhi. Effect of cable restrainers on seismic response of cross-fault bridges[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2020, 48(9): 1256-1263.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [22] Lam L, Teng J G. Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(5): 612-623.
- [23] 周颖, 顾安琪. 自复位剪力墙结构四水准抗震设防下基于位移抗震设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(3): 118-126.
- Zhou Ying, Gu An-qi. Displacement-based seismic design of self-centering shear walls under four-level seismic fortifications[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(3): 118-126.