

石岩, 赵昊森, 初存杰, 等. 跨走滑断层多跨简支梁桥的限位加固与性能提升[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(6): 154-168.  
SHI Yan, ZHAO Hao-miao, CHU Cun-jie, et al. Displacement-restrained reinforcement and performance improvement of multi-span simply-supported beam bridge across strike-slip fault[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(6): 154-168.  
DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.06.013

## 跨走滑断层多跨简支梁桥的限位加固与性能提升

石岩<sup>1</sup>, 赵昊森<sup>1</sup>, 初存杰<sup>2</sup>, 韩建平<sup>1</sup>, 刘云帅<sup>1</sup>, 杨雄<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学土木与水利工程学院, 甘肃兰州 730050;

2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东济南 250101)

**摘要:**为降低简支梁桥在强震作用下的落梁风险并控制支座滑动位移, 提出一种具有多级滑移与限位功能的支座, 通过薄聚酯板调控滑移面的启动顺序, 以环形限位钢套箍约束最大滑动位移, 从而协调控制支座的滑动与限位; 基于理论分析建立了该支座的简化力学模型及力-位移关系, 进一步发展了采用限位加固支座+粘滞阻尼器+防屈曲支撑(BRB)的组合加固体系, 以弥补单一限位加固支座的不足; 基于 OpenSees 建立了 4 跨简支梁桥动力分析模型, 以 40 组基于速度脉冲特性合成的跨断层地震动作为输入, 系统研究了支座和桥墩等主要构件的位移响应及损伤状态, 分析了限位加固支座和组合加固体系对简支梁桥抗震性能的提升效果。研究结果表明: 采用限位加固支座的简支梁桥的支座峰值位移降低近 30%, 其限位效果与铅芯橡胶支座(LRB)相当; 限位加固支座对主梁纵向峰值位移的放大程度普遍优于 LRB, 且具有与 LRB 相当的减缓主梁旋转的性能; 与仅设置限位加固支座相比, 采用组合加固体系可使主梁纵向峰值位移减小约 50%, 在降低桥墩横向位移的同时减轻了桥墩的损伤, 增强了桥梁的整体性能。综上, 提出的限位加固支座和组合加固体系可为高烈度区多跨简支梁桥在跨断层地震动作用下的防落梁能力提升和抗震设计提供参考。

**关键词:**桥梁工程; 防落梁; 有限元; 限位加固支座; 组合加固体系; 地震动合成; 走滑断层

**中图分类号:**U448.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2025)06-0154-15

### Displacement-restrained reinforcement and performance improvement of multi-span simply-supported beam bridge across strike-slip fault

SHI Yan<sup>1</sup>, ZHAO Hao-miao<sup>1</sup>, CHU Cun-jie<sup>2</sup>, HAN Jian-ping<sup>1</sup>,  
LIU Yun-shuai<sup>1</sup>, YANG Xiong<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** To reduce the unseating risk of simply-supported beam bridges under strong earthquakes and to control the sliding displacement of bearings, a bearing with multi-stage sliding and displacement-restrained functions was proposed. The bearing employed a thin polyester plate

收稿日期: 2025-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52268075); 甘肃省重点研发计划项目(22YF7GA161)

作者简介: 石岩(1985-), 男, 甘肃通渭人, 教授, 工学博士, E-mail: shiyan@lut.edu.cn.

通信作者: 韩建平(1970-), 男, 甘肃宕昌人, 教授, 工学博士, E-mail: jphan@lut.edu.cn.

to regulate the activation sequence of the sliding surface and utilized a circular limiting steel hoop to restrain the maximum sliding displacement, thus coordinately controlling the sliding and limiting of the bearing. Based on theoretical analysis, a simplified mechanical model and corresponding force-displacement relationship of the bearing were established. Furthermore, a combined reinforcement system, consisting of displacement-restrained reinforced bearing, viscous dampers, and buckling-restrained braces (BRBs), was developed to overcome the limitations of a single displacement-restrained reinforced bearing. A dynamic analysis model of a four-span simply-supported beam bridge was established using OpenSees. Forty sets of synthesized cross-fault ground motions based on velocity pulse-like characteristics were used as input. The displacement responses and damage states of critical components, such as bearings and piers, were systematically investigated. The effects of displacement-restrained reinforced bearing and combined reinforcement system on seismic performance of simply-supported beam bridges were analyzed. The research results indicate that the peak bearing displacement of simply-supported beam bridges equipped with displacement-restrained reinforced bearings reduces by nearly 30%. The limiting effect is comparable to that of lead rubber bearing (LRB). The displacement-restrained reinforced bearing generally outperforms LRB in amplifying the longitudinal peak displacement of the main girder, while exhibiting comparable performance in reducing the girder rotation. Compared with the bridge equipped only with displacement-restrained reinforced bearings, the combined reinforcement system reduces the longitudinal peak displacement of the main girder by approximately 50%. It decreases the lateral displacement of piers and mitigates pier damage, thereby enhancing the overall performance of the bridge. In conclusion, the proposed displacement-restrained reinforced bearing and combined reinforcement system can provide references for enhancing the unseating prevention capability and seismic design of simply-supported beam bridges in high-intensity seismic zones under cross-fault ground motions. 4 tabs, 17 figs, 35 refs.

**Key words:** bridge engineering; unseating prevention; finite element; displacement-restrained reinforced bearing; combined reinforcement system; ground motion synthesis; strike-slip fault

## 0 引言

桥梁工程是交通运输系统的重要组成部分,其中简支梁桥分布广泛且数量众多,公路桥中通常采用浮放于墩梁之间的板式橡胶支座<sup>[1]</sup>。由于支座与墩台和梁体间无连接措施,在地震作用下易发生滑动,对于桥墩和基础实际上起到隔震效果,而若支座滑动位移过大,过早屈服失效,将导致较大的墩梁相对位移,落梁震害严重,如汶川地震中百花大桥引桥、庙子坪岷江大桥引桥、南坝涪江桥及映秀顺河桥均发生落梁震害<sup>[2]</sup>。随着中国基础设施建设重心逐渐从东部沿海转向西部山区,越来越多的桥梁面临跨越断层的潜在威胁<sup>[3-4]</sup>。桥梁结构遭遇走滑断层时,由于受到平行断层(Fault-Parallel, FP)方向的滑冲效应(永久位移)和垂直断层(Fault-Normal, FN)方向的向前方向性效应的影响<sup>[5]</sup>,跨断层地震

动产生的地面振动和地表位移会加剧简支梁桥板式橡胶支座的破坏,引起更大的墩梁相对位移,造成落梁甚至全桥倒塌,从而造成巨大损失<sup>[6-7]</sup>。因此,聚焦多跨简支梁桥抗震性能的薄弱部位,研究桥梁结构的限位加固和优化设计对避免或减轻结构损毁,提升桥梁的抗震性能具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。

目前,国内外学者关于跨断层桥梁结构的抗震性能提升和优化设计主要是隔震理念和限位措施的合理使用。诸多学者针对板式橡胶支座做了相关研究。Pang等<sup>[8]</sup>基于抗震韧性的设计方法提出了一个新的抗震韧性评价指标,采用高斯过程回归模型和均匀设计法对形状记忆合金(Shape Memory Alloys, SMA)约束限位滑动支座进行了参数化研究,探讨了不同类型滑动支座的抗震性能;Zhou等<sup>[9]</sup>提出了一种基于概率的方法来评估无黏结板式橡胶支座公路桥梁在附加横向钢阻尼器后的残余位

移;Fang等<sup>[10]</sup>采用拟静力试验和振动台试验着重讨论了新型 SMA 拉索约束板式橡胶支座的性能,为灾后隔震桥梁的快速恢复提供了参考;Liu等<sup>[11]</sup>开发了一种 SMA 约束橡胶支座,通过试验和数值模拟揭示了其力学性能,将其应用于整体桥梁当中,采用易损性分析评价其整体隔震性能,并进行了参数化研究,以实现各构件能力与需求的平衡。就既有研究和震害来看,仅采用隔震支座明显不足以防止强震作用下简支梁桥发生落梁震害,汶川地震中高原大桥和玛多地震中野马滩 2 号桥的落梁震害更加暴露了该问题,研究桥梁支座采用限位措施后的防落梁效果也尤其重要<sup>[2,12]</sup>。Shrestha等<sup>[13]</sup>通过 SMA 或钢索对橡胶支座进行位移限制,有效降低了桥梁因地震而引起的碰撞和落梁损伤;Xiang等<sup>[14]</sup>将支座滑动作为一种保险丝机制来减轻桥墩的抗震需求,并采用钢阻尼器控制支座位移以防止落梁;Li等<sup>[15]</sup>研究了基于 SMA 的钢筋混凝土桥墩和约束装置在防落梁方面的有效性,并进行了优化设计;Zhong等<sup>[16]</sup>提出了一种由拉索约束复合橡胶支座和耗能摇摆墩组合而成的多阶段桥梁抗震体系,对比分析了该体系的抗震性能,并进行了参数化讨论,结果表明,新型体系具有较好的抗震能力和较低的系统易损性。以上研究采用不同的限位装置来约束支座位移以防落梁,然而受限于材料的发展,SMA 等耗材较为昂贵,实际桥梁设计过程中往往不予采用。因此,本文通过薄聚酯板来控制板式橡胶支座的滑动面先后顺序,以环型限位钢套箍实现约束支座滑动,采用功能分离理念提出了成本低廉、便于安装更换的限位加固支座,以实现工程安全和经济效益的最大化利用,力求为简支梁桥的限位加固和性能提升提供参考。考虑到桥梁跨越断层时落梁风险加剧,为增强结构整体性和弥补单独使用限位加固支座的不足,提出了组合加固体系,以应对跨断层区域简支梁桥落梁等震害。

当桥梁邻近走滑断层甚至跨越断层时,断层错动引起的地表永久位移将加剧简支梁桥落梁风险,如映秀顺河桥<sup>[7]</sup>。因地表断层破裂带两侧和附近的地震动记录极其有限,相关学者针对断层地震动模拟进行了研究:Mavroeidis等<sup>[17]</sup>提出了一种可以从定性和定量两方面来描述近断层地震动脉冲特征的分析模型;Ghahari等<sup>[18]</sup>基于移动平均滤波法将近断层地震动分解为高频和低频两部分脉冲记录,通过与普通地震动对比,指出近断层地震动的特殊性由高频和低频成分造成;Li等<sup>[19]</sup>基于分解-叠加的

思路提出了一种将地震动高频成分与简单等效脉冲结合来人工合成近断层地震动的方法;Yang等<sup>[20]</sup>提出了一种简单有效的方法来模拟跨走滑断层地震动,通过比较实测地震动记录和利用加载函数生成的地震动下非隔震桥梁和隔震桥梁的地震响应和地震需求,验证了该方法的有效性,同时介绍了一种基于经验和实用准则来选择加载函数参数的方法。可见,速度脉冲效应和地震动高频分量已成为断层地震动模拟不可缺少的部分。不同于 Li等<sup>[19]</sup>通过实测地震动记录分离出的地震动低频分量来初步确定速度脉冲模型参数,本文采用半经验半理论公式<sup>[20]</sup>简洁明了地确定跨走滑断层低频分量中向前方向性效应和滑冲效应的相关参数,便于设计人员将其应用在结构分析上。

考虑到目前针对跨走滑断层地震动下简支梁桥在防落梁方面的限位加固和性能提升研究较少,本文基于速度脉冲人工合成地震动的方法,选用 7 组人工合成跨断层地震动,以一座 4 跨简支梁桥为研究对象,通过对板式橡胶支座进行限位加固,防止其过早失效,同时在桥台与主梁、主梁与主梁间安装粘滞阻尼器,在排架墩之间横向布置防屈曲支撑(Buckling Restrained Brace, BRB),以此组合加固体系来提升桥梁在跨断层地震动下的抗震性能。通过分析桥墩、支座等关键构件的非线性反应,并与使用铅芯橡胶支座(Lead Rubber Bearing, LRB)的工况进行对比,研究了组合加固体系提高跨断层多跨简支梁桥抗震性能的可行性。

## 1 走滑断层地震动合成方法

跨断层地震动的模拟采用基于速度脉冲的人工合成方法,首先通过 4 阶 Butterworth 滤波方法从实测地震动中分解出地震动高频成分,然后根据 Mavroeidis 模型<sup>[17]</sup>生成低频速度脉冲,进而叠加合成可体现跨断层特点的宽频带脉冲型地震动。

### 1.1 地震动高频成分分解

本文选取 Baker等<sup>[21]</sup>推荐的 40 组脉冲型近断层地震动作为基础地震动,依次编号为 PL-1~PL-40,采用 4 阶 Butterworth 滤波方法从原始地震动中分解出高频成分。4 阶 Butterworth 滤波方法的频响函数  $H(f)$  为

$$H(f) = \frac{1}{1 + (f/f_c)^{2n}} \quad (1)$$

式中: $f$ 为频率; $f_c$ 为截止频率; $n$ 为滤波阶数。

截止频率  $f_c$  会影响地震动频谱特性,若  $f_c$  较

高,则可能会直接滤掉原始地震动中一部分重要的高频成分。截止频率  $f_c$  的计算公式(2)为<sup>[19]</sup>

$$f_c = \frac{1}{\alpha T_p - \Delta t} \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间; $\Delta t$ 为地震动步长; $T_p$ 为脉冲周期; $\alpha$ 为经验系数,滑冲效应地震动取 $\alpha=0.25$ <sup>[18]</sup>,向前方向性效应地震动取 $\alpha=0.8$ <sup>[19]</sup>。

## 1.2 低频速度脉冲生成方法

垂直和平行断层方向的低频速度脉冲成分均采用 Mavroidis 速度脉冲模型<sup>[17]</sup>模拟,相应的速度时程  $v(t)$  表达式为

$$v(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi f_p}{2} (t - t_0) \right] \right\} \cdot \\ \quad \cos [2\pi f_p (t - t_0) + \varphi] \\ \quad t_0 - \gamma / (2f_p) \leq t \leq t_0 + \gamma / (2f_p), \gamma > 1 \\ 0 \quad \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A$ 为低频速度脉冲峰值; $f_p$ 为低频速度脉冲频率; $\varphi$ 为低频速度脉冲相位; $\gamma$ 为低频速度脉冲形状参数; $t_0$ 为低频速度脉冲峰值出现的时刻。

如式(3)所示,对  $v(t)$  求导,可得加速度时程  $a(t)$ ,对  $v(t)$  积分,可得到位移时程。

### 1.2.1 垂直断层方向脉冲参数选取

垂直断层方向的低频速度脉冲峰值  $A$  和低频速度脉冲频率  $f_p$  分别为<sup>[17,20,22-23]</sup>

$$A \approx (0.85 - 1.00) V_p \quad (4)$$

$$V_p = 626 \sqrt{D_f^2 + 6.8^2} \quad D_f = 0 \quad (5)$$

$$\lg(T_p) = -2.36 + 0.42M \quad (6)$$

$$f_p = 1/T_p \quad (7)$$

式中: $D_f$ 为断层距; $M$ 为震级; $V_p$ 为峰值地面速度。

$\gamma$  和  $\varphi$  可由走滑断层地面运动中垂直断层方向的波形特征来确定。当初始位移和残余位移均为 0 时可得

$$\frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{1 - \gamma^2} \sin(\varphi - \pi\gamma) + K = 0 \quad (8)$$

$$\frac{A}{4\pi f_p} \frac{1}{1 - \gamma^2} \sin(\varphi + \pi\gamma) + K = 0 \quad (9)$$

式中: $K$ 为积分常数。

联立式(8)和(9)可得

$$\cos(\varphi) \sin(\pi\gamma) = 0 \quad (10)$$

$$\varphi = (n_1 + 1/2)\pi \quad \text{或} \quad \gamma = n_2 \quad (11)$$

式中: $n_1$  和  $n_2$  分别为 2 个不同的整数。

已有研究表明<sup>[17,23]</sup>,  $\gamma$  的取值范围为  $(1, 4]$ ,

$\varphi$  的取值范围为  $[0, 2\pi]$ , 可得

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \quad \text{或} \quad \gamma = 2, 3, 4 \quad (12)$$

为满足垂直断层方向的初始位移和残余位移为 0, 当低频速度脉冲形状参数  $\gamma=2$  (或  $\gamma=3$  或  $\gamma=4$ ) 时, 低频速度脉冲相位  $\varphi \in [0, 2\pi]$ ; 当  $\gamma \in (1, 2)$  [或  $\gamma \in (2, 3)$  或  $\gamma \in (3, 4)$ ] 时,  $\varphi = \pi/2$  (或  $\varphi = 3\pi/2$ )。

为了确保  $t_0$  表示的低频速度脉冲峰值开始时刻大于或等于 0, 使得<sup>[17,20]</sup>

$$t_0 \geq \gamma T_p / 2 \quad (13)$$

故取  $t_0$  为 5 或 8 s。

### 1.2.2 平行断层方向脉冲参数选取

由于平行断层方向的速度脉冲仍采用 Mavroidis 速度脉冲模型模拟, 需要确定的脉冲参数与垂直断层方向一致。平行断层方向由于滑冲效应, 地震动位移时程存在永久位移, 此时  $\gamma$  为一个统一值,  $\varphi$  的取值接近 0 或  $\pi$ <sup>[24]</sup>。可取  $\gamma = 1 + \epsilon$ ,  $\varphi = 0$ , 其中  $\epsilon$  为一个任意小正数, 取  $\epsilon = 0.05$ <sup>[25]</sup>。同样地取  $t_0$  为 5 或 8 s。低频速度脉冲周期  $T_p$  和脉冲峰值  $A$  分别为<sup>[17,20,26]</sup>

$$\lg(T_p) = \lg(2 + \epsilon) - 3 + 0.5M \quad (14)$$

$$\lg(D_{ave}) = -1.7 + 0.5M \quad (15)$$

$$A = \frac{2D_{ave}}{T_p / (2 + \epsilon)} \quad (16)$$

式中: $D_{ave}$ 为平均永久地面位移。

垂直断层方向和平行断层方向的低频速度脉冲如图 1 所示。

## 1.3 断层地震动合成及输入

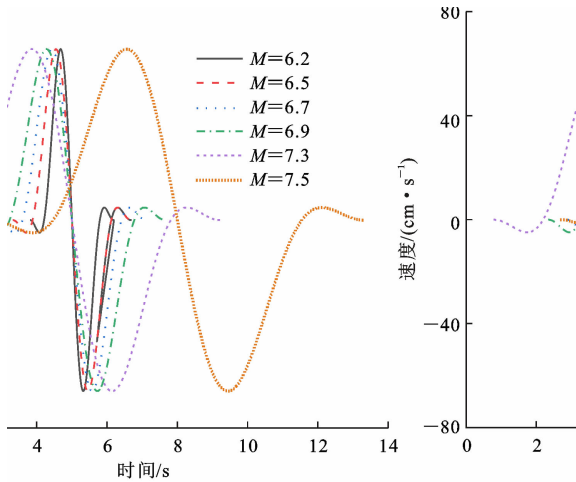
根据田玉基等<sup>[27]</sup>的研究, 近似认为低频脉冲加速度峰值的到达时刻与高频脉冲加速度峰值的到达时刻相同, 以此将高频加速度时程与低频加速度时程叠加在一起, 得到 40 组跨断层脉冲型地震动加速度时程, 再通过积分分别得到跨断层脉冲型地震动的速度和位移时程, 不同震级下跨断层脉冲型地震动的位移时程如图 2 所示。

为考虑平行断层方向的非一致地面运动及永久位移, 地震动输入采用多点激励位移输入模型<sup>[28]</sup>, 并将模拟合成的位移时程作为断层两侧桥墩的地震动输入。选取桥梁轴向与断层交角  $\theta$  为计算参数, 以逆时针旋转为正, 计算时将断层两侧垂直断层分量和平行断层分量地震动时程  $G_{FN}(t)$  和  $G_{FP}(t)$  按图 3 所示分别转换为纵桥向和横桥向地震动时程  $G_L(t)$  和  $G_T(t)$  进行输入。

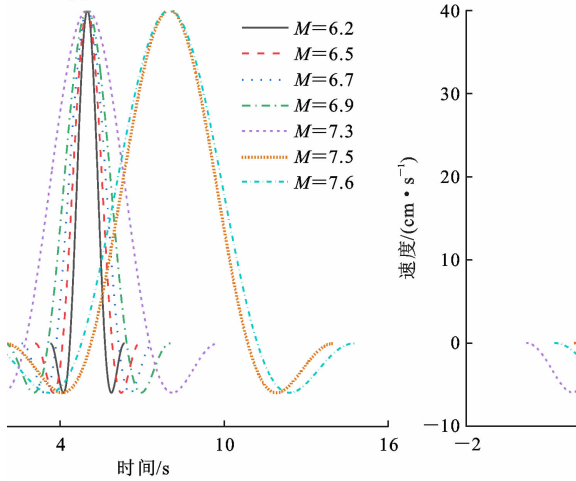
当输入点在断层左边时

$$G_L(t) = G_{FN}(t) \sin(\theta) + G_{FP}(t) \cos(\theta) \quad (17)$$

$$G_T(t) = -G_{FN}(t) \cos(\theta) + G_{FP}(t) \sin(\theta) \quad (18)$$

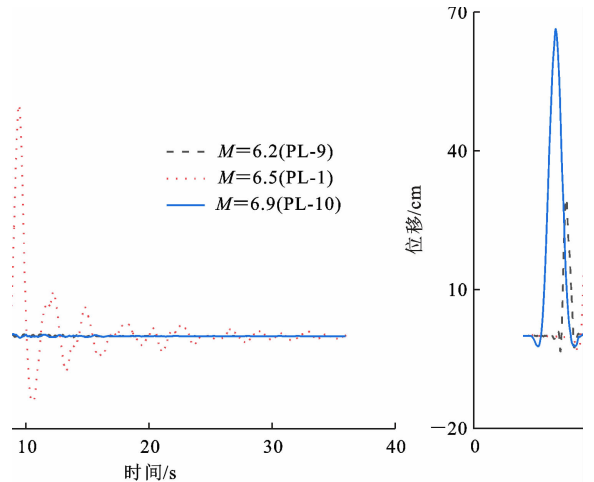


(a) 垂直断层方向

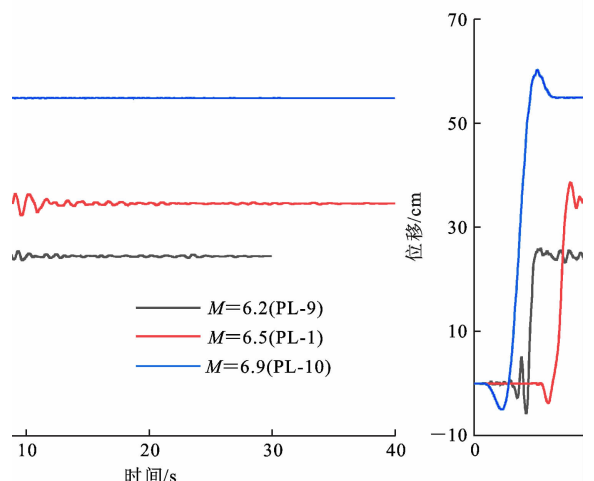


(b) 平行断层方向

图1 人工合成低频速度脉冲  
Fig. 1 Artificially synthesized low-frequency velocity pulses



(a) 垂直断层方向



(b) 平行断层方向

图2 跨断层脉冲型地震动位移时程曲线  
Fig. 2 Displacement time history curves of cross-fault pulse-type ground motions

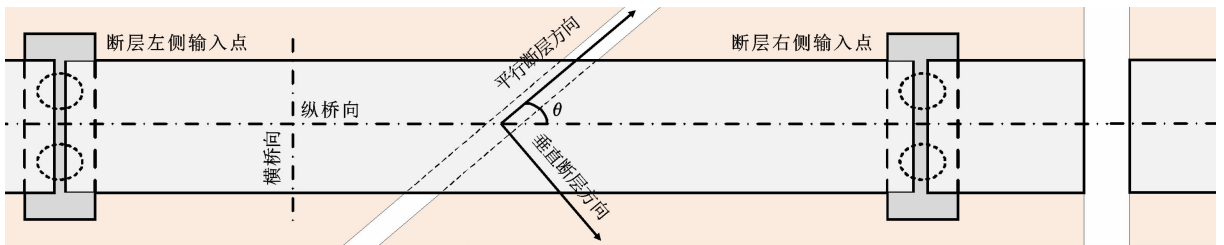


图3 地震动输入转换方法

Fig. 3 Ground motions input conversion method

当输入点在断层右边时

$$G_L(t) = G_{FN}(t) \sin(\theta) - G_{FP}(t) \cos(\theta) \quad (19)$$

$$G_T(t) = -G_{FN}(t) \cos(\theta) - G_{FP}(t) \sin(\theta) \quad (20)$$

由于中小跨径桥梁上部结构通常直接搭在板式橡胶支座上,使得支座与墩梁之间无连接措施,仅依靠接触面的摩擦力来限制支座移位,几乎无法避免在巨震作用下发生落梁震害,因此,研究巨震下此类桥梁的限位加固和性能提升意义不大。故本文选取

基于速度脉冲方法人工合成的震级在 6.5~6.7 的 7 组地震动作为跨断层地震动荷载,其基本特性如表 1 所示。

## 2 限位加固和抗震性能提升措施

### 2.1 功能分离式限位加固措施

借鉴高速铁路桥梁减隔震性能优化设计中功能分离的理念<sup>[29-30]</sup>,对跨断层多跨筒支梁桥进行抗震

表 1 地震动特性

Table 1 Ground motion characteristics

地震动 编号	震级	FP		FN	
		峰值 位移/m	永久 位移/m	峰值 位移/m	永久 位移/m
PL-01	6.5	0.386	0.346	0.501	0.002
PL-02	6.5	0.380	0.347	0.609	0.003
PL-06	6.5	0.388	0.347	0.426	0.001
PL-08	6.5	0.413	0.347	0.405	0.007
PL-14	6.7	0.480	0.436	0.652	-0.004
PL-20	6.7	0.474	0.436	0.894	0.001
PL-21	6.7	0.482	0.436	0.613	0.001

性能提升,其措施包括板式橡胶支座的限位加固、结构整体性和桥墩性能的提升。板式橡胶支座的限位加固指在主梁底面和盖梁(台帽)顶面分别锚

固环型限位钢套箍,限于实际工程中采用的板式橡胶支座型号不同,对应的规格和尺寸也有所区别,因而环型限位钢套箍的安装位置和尺寸也有所差异,如图 4 所示,为了便于安装,环型限位钢套箍可由 2 个半圆型套箍拼接而成,通过环型限位钢套箍的约束作用提高板式橡胶支座的位移容许能力,以防其过早屈服失效,减小落梁风险。同时主梁底部与支座的接触面间增加可以改变摩擦因数的薄聚酯板,确保在剪力作用下支座上表面先于下表面滑动,做到滑动面先后顺序可控。提升结构整体性可通过在主梁梁底或台帽处设置连接耳环座,以实现粘滞阻尼器在相邻主梁或主梁与台帽间的布置,桥墩性能提升措施指在桥墩之间横向布置 BRB,如图 5 所示。

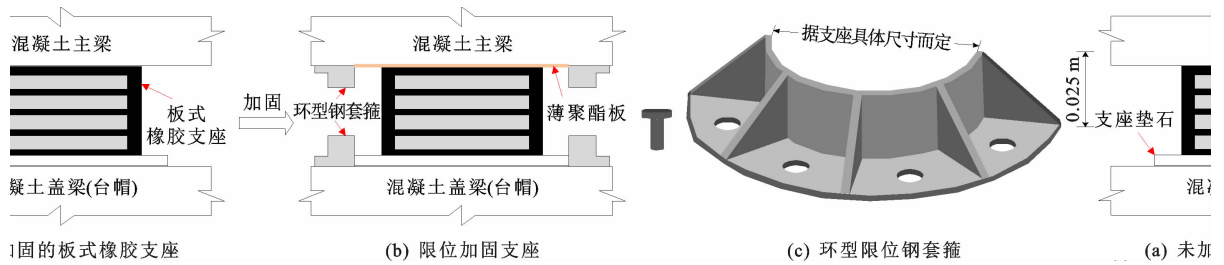


图 4 板式橡胶支座限位加固

Fig. 4 Displacement-restraining reinforcement for plate rubber bearing

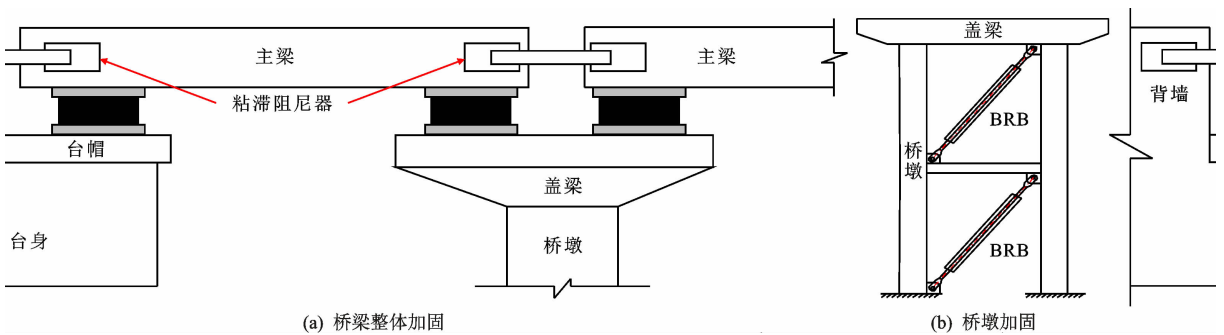


图 5 跨断层多跨筒支梁桥加固措施

Fig. 5 Reinforcement measures of cross-fault multi-span simply-supported beam bridge

2.2 限位加固支座简化模型

限位加固支座上表面薄聚酯板与梁底混凝土接触,摩擦因数为  $\mu_1$ ,下表面橡胶与垫石混凝土接触,摩擦因数为  $\mu_2$ ,其滑动过程如图 6 所示。图 7(a)给出了限位加固支座的简化模型,采用碰撞刚度为  $k_s$  的弹簧和碰撞间隙来模拟支座与环型限位钢套箍的碰撞,考虑支座上下表面滑动摩擦并分别与碰撞单元并联,结合支座可以左右滑动的实际情况,以剪切刚度为  $k_b$  的弹簧并联左右两侧单元表示限位加固支座的简化模型。随着支座变形的逐渐增大,限位加固支座的加(卸)载路径分为以下 6 个阶段,

加(卸)载路径如图 7(b)所示。

阶段 1:支座在地震作用下产生的水平  $F$  小于其上表面滑动摩擦力  $F_{1y} = \mu_1 F_N$ ,其中  $F_N$  为上部结构对支座的压力。此时,板式橡胶支座自身发生剪切变形,环型限位钢套箍所起的约束作用并未开始,加(卸)载路径为  $a$ 。

阶段 2:随着支座剪力的不断增加,当  $F = F_{1y}$  时,板式橡胶支座上表面开始滑动,  $D_1$  为支座上表面临界滑动位移,直至板式橡胶支座与上层环型钢套箍接触,限位加固支座的加载路径为  $b$ ,卸载路径为  $c$ 。

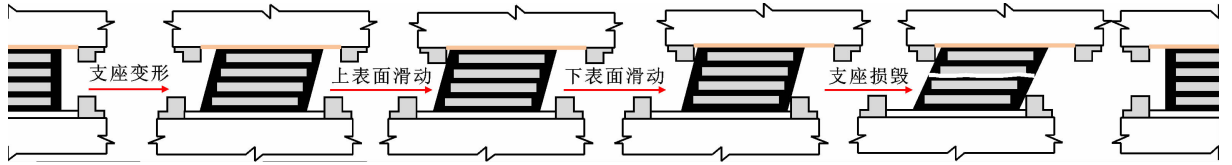


图6 限位加固支座的滑动过程

Fig. 6 Sliding process of displacement-restrained reinforced bearing

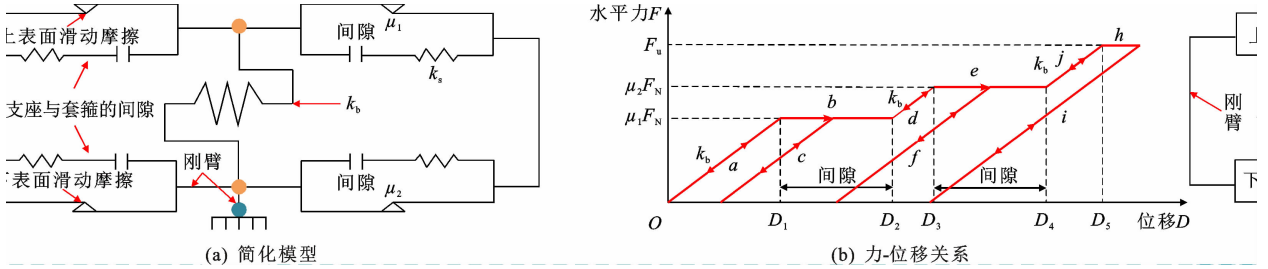


图7 限位加固支座的简化模型及加(卸)载路径

Fig. 7 Simplified model and loading (unloading) paths of displacement-restrained reinforced bearing

阶段 3: 当上层环型钢套箍与支座之间的间隙为 0 时,  $D_2$  为  $D_1$  与间隙之和, 上层环型限位钢套箍开始发挥作用, 限制上表面继续滑动, 迫使支座继续发生剪切变形, 直至  $F$  等于下表面滑动摩擦力  $F_{2y} = \mu_2 F_N$ , 限位加固支座的加(卸)载路径为  $d$ 。

阶段 4: 当  $F = F_{2y}$  时, 支座下表面开始滑动,  $D_3$  为支座下表面临界滑动位移, 直至板式橡胶支座与下层环型限位钢套箍接触, 限位加固支座的加载路径为  $e$ , 卸载路径为  $f$ 。

阶段 5: 当下层环型钢套箍与支座之间的间隙为 0 时, 位移为  $D_4$ , 环型钢套箍将迫使支座继续变形, 直至支座本身损毁, 限位加固支座的加(卸)载路径为  $j$ 。

阶段 6: 当  $F$  等于剪切极限承载力  $F_u$  时, 达到极限位移  $D_5$ , 限位加固支座损毁, 加载路径为  $h$ , 卸载路径为  $i$ 。

### 3 桥梁概况与分析模型

#### 3.1 简支梁桥概况

本文以一座 4 跨预应力混凝土空心板简支梁桥为研究对象, 全桥长 115 m, 桥宽 8 m。主梁长 25 m, 由 8 片板梁组合而成, 桥头搭板长 15 m, 材料为 C40 混凝土。下部结构为直径 1.5 m 的圆截面双柱式混凝土排架墩和 2 个重力式桥台。双柱式桥墩采用 C30 混凝土, 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup> 墩高依次为 16.46、14.72 和 14.46 m, 纵筋采用 HRB335 钢, 直径为 25 mm, 箍筋采用 HPB235 钢, 直径为 10 mm, 墩顶设有盖梁和挡块, 桥墩中间位置和墩底分别设有系

梁和地系梁, 桥墩基础采用嵌岩桩基础。桥台为 U 型重力式桥台, 基础采用扩大基础。全桥支座均采用圆形冠状板式橡胶支座, 单片板梁由 4 个支座支撑, 总计 128 个支座, 且所有支座上下表面均直接采用环氧树脂粘接在主梁底部和盖梁(台帽)顶面。

#### 3.2 动力分析模型

基于 OpenSees 建立该桥三维数值模型, 如图 8 所示。整体坐标系以 2<sup>#</sup> 墩底为原点, 纵桥向为  $x$  轴, 横桥向为  $y$  轴, 竖向为  $z$  轴。桥梁结构的阻尼比取 5%, 采用 Reyleigh 阻尼。上部结构基于梁格法建立, 混凝土板梁和梁间横向联系均采用弹性梁柱单元模拟, 横向联系每隔 5 m 设置一道, 且只考虑刚度不考虑质量。忽略双柱式排架墩盖梁的塑性变形, 采用弹性梁柱单元模拟, 而桥墩主体和系梁由于在跨断层地震动下容易发生塑性变形, 故二者采用基于纤维截面的非线性梁柱单元模拟。纤维截面混凝土采用 Concrete04 材料, 纵向钢筋采用 Steel02 材料。由于 OpenSees 中没有钢筋混凝土挡块的力-位移本构关系, 故本文通过 3 个非线性弹簧的串并联来模拟挡块的力学性能。钢筋和混凝土剪力分项的本构特性均采用 Hysteretic 材料模拟。忽略主梁和挡块间在碰撞过程中的能量损耗, 采用 Elastic-Perfectly Plastic Gap 材料模拟, 梁体与挡块之间的横向碰撞则通过 Two Node Link 单元来模拟。考虑桥台与梁体间纵向碰撞过程中的能量损失, 基于 Hertz-Damp 双线性碰撞模型, 采用 Impact 材料模拟。

未加固的板式橡胶支座采用 Elastomeric

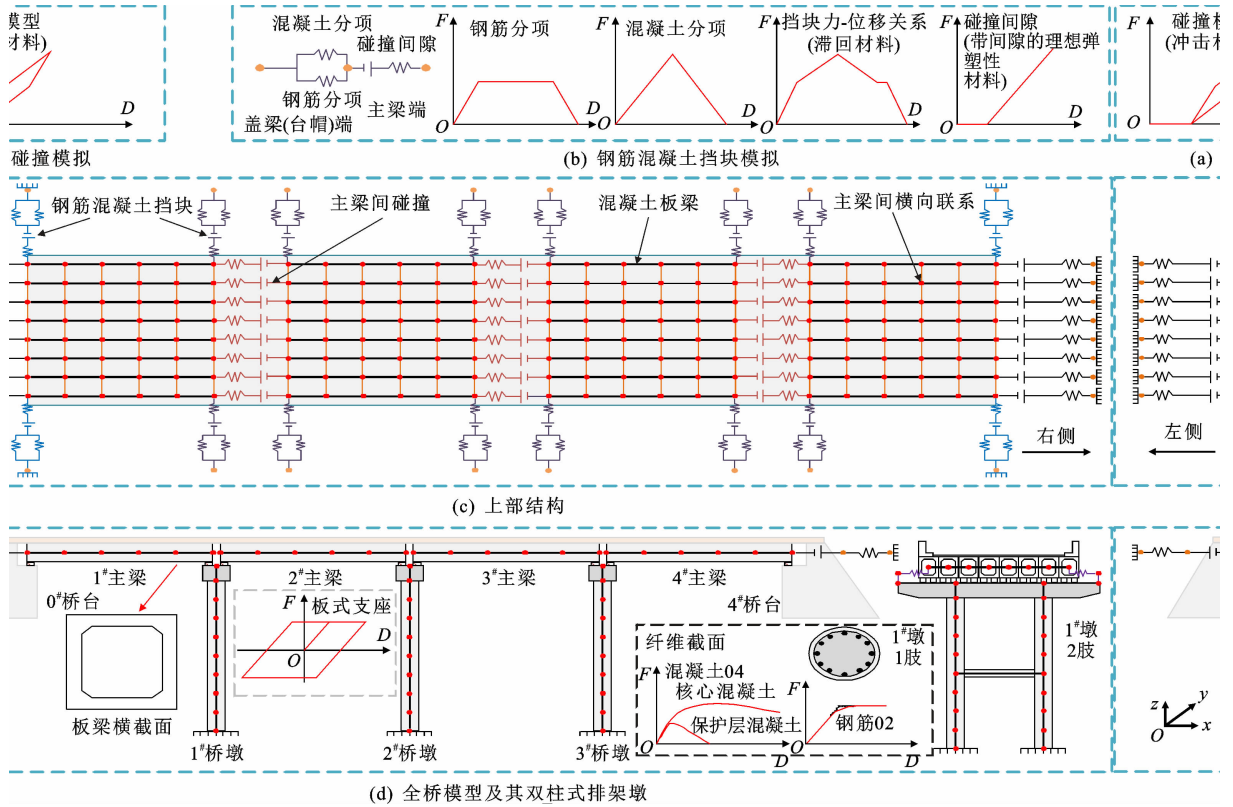


图 8 动力时程分析模型

Fig. 8 Dynamic time history analysis model

Bearing (Plasticity) 单元模拟, 临界滑动位移取 0.044 m。限位加固支座数值分析模型如图 9 所示, 其中:  $F_{by}$  为限位加固支座的屈服力;  $k_b$  为其剪切刚度, 其屈服位移取支座发生严重损伤时的临界值 100 mm。支座上下表面滑动摩擦力采用 Elastic-Perfectly Plastic 材料模拟, 上表面取滑动摩擦因数  $\mu_1 = 0.02$ , 下表面取滑动摩擦因数  $\mu_2 = 0.27$ , 将弹性单元的刚度设为无限大, 以忽略支座上下表面变形<sup>[31-33]</sup>。限位环型钢套箍高度  $H_t$  取 0.025 m,

与板式橡胶支座之间的碰撞间隙采用 Elastic-Perfectly Plastic Gap 材料模拟, 二者之间的碰撞视为刚性碰撞, 即碰撞刚度和碰撞屈服力取无限大, 取碰撞间隙为 0.05 m。限位加固支座的基本参数如表 2 所示, 单个支座模型低周往复计算结果如图 10 所示。

根据《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822—2011), 选用 Y4Q420 型 LRB, 采用 Elastomeric Bearing (Plasticity) 单元来模拟, 屈服强度  $F_{LRBy}$

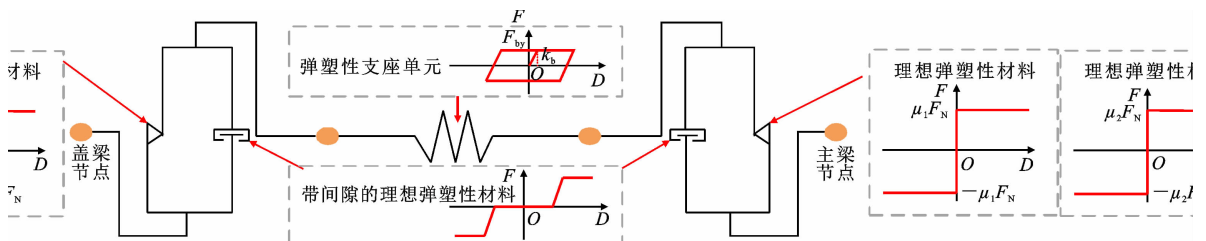


图 9 基于 OpenSees 的限位加固支座的数值模型

Fig. 9 Numerical model of displacement-restrained reinforced bearing based on OpenSees

表 2 限位加固支座的基本参数

Table 2 Basic parameters of displacement-restrained reinforced bearing

参数	上表面摩擦单元		下表面摩擦单元		限位间隙/m	套箍高度/m	弹性支座单元	
	$\mu_1$	$F_{1y}/\text{kN}$	$\mu_2$	$F_{2y}/\text{kN}$			$F_{by}/\text{kN}$	$k_b/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
取值	0.02	2.851	0.27	38.494	0.05	0.025	87.920	879.2

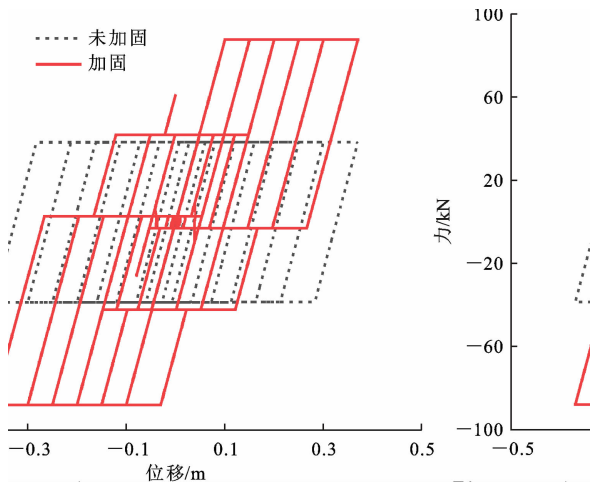


图 10 支座的低周往复曲线

Fig. 10 Low-cycle reciprocating curves of bearing

取 61 kN, 屈服前刚度  $K_{LRB1}$  和屈服后刚度  $K_{LRB2}$  分别取 4 600 和 700  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ , 特征强度  $Q_d$  取 51.72 kN, 双线性本构曲线如图 11 所示。

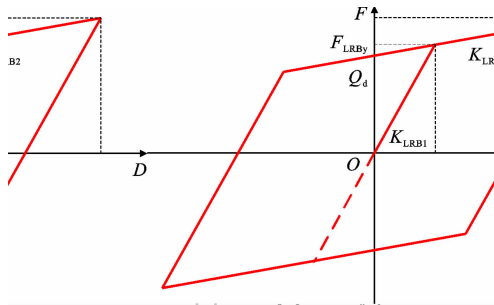


图 11 铅芯橡胶支座本构曲线

Fig. 11 Constitutive curve of lead rubber bearing

为保证 BRB 在排架墩之后破坏, 借鉴设置 BRB 桥梁排架墩基于位移的设计方法<sup>[34]</sup>, 假定桥墩在屈服前的变形沿墩高满足线性增加趋势, 选用 TJH 型防屈曲支撑, 核心材料为 Q235 钢材, 核心段长度均取 5.5 m, 支撑总长度按实际墩高确定, 采用基于双线性本构的 Steel01 材料模拟, 其屈服硬化比取 0.03。

针对简支梁桥模型 1<sup>#</sup> 墩处支座和墩顶位移, 考虑不同阻尼系数和速度指数对粘滞阻尼器减震效果的影响, 主梁间粘滞阻尼器的阻尼系数取 3 000  $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 桥台与主梁间阻尼系数取为 4 000  $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 速度指数取 0.4, 采用基于 Maxwell 模型的 Viscous-Damper 材料并结合 Two Node Link 单元进行模拟。

## 4 地震反应及损伤控制分析

为控制跨断层地震动下简支梁桥的地震反应, 基于功能分离理念对板式橡胶支座进行限位加固,

为增强结构整体性并弥补单独采用限位加固支座的不足, 建立了组合加固体系, 以桥墩、支座和主梁峰值位移和残余位移、桥墩位移延性系数为性能指标, 着重分析不同减震控制措施下桥梁的损伤控制效果。

### 4.1 组合加固体系及损伤分析指标

为分析限位加固支座及限位加固支座+粘滞阻尼器+BRB 组合加固体系对跨断层简支梁桥抗震性能的影响, 建立 6 种工况进行对比分析, 如表 3 所示。

表 3 工况划分

Table 3 Working condition classification

工况编号	减震装置布置情况	支座类型
1	未设置粘滞阻尼器和 BRB	板式橡胶支座
2	未设置粘滞阻尼器和 BRB	限位加固支座
3	未设置粘滞阻尼器和 BRB	铅芯橡胶支座
4	主梁间及桥台与主梁之间布置粘滞阻尼器, 桥墩间布置 BRB	板式橡胶支座
5	主梁间及桥台与主梁之间布置粘滞阻尼器, 桥墩间布置 BRB	限位加固支座
6	主梁间及桥台与主梁之间布置粘滞阻尼器, 桥墩间布置 BRB	铅芯橡胶支座

以位移延性系数  $\mu_d$  为指标来分析桥墩的地震损伤。Hwang 等<sup>[35]</sup> 采用位移延性系数来定义桥墩发生的 4 种损伤状态, 并取临界值 1.0、1.2、1.76 和 4.76 来分别对应轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤。本文桥例采用双柱式排架墩, 通过分别对限位加固支座和桥墩进行静力弹塑性分析, 得到限位加固支座达到剪切极限承载力  $F_u$  时的极限位移 0.2 m 和 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup> 墩在纵、横桥向外侧受拉钢筋屈服时的墩顶位移。进行非线性时程反应分析, 得到各墩墩顶峰值位移, 以此计算排架墩纵、横向位移延性系数, 表 4<sup>[35]</sup> 给出了桥墩的损伤状态。以支座剪切应变为极限状态指标定义轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤, 界限值分别为 75%、150%、250% 和 300%, 相应的支座剪切变形分别为 30、60、100 和 120 mm。

### 4.2 限位加固支座对桥梁地震反应的影响

为考察限位加固支座对简支梁桥抗震性能的影响, 以支座类型为变量, 分析当走滑断层地震动以  $\theta=90^\circ$  从第 2 跨穿越时, 支座、主梁和桥墩等关键构件的地震反应。

表 4 桥墩的损伤状态  
Table 4 Damage states of piers

损伤状态	桥墩位移延性系数	
	纵桥向	横桥向
轻微损伤	1.00	1.00
中等损伤	1.20	1.35
严重损伤	1.76	2.47
完全损伤	4.76	5.48

图 12 给出了不同支座纵、横向峰值位移,可以看出:桥墩处支座位移均介于 0.044~0.200 m,说明板式橡胶支座已经严重滑动,支座性能几乎失效,而限位加固支座位移处于可控范围,仍可发挥作用,落梁风险降低;桥台处支座位移仍在 0.3 m 以上,表明限位加固对板式橡胶支座性能提升有限,还需考虑其他抗震性能提升措施;除第 2 跨外,限位加固支座可使支座纵向峰值位移最大降低近 30%,其限位效果与 LRB 相当;限位加固支座和 LRB 的模拟刚度略有差别,而第 2 跨处支座受横桥向滑冲效应影响较为严重,强烈的横向地震动引起的桥跨两侧横向相对位移放大了这种差异,使得此处支座的纵向位移响应有所不同;横桥向桥墩处支座峰值位移除第 2 跨外,不同支座类型对峰值位移响应的影响较小,而桥台处支座峰值位移与纵桥向类似,限位加固支座使 0<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 桥台的横向峰值位移分别降低了 17% 和 14%。

图 13 为不同支座类型下主梁纵、横向峰值位移及残余位移,可以看出:板式橡胶支座在限位加固后普遍优于 LRB 对主梁纵向峰值位移的放大程度;断层附近 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup> 梁的纵向残余位移变化规律与距断层最近的支座纵向位移响应变化一致,其中 1<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 梁残余位移变化趋势差别可能与桥墩高度有关,而支座加固后 4<sup>#</sup> 梁的残余位移比未加固时有所降低,这与采用 LRB 的影响类似;在横桥向,限位加固支座使得非断层穿越跨的 1<sup>#</sup> 梁的平动位移减小,对断层穿越跨的 2<sup>#</sup> 梁的峰值位移影响不明显,且无论在何种工况下主梁均严重旋转,梁端相对横向位移接近 0.8 m;采用不同支座对主梁横向残余位移影响较小,但限位加固支座和 LRB 均减缓了主梁的旋转程度,说明支座加固后具有与 LRB 相当的隔震效果。

图 14 为不同支座类型下桥墩纵、横向峰值位移及位移延性系数,可以看出:限位加固支座使各桥墩纵向位移分布差异增大,最明显的 3<sup>#</sup> 桥墩 2 个墩肢的纵向峰值位移分别增加了 19.8% 和 19.7%,说明

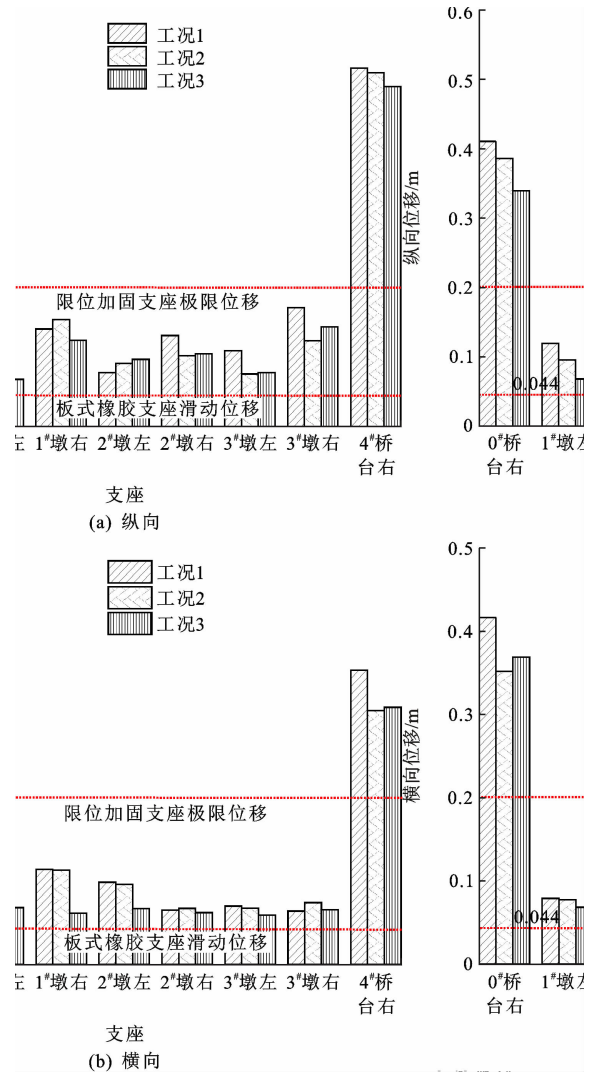
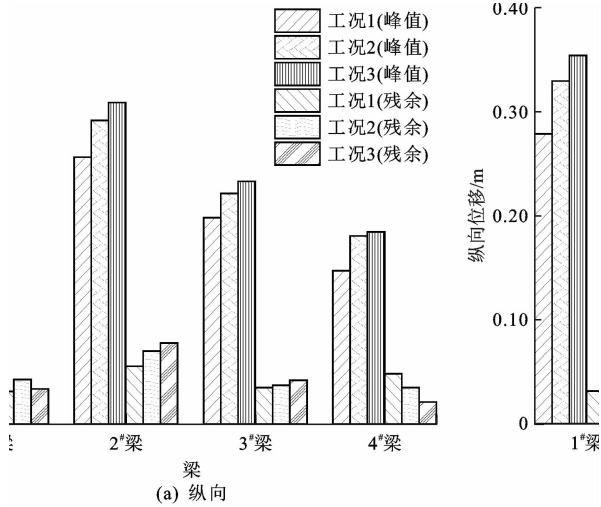


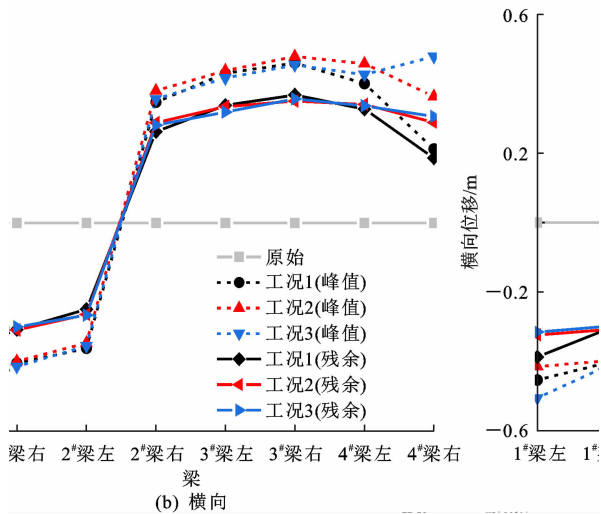
图 12 不同支座类型下支座位移反应  
Fig. 12 Displacement responses of bearings under different bearing types

各桥墩处若采用限位加固支座,将会加剧矮墩的位移响应和断层穿越处桥墩的扭转,而桥墩纵向位移延性系数仍在 1.76~4.76,结合表 4 可知,桥墩依然处于严重损伤状态;支座类型对桥墩横向峰值位移的影响较小,而限位加固支座和 LRB 对 3<sup>#</sup> 桥墩横向位移响应有不同的影响,这与 3<sup>#</sup> 桥墩最矮、离断层穿越跨的距离最远有关;桥墩横向位移延性系数除 3<sup>#</sup> 桥墩在使用板式橡胶支座和 LRB 下小于 2.47,属中等损伤外,其余情况均在 2.47~5.48,为严重损伤,且限位加固支座明显增加了所有桥墩的横向损伤。

综合以上分析可知,限位加固支座可有效控制筒支梁桥在跨走滑断层地震动下的支座位移响应,其限位效果与 LRB 相当。在既有板式橡胶支座的基础上采用环型限位钢套箍来加固的方法不仅具有



(a) 纵向



(b) 横向

图 13 不同支座类型下主梁位移响应

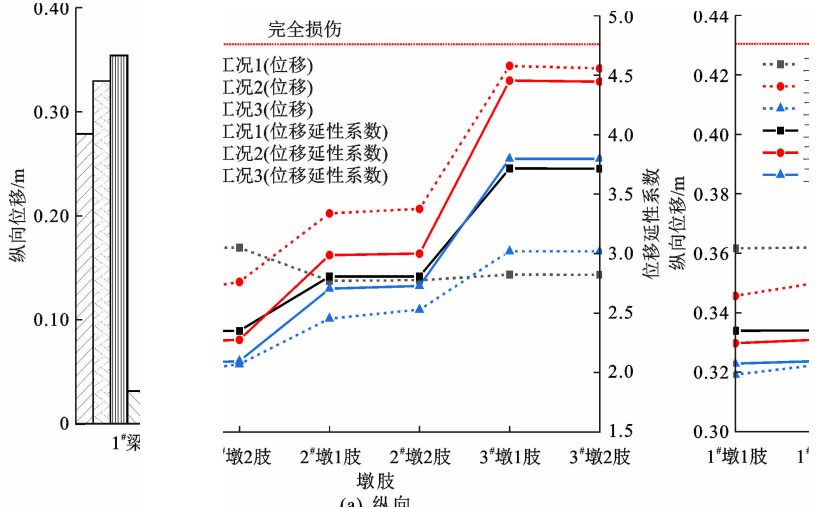
Fig. 13 Displacement responses of main girders under different bearing types

费用低、易于震后快速修复更换的优点,而且避免了采用 LRB 面临的墩梁间距离不够、影响高程以及替换过程中阻断交通等问题。同时,限位加固支座也会增加桥墩的损伤,因而在加固板式橡胶支座的同时应考虑桥墩性能的提升。

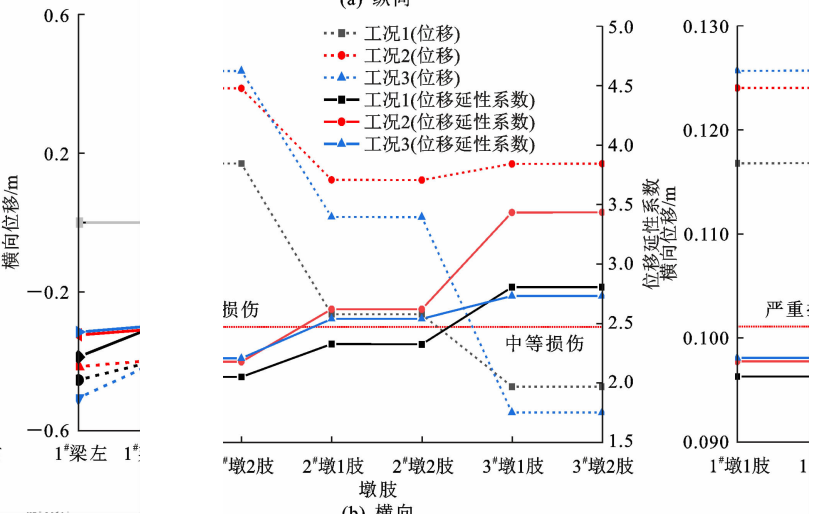
### 4.3 组合加固体系对桥梁抗震性能的提升

为研究组合加固体系对简支梁桥抗震性能的影响,对比分析当断层以  $\theta=90^\circ$  从第 2 跨穿越时,单独采用限位加固支座和组合加固体系下桥梁关键构件的非线性反应。

图 15 给出了组合加固体系下主梁峰值和残余位移,可以看出:组合加固体系对主梁纵、横向残余位移影响不大,这是由于其没有提升结构的自复位能力;就主梁纵向峰值位移而言,组合加固体系可抑制因单独使用限位加固支座造成的位移放大现象,相较于单独使用限位加固支座,采用组合加固体系



(a) 纵向



(b) 横向

图 14 不同支座类型下桥墩位移响应

Fig. 14 Displacement responses of piers under different bearing types

使 1#~4# 主梁纵向峰值位移依次减少 73%、49%、52%和 58%,且上部结构纵向位移分布也变得更加均匀;对于横桥向,组合加固体系会略微降低主梁的峰值位移,同时减轻主梁的旋转。

图 16 为组合加固体系下支座的纵、横向位移,可以看出:组合加固体系会适当降低除 2# 墩左侧支座外其余各桥墩处支座的纵向和横向位移响应,并使各桥墩处支座的位移分布更加均匀,避免某个位置因支座位移过大而引起落梁,2# 墩左侧支座的位移异常是由于断层从桥梁第 2 跨穿过导致的;采用组合加固体系对简支梁桥进行加固后,会增大桥台处支座的纵向位移,这主要是由于组合加固体系增加了桥台承担的上部结构地震惯性力的分量,可以通过加宽桥台帽宽度和增强桥台处横向混凝土挡块的设计强度来弥补。

图 17 为组合加固体系下桥墩纵向和横向峰值

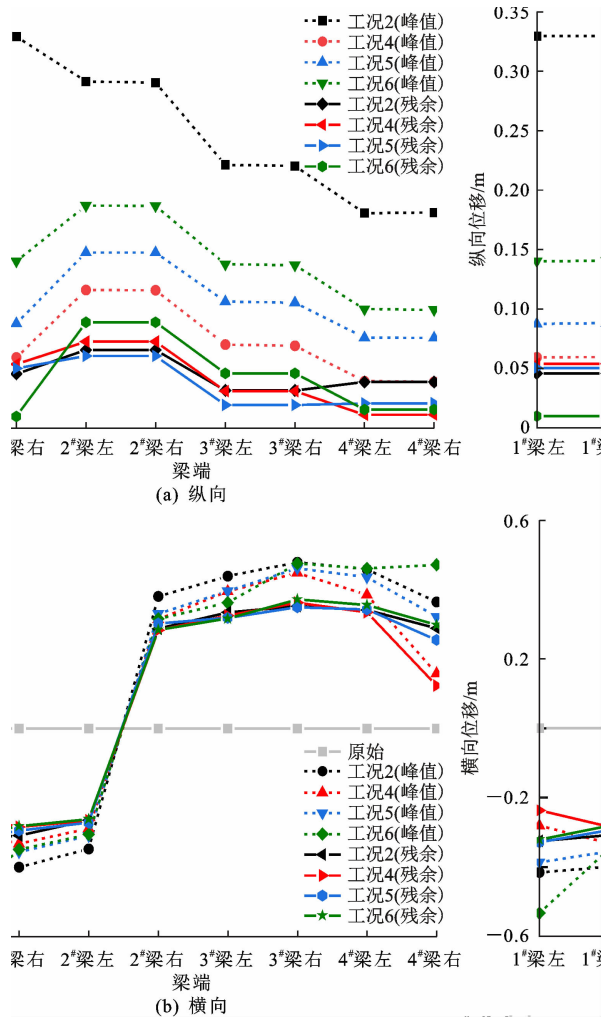


图 15 组合加固体系下主梁位移响应

Fig. 15 Displacement responses of main girder under combined reinforcement system

位移及位移延性系数,可以看出:在纵向桥台与主梁、主梁与主梁之间布置粘滞阻尼器会增强结构整体性,略微降低矮墩的损伤,使各桥墩损伤分布更加均匀,但会增加高墩的纵向位移响应;横桥向使用 BRB 可有效降低滑冲效应对桥墩横向位移响应的影响,降低所有桥墩的损伤程度,且当组合加固体系采用限位加固支座时,1#~3# 桥墩横向位移依次降低 28%、55%和 62%。

### 5 结 语

(1)通过分解-叠加的思路,从 40 组实测地震动中分解出地震动高频分量,基于速度脉冲分别模拟具有滑冲效应和向前方向性效应的地震动低频分量,叠加高低频分量得到 40 组跨断层地震动,进而模拟跨走滑地震动效应。

(2)在 6.5~6.7 级走滑断层地震动下,板式橡

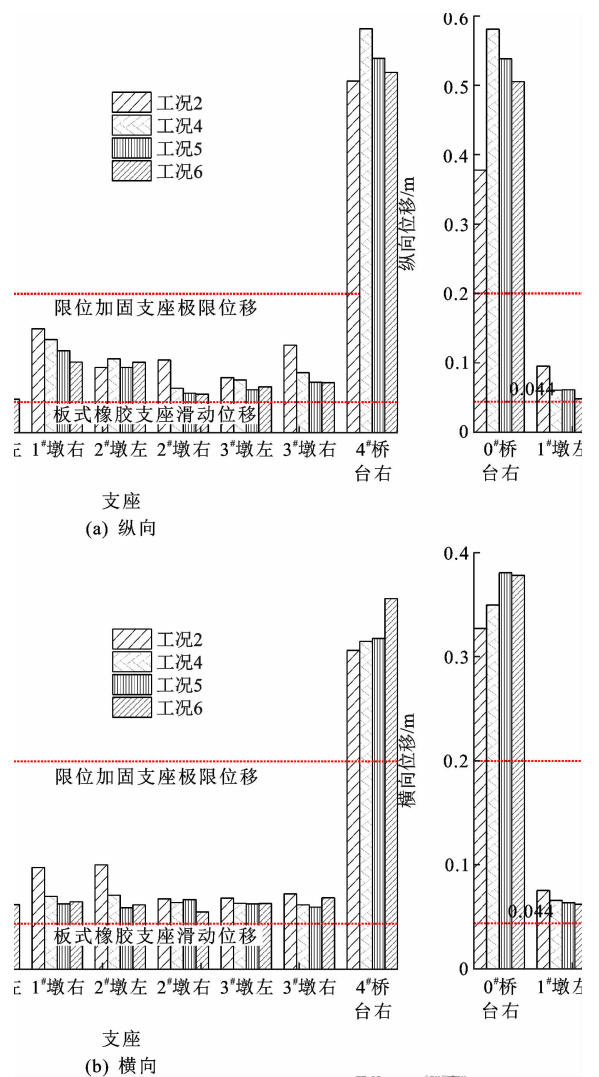


图 16 组合加固体系下支座位移响应

Fig. 16 Displacement responses of bearings under combined reinforcement system

胶支座在限位加固后桥墩处的支座变形均在可控范围内,避免了支座因滑动位移过大而过早屈服失效的现象,同时使主梁横向旋转变得平缓,说明由于环型限位钢套箍对板式橡胶支座的约束作用,减小了落梁风险,但会适当增大主梁纵向峰值位移,并加重桥墩的损伤程度;限位加固支座具有与 LRB 相当的隔震能力,但比替换 LRB 更为便宜、便捷,也不影响既有线路高程。

(3)组合加固体系可弥补因单独使用限位加固支座或 LRB 导致的主梁纵向峰值位移增大、桥墩横向损伤加剧等问题,同时增加了结构整体性,但组合加固体系依旧无法降低桥墩的纵向损伤,无法减轻桥台处支座的变形,因此,就跨断层简支梁桥而言,除了采用组合加固体系外,还应考虑通过加宽盖梁台帽以增大支座的位移容许能力、增大桥墩截面等

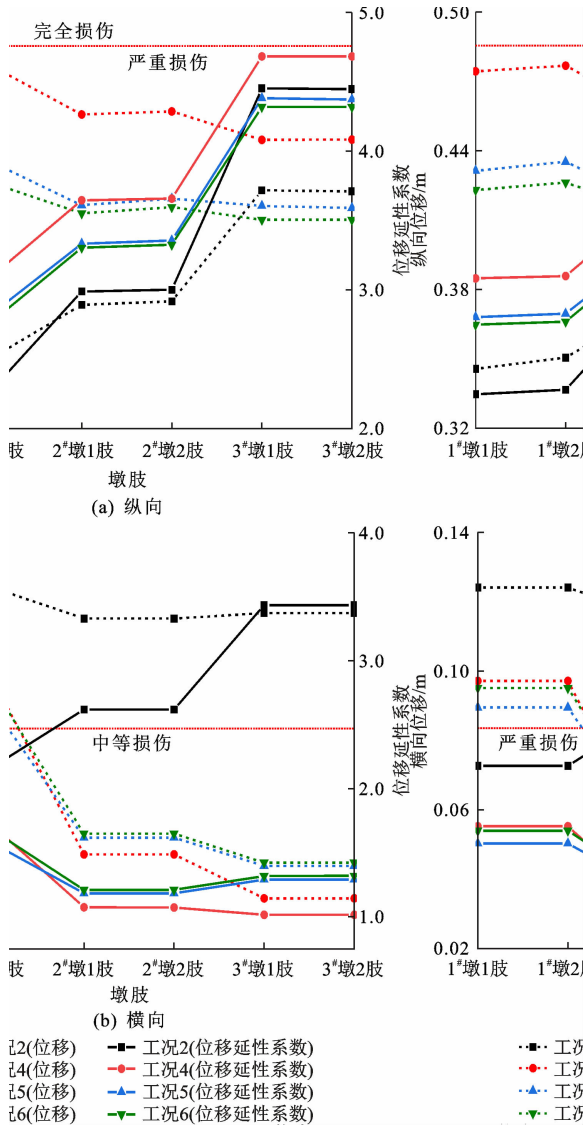


图 17 组合加固体系下桥墩位移响应

Fig. 17 Displacement responses of piers under combined reinforcement system

措施来提升桥墩的抗震能力。

(4)本文采用的跨断层地震动模拟方法与实测地震动记录之间仍存在些许偏差,模拟结果的精度有待在后续进一步提升。此外,限位加固支座与组合加固体系仍处于理论分析阶段,未来将继续展开系统性试验研究,以验证其有效性。

参考文献:

References:

[ 1 ] 范立础, 聂利英, 李建中. 地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 31-36.  
 FAN Li-chu, NIE Li-ying, LI Jian-zhong. Dynamic characteristic analysis of laminated rubber bearing

sliding under earthquake [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 31-36.  
 [ 2 ] 王东升, 郭 迅, 孙治国, 等. 汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 84-94.  
 WANG Dong-sheng, GUO Xun, SUN Zhi-guo, et al. Damage to highway bridges during Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 84-94.  
 [ 3 ] 贾宏宇, 杨 健, 郑史雄, 等. 跨断层桥梁抗震综述[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(5): 1075-1093.  
 JIA Hong-yu, YANG Jian, ZHENG Shi-xiong, et al. A review on aseismic bridges crossing fault rupture regions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(5): 1075-1093.  
 [ 4 ] 宗周红, 林元铮, 林 津, 等. 跨断层地震动及其对桥梁结构影响研究进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 80-96.  
 ZONG Zhou-hong, LIN Yuan-zheng, LIN Jin, et al. Research advances of across-fault ground motions and their effects on bridge structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 80-96.  
 [ 5 ] 陈笑宇, 王东升, 付建宇, 等. 近断层地震动脉冲特性研究综述[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 1-14, 54.  
 CHEN Xiao-yu, WANG Dong-sheng, FU Jian-yu, et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 1-14, 54.  
 [ 6 ] PETERSEN M D, DAWSON T E, CHEN R, et al. Fault displacement hazard for strike-slip faults [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 805-825.  
 [ 7 ] YANG S, MAVROEIDIS G P. Bridges crossing fault rupture zones: A review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 545-571.  
 [ 8 ] PANG Y T, SUN Y X, ZHONG J. Resilience-based performance and design of SMA/sliding bearing isolation system for highway bridges[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(14): 6187-6211.  
 [ 9 ] ZHOU L X, SHAHRIA ALAM M, SONG A M, et al. Probability-based residual displacement estimation of unbonded laminated rubber bearing supported highway bridges retrofitted with transverse steel damper[J]. Engineering Structures, 2022, 272: 115053.  
 [10] FANG C, LIU X T, WANG W, et al. Full-scale shaking table test and numerical analysis of structural frames with SMA cable-restrained base isolation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,

- 2023, 52(12): 3879-3902.
- [11] LIU X T, WANG W, HU D W, et al. Test, design, and parametric analysis of a prefabricated industrial building with shape memory alloy (SMA) cable-restrained bearings for seismic resilience [J]. *Engineering Structures*, 2024, 313: 118288.
- [12] 管仲国,黄勇,张昊宇,等. 青海玛多7.4级地震桥梁工程震害特性分析[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(3):38-45.
- GUAN Zhong-guo, HUANG Yong, ZHANG Hao-yu, et al. Damage characteristics and analysis of bridge engineering in M7.4 Qinghai Maduo Earthquake[J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(3): 38-45.
- [13] SHRESTHA B, HAO H, BI K M. Effectiveness of using rubber bumper and restrainer on mitigating pounding and unseating damage of bridge structures subjected to spatially varying ground motions [J]. *Engineering Structures*, 2014, 79: 195-210.
- [14] XIANG N L, LI J Z. Seismic performance of highway bridges with different transverse unseating-prevention devices[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(9): 04016045.
- [15] LI S, WANG J, SHAHRIA A M. Multi-criteria optimal design and seismic assessment of SMA RC piers and SMA cable restrainers for mitigating seismic damage of simply-supported highway bridges [J]. *Engineering Structures*, 2022, 252: 113547.
- [16] ZHONG H Q, GUO J J, YUAN W C, et al. Seismic assessment and parametric analysis on a multi-level aseismic simply-supported bridge with cable-restraining composite rubber bearings and dissipative controlled rocking piers [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 177: 108372.
- [17] MAVROEIDIS G P. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [18] FARID GHAHARI S F, JAHANKHAH H, ALI GHANNAD M A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(7): 536-546.
- [19] LI S, ZHANG F, WANG J, et al. Effects of near-fault motions and artificial pulse-type ground motions on super-span cable-stayed bridge systems[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(3): 04016128.
- [20] YANG S, MAVROEIDIS G P, UCAK A. Analysis of bridge structures crossing strike-slip fault rupture zones: A simple method for generating across-fault seismic ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2020, 49(13): 1281-1307.
- [21] BAKER J W, LIN T, SHAHI S K, et al. New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2011.
- [22] HALLDÓRSSON B, MAVROEIDIS G P, PAPAGEORGIOU A S. Near-fault and far-field strong ground-motion simulation for earthquake engineering applications using the specific barrier model[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(3): 433-444.
- [23] CORK T G, KIM J H, MAVROEIDIS G P, et al. Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 80: 102-118.
- [24] MAVROEIDIS G P, PAPAGEORGIOU A S. Effect of fault rupture characteristics on near-fault strong ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(1): 37-58.
- [25] VETTER C R, TAFLANIDIS A A, MAVROEIDIS G P. Tuning of stochastic ground motion models for compatibility with ground motion prediction equations[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2016, 45(6): 893-912.
- [26] CHANG Z W, WU H R, GODA K. Automated parameterization of velocity pulses in near-fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2024, 53(3): 1006-1027.
- [27] 田玉基,杨庆山,卢明奇. 近断层脉冲型地震动的模拟方法[J]. *地震学报*, 2007, 29(1):77-84,114.
- TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan, LU Ming-qi. Simulation method of near-fault pulse-type ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(1): 77-84, 114.
- [28] 惠迎新,王克海,吴刚,等. 跨断层桥梁地震响应分析及合理跨越角度研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(13):6-11,17.
- HUI Ying-xin, WANG Ke-hai, WU Gang, et al. Seismic responses of bridges crossing faults and their best crossing angles [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(13): 6-11, 17.
- [29] 石岩,王东升,孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(3):19-24.
- SHI Yan, WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo. Analysis of seismic response of seismically mitigated

- and isolated bridge subjected to near-fault ground motion[J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(3): 19-24.
- [30] 石岩,李军,秦洪果,等.桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J].*中国公路学报*,2021,34(2): 134-154.  
SHI Yan, LI Jun, QIN Hong-guo, et al. Review on seismic performance of bridge double-column bents[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 134-154.
- [31] 石岩,王东升,孙治国.基于位移的中等跨径减隔震桥梁抗震设计方法[J].*中国公路学报*,2016,29(2): 71-81.  
SHI Yan, WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo. Displacement-based seismic design method for medium span bridges with seismic isolation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(2): 71-81.
- [32] 项乃亮,崔侠侠,李建中.板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2016,44(12):1828-1834.  
XIANG Nai-liang, CUI Xia-xia, LI Jian-zhong. Experimental study on sliding friction behavior of laminated rubber bearing and its mechanical model[J]. *Journal of Tongji University. Natural Science*, 2016, 44(12): 1828-1834.
- [33] 周勇军,薛宇欣,高徐军,等.基于模态叠加法的公路简支梁桥动力放大系数研究[J].*交通运输工程学报*, 2023,23(6):146-155.  
ZHOU Yong-jun, XUE Yu-xin, GAO Xu-jun, et al. Research on dynamic amplification factor of highway simply supported girder bridge based on modal superposition method[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 146-155.
- [34] 石岩,王东升,韩建平.设置BRB桥梁排架墩基于位移抗震设计方法[J].*土木工程学报*,2017,50(7): 62-68,128.  
SHI Yan, WANG Dong-sheng, HAN Jian-ping. Displacement-based design method for bridge bents with buckling-restrained braces (BRBs)[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(7): 62-68, 128.
- [35] HWANG H,刘晶波.地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J].*土木工程学报*,2004,37(6): 47-51.  
HWANG H, LIU Jing-bo. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(6): 47-51.