

祝浩然,夏修身,钟亚伟,等.铁路自复位桥墩地震动最不利输入方向研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1380-1386.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230706001

ZHU Haoran, XIA Xiushen, ZHONG Yawei, et al. Critical angle of earthquake input for self-centering bridge piers of railways [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1380-1386. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230706001

# 铁路自复位桥墩地震动最不利输入方向研究

祝浩然<sup>1</sup>, 夏修身<sup>1</sup>, 钟亚伟<sup>2</sup>, 戴胜勇<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为探究地震动输入角度对铁路自复位桥墩地震反应的影响,以一座简支梁桥为工程背景,建立空间自复位桥墩地震反应分析模型,并对模型进行验证。选择22组强震记录作为地震动输入,以屈服面函数 $\Psi$ 作为判别最不利输入角度的标准,从 $0^\circ$ 开始顺时针旋转,每次增加 $5^\circ$ ,进行铁路自复位桥墩地震反应分析。结果表明:145°输入时, $\Psi$ 值最大,145°为桥墩最不利输入角度;在最不利方向下桥墩的地震反应大于顺桥向和横桥向。自复位桥墩设计时若不考虑地震动最不利输入方向,则偏于不安全。

**关键词:** 自复位桥墩; 三维地震动; 最不利角度; 屈服面函数

中图分类号: U442.59

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1380-07

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230706001

## Critical angle of earthquake input for self-centering bridge piers of railways

ZHU Haoran<sup>1</sup>, XIA Xiushen<sup>1</sup>, ZHONG Yawei<sup>2</sup>, DAI Shengyong<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To investigate the influence of ground motion input angles on the seismic response of railway self-centering piers, a seismic response analysis model for spatial self-centering bridge piers was established and validated using a simply supported beam bridge as the case study. A total of 22 sets of strong motion records were selected as seismic inputs. The yield surface function  $\Psi$  was used to determine the critical input angle. Starting from an initial angle of  $0^\circ$ , the seismic response of the railway self-resetting pier was examined by rotating clockwise, increasing the angle by  $5^\circ$  increments each time. The results show that the value of  $\Psi$  was maximized at an input angle of  $145^\circ$ , designating this as the critical input angle for the pier. The seismic response in this critical direction surpassed those observed in the longitudinal and transverse directions. Designs that ignore the critical angle of ground motion in the design of self-centering bridge piers may be unsafe.

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278186, 52068041)

第一作者简介: 祝浩然(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: 731490390@qq.com.

通信作者: 夏修身(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: xiaxiushen@mail.lzjtu.cn.

**Keywords:** self-centering pier; three-dimensional ground motion; critical angle; yield surface function

## 0 引言

由于地震动的空间性和不确定性,不同的地震动输入方向会引起结构不同的地震反应。普通桥梁结构只需考虑水平向地震作用,按顺桥向或横桥向分别输入地震动,即可得到最不利地震反应<sup>[1]</sup>。而地震动输入方向对复杂结构的影响则需要进一步研究。Torbol 等<sup>[2]</sup>研究表明不考虑地震动的入射角会明显低估桥梁结构的地震反应。单德山等<sup>[3]</sup>利用增量动力分析方法探究了薄壁桥墩的最不利输入角度,发现桥墩的地震反应和地震动入射角有关。李小珍等<sup>[4]</sup>以某铁路部分斜拉桥为研究对象,提出在进行地震反应分析时,应考虑竖向地震动及水平地震动最不利输入方向的影响。韩恩圳等<sup>[5]</sup>研究发现,对于竖向振型为主的结构,应考虑多维地震动输入并计算出结构的最不利角度。王滔等<sup>[6]</sup>研究发现,桥墩的最不利方向与结构自身特性和输入的地震波有关。国内外学者对最不利方向的研究方法主要基于能量法和反应谱法。López 等<sup>[7]</sup>提出了利用反应谱形状来确定最不利入射方向的方法。冯云田等<sup>[8]</sup>引入结构抗震主轴的概念,利用结构最大变形来确定地震动的最不利输入方向。范立础等<sup>[9]</sup>利用输入能量和屈服面函数的方法研究了复杂结构地震动输入最不利方向的标准。

Housner 等<sup>[10]</sup>在 20 世纪 60 年代提出摇摆隔震的概念,其可以作为一种有效的隔震方法。司炳君等<sup>[11]</sup>、孙治国等<sup>[12]</sup>和钟正午等<sup>[13]</sup>通过试验与模拟相结合,验证了摇摆自复位桥墩拥有较好的抗震性能。Palermo 等<sup>[14-16]</sup>、Solberg 等<sup>[17]</sup>和 Ou 等<sup>[18]</sup>提出了一种采用无黏结预应力技术并内置耗能钢筋的新型摇摆桥墩设计,通过拟静力和拟动力试验验证了这种新型摇摆桥墩具有较好的自复位能力,可以显著减小桥墩损伤。夏修身等<sup>[19-20]</sup>提出中等高度铁路桥墩可以采用自由摇摆的方法隔震,并通过试验证明了隔震摇摆桥墩具有自复位能力。铁路自复位桥墩的墩柱截面多是圆端形,这种截面的纵、横向尺寸相差大,各个方向的惯性矩不同,在地震力作用下的抗侧承载力和耗能能力也不同,因此,圆端形截面各个方向的抗震能力是有差异的。当地震动沿着斜向方向作用时,很难判定桥墩是否被破坏,再加上桥墩的提离摇摆与输入方向有关,因此,探究铁路自复位桥墩的最不利输入方向是有必要的。

本文以一座铁路简支梁桥为工程背景,建立空间自复位桥墩地震反应分析模型,并对模型进行验证;选择 22 组近断层地震动记录作为地震动输入,以屈服面函数作为判别最不利输入角度的方法,从 0°方向开始顺时针旋转,每次增加 5°,对铁路自复位桥墩的地震反应进行分析,探讨其最不利输入方向。

## 1 模型的建立与验证

### 1.1 工程背景

本文以云南省大理至瑞丽线漾濞 1 号特大桥 18 号桥墩为工程背景(图 1)。上部结构为等跨简支箱形梁,跨度 32.7 m;下部结构为圆端形空心高墩,墩高 58 m,墩底截面尺寸为 7 m(顺桥向)×9.1 m(横桥向)×1.12 m(壁厚)。对传统的 18 号桥墩进行再设计,使其成为自复位桥墩。再设计后的墩底扩大基础为 C30 混凝土,宽  $B=10$  m,截面面积  $A_0=120$  m<sup>2</sup>,全截面纵向配筋率及配箍率均为 0.7%。自复位桥墩的设计过程及详细设计参数见文献<sup>[21]</sup>。

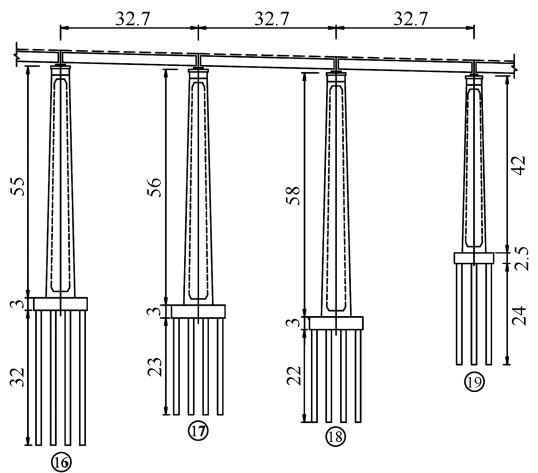


图 1 漾濞 1 号桥型布置(单位:m)

Fig.1 Layout of Yangbi No. 1 bridge (Unit:m)

### 1.2 模型建立

采用 81 个竖向只受压不受拉弹簧模型来模拟三维地震动下自复位桥墩的提离摇摆,基于 MIDAS/Civil 分析软件建立自复位桥墩空间多弹簧模型(图 2)<sup>[21]</sup>。模型桥墩由 360 个节点和 430 个单元组成,墩身由梁单元模拟,承台和扩大基础由刚臂单元模拟。利用集中质量模拟桥跨重量,在第 27 和第 230 个节点处施加静力荷载,扩大基础的质量集中于重

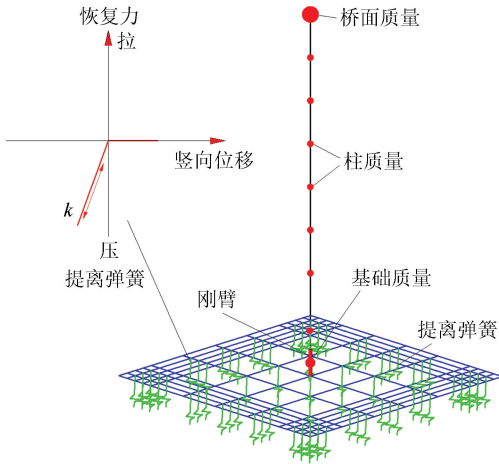


图2 自复位桥墩空间多弹簧模型

Fig.2 Spatial multi-spring model of self-centering pier

心。基础两端 area1、area2 区各布置 36 根弹簧,基础中部 area3 区布置 9 根弹簧。只受压弹簧的模型和力-位移关系如图 2 所示。参考文献[22],空间多弹簧分布如图 3 所示,提高弹簧的竖向刚度按式(1)、(2)计算(表 1)。

$$k_{\text{area1 \& 2}} = \frac{6.83G}{1-\nu} \quad (1)$$

$$k_{\text{area3}} = \frac{0.73G}{1-\nu} \quad (2)$$

式中: $k_{\text{area1 \& 2}}$ 为基础 area1 区和 area2 区每平方米的弹簧刚度; $k_{\text{area3}}$ 为基础 area3 区每平方米的弹簧刚度; $G$ 为基础材料的剪切模量; $\nu$ 为基础材料的泊松比。

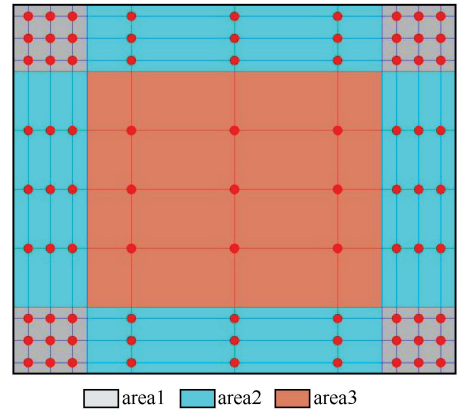


图3 提高弹簧的分布

Fig.3 Distribution of lift-off springs

表1 提高弹簧参数

Table 1 Parameters of lift-off spring

弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	剪切模量 $G/\text{MPa}$	area1 & area2		area3	
			弹簧数量	$k_{\text{area1 \& 2}}/(\text{kN/m})$	弹簧数量	$k_{\text{area3}}/(\text{kN/m})$
$3.3 \times 10^4$	0.2	$1.33 \times 10^4$	72	158 940 000	9	71 175 000

### 1.3 模型验证

夏修身等<sup>[22-23]</sup>针对铁路自复位桥墩提出了一种简化的两弹簧模型,并通过振动台试验验证了用两弹簧模型模拟自复位桥墩提高摇摆的合理性。在文献[24-25]中,两弹簧模型通过 OpenSees 平台,可以在地震动作用下较好地模拟自复位桥墩的地震反应,因此,本文利用其对铁路自复位桥墩空间多弹簧模型进

行验证。选取 Northridge 波、El-Centro 波、Taft 波三条强震记录,将地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)统一调整为  $0.57g$ 。两弹簧模型和空间多弹簧模型在三种地震波输入下的墩顶位移和墩底弯矩的对比列于表 2,在 Northridge 波作用下墩顶位移和墩底弯矩的比较分别如图 4、5 所示。

通过表 2 可以看出,两个模型的墩顶位移在

表2 空间多弹簧模型和两弹簧模型结果比较

Table 2 Comparison between results of spatial multi-spring model and two-spring model

地震动	墩顶位移/mm		相差 /%	墩底弯矩/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )		相差 /%
	两弹簧模型	空间多弹簧模型		两弹簧模型	空间多弹簧模型	
	Northridge 波	519		516	0.5	
El-Centro 波	271	260	4.0	222 800	208 600	6.3
Taft 波	153	148	3.2	204 500	188 700	7.7

Northridge 波下相差最小(0.5%),在 El-Centro 波下相差 4.0%;墩底弯矩在 Northridge 波、El-Centro 波下相差 6.3%,在 Taft 波下相差最大(7.7%)。通过图 4、5 可以看出,在 Northridge 波下两个模型的墩顶位移和墩底弯矩时程曲线吻合较好。由此可知,空间多弹簧模型可以较好地模拟自复位桥墩的

地震反应。

## 2 地震波选取

根据 Vamvatsikos 等<sup>[26]</sup>的研究,20 组地震工况即可反映地震动的不确定性。将震中距  $2 \sim 15 \text{ km}$ ,地面峰值速度(Peak Ground Velocity,PGV) $>10 \text{ cm/s}$ ,

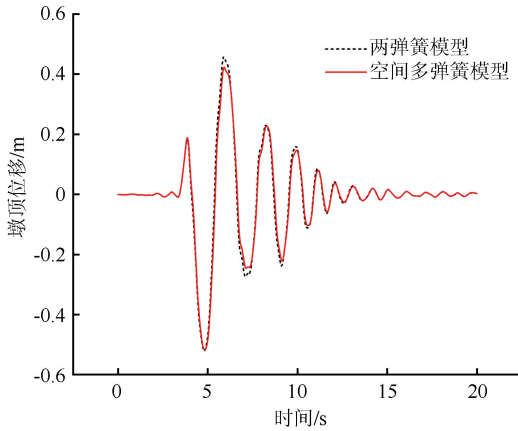


图 4 Northridge 波作用下墩顶位移比较

Fig.4 Comparison between pier top displacements under Northridge wave

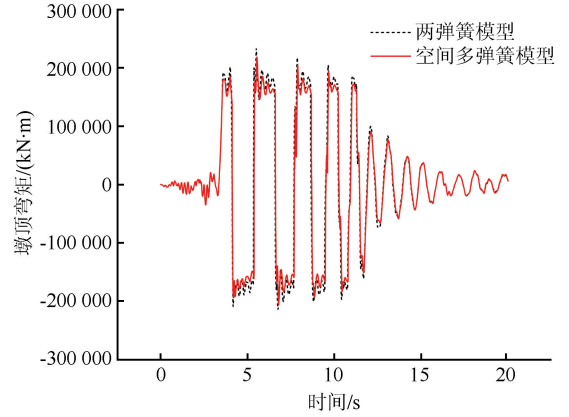


图 5 Northridge 波作用下墩底弯矩比较

Fig.5 Comparison between bending moments of pier bottom under Northridge wave

$PGA > 0.2g$ ,  $PGV/PGA$  较大,速度脉冲的持时不得小于 0.5 s 作为选取近断层地震波的条件,从美国太平洋强震数据库(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)中选取 22 组近断层地震波。每组地震波包括两个水平分量(NS,EW)和 1 个垂直分量(UP)。

### 3 算例分析

以 1.1 节的背景桥墩作为研究对象,采用 1.3 节

中经过验证的空间多弹簧模型,进行地震动最不利输入角度分析。以表 3 中 22 组近断层地震波为三向输入,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  中,两个水平方向的地震动沿顺时针输入,每次输入角度间隔为  $5^\circ$ 。

#### 3.1 最不利输入角度的评判方法

自复位桥墩在三向地震动输入下会产生两个方向的弯矩,即顺桥向弯矩  $M_{ye}$  和横桥向弯矩  $M_{ze}$ 。两个方向的弯矩相互影响,任何单一方向地震动输入所达到的最大弯矩不能作为判别截面最不利方向

表 3 输入地震动信息

Table 3 Information of input ground motions

序号	编号	地震名称	台站	震级	震中 /km	强震记录分量 $PGA/g$		
						NS	EW	UP
1	160	Imperial Valley-0	Bonds Corner	6.5	2.66	0.59	0.77	0.53
2	1176	Kocaeli_Turkey	Yarimca	7.5	4.83	0.23	0.32	0.24
3	1052	Northridge-01	Pacoima Kagel Canyon	6.7	7.26	0.30	0.43	0.16
4	230	Mammoth Lakes-01	Convict Creek	6.1	6.63	0.42	0.44	0.39
5	540	N.Palm Springs	Whitewater Trout Farm	6.1	6.04	0.48	0.62	0.41
6	558	Chalfant Valley-02	Zack Brothers Ranch	6.2	7.58	0.45	0.40	0.32
7	901	Big Bear-01	Big Bear Lake-Civic Center	6.5	8.3	0.48	0.54	0.19
8	802	Loma Prieta	Saratoga-Aloha Ave	6.9	8.5	0.51	0.33	0.40
9	180	Imperial Valley-06	El-Centro Array #5	6.5	3.95	0.59	0.53	0.38
10	753	Loma Prieta	Corralitos	6.9	3.85	0.64	0.48	0.46
11	139	Tabas_Iran	Dayhook	7.4	13.94	0.32	0.40	0.19
12	764	Loma Prieta	Gilroy-Historic Bldg	6.9	10.97	0.29	0.24	0.14
13	741	Loma Prieta	BRAN	6.9	10.72	0.46	0.50	0.50
14	1082	Northridge-01	Sun Valley-Roscoe Blvd	6.7	10.05	0.33	0.27	0.45
15	1101	Kobe_Japan	Amagasaki	6.9	11.34	0.27	0.32	0.34
16	828	Cape Mendocino	Petrolia	7.0	8.18	0.59	0.66	0.16
17	1605	Duzce_Turkey	Duzce	7.1	6.58	0.40	0.51	0.34
18	4451	Montenegro_Yugoslavia	Bar-Skupstina Opstine	7.1	6.98	0.37	0.37	0.24
19	4458	Montenegro_Yugoslavia	Ulcinj-Hotel Olympic	7.1	5.76	0.29	0.24	0.46
20	4456	Montenegro_Yugoslavia	Petrovac-Hotel Olivia	7.1	8.01	0.46	0.23	0.31
21	1085	Northridge-01	Sylmar-Converter Sta East	6.7	5.19	0.85	0.45	0.47
22	779	Loma Prieta	LGPC	6.9	3.88	0.57	0.60	0.89

的标准。为了研究自复位桥墩在三维地震动下的最不利方向,采用 Bresler 等<sup>[27]</sup>和孟杰等<sup>[28]</sup>给出的屈服面函数  $\Psi$  [式(3)]作为最不利输入方向判定标准。当  $\Psi < 1$  时,桥墩处于线弹性状态;当  $\Psi \geq 1$  时,桥墩则达到屈服状态。

$$\left(\frac{M_{ye}}{M_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{M_{ze}}{M_{z0}}\right)^2 = \Psi \quad (3)$$

式中: $M_{y0}$ 为墩底顺桥向初始屈服弯矩; $M_{z0}$ 为墩底横桥向初始屈服弯矩。

### 3.2 地震动最不利输入角度分析

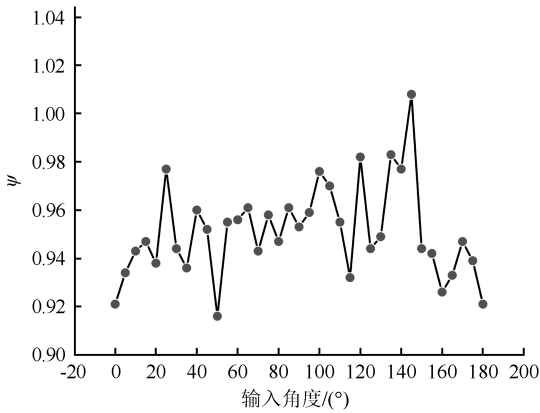
以 22 组近断层地震动下桥墩所产生的地震反

应平均值作为桥墩地震反应,采用恒载轴力与地震轴力最不利组合  $F_N$ ,计算 18 号桥墩的墩底屈服弯矩  $M_{y0}$  及  $M_{z0}$ 。沿  $0^\circ$  方向输入地震动时,顺桥向为 NS,横桥向为 EW,竖向为 UP,22 组地震波均为原始数据(未调幅)。地震动输入角度  $\theta$  为顺桥向 NS 地震波与 X 轴方向、横桥向 EW 地震波与 Y 轴方向的夹角。为寻找最不利输入角度,保持输入地震动三向正交不变,将地震动输入方向沿  $0^\circ$  方向顺时针旋转,每次增加  $5^\circ$ 。各个角度下的屈服面函数  $\Psi$  值列于表 4(图 6)。

表 4 不同输入角度下屈服面函数  $\Psi$  值

Table 4 Value of yield surface function  $\Psi$  under different input angles

输入角度/ $^\circ$	$M_{ye}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{ze}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{y0}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{z0}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$F_N/\text{kN}$	$\Psi$
0	211 364	248 582	306 938	371 738	21 654	0.921
5	210 291	251 418	305 709	370 193	22 100	0.934
10	211 509	251 709	305 387	369 787	22 217	0.943
15	210 877	250 409	303 514	367 430	22 898	0.947
20	210 335	253 405	306 293	370 927	21 888	0.938
25	211 036	262 032	305 770	370 269	22 078	0.977
30	209 236	256 714	306 561	371 263	21 791	0.944
35	208 914	257 514	308 291	373 044	21 164	0.936
40	213 214	254 791	305 998	370 556	21 995	0.960
45	214 336	253 791	305 728	370 217	22 093	0.952
50	211 641	254 464	303 786	367 773	22 799	0.916
55	211 527	241 495	304 748	368 984	22 449	0.955
60	212 609	252 623	306 398	371 059	21 850	0.956
65	213 873	254 009	305 536	369 974	22 163	0.961
70	210 832	254 805	306 767	371 523	21 716	0.943
75	212 591	255 441	305 968	370 518	22 006	0.958
80	215 318	252 268	307 968	372 641	21 281	0.947
85	215 977	252 573	306 271	370 899	21 896	0.961
90	216 518	254 445	309 093	374 415	20 766	0.953
95	217 777	250 441	306 591	371 301	21 780	0.959
100	221 341	247 695	305 021	369 327	22 350	0.976
105	216 332	252 014	304 837	369 095	22 417	0.970
110	210 745	255 350	305 101	369 427	22 321	0.955
115	212 645	250 273	307 214	371 702	21 554	0.932
120	213 577	256 977	303 899	367 915	22 758	0.982
125	210 736	252 086	304 881	369 150	22 401	0.944
130	211 573	253 786	305 704	370 186	22 102	0.949
135	219 464	252 791	305 558	370 002	22 155	0.983
140	218 277	251 405	304 773	369 015	22 440	0.977
145	219 214	254 905	302 742	366 458	23 179	1.008
150	208 932	252 673	303 945	367 974	22 741	0.944
155	208 668	254 655	305 326	369 711	22 239	0.942
160	209 600	251 245	306 453	371 128	21 830	0.926
165	210 855	255 550	308 766	374 005	21 885	0.933
170	208 682	254 914	304 636	368 842	22 490	0.947
175	213 127	253 818	308 548	373 364	21 071	0.939
180	211 364	248 582	306 938	371 738	21 654	0.921

图 6 不同输入角度下屈服面函数  $\Psi$  值Fig.6 Value of yield surface function  $\Psi$  under different input angles

结合图 6、表 4 可以看出,屈服面函数  $\Psi$  在震动  $145^\circ$  输入下最大,  $\Psi$  为 1.008 且大于 1, 这表明此时自复位桥墩达到屈服状态。表 4 中屈服面函数值在除  $145^\circ$  外的其他角度下均小于 1, 说明  $145^\circ$  是三向地震动输入时铁路自复位桥墩的最不利输入角度, 且三向地震动输入时墩底弯矩反应也大于顺桥向或横桥向单独输入。因此, 自复位桥墩设计时若不考虑地震动最不利输入方向, 则偏于不安全。

## 4 结论

(1) 给出了能考虑多角度提高的铁路自复位桥墩空间多弹簧模型建立方法, 并与经过振动台试验验证的两弹簧模型结果进行比较, 发现空间多弹簧模型可以较好地模拟自复位桥墩的地震反应。

(2) 提出了采用屈服面函数判别铁路自复位桥墩地震动最不利输入角度的方法。

(3) 铁路自复位桥墩地震动最不利输入方向不一定是顺桥向或横桥向。本研究中桥墩地震动最不利输入角度为  $145^\circ$ , 在此方向下墩底弯矩反应大于顺桥向和横桥向输入。自复位桥墩设计时若不考虑地震动最不利输入方向, 则偏于不安全。

## 参考文献(References)

[1] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China.Specifications for seismic design of highway bridges:JTG/T 2231-01—2020[S].Beijing:China Communications Press,2020.

[2] TORBOL M, SHINOZUKA M.Effect of the angle of seismic incidence on the fragility curves of bridges[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2012,41(14):2111-2124.

[3] 单德山,韩璐璐,瞿发宪,等.地震动入射角对空心薄壁高墩桥

梁地震易损性的影响[J].交通运输工程学报,2020,20(6):90-103.

SHAN Deshan, HAN Lulu, QU Faxian, et al. Impact of ground motion incident angles on seismic vulnerability for bridge with thin-walled hollow tall pier[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 90-103.

- [4] 李小珍,洪沁焯,雷虎军,等.地震动输入方向对铁路部分斜拉桥地震响应的影响[J].桥梁建设,2015,45(1):26-32.  
LI Xiaozhen, HONG Qinye, LEI Hujun, et al. Effect of input directions of seismic ground motion on seismic responses of a railway extradosed bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(1): 26-32.
- [5] 韩恩圳,何浩祥,吕永伟.三维地震动下结构最不利入射角度研究[J].振动工程学报,2016,29(1):132-139.  
HAN Enzhen, HE Haoxiang, LÜ Yongwei. Critical angle of structure subjected to three-dimensional ground motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 132-139.
- [6] 王滔,郭恩栋,张丽娜,等.大跨斜拉桥地震动最不利输入方向分析[J].世界地震工程,2007,23(4):107-111.  
WANG Tao, GUO Endong, ZHANG Li'na, et al. The critical direction of earthquake input for dynamic analysis of a long span cable-stayed bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 107-111.
- [7] LÓPEZ O A, TORRES R. The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(9): 881-894.
- [8] 冯云田,李明瑞,林春哲.复杂结构的弹性地震反应分析[J].地震工程与工程振动,1991,11(4):77-86.  
FENG Yuntian, LI Mingrui, LIN Chunzhe. Elastic earthquake response analysis for complex structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(4): 77-86.
- [9] 范立础,聂利英,李建中.复杂结构地震波输入最不利方向标准问题[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(6):631-636.  
FAN Lichu, NIE Liying, LI Jianzhong. Discussion on standard of critical angle of seismic wave in seismic analysis of complicated structures[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(6): 631-636.
- [10] HOUSNER G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 403-417.
- [11] 司炳君,谷明洋,孙治国,等.近断层地震动下摇摆-自复位桥墩地震反应分析[J].工程力学,2017,34(10):87-97.  
SI Bingjun, GU Mingyang, SUN Zhiguo, et al. Seismic response analysis of the rocking self-centering bridge piers under the near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 87-97.
- [12] 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.
- [13] 钟正午,石岩,秦洪果,等.摇摆-自复位桥墩的多弹簧模型建模方法研究[J].世界地震工程,2021,37(4):197-205.  
ZHONG Zhengwu, SHI Yan, QIN Hongguo, et al. Simulation method for multi-spring model of rocking self-centering pier [J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(4): 197-205.
- [14] PALERMO A, PAMPANIN S, CALVI G M. Concept and development of hybrid solutions for seismic resistant bridge systems[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(6): 899-921.
- [15] PALERMO A, PAMPANIN S, MARRIOTT D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1648-1661.
- [16] PALERMO A, PAMPANIN S. Enhanced seismic performance of hybrid bridge systems: comparison with traditional monolithic solutions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2008, 12(8): 1267-1295.
- [17] SOLBERG K, MASHIKO N, MANDER J B, et al. Performance of a damage-protected highway bridge pier subjected to bidirectional earthquake attack[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(5): 469-478.
- [18] OU Y C, WANG P H, TSAI M S, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(3): 255-264.
- [19] 夏修身,陈兴冲.铁路高墩桥梁基底摇摆隔震与墩顶减震对比研究[J].铁道学报,2011,33(9):102-107.  
XIA Xiushen, CHEN Xingchong. Controlled rocking and pier top seismic isolation of railway bridge with tall piers[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(9): 102-107.
- [20] XIA X S, ZHANG X Y, SHI J, et al. Seismic isolation of railway bridges using a self-centering pier[J]. Smart Structures and Systems, 2021, 27(3): 447-455.
- [21] 夏修身,陈兴冲,李建中.高墩自复位隔震机理[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(7):2549-2557.  
XIA Xiushen, CHEN Xingchong, LI Jianzhong. Isolation mechanism of self-centering tall pier[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2549-2557.
- [22] 夏修身,陈兴冲.桩基础高墩摇摆隔震分析模型研究[J].铁道学报,2013,35(11):86-91.  
XIA Xiushen, CHEN Xingchong. Study on analytical model for rocking isolation of tall piers with pile foundations[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 86-91.
- [23] 夏修身,唐径遥,韦性涵,等.自复位高墩振动台模型试验[J].世界地震工程,2020,36(1):109-117.  
XIA Xiushen, TANG Jingyao, WEI Xinghan, et al. Shaking table test of self-centering model bridge pier[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 109-117.
- [24] 史军,夏修身,唐径遥.远场长周期地震动对自复位高墩地震反应的影响[J].地震工程与工程振动,2021,41(5):249-255.  
SHI Jun, XIA Xiushen, TANG Jingyao. Influence of far-field long-period ground motion on seismic response of self-centering high piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 249-255.
- [25] 夏修身,李建中.近场地震动对桩基础高墩摇摆反应的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(4):82-86.  
XIA Xiushen, LI Jianzhong. Effect of near-field ground motion on the rocking response of tall pier with pile foundations[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4): 82-86.
- [26] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [27] BRESLER B. Design criteria for reinforced columns under axial load and biaxial bending[J]. ACI Journal Journal, 1960, 57(11): 481-490.
- [28] 孟杰,刘钊.基于屈服面的曲线梁桥地震动最不利输入方向[J].振动与冲击,2013,32(3):115-118.  
MENG Jie, LIU Zhao. Critical angle of seismic incidence for curved bridges based on a yield surface[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3): 115-118.

(本文编辑:赵乘程)