

文章编号:1005-0930(2024)01-0223-015 中图分类号:U442.5 文献标识码:A  
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.01.015

# 近断层脉冲地震动下桥梁排架墩基于 保险丝的损伤控制研究

石岩, 张智超, 秦洪果, 裴银海

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为增强临近断层区域桥梁双柱式排架墩的横向抗震性能,基于结构保险丝理念,引入防屈曲支撑(Buckling-Restrained Brace, BRB)作为牺牲性保险丝进行抗震性能提升.针对近断层脉冲型地震动的特点,采用单一函数解析模型模拟一组以矩震级、断层距为主要参数的低频脉冲分量,并叠加强震动记录滤波后的高频分量作为研究输入地震动.以一座公路桥梁中的典型排架墩为原型,建立动力分析模型,通过非线性地震反应时程分析,系统研究了 BRB 布置形式(人字、单斜和肘节式)、矩震级、断层距和脉冲数对排架墩损伤控制效果及抗震性能的影响.结果表明,采用 BRB 作为保险丝可明显提升排架墩的抗震性能,显著降低其地震损伤;位移放大型肘节式 BRB 体系较传统单斜式和人字形的耗能能力更强,在小位移情况下尤为显著.

**关键词:**桥梁工程;近断层地震动;双柱式排架墩;防屈曲支撑;损伤控制;地震响应;抗震性能

桥梁双柱或多柱式排架墩是中小跨径公路桥梁和城市高架桥中应用最为广泛的下部结构形式,数次破坏性地震表明其具有较高的地震易损性<sup>[1-2]</sup>.例如,汶川地震强震区域内简支梁桥和连续梁桥双柱墩遭遇严重以上破坏的占比高达 20%和 40%<sup>[2-3]</sup>.因此,桥梁排架墩的抗震研究一直备受关注<sup>[4-5]</sup>.

目前,在框架结构中设置屈曲约束支撑(Buckling-Restrained Brace, BRB)来提高其抗震能力是比较常用的减震方式<sup>[6]</sup>.随着结构保险丝损伤控制理念的发展,如何将 BRB 作为牺牲性保险丝构件应用于桥梁排架墩进而提升整体的抗震性能受到了国内外学者的广泛重视<sup>[7-8]</sup>.El-Bahey 和 Bruneau<sup>[9-10]</sup>将 BRB 用于桥梁排架墩的抗震设计,通过试验及数值模拟相结合的方法验证了其在提升排架墩抗震性能方面的有效性.孙治国等<sup>[11]</sup>通过对 BRB 核心段长度的设计实现了排架墩渐进式破坏体系,表明 BRB 的率先屈服能有效控制排架墩的损伤.谢文和孙利民<sup>[12]</sup>将 BRB 引入双柱式高墩,并基于结构保险丝的设计理念提出了双柱式高墩地震损伤控制方法.石岩等<sup>[13-15]</sup>发展排架墩设置保险丝体系的弹塑性反应谱模型,建立基于性能的设计方法以及开展了不同 BRB 布置形式的参数研究.Dong

收稿日期:2022-03-28;修订日期:2022-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52268075, 51908265);兰州理工大学红柳优青项目(04-061810)

作者简介:石岩(1985—),男,博士,教授,硕士生导师.E-mail:skyk86@163.com

等<sup>[16]</sup>开发了一种自复位防屈曲支撑,该装置在提高桥墩强度的同时能显著降低结构的残余位移.目前对于 BRB 在排架墩上的应用研究多集中在损伤控制、设计方法和新型装置开发上,布置形式多为人字形<sup>[11,13-15]</sup>和单斜式<sup>[9-10,14-16]</sup>.然而, BRB 作为位移相关型金属屈服阻尼器,其耗能能力取决于支撑两端的相对位移,上述两种传统布置形式会抑制 BRB 的轴向变形,加上钢筋混凝土排架墩的变形能力通常较小,因此难以充分发挥 BRB 优越的耗能能力<sup>[15]</sup>.为此,如何在结构小位移情况下最大限度开发阻尼器作用成为不少学者的研究重点<sup>[17]</sup>.

针对传统阻尼器布置的缺点,Constantinou 等<sup>[18]</sup>提出了具有位移放大效应的肘节式阻尼器损伤控制体系,Hwang 等<sup>[19]</sup>采用肘节式和单斜式 BRB 对 3 层框架结构进行抗震设计,振动台试验表明肘节式 BRB 在结构地震反应损伤控制方面更为有效.随后 Hwang 等<sup>[20]</sup>进一步研究,提出了考虑阻尼器两端相对变形的肘节式支撑设计公式.然而,目前肘节式 BRB 损伤控制体系主要应用于建筑结构,在桥梁领域研究相对较少.

对于具有长周期、短持时、高幅值的近断层脉冲型地震动,结构的地震响应可能更加剧烈<sup>[21-22]</sup>,因此研究结构在其作用下的抗震问题十分必要.目前近断层脉冲型地震动记录相对有限,脉冲型函数多被用于近断层地震动低频分量的模拟,来满足工程设计人员的需求<sup>[23]</sup>.同时已有研究表明<sup>[24-25]</sup>,近断层地震动高频分量对结构的响应不容忽视,结合时频滤波技术,将强震动记录滤波处理后的高频分量与低频脉冲分量进行叠加能更好匹配近断层脉冲型地震动的真实情况.

针对近断层脉冲型地震动的特征,基于现有理论合成了一组近断层脉冲型地震动,后建立一组弯曲破坏排架墩动力分析模型,通过 Pushover 分析及非线性时程分析,系统研究了 BRB 布置形式、矩震级、断层距和脉冲数对桥梁排架墩地震响应和损伤控制效果的影响.

## 1 近断层脉冲型地震动模拟

虽然目前实际记录到了一定数量的近断层脉冲地震动数据,但在很多情况下依旧无法满足工程设计的要求;另外,强震动记录因地震机理的复杂性和随机性,导致地震动特性差异巨大,不便开展参数研究;因此,通过脉冲型函数来模拟近断层地震动在研究中较多采用.滑冲效应和方向性效应是近断层脉冲型地震动最显著的两种特征<sup>[21,26-27]</sup>,前者主要表现为单向速度脉冲,后者则为双向往复形式.以向前方向性效应为研究对象,通过模拟低频速度脉冲并叠加高频分量得到近断层脉冲型地震动记录,用于非线性地震反应时程分析研究.

### 1.1 低频脉冲模拟

根据函数表达式不同,脉冲型函数模型可分为分段函数解析模型<sup>[28]</sup>和单一函数解析模型<sup>[29-30]</sup>.考虑到分段函数解析模型不具连续性,不适用于广泛的参数研究,采用 Agrawal 和 He<sup>[30]</sup>提出的衰减正弦曲线单一函数解析模型进行研究,相较于其他单一函数模型,该模型具有更简单的时域表达式和频域对应函数,只需要调整衰减因子这一变量便可实现具有多个速度脉冲峰值地震动的模拟.单一函数解析模型中的地震动速度和加速度时程表达式为

$$\dot{u}_g = se^{-\zeta_p \omega_p t} \sin(\omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2} t) \quad (1)$$

$$\ddot{u}_g = se^{-\zeta_p \omega_p t} \left[ -\zeta_p \omega_p \sin(\omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2} t) + \omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2} \cos(\omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2} t) \right] \quad (2)$$

式中: $\zeta_p$  为正弦曲线的衰减因子,主要控制地震动的脉冲数<sup>[31]</sup>,脉冲数通过峰值地面速度与峰值地面加速度的比值确定<sup>[32]</sup>,当 $\zeta_p$ 取10%、20%和30%时,分别可模拟1、2和3次速度脉冲; $\omega_p$ 为正弦曲线的频率; $s$ 为速度脉冲的初始振幅; $t$ 为时间,脉冲持时为8s。矩震级 $M_w$ 范围控制在6~7.5,增量为0.3;断层距 $R$ 范围控制在2~7km,增量为1km。

近断层地震动的速度脉冲周期 $T_p$ 和峰值地面速度 $V_p$ 与矩震级和断层距的关系如下<sup>[33]</sup>

$$\ln(V_p) = -2.31 + 1.15M_w - 0.5\ln(R) \quad (3)$$

$$\log_{10}(T_p) = -2.5 + 0.425M_w \quad (4)$$

表1所示为选定矩震级和断层距下36条模拟近断层地震动速度脉冲周期 $T_p$ 和峰值地面速度 $V_p$ 的计算值。

表1 模拟近断层地震动的计算参数

Table 1 Calculation parameters of simulated near fault ground motions

$M_w$	峰值速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )						速度脉冲周期/s					
	2km	3km	4km	5km	6km	7km	2km	3km	4km	5km	6km	7km
6.0	70	57	49	44	40	37	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
6.3	98	80	69	62	57	53	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
6.6	139	113	98	88	80	74	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
6.9	196	160	139	124	113	105	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
7.2	277	226	196	175	160	148	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63
7.5	391	319	276	247	226	209	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87

为建立近断层地震动的速度脉冲周期 $T_p$ 和峰值地面速度 $V_p$ 与模拟地震动速度及加速度时程之间的对应关系,首先要确定正弦曲线的频率 $\omega_p$ 和初始振幅 $s$ ,通过式(5)计算出正弦曲线的频率 $\omega_p$ ,建立速度脉冲周期 $T_p$ 与函数解析模型之间的关系

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p \sqrt{1 - \zeta_p^2}} \quad (5)$$

令式(2)为0,求出峰值速度出现时间 $t_p$ ;再将峰值地面速度 $V_p$ 引入式(1)求出初始振幅 $s$ ,化简等式如下

$$t_p = \frac{\tan^{-1} \sqrt{1/\zeta_p^2 - 1}}{\omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2}} \quad (6)$$

$$s = V_p / [e^{-\zeta_p \omega_p t_p} \sin(\omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2} t_p)] \quad (7)$$

设置时间步长为0.005s,至此得到近断层脉冲型函数的所有参数。以 $M_w = 6.0, R = 2\text{km}$ 为例,其地震动速度时程和加速度时程如图1所示,随着衰减因子的增大模拟地震动脉冲数减小,但其初始加速度幅值更高。图2所示为矩震级和断层距对脉冲加速度时程的影响,可以看出断层距对脉冲幅值有影响,矩震级除了控制脉冲幅值,还对脉冲周期有影响,这些都将直接影响结构的地震响应。

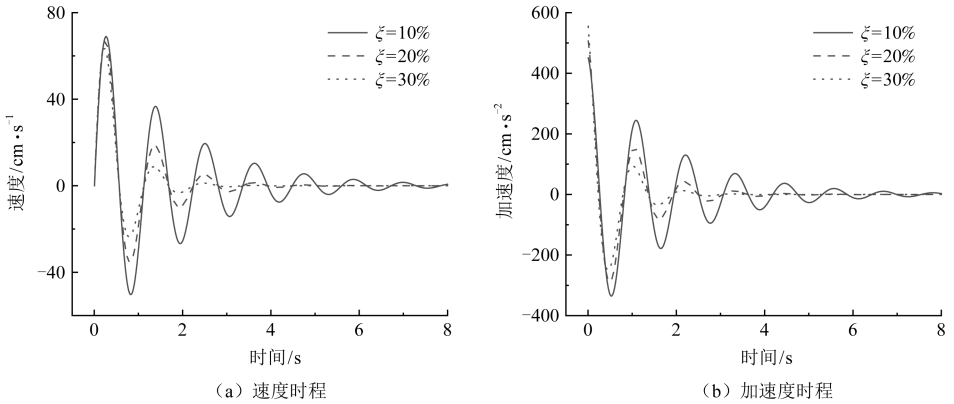


图1 衰减因子对模拟地震动的影响  
Fig.1 Effect of  $\zeta_p$  on simulated ground motion

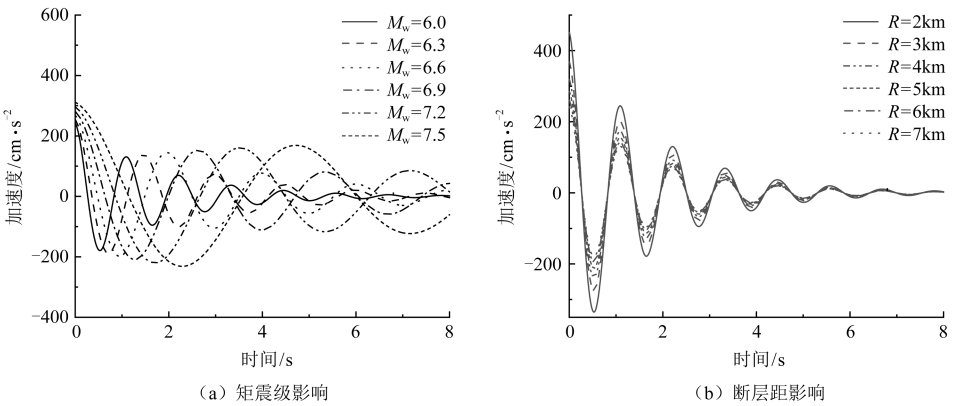


图2 矩震级和断层距对模拟地震动的影响  
Fig.2 Effect of  $M_w$  and  $R$  on simulated ground motion

## 1.2 高频分量选取及叠加方法

为兼顾脉冲型地震动高频特征及低频脉冲对结构响应的影响,参考李帅等<sup>[25]</sup>提出的“分解-叠加”法进行近断层地震动合成,即将强震动记录滤波处理后的高频分量与等效脉冲模型合成的低频分量进行叠加。根据 Baker 等<sup>[34]</sup>为美国太平洋地震工程中心 (PEER) 交通设施抗震研究提供的地震动记录数据库,在确保滤波后无脉冲并尽可能满足断层距、矩震级丰富性的前提下,选取了 10 条具有向前方向性效应的近断层脉冲型地震动记录,地震动信息见表 2。滤波截止频率参考文献<sup>[24]</sup>取 1.0Hz,并采用 Butterworth 滤波器进行滤波处理。图 3 所示为 GM.06 地震动滤波前后加速度、速度时程对比,可见所采用方法可以较好地滤出地震动的低频脉冲部分。

目前,国内外对地震动高、低频分量进行叠加主要采用加速度峰值时刻对应叠加<sup>[24]</sup>和速度峰值时刻对应叠加<sup>[25]</sup>两种。该研究模拟的地震动断层距为 2~7km,满足文献<sup>[24]</sup>提出的近断层传播距离短,可忽略不同频率成分传播速度差异的假设,故选择第一种方

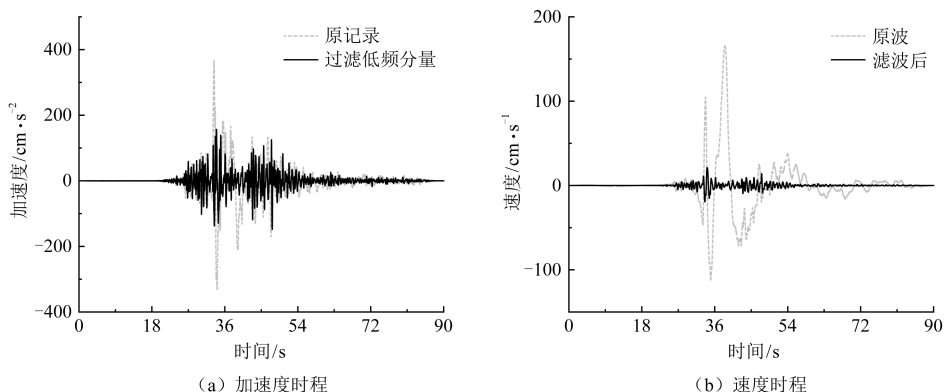


图3 过滤低频脉冲的时程曲线(GM.06)

Fig.3 Time history curve of filtered low-frequency pulse of GM.06 ground motion

法,将生成的低频脉冲分量和滤波后的高频分量进行叠加,共合成 360 条近断层脉冲型地震动用于后续研究,其中合成地震动的加速度时程如图 4 所示。

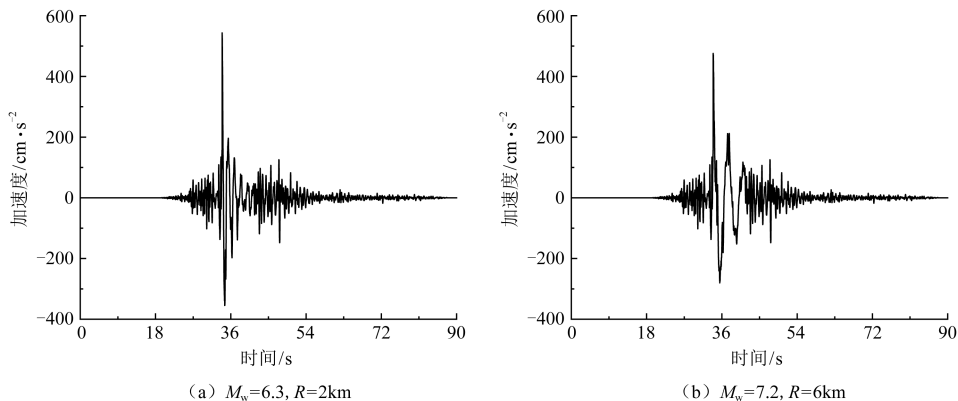


图4 合成地震动加速度时程曲线(GM.06)

Fig.4 Acceleration time history curve of synthetic ground motion(GM.06)

表2 选定的地震动信息

Table 2 Information on selected earthquake records

编号	地震事件	年份	$R/km$	$M_w$	台站和分量
GM.01	Imperial Valley-06	1979	7.31	6.53	EC County Center FF-SN
GM.02	Imperial Valley-06	1979	0.07	6.53	ECMeloland Overpass FF-SN
GM.03	Landers	1992	23.62	7.28	Yermo Fire Station-SN
GM.04	Northridge-01	1994	5.48	6.69	Newhall-W Pico Canyon Rd-SN
GM.05	Kocaeli, 土耳其	1999	10.92	7.51	Gebze-SN
GM.06	Chi-Chi, 台湾	1999	0.66	7.62	TCU052-SN
GM.07	Chi-Chi, 台湾	1999	5.30	7.62	TCU054-SN
GM.08	Chi-Chi, 台湾	1999	5.18	7.62	TCU082-SN
GM.09	Chi-Chi, 台湾	1999	7.00	7.62	TCU087-SN
GM.10	Chi-Chi, 台湾	1999	6.10	7.62	TCU103-SN

## 2 基于保险丝的排架墩抗震性能提升方法

### 2.1 BRB 布置形式

基于保险丝的设计理念,在排架墩设计中加入防屈曲支撑,采用人字形、单斜式和肘节式 3 种不同的 BRB 布置形式来提高其抗震性能,如图 5 所示, $H$  表示墩高, $W$  为排架墩的墩间净距, $D$  为桥墩的截面深度, $L_{RC}$  为 BRB 的核心段长度, $\theta$  为 BRB 与地面的水平夹角, $i, j$  分别为确定肘节式连接点位置的参数.由于 BRB 与盖梁(或墩脚)连接点位置不同,不同布置形式(单斜、人字、肘节)对应不同的位移放大系数  $f$ ,设置 BRB 排架墩的位移放大系数  $f$  定义如下

$$f = \frac{v}{u} \quad (8)$$

式中: $v$  为 BRB 的轴向位移; $u$  为排架墩的水平位移.对于人字形和单斜式等传统布置形式,其  $f$  值可根据水平夹角  $\theta$  简单计算,肘节式具有位移放大效应,其位移放大系数可根据式(9)确定<sup>[15]</sup>

$$f = \frac{1}{(i/j + 1 - 1/j) \sqrt{1 + (j/i)^2 a^2}} \quad (9)$$

式中: $a = H/W$ .

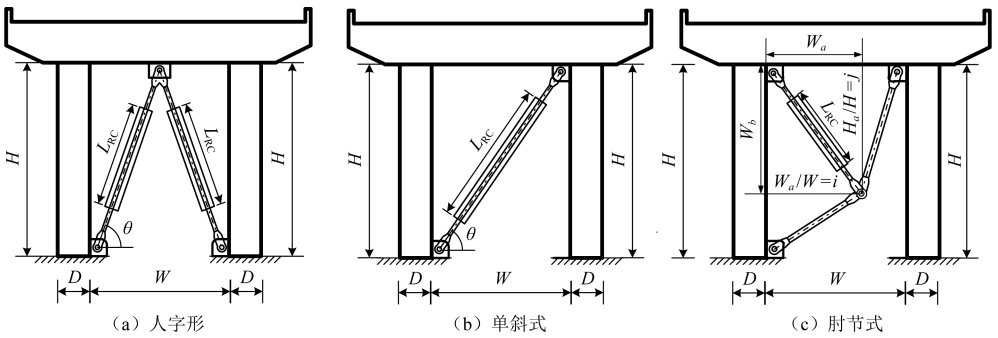


图 5 设置 BRB 的排架墩体系

Fig.5 Bridge bents retrofitting with BRB

### 2.2 设计案例及动力分析模型

以某简支梁桥中的典型排架墩作为设计案例,其墩高为 7m,剪跨比为 2.7.桥墩墩身为边长 1.3m 的矩形截面,墩柱净距 5.6m,纵向配筋率为 1.02%,盖梁为 1.6m×1.9m 的矩形截面;桥墩和盖梁都采用 HRB335 钢筋、C30 混凝土,其立面图、截面尺寸及配筋情况如图 6 所示.基于 OpenSees 地震分析平台建立排架墩动力分析模型.为简化模型,分析时未考虑支座的柔性,假设上部结构与桥墩系刚性连接<sup>[15,35]</sup>,桥梁上部结构简化为集中质量作用在排架墩的顶部.桥墩及盖梁采用弹塑性纤维梁柱单元模拟;防屈曲支撑采用 steel02 材料的 twonodelink 单元模拟;肘节式连杆采用弹性梁柱单元模拟,并赋予其极大的刚度以确保应变集中在保险丝(BRB)构件上;连接构件与桥墩的等效刚臂采用 equalDOF 命令实现.排架墩模型的阻尼比取 5%,并采用瑞利阻尼.

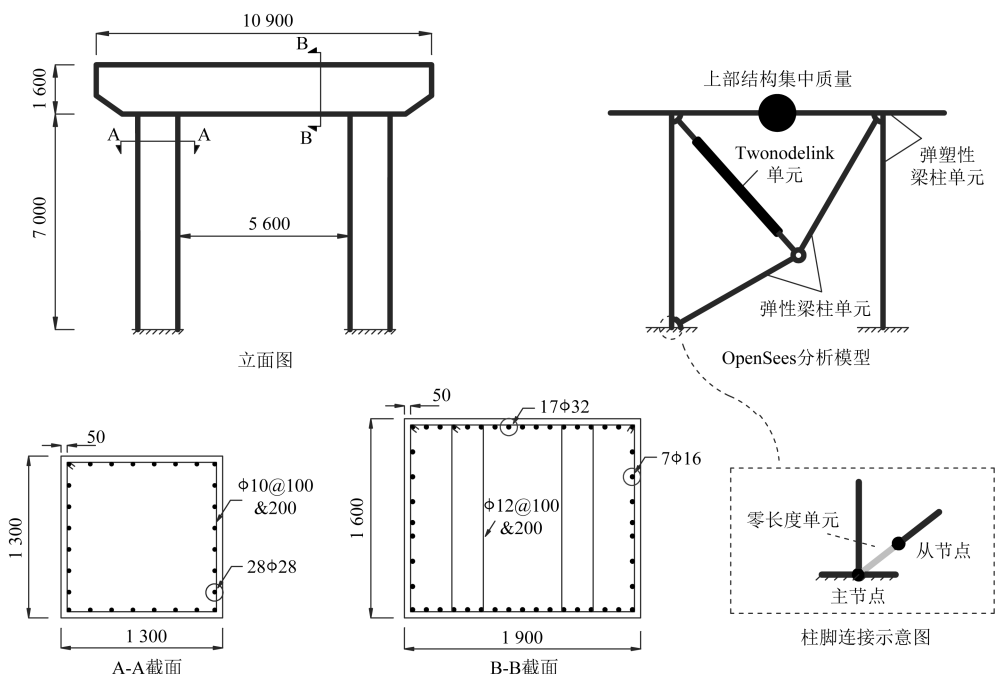


图6 案例排架墩及数值模型(单位:mm)

Fig.6 The selected two-column bent and the analysis model(unit:mm)

### 2.3 保险丝(BRB)设计及参数

为达到主体结构损伤控制效果,对保险丝构件应严格进行参数设计.由于保险丝构件与排架墩并联,两者水平位移值相同,故保险丝性能参数可通过基于位移的设计方法确定<sup>[14]</sup>.该案例中BRB作为保险丝构件应先于排架墩屈服以消耗地震能量,并保证桥墩不会发生较大的位移,以达到损伤控制的效果;同时当桥墩接近达到极限位移时,BRB不能先于其失效,以保证结构整体的安全性.基于上述设计原则,在对保险丝进行参数设计之前应首先得到主体结构的抗震性能参数.

基于OpenSees平台对未设置BRB的排架墩(简称“裸墩”)进行Pushover分析,得到其抗震性能参数,如图7所示,裸墩的屈服位移 $d_y = 1.9\text{cm}$ ,极限位移 $d_u = 11.8\text{cm}$ .保险丝构件参数采用“等强度、刚度”设计原则,即3种排架墩损伤控制体系的BRB轴向力学性能相同,以便分析布置形式对排架墩抗震性能提升的效果差异.考虑到位移放大型肘节式BRB损伤控制体系较传统人字形和单斜

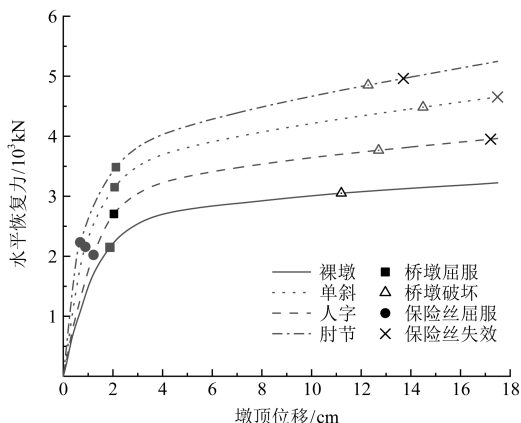


图7 案例排架墩Pushover分析对比

Fig.7 Comparison of bare bent and retrofitted bent by pushover analysis

式更易损坏(同一水平位移下,肘节式 BRB 体系轴向变形更大),设计案例中所有 BRB 均与肘节式 BRB 体系设计参数保持统一.包括排架墩参数和 BRB 设计参数在内的模型相关信息见表 3.值得注意的是,该设计案例为弯曲破坏模型,当排架墩设计为剪切或弯剪耦合破坏时,为避免剪切破坏的发生,BRB 性能参数的设计要更为严格.

表 3 模型基本信息和 BRB 设计参数

Table 3 Basic information of bent and design results of BRB

项目	排架墩		肘节式 BRB 参数	
	参数	取值	参数	取值
参数与取值	高度 $H$	7.0m	位移放大系数 $f$	1.0
	柱间净距 $D$	5.6m	坐标参数 $i, j$	0.7, 0.75
	$a = H/D$	1.25	钢芯屈服应力	235MPa
	屈服位移 $d_y$	0.019m	BRB 核心段长度 $L_{RC}$	4.711m
	极限位移 $d_u$	0.118m	BRB 屈服强度 $F_{by}$	1 140kN
	屈服强度	2 153kN	BRB 初始刚度 $K_1$	$2.06 \times 10^5$ kN/m

对 3 种 BRB 布置形式的排架墩进行 Pushover 分析得到其水平恢复力曲线(图 7),与裸墩恢复力曲线进行对比,可以看出设置 BRB 能显著提高排架墩的强度和刚度,3 种布置形式的 BRB 均先于主体结构发生屈服,后于主体结构失效.在满足保险丝设计要求的情况下,由于位移放大效应的存在,相同水平位移下肘节式 BRB 排架墩较传统人字形和单斜式具有更大的侧向抗力,抗震性能提升效果更为显著.

### 3 地震响应及减震效果影响因素分析

为探究近断层脉冲作用下设置 BRB 排架墩的地震响应及损伤控制效果,以近断层脉冲型合成地震动为输入,通过非线性动力时程分析研究排架墩的峰值位移、震后残余位移及 BRB 轴向峰值应变等参数随近断层地震动矩震级、断层距、脉冲数和 BRB 布置形式的变化情况.

图 8 所示为排架墩的峰值位移、残余位移和 BRB 轴向峰值应变在两种不同断层距地震动下随矩震级的变化曲线,可以发现:(1)相同断层距地震动下,裸墩和设置 BRB 排架墩的峰值位移、残余位移和 BRB 轴向峰值应变均随近断层地震动矩震级的增大而增大,并且三者的增长速率也基本呈逐步增大趋势,这主要是因为随矩震级的增大近断层地震动的低频脉冲周期和幅值也逐渐增大,脉冲幅值将直接影响地震响应,脉冲周期则通过控制结构屈服水平之上惯性力的作用时长来影响地震响应;(2)相同矩震级地震动下,设置 BRB 排架墩的峰值位移和残余位移相较于裸墩显著减小,表明 BRB 可以有效控制排架墩的地震响应,肘节式 BRB 体系的控制效果最好,人字形和单斜式 BRB 体系分别在峰值位移和残余位移控制上效果最差;同等条件下的肘节式 BRB 体系变形效率最高(轴向峰值应变最大),其次为单斜和人字形,这主要与肘节式体系的位移放大效应有关;(3)相同矩震级地震动下,裸墩和设置 BRB 排架墩的结构响应随地震动断层距的增大而减小,并且断层距越小设置 BRB 排架墩的峰值位移和残余位移与裸墩的差值越大,即断层距越小 BRB 减震效果越好.



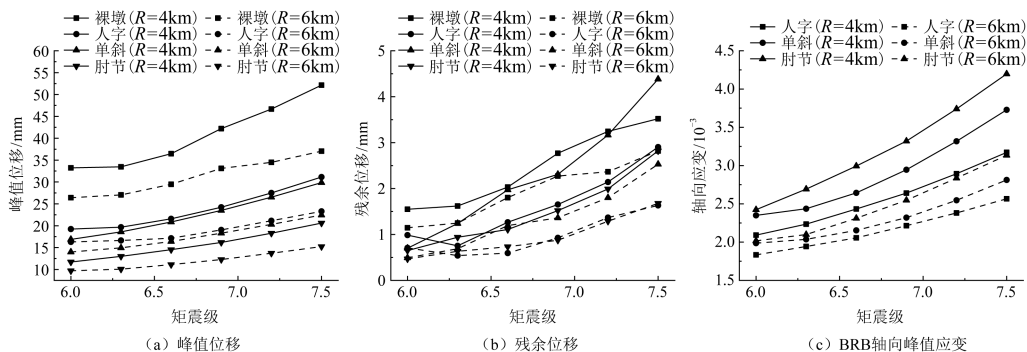


图8 地震响应随矩震级的变化曲线

Fig.8 Variation of seismic response with  $M_w$ 

图9所示为排架墩的峰值位移、残余位移和BRB轴向峰值应变在两种不同矩震级地震动下随断层距的变化曲线,可以发现:(1)相同矩震级地震动下,裸墩和设置BRB排架墩的峰值位移、残余位移和BRB轴向峰值应变均随近断层地震动断层距的增大而减小,并逐渐趋于水平,这主要是因为近断层地震动的低频脉冲幅值随断层距的增大而减小;与矩震级不同,断层距对低频脉冲周期无影响,因此图9所示的曲线相较于图8的更为平滑;(2)相同断层距地震动下,设置BRB排架墩的峰值位移和残余位移相较于裸墩显著减小;同等条件下人字形和单斜式BRB体系分别在峰值位移和残余位移控制上效果最差,肘节式BRB体系变形效率最高;(3)相同断层距地震动下,裸墩和设置BRB排架墩的结构响应随地震动矩震级的增大而增大,并且矩震级越大设置BRB排架墩的峰值位移和残余位移与裸墩的差值越大,即矩震级越大BRB减震效果越好。

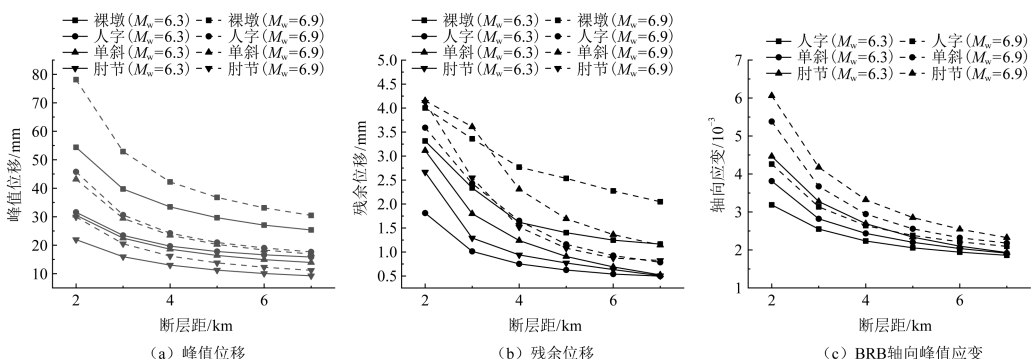


图9 地震响应随断层距的变化曲线

Fig.9 Variation of seismic response with  $R$ 

为进一步探讨近断层地震动的脉冲数对桥梁排架墩地震响应的影响,绘制了矩震级7.5、断层距7km时不同脉冲数地震动下排架墩的峰值位移、残余位移和BRB轴向峰值应变变化曲线(图10),可以看出,随着脉冲数的增加裸墩和设置BRB排架墩的地震响应均呈下降趋势,3次脉冲对应地震响应最小,单次脉冲则最大,分析认为单次脉冲虽不具备

多次往复脉冲效果,但其具有更大的脉冲幅值,而脉冲幅值对排架墩地震响应影响较大;同时地震动脉冲数的增加弱化了肘节式 BRB 体系变形能力的优势,例如单次脉冲近断层地震动作用下,肘节式 BRB 体系的变形效率分别为人字形和单斜式的 128%和 113%,而在 3 次脉冲下分别下降了 15%和 7%.

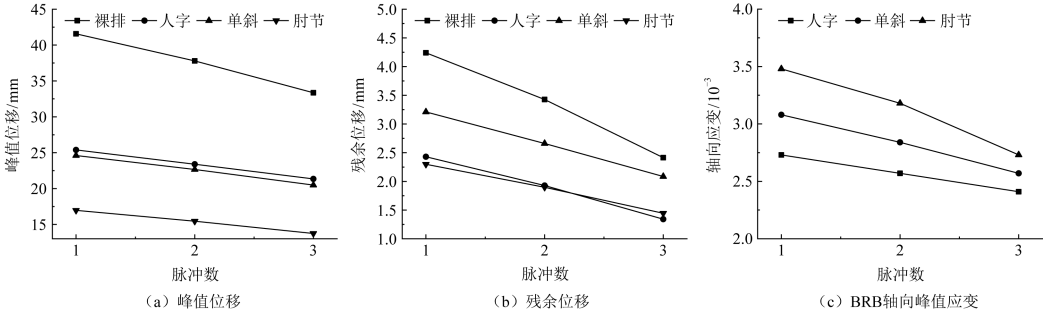


图 10 地震响应随脉冲数的变化曲线

Fig.10 Variation of seismic response with pulse numbers

为更好地对比不同 BRB 布置形式排架墩的损伤控制效果,以位移延性系数  $\mu_d$  为损伤指标,根据文献[36]确定排架墩的不同损伤状态,后对矩震级 6.0~7.5,断层距 2~7km,衰减因子取 10%的 360 条合成地震动下案例排架墩进行损伤状况占比统计,统计结果如图 11 所示.其中裸墩有 89%处于中等以上损伤状态,严重损伤占比 57%;设置人字形和单斜式 BRB 体系的排架墩损伤相对得到控制,无损伤占比提升了 30%以上,中等以上损伤状态占比降低到 50%;相较传统布置形式,肘节式 BRB 体系损伤控制效果进一步提升,无损伤占比高达 70%,且未出现完全损伤状态.同时统计了 360 条地震动下 3 种 BRB 布置形式排架墩减震率的平均值,减震率定义为排架墩地震响应峰值和设置 BRB 排架墩的地震响应峰值差与排架墩地震响应峰值之比,其中设置肘节式 BRB 体系的排架墩减震率为 62%、单斜式为 44.7%、人字形为 40.9%.

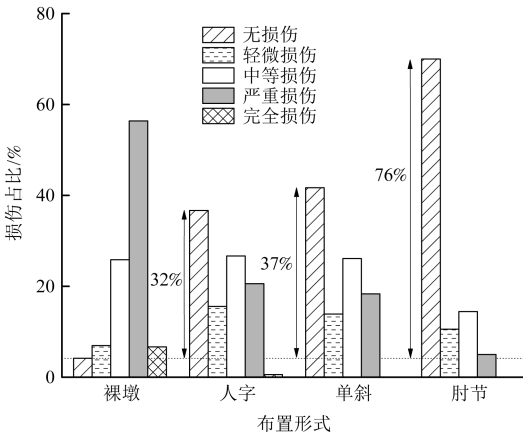


图 11 案例排架墩的损伤占比统计

Fig.11 Damage probability of bents

通过大量的统计分析不难发现,设置 BRB 的排架墩具有良好的抗震性能,可有效控制地震损伤,其中位移放大肘节式 BRB 体系的抗震效果最显著.

统计分析结构响应峰值能够宏观地对比不同 BRB 布置形式的抗震效果,但仅凭单一数据不能清晰掌握 BRB 排架墩的反应细节及构件工作情况.图 12(a)所示为特定地震动 ( $M_w = 6.6, R = 6\text{km}$ 、叠加 GM.07 高频分量)下案例排架墩的位移时程曲线,可以看出,裸墩和传统 BRB 布置形式的排架墩均经历了塑性变形,而设置肘节式 BRB 体系的排架墩始终保持

在弹性范围,不论是从峰值位移还是残余位移角度对比,肘节式 BRB 体系的抗震性能都优于人字形和单斜式.为进一步说明肘节式 BRB 体系的优势,从保险丝构件耗能角度进行对比,图 12(b)所示为肘节式和单斜式 BRB 体系的滞回曲线对比,从滞回环面积可以看出两者消耗的能量是基本相等的,但单斜式 BRB 排架墩的峰值位移却比肘节式高 37.4%,故可以认为肘节式 BRB 体系在小位移下具有更强的耗能能力.

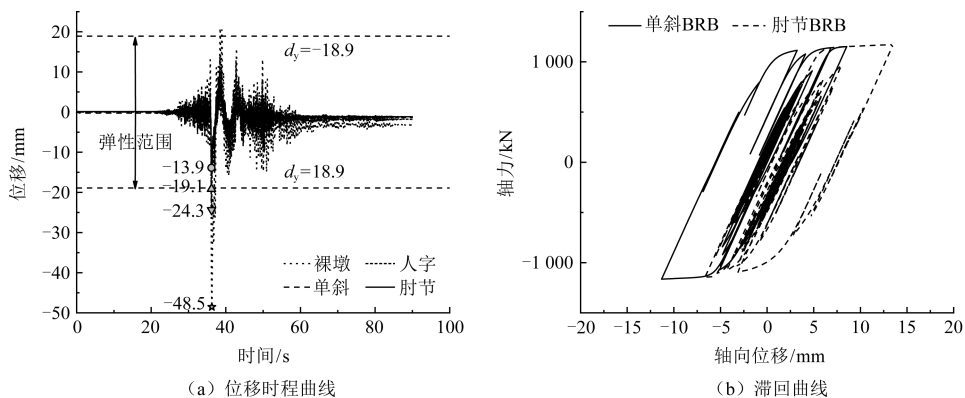


图 12 案例排架墩抗震性能对比

Fig.12 Seismic performance comparison of bents

值得说明的是,图 12(a)所示的位移时程曲线呈现出丰富的高频分量,主要是由于选用案例的自振周期较小,裸墩的自振周期为 0.42s,设置 BRB 后其自振周期进一步降低.为进一步说明该问题,输入 GM.07 强震动记录进行时程分析,从其位移时程曲线(图 13(a))可以看出,强震动记录下排架墩的位移时程曲线与合成地震动下类似,其高频分量依旧显著,说明对于此类短周期结构,地震动高频分量的影响不可忽略,进一步说明地震动合成时叠加高频成分的重要性.另外,图 13(b)显示的 BRB 滞回耗能曲线也说明肘节式 BRB 体系的损伤控制效果最好,小位移情况下耗能能力更强,与上述的合成地震动结果一致.

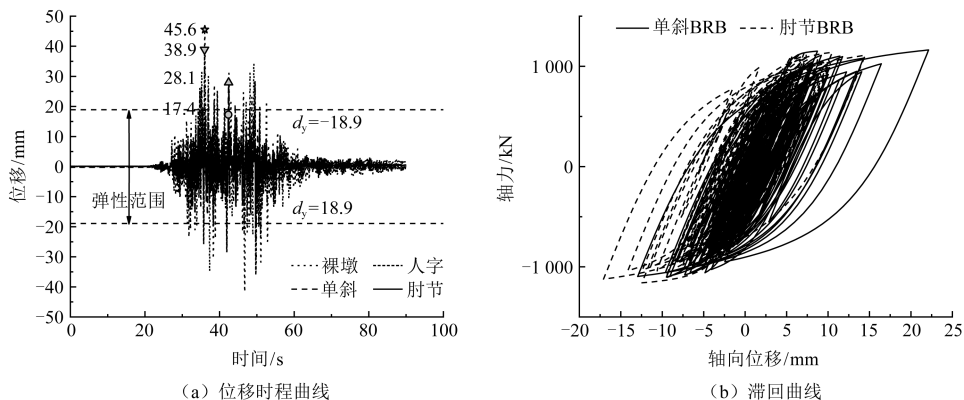


图 13 GM.07 地震动下排架墩抗震性能对比

Fig.13 Seismic performance comparison of bents under GM.07 ground motion

## 4 结论

基于结构保险丝的抗震设计理念,将 BRB 作为耗能构件引入桥梁排架墩来提高其横向抗震性能,采用低频叠加高频的方法合成了考虑不同矩震级和断层距等特征的近断层脉冲型地震动,通过非线性动力分析获得了裸墩和设置肘节式、单斜形和人字形 BRB 体系排架墩的地震响应,探讨了 BRB 布置形式和近断层地震动矩震级、断层距和脉冲数等特征对排架墩抗震性能的影响,得出主要结论如下:

(1) 采用 BRB 作为保险丝可以显著提升排架墩的抗震性能,降低其地震损伤.以位移延性系数为损伤指标,采用传统人字形和单斜式 BRB 布置的排架墩无损伤占比相比较裸墩提升了 30% 以上,中等以上损伤占比降低 40% 左右;肘节式 BRB 排架墩的损伤控制效果最为显著,无损伤占比可达 70%;

(2) 采用等强度和刚度的 BRB 对排架墩进行抗震设计,不同布置形式导致抗震性能差异.位移放大型肘节式 BRB 体系较传统单斜式和人字形的耗能能力更强,尤其在小位移情况下;

(3) 裸墩和 BRB 排架墩的地震响应随近断层地震动矩震级的增大、断层距和脉冲数的减小而增大;矩震级越大、断层距越小设置 BRB 排架墩的体系减隔震效果越好,地震动脉冲数的增加将弱化肘节式 BRB 体系变形能力的优势.

## 参考文献

- [1] 唐伟健,王东升,张蒙,等.桥梁震害的历史回顾(下)[J].地震工程与工程振动,2021,41(5):90-105  
Tang Weijian, Wang Dongsheng, Zhang Meng, et al. A review of the seismic damage history of bridges (II) [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 90-105
- [2] 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 Hongguo, et al. Review on seismic performance of bridge double-column bents [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 134-154
- [3] 陈乐生,庄卫林,赵河清,等.汶川地震公路震害调查:桥梁[M].北京:人民交通出版社,2012  
Chen Lesheng, Zhuang Weilin, Zhao Heqing, et al. Report on highways damage in the Wenchuan earthquake: Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2012
- [4] 孙治国,赵泰儀,石岩,等.摇摆-自复位桥墩抗震性能数值建模方法研究[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(6):1357-1369  
Sun Zhiguo, Zhao Taiyi, Shi Yan, et al. Research on numerical modeling method for rocking self-centering bridge piers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(6): 1357-1369
- [5] 陈亮,李建中.强震地面运动频谱特性对 RC 桥墩结构非线性地震反应的影响[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(5):749-757  
Chen Liang, Li Jianzhong. Effects of frequency content of earthquake ground motions on nonlinear seismic responses of RC bridge columns [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(5): 749-757
- [6] 韩强,董慧慧,王利辉,等.基于可更换构件的可恢复功能桥梁防震结构研究综述[J].中国公路学报,2021,34(9):215-230  
Han Qiang, Dong Huihui, Wang Lihui, et al. Review of seismic resilient bridge structures with replaceable members [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 215-230
- [7] 陈 X, Li C. Seismic assessment of tall pier bridges with double-column bents retrofitted with buckling restrained braces subjected to near-fault motions [J]. Engineering Structures, 2021, 226: 111390
- [8] 石岩,王东升,韩建平,等.桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J].地震工程与工程振动,2017,37(5):118-128

- Shi Yan, Wang Dongsheng, Han Jianping, et al. Application status of seismic isolation for bridges and its development tendency[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, 37(5): 118-128
- [ 9 ] El-bahey S, Bruneau M. Bridge piers with structural fuses and bi-steel columns. I: Experimental testing[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(1): 25-35
- [ 10 ] El-bahey S, Bruneau M. Bridge piers with structural fuses and bi-steel columns. II: Analytical investigation[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(1): 36-46
- [ 11 ] 孙治国, 华承俊, 石岩, 等. 利用 BRB 实现桥梁排架墩基于保险丝理念的抗震设计[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(22): 199-205
- Sun Zhiguo, Hua Chengjun, Shi Yan, et al. Seismic design of bridge bents with BRB as a structural fuse[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(22): 199-205
- [ 12 ] 谢文, 孙利民. 基于结构“保险丝”概念的双柱式高墩地震损伤控制研究[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(3): 420-428
- Xie Wen, Sun Limin. Investigation on seismic damage control of twin-column tall piers based on structural fuse concept[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(3): 420-428
- [ 13 ] 石岩, 张展宏, 韩建平, 等. 设置 BRB 的桥梁排架墩抗震性能参数分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 71-76
- Shi Yan, Zhang Zhanhong, Han Jianping, et al. Parametric analysis of seismic performance for bridge bents with buckling restrained braces (BRBs)[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 71-76
- [ 14 ] 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 Dongsheng, Han Jianping. Displacement-based design method for bridge bents with buckling restrained braces (BRBs)[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(7): 62-68+128
- [ 15 ] Shi Y, Zhong Z W, Qin H G, et al. Toggle buckling restrained brace systems and a corresponding design method for the seismic retrofit of bridge bents[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 110996
- [ 16 ] Dong HH, Du X L, Han Q, et al. Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers[J]. *Engineering Structures*, 2017, 148: 47-62
- [ 17 ] 赵桂峰, 马玉宏. 阻尼器响应放大技术研究与应用进展[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(6): 64-78
- Zhao Guifeng, Ma Yuhong. Research and application progress of damper response amplification technology[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(6): 64-78
- [ 18 ] Constantinou M C, Tsopelas P, Hammel W, et al. Toggle-brace-damper seismic energy dissipation systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(2): 105-112
- [ 19 ] Hwang J S, Huang Y N, Hung Y H. Analytical and experimental study of toggle-brace-damper systems[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(7): 1035-1043
- [ 20 ] Hwang J S, Huang Y N, Yi S L, et al. Design formulations for supplemental viscous dampers to building structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(1): 22-31
- [ 21 ] 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 Xiaoyu, Wang Dongsheng, Fu Jianyu, et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(8): 1-14+54
- [ 22 ] 贺秋梅, 李小军, 杨宇. 近断层速度脉冲型地震动作用基础隔震建筑位移反应分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(1): 1-13
- He Qiumei, Li Xiaojun, Yang Yu. Displacement response analysis of base-isolated buildings subjected to near-fault ground motions with velocity pulse[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(1): 1-13
- [ 23 ] 杨福剑, 王国新. 一种改进的近断层脉冲型地震动模拟方法[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(3): 489-500
- Yang Fujian, Wang Guoxin. An improved approach for near-fault pulse-like ground motion simulation[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2019, 14(3): 489-500
- [ 24 ] 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 Yuji, Yang Qingshan, Lu Mingqi. Simulation method of near-fault pulse type ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(1): 77-84+114

- [25] 李帅,张凡,颜晓伟,等.近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J].中国公路学报,2017,30(2):86-97+106  
Li Shuai,Zhang Fan,Yan Xiaowei,et al.Synthetic method for near-fault ground motions and its influence on seismic response of super-span cable-stayed bridge[J].China Journal of Highway Transportation,2017,30(2):86-97+106
- [26] 贾俊峰,杜修力,韩强.近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(1):1-12  
Jia Junfeng,Du Xiuli,Han Qiang,A state-of-the review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures[J].Journal of Building Structures,2015,36(1):1-12
- [27] 赵晓芬,温增平,陈波.近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究[J].地震学报,2018,40(5):673-688+690  
Zhao Xiaofen,Wen Zengping,Chen Bo.Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation[J].Acta Seismologica Sinica,2018,40(5):673-688+690
- [28] Alavi B,Krawinkler H.Effects of near-fault ground motions on frame structures[R].California;Blume Earthquake Engineering Center,2001
- [29] Mavroeidis G P,Papageorgiou A S.A mathematical representation of near-fault ground motions[J].Bulletin of the Seismological Society of America,2003,93(3):1099-1131
- [30] Agrawal A K,He W L.A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures[C].Engineering Mechanics Conference.American Society of Civil Engineers,2002
- [31] Dicleli M.Supplemental elastic stiffness to reduce isolator displacements for seismic-isolated bridges in near-fault zones[J].Engineering Structures,2007,29(5):763-775
- [32] He W L.Smart energy dissipation systems for protection of civil infrastructures from near-field earthquakes[D].New York;City University of New York,2003
- [33] Somerville P G.Development of an improved representation of near fault ground motions[C].SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data.Oakland;SUSMD,1998
- [34] 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;Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER),2011
- [35] Xiang N,Alam M S.Displacement-based seismic design of bridge bents retrofitted with various bracing devices and their seismic fragility assessment under near-fault and far-field ground motions[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,119:75-90
- [36] Hwang H,Liu J B,Chiu Y H.Seismic fragility analysis of highway bridges[R].Urbana;Mid-America Earthquake Center,2001

# Seismic Damage Control of Bridge Bents Retrofitted with Structural Fuse Under Near-fault Pulse-type Ground Motions

SHI Yan, ZHANG Zhichao, QIN Hongguo, PEI Yin Hai  
(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

## Abstract

Buckling restrained braces (BRBs) retrofitted to a double-column bridge bents as sacrificial components could enhance the lateral seismic performance of bridge near the fault area, based on the structural fuse concept. A single-function analytical model was used to simulate a group of low-frequency pulse components with moment magnitude and fault distance as the main parameters, according to the characteristics of near-fault pulse-type ground motions. The high-frequency components of strong motion record were obtained by time-frequency filtering and the low-frequency pulse components were superimposed to generate the input ground motion. The bents of an ordinary highway bridge were used as a reference for a dynamic analysis model and the effects of the BRB layout scheme (inverted-V, diagonal and toggle type), moment magnitude, fault distance, and the number of velocity pulses on the seismic performance of the bents were studied using a nonlinear time history analysis. The results show that installing BRBs can improve the seismic performance of bridge bents and reduce seismic damage. Furthermore, the energy dissipation capacity of toggle BRB systems is stronger than that of traditional inverted-V and diagonal BRB systems, particularly under small displacements.

**Keywords:** bridge engineering; near-fault ground motions; bridge bents; buckling-restrained braces; damage control; seismic response; seismic performance