

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.015

# 考虑行波效应下钢管混凝土系杆拱桥隔震研究

高忠虎<sup>1</sup>,吴忠铁<sup>1</sup>,狄生奎<sup>2</sup>,吴云<sup>1</sup>,王晓琴<sup>1</sup>

(1.西北民族大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730030;2.兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**利用有限元分析软件Midas/Civil建立下承式钢管混凝土拱桥非隔震和隔震两种模型,考虑纵桥向行波效应,分别在波速为100 m/s、500 m/s、2 000 m/s和纵向一致地震激励下,对比分析两种模型拱肋和桥墩的不同响应值,得出考虑不同波速的行波效应较复杂,隔震模型对不同波速的隔震效果均较好。

**关键词:**钢管混凝土拱桥;隔震;行波效应;地震响应;铅芯橡胶支座

**中图分类号:**U448.53

**文献标志码:**A

## 0 引言

近年来地震频发,结构抗震与隔震成为工程界研究的热点。拱桥因其具有美观、经济、受力合理等优点而成为常见的桥型之一。由于拱桥结构形式特殊,地震响应分析复杂<sup>[1]</sup>,同时受到场地条件、相干效应、行波效应等因素的影响<sup>[2]</sup>。传统结构采用抗震的思路<sup>[3]</sup>,增加了造价<sup>[4]</sup>,但抗震性能的提高与经济性往往不相匹配。近年来通过隔震研究,发现隔震是一种行之有效的办法<sup>[5]</sup>,在历次地震中均得到检验<sup>[6-7]</sup>。

目前关于拱桥抗震的研究较多,如狄生奎等<sup>[8]</sup>对系杆拱桥从不同方向进行地震激励,研究了不同约束的影响;李小珍等<sup>[9]</sup>通过人工合成非一致地震波,研究了相干、场地和波速等对连续梁拱桥动力响应的影响;白玲<sup>[10]</sup>采用多维输入地震波证明了对大跨度钢管混凝土桥抗震分析的合理性;Li等<sup>[11]</sup>在非一致地震激励下研究了一座钢管混凝土拱桥的动力响应,得出应重视多维地震与空间变异性的结论。对于拱桥考虑行波效应的隔震研究还很少,因此对其进行不同波速地震激励下的响应分析具有重要的意义。

## 1 有限元模型及动力特性分析

利用有限元软件Midas/Civil建立一座实际的下承式钢管混凝土系杆拱桥非隔震和隔震模型,该桥梁跨径为87 m,矢高为17 m,桥面宽为31 m,矢跨比为0.2,上下弦管采用1 000 mm×14 mm的钢管,拱肋钢管内填充C50微膨胀混凝土。拱肋、横撑、横梁、纵梁、桥墩等用梁单元模拟,吊杆用杆单元模拟,桥面板用板单元模拟,将非结构构件的质量采用等效简化处理,桥墩底部采用固定约束,隔震模型在桥墩顶部和盖梁连接处设置铅芯橡胶支座,通过Midas边界中的一般连接,特征值类型中选择铅芯橡胶支座隔震装置进行设置,铅芯橡胶隔震支座参数见表1,模型图见图1。X轴表示纵桥向(顺桥向),Y轴表示横桥向,Z轴表示竖向。

利用有限元软件动力特性分析功能,进行两种模型特征值分析<sup>[12-14]</sup>,得出非隔震模型基频为0.383 496 Hz,振型为拱肋横向侧倾,隔震模型基频为0.262 99 Hz,振型亦为拱肋横向侧倾。隔震模型基频减小率为38.3%。鉴于篇幅有限,其他频率和振型此处不再列出。

**收稿日期:**2022-09-30

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:51868067);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:31920210078);甘肃省建设厅科技攻关项目(编号:JK201910)

**作者简介:**高忠虎,男,硕士,副教授.E-mail:gzh@xbmu.edu.cn

表1 铅芯橡胶支座参数

支座平面尺寸/ (mm×mm)	铅芯屈服 力/kN	屈服前刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	水平等效刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
1 120×1 120	683	21.5	3.3	5.3

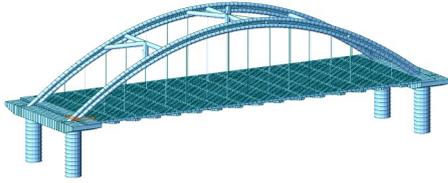


图1 有限元模型图

## 2 地震响应分析

### 2.1 地震波选取与输入

选用El centro、Northridge、Loma Prieta 3条地震波,桥梁所在地区抗震设防烈度为Ⅷ度,基本地震动加速度峰值为0.2g,考虑El地震作用,为了与规范反应谱相协调以及进行对比分析,对3条地震波分别进行了调幅,调幅系数分别取0.27、0.160 56、0.351 91,输入时间取前20 s,调整后的地震波见图2。地震波沿纵桥向输入,考虑行波效应,地震波传播速度分别选取100 m/s、500 m/s、2 000 m/s和无穷大。

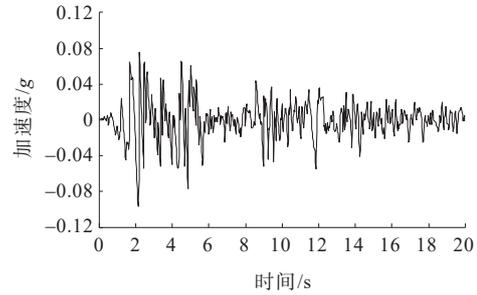
### 2.2 响应分析

考虑不同波速的地震作用,分析非隔震和隔震模型的拱肋和桥墩响应。主要分析拱肋的位移和加速度;拱肋和桥墩的内力响应等。

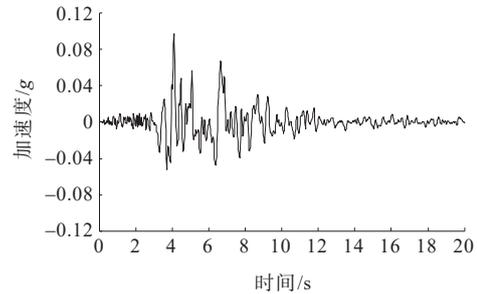
#### 2.2.1 拱肋的位移

表2列出3种地震波作用下考虑行波效应时两

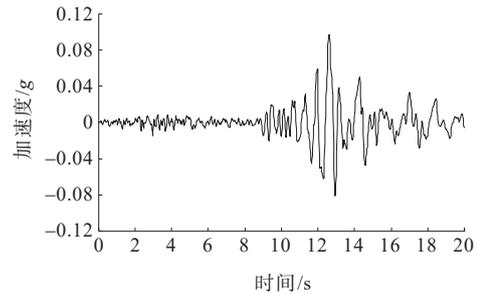
种模型拱顶和1/4拱肋最大位移值,图3~6为两种模型3种地震波作用下最大位移平均值对比图。



(a) El-centro波



(b) Northridge波



(c) Loma Prieta波

图2 调整后的地震波形图

表2 考虑行波效应时两种模型拱顶和1/4拱肋最大位移值

地震波	波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	1/4拱肋最大位移值/cm						拱顶最大位移值/cm					
		非隔震			隔震			非隔震			隔震		
		D <sub>X</sub>	D <sub>Y</sub>	D <sub>Z</sub>	D <sub>X</sub>	D <sub>Y</sub>	D <sub>Z</sub>	D <sub>X</sub>	D <sub>Y</sub>	D <sub>Z</sub>	D <sub>X</sub>	D <sub>Y</sub>	D <sub>Z</sub>
El-centro	100	5.63	0.16	2.01	6.23	0.00	0.29	5.56	0.04	0.23	6.22	0.00	0.02
	500	6.87	0.11	1.40	7.37	0.00	0.36	6.82	0.01	0.08	7.35	0.00	0.01
	2 000	7.12	0.13	1.82	7.44	0.00	0.38	7.06	0.01	0.15	7.42	0.00	0.01
	∞	1.66	0.13	1.82	6.12	0.00	0.40	1.53	0.01	0.15	6.07	0.00	0.01
Northridge	100	2.60	0.14	1.84	3.97	0.00	0.26	2.25	0.03	0.19	3.94	0.00	0.01
	500	4.09	0.11	1.77	5.00	0.00	0.44	3.80	0.01	0.12	4.96	0.00	0.01
	2 000	4.43	0.13	2.18	5.05	0.00	0.46	4.12	0.01	0.18	5.01	0.00	0.01
	∞	1.69	0.13	2.19	7.73	0.00	0.46	1.36	0.01	0.18	7.64	0.00	0.01
Loma Prieta	100	2.29	0.13	1.86	2.79	0.00	0.19	1.92	0.02	0.11	2.76	0.00	0.01
	500	2.19	0.17	1.88	3.53	0.00	0.28	3.52	0.01	0.08	3.50	0.00	0.01
	2 000	3.91	0.15	2.28	3.85	0.00	0.31	3.79	0.01	0.12	3.82	0.00	0.01
	∞	1.62	0.15	2.32	4.95	0.00	0.31	1.19	0.01	0.13	4.90	0.00	0.01

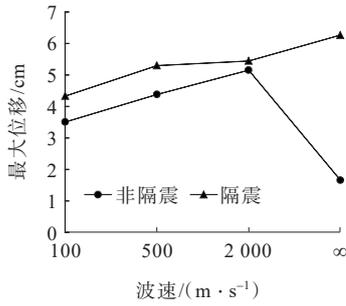


图 3 1/4 拱肋位移  $D_x$  对比图

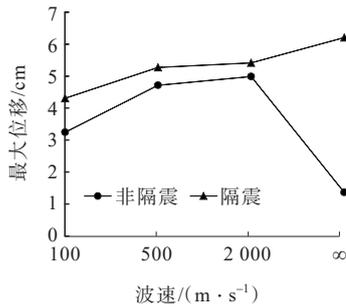


图 4 拱顶位移  $D_x$  对比图

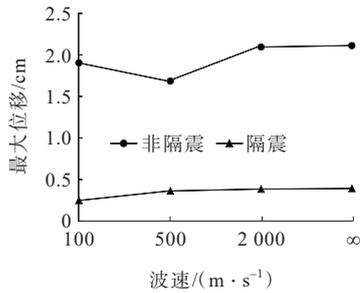


图 5 1/4 拱肋位移  $D_z$  对比图

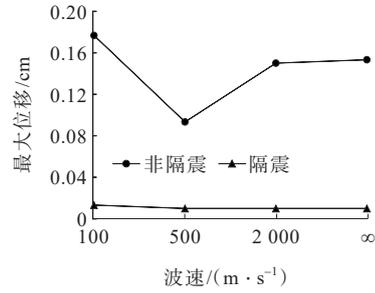


图 6 拱顶位移  $D_z$  对比图

由表 2 及图 3~6 可知:

在不同波速地震激励下,隔震模型拱肋纵向绝对最大位移均出现了增大现象,一致激励下时增大最为明显。隔震结构拱肋竖向位移很小,明显小于非隔震结构,波速对非隔震结构竖向位移的影响比隔震结构显著。

2.2.2 拱肋加速度

表 3 为 3 种地震波作用下考虑行波效应时两种模型拱顶和 1/4 拱肋最大绝对加速度值,图 7~12 为两种模型 3 种地震波作用下最大绝对加速度平均值对比图。

由表 3 及图 7~12 可知:

在不同波速地震激励下,隔震模型拱肋纵向最大绝对加速度小于非隔震模型;两种模型纵向和横向最大绝对加速度曲线走势基本一致,表现为上凸形;隔震结构拱肋竖向最大绝对加速度小于非隔震结构;波速对非隔震结构竖向最大绝对加速度的影

表 3 考虑行波效应时两种模型拱顶和 1/4 拱肋最大绝对加速度

地震波	波速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	1/4 拱肋最大绝对加速度/( $cm \cdot s^{-2}$ )						拱顶最大绝对加速度/( $cm \cdot s^{-2}$ )					
		非隔震			隔震			非隔震			隔震		
		$A_{AX}$	$A_{AY}$	$A_{AZ}$	$A_{AX}$	$A_{AY}$	$A_{AZ}$	$A_{AX}$	$A_{AY}$	$A_{AZ}$	$A_{AX}$	$A_{AY}$	$A_{AZ}$
El-centro	100	140.49	11.18	118.83	99.90	8.88	11.97	138.44	9.25	26.02	99.00	8.86	6.37
	500	170.45	12.10	113.21	100.18	9.44	7.27	163.31	8.75	16.42	100.26	9.45	6.75
	2 000	205.04	13.91	190.95	99.83	9.64	8.98	207.37	9.96	24.73	99.81	9.60	7.26
	$\infty$	131.68	7.67	191.50	21.08	0.08	7.66	131.54	2.30	24.76	20.26	0.10	0.60
Northridge	100	147.62	10.48	109.56	93.01	12.54	6.07	129.88	12.92	20.52	92.65	12.55	2.81
	500	170.76	14.14	119.31	84.25	12.58	4.71	165.26	12.03	17.69	84.19	12.58	2.88
	2 000	181.25	13.56	152.14	83.29	12.58	5.48	167.94	12.22	31.89	83.45	12.60	3.10
	$\infty$	139.96	8.45	152.43	23.50	0.06	6.11	124.53	2.42	29.84	23.15	0.03	0.30
Loma Prieta	100	144.67	14.82	111.05	94.24	13.59	7.67	131.47	13.77	10.90	94.13	13.55	3.15
	500	185.02	14.90	135.38	82.53	13.32	6.44	180.62	13.70	11.47	82.78	13.30	3.25
	2 000	185.44	18.60	182.00	84.06	13.16	6.46	188.89	13.76	20.30	84.39	13.13	3.33
	$\infty$	112.96	13.72	183.37	14.72	0.06	6.69	109.33	1.79	19.19	13.94	0.02	0.25

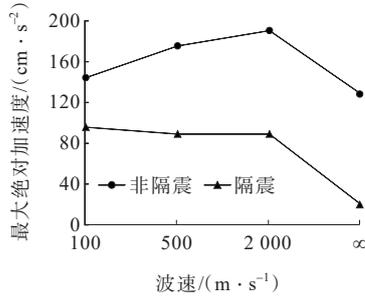


图7 1/4拱肋绝对加速度  $A_{AX}$  对比图

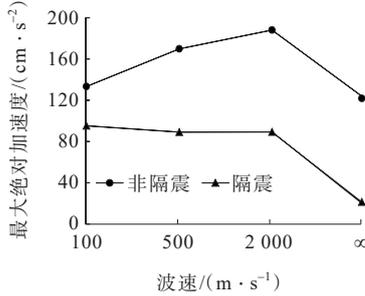


图8 拱顶绝对加速度  $A_{AX}$  对比图

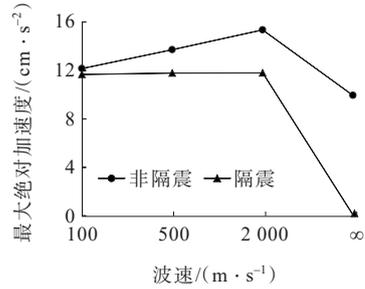


图9 1/4拱肋绝对加速度  $A_{AY}$  对比图

响比隔震结构显著;不同波速作用下隔震结构拱肋绝对加速度减小明显。

### 2.2.3 拱肋相对加速度

表4列出了3种地震波作用下考虑行波效应时

两种模型拱顶和1/4拱肋最大相对加速度值,图13~16为两种模型3种地震波作用下最大相对加速度平均值对比图。

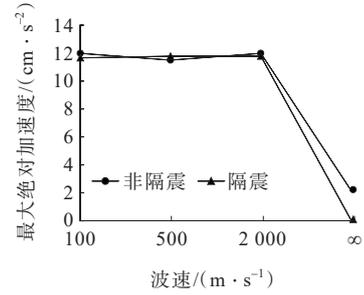


图10 拱顶绝对加速度  $A_{AY}$  对比图

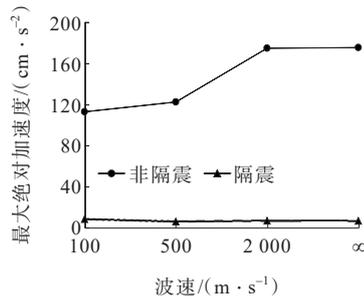


图11 1/4拱肋绝对加速度  $A_{AZ}$  对比图

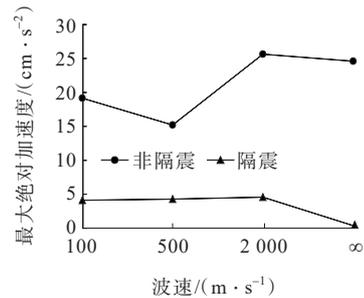


图12 拱顶绝对加速度  $A_{AZ}$  对比图

表4 考虑行波效应时两种模型拱顶和1/4拱肋最大相对加速度

地震波	波速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	1/4拱肋最大相对加速度/( $cm \cdot s^{-2}$ )						拱顶最大相对加速度/( $cm \cdot s^{-2}$ )					
		非隔震			隔震			非隔震			隔震		
		$R_{AX}$	$R_{AY}$	$R_{AZ}$	$R_{AX}$	$R_{AY}$	$R_{AZ}$	$R_{AX}$	$R_{AY}$	$R_{AZ}$	$R_{AX}$	$R_{AY}$	$R_{AZ}$
El-centro	100	110.08	7.49	116.81	13.01	0.13	7.95	104.56	2.22	20.69	11.95	0.16	1.50
	500	90.21	6.44	113.37	18.10	0.11	7.62	82.01	1.68	16.29	17.55	0.16	1.17
	2000	132.72	7.81	191.78	19.49	0.16	8.96	127.53	3.45	25.20	18.37	0.18	2.33
	$\infty$	204.23	7.67	191.50	84.55	0.08	7.66	200.41	2.30	24.76	84.70	0.10	0.60
Northridge	100	103.48	8.28	108.06	12.37	0.05	4.20	96.24	1.78	19.59	11.77	0.07	0.57
	500	104.66	6.74	116.64	22.82	0.05	5.60	96.48	1.35	15.72	22.47	0.06	0.69
	2000	138.65	8.41	149.63	23.32	0.06	6.23	123.36	2.69	30.06	23.01	0.07	0.73
	$\infty$	140.57	8.45	152.43	106.97	0.06	6.11	135.40	2.42	29.84	106.84	0.03	0.30
Loma Prieta	100	88.46	8.95	112.75	8.28	0.05	4.92	82.29	1.13	10.92	8.55	0.03	0.44
	500	93.70	10.20	133.22	13.92	0.05	6.02	86.94	0.99	10.73	13.23	0.03	0.45
	2000	111.87	13.68	182.27	14.61	0.06	6.58	108.03	1.82	19.09	13.92	0.05	0.55
	$\infty$	134.21	13.72	183.37	109.65	0.06	6.69	123.29	1.79	19.19	108.91	0.02	0.25

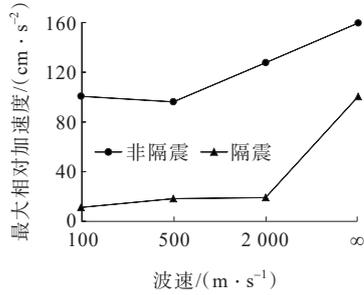


图13 1/4拱肋相对加速度 $R_{Ax}$ 对比图

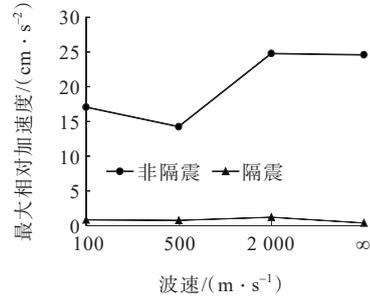


图16 拱顶相对加速度 $R_{Az}$ 对比图

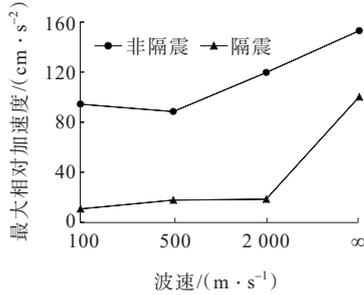


图14 拱顶相对加速度 $R_{Ax}$ 对比图

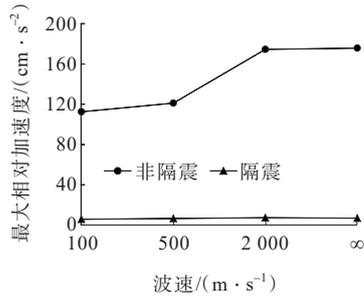


图15 1/4拱肋相对加速度 $R_{Az}$ 对比图

由表4及图13~16可得:在不同波速地震激励下,隔震模型拱肋纵向最大相对加速度小于非隔震模型;两种模型纵向最大相对加速度曲线走势基本一致,表现为下凹形;隔震结构拱肋竖向最大相对加速度小于非隔震结构;波速对非隔震结构竖向最大相对加速度的影响比隔震结构显著;不同波速作用下隔震结构拱肋相对加速度减小明显。

2.2.4 拱肋内力响应

表5列出了3种地震波作用下考虑行波效应时两种模型拱肋轴力、剪力、扭矩、弯矩值及减震率,图17为不同波速拱肋内力减震率对比图。

由表5及图17可知:在不同波速地震激励下,隔震模型拱肋内力减小明显;拱肋主要内力轴力、剪力 $F_z$ 、弯矩 $M_y$ 随波速变化曲线走势基本一致;轴力平均减震率达87.64%,剪力 $F_z$ 平均减震率达88.91%,弯矩 $M_y$ 平均减震率达86.65%;波速为100 m/s时,减震

表5 考虑行波效应地震作用下两种模型拱肋轴力、剪力、扭矩、弯矩比较

地震波	波速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	构件	轴力 $F_x$ / kN	减震 率/%	剪力 $F_y$ / kN	减震 率/%	剪力 $F_z$ / kN	减震 率/%	扭矩 $M_x$ / ( $kN \cdot m$ )	减震 率/%	弯矩 $M_y$ / ( $kN \cdot m$ )	减震 率/%	弯矩 $M_z$ / ( $kN \cdot m$ )	减震 率/%
El-centro	100	拱肋(非隔震)	7 108	95.2	6	100	1 319	91.7	5	100	4 470	92.0	55	100.0
		拱肋(隔震)	338		0		110		0		358		0	
	500	拱肋(非隔震)	3 185	86.3	4	100	617	85.9	3	100	2 008	84.8	39	97.4
		拱肋(隔震)	436		0		87		0		306		1	
	2 000	拱肋(非隔震)	3 938	88.7	5	100	1 109	88.0	4	100	2 320	86.2	49	98.0
		拱肋(隔震)	444		0		86		0		320		1	
$\infty$	拱肋(非隔震)	3 811	87.5	5	100	691	86.1	4	100	2 242	83.9	49	98.0	
	拱肋(隔震)	477		0		96		0		361		1		
Northridge	100	拱肋(非隔震)	4 224	91.7	6	100	1 319	92.8	7	100	3 528	90.4	44	100.0
		拱肋(隔震)	350		0		95		0		337		0	
	500	拱肋(非隔震)	2 339	76.6	5	100	705	83.3	6	100	2 089	78.5	40	97.5
		拱肋(隔震)	547		0		118		0		450		1	
	2 000	拱肋(非隔震)	3 149	82.1	6	100	804	85.0	7	100	2 376	80.8	50	98.0
		拱肋(隔震)	564		0		121		0		456		1	
$\infty$	拱肋(非隔震)	3 210	82.3	6	100	792	84.6	7	100	2 336	80.4	51	98.0	

续表 5

地震波	波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	构件	轴力 F <sub>x</sub> / kN	减震 率/%	剪力 F <sub>y</sub> / kN	减震 率/%	剪力 F <sub>z</sub> / kN	减震 率/%	扭矩 M <sub>x</sub> / (kN·m)	减震 率/%	弯矩 M <sub>y</sub> / (kN·m)	减震 率/%	弯矩 M <sub>z</sub> / (kN·m)	减震 率/%	
Loma Prieta	100	拱肋(隔震)	568		0		122		0		458		1		
		拱肋(非隔震)	4 202	92.6	5	100	1 074	93.9	7	100	3 468	93.8	46	100.0	
	500	拱肋(隔震)	312		0		66		0		214		0		
		拱肋(非隔震)	3 152	88.6	6	100	929	92.0	7	100	2 826	90.1	48	100.0	
	2 000	拱肋(隔震)	360		0		74		0		280		0		
		拱肋(非隔震)	3 626	90.0	8	100	979	91.8	9	100	2 639	88.8	66	100.0	
	∞	拱肋(隔震)	361		0		80		0		296		0		
		拱肋(非隔震)	3 614	90.1	8	100	1 004	91.8	9	100	3 020	90.1	67	100.0	
			拱肋(隔震)	359		0		82		0		300		0	

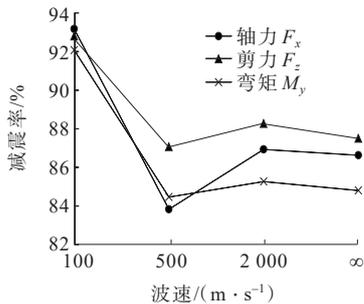


图 17 不同波速拱肋内力减震率对比图

效果最明显;当波速为 100 m/s 时非隔震模型拱肋轴力、剪力 F<sub>z</sub>、弯矩 M<sub>y</sub> 均较大,设计时应注意考虑波速的影响;隔震模型轴力、剪力 F<sub>z</sub>、弯矩 M<sub>y</sub> 随波速增大呈增大现象。

2.2.5 桥墩内力响应

表 6 列出了 3 种地震波作用下考虑行波效应时两种模型桥墩轴力、剪力、扭矩、弯矩值及减震率,图 18 为不同波速桥墩内力减震率对比图。

表 6 考虑行波效应地震作用下两种模型桥墩轴力、剪力、扭矩、弯矩比较

地震波	波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	构件	轴力 F <sub>x</sub> / kN	减震 率/%	剪力 F <sub>y</sub> / kN	减震 率/%	剪力 F <sub>z</sub> / kN	减震 率/%	扭矩 M <sub>x</sub> / (kN·m)	减震 率/%	弯矩 M <sub>y</sub> / (kN·m)	减震 率/%	弯矩 M <sub>z</sub> / (kN·m)	减震 率/%
El-centro	100	桥墩(非隔震)	498		15	-13.3	11 305	96.3	351	100	152 027	97.2	105	-33.3
		桥墩(隔震)	32	93.6	17		421		0		4 245		140	
	500	桥墩(非隔震)	496		10	-50.0	4 027	91.1	128	100	53 153	93.3	79	-60.8
		桥墩(隔震)	40	91.9	15		360		0		3 542		127	
	2 000	桥墩(非隔震)	820		18	5.6	3 726	90.3	155	100	47 884	92.6	141	0.0
		桥墩(隔震)	44	94.6	17		363		0		3 565		141	
∞	桥墩(非隔震)	828		19	42.1	3 392	88.6	147	100	43 142	91.1	144	38.9	
	桥墩(隔震)	45	94.6	11		388		0		3 844		88		
Northridge	100	桥墩(非隔震)	475		11	-9.1	6 888	96.2	220	100	94 293	96.9	81	-21.0
		桥墩(隔震)	32	93.3	12		265		0		2 959		98	
	500	桥墩(非隔震)	488		9	-33.3	3 551	89.5	104	100	49 208	91.4	71	-43.7
		桥墩(隔震)	36	92.6	12		373		0		4 228		102	
	2 000	桥墩(非隔震)	665		18	44.4	3 267	88.6	139	100	4 1515	89.8	130	38.5
		桥墩(隔震)	40	94.0	10		372		0		4 214		80	
∞	桥墩(非隔震)	671		18	61.1	3 278	88.6	138	100	41 549	89.8	132	53.8	
	桥墩(隔震)	41	93.9	7		373		0		4 221		61		
Loma Prieta	100	桥墩(非隔震)	534		12	16.7	6 114	96.0	199	100	80 890	97.1	87	3.4
		桥墩(隔震)	25	95.3	10		245		0		2 360		84	
	500	桥墩(非隔震)	569		13	23.1	3 380	92.9	127	100	44 587	94.6	97	15.5
		桥墩(隔震)	28	95.1	10		241		0		2 426		82	
	2 000	桥墩(非隔震)	798		18	61.1	2 802	91.5	163	100	36 528	93.5	142	58.5
		桥墩(隔震)	33	95.9	7		237		0		2 392		59	
∞	桥墩(非隔震)	811		18	61.1	2 789	91.6	164	100	36 178	93.5	143	62.2	
	桥墩(隔震)	33	95.9	7		235		0		2 366		54		

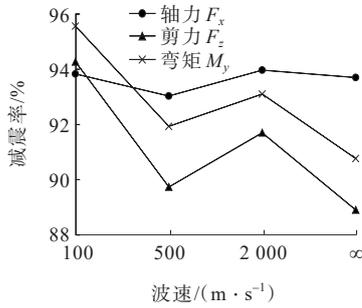


图 18 不同波速桥墩内力减震率对比图

由表 6 及图 18 可知:在不同波速地震激励下,隔震模型桥墩内力减小明显;桥墩主要内力轴力、剪力  $F_z$ 、弯矩  $M_y$  随波速变化曲线走势基本一致;轴力平均减震率达 94.23%,剪力  $F_z$  平均减震率达 91.77%,弯矩  $M_y$  平均减震率达 93.40%;剪力  $F_z$  与弯矩  $M_y$  在波速为 100 m/s 时,减震效果最明显,随波速增大依次降低;当波速为 100 m/s 时非隔震模型桥墩剪力  $F_z$ 、弯矩  $M_y$  较大,设计时应注意考虑波速的影响。

### 3 结论

(1) 波速对下承式钢管混凝土系杆拱桥的影响较为复杂,地震分析时应注意波速的影响。

(2) 不同波速地震波作用下,1/4 拱肋顺桥向、横桥向和竖向位移平均减小率分别为 -45.19%、100%、82.28%,拱顶顺桥向、横桥向和竖向位移平均减小率分别为 -48.16%、100%、92.44%。隔震模型拱肋纵向最大位移基本表现为增大现象,横向和竖向最大位移减小。

(3) 不同波速地震波作用下隔震模型拱肋绝对加速度和相对加速度减小明显,1/4 拱肋顺桥向、横桥向和竖向绝对加速度平均减小率分别为 54.02%、31.00%、95.14%,拱顶顺桥向、横桥向和竖向绝对加速度平均减小率分别为 52.25%、6.29%、84.22%,1/4 拱肋顺桥向、横桥向和竖向相对加速度平均减小率分别为 69.23%、99.15%、95.52%,拱顶顺桥向、横桥向和竖向相对加速度平均减小率分别为 67.71%、95.94%、96.04%。

(4) 隔震结构对不同波速均表现出很好的减震效果,拱肋轴力平均减震率达 87.64%,剪力  $F_z$  平均减震率达 88.91%,弯矩  $M_y$  平均减震率达 86.65%,桥墩轴力平均减震率达 94.23%,剪力  $F_z$  平均减震率达 91.77%,弯矩  $M_y$  平均减震率达 93.40%,对拱肋和桥墩内力响应减小很明显。

### 参考文献:

- [1] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 夏修身,戴胜勇,刘尊稳.大跨度拱桥抗震概念设计方法[J].地震工程与工程振动,2017,37(2):90-96.
- [3] 庄军生.桥梁减震、隔震支座和装置[M].北京:中国铁道出版社,2012.
- [4] 张文华.贵广铁路东平水道特大桥抗震设计研究[J].铁道标准设计,2017,61(6):77-81.
- [5] 李小珍,刘桢杰,辛莉峰,等.考虑行波效应的刚架系杆拱桥减隔震分析[J].铁道工程学报,2015,32(3):46-51.
- [6] 吴忠铁,范萍萍,杜永峰,等.地震波参数对基础隔震体系的减震效果影响研究与试验验证[J].土木工程学报,2019,52(6):35-44,54.
- [7] 王克海,李冲,李悦.中国公路桥梁抗震设计规范中存在的问题及改进建议[J].建筑科学与工程学报,2013,30(2):95-103.
- [8] 狄生奎,汪甲,项长生,等.边界条件对CFST拱桥抗震性能影响分析[J].中外公路,2014,34(1):134-138.
- [9] 李小珍,杨得海,雷康宁,等.大跨度连续梁拱桥多点多维地震响应分析[J].西南交通大学学报,2021,56(2):221-228.
- [10] 白玲.大跨度钢管混凝土拱桥地震响应分析[J].中国铁道科学,2008,29(6):41-45.
- [11] LI B, CHOUW N. Experimental investigation of inelastic bridge response under spatially varying excitations with pounding[J].Engineering Structures,2014,79:106-116.
- [12] 成凯,叶锡钧,梁伟.大跨度异形拱桥动力特性分析[J].中外公路,2019,39(4):64-67.
- [13] 王德慧,许斐,张哲.T构-系杆拱组合体系桥设计探讨与力学性能研究[J].中外公路,2017,37(6):198-205.
- [14] 雷顺成,刘国坤,邓继华,等.考虑空间效应的大跨度斜拉桥随机地震下主梁力学响应规律分析[J].中外公路,2022,42(4):107-112.