

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808043

不同场地条件地震作用下曲线桥振动台试验

苏鹏, 陈彦江, 闫维明

(工程抗震与结构诊治北京市重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

摘要: 为研究不同场地条件地震对曲线桥结构响应的影响,以一座5%纵坡的曲线桥为研究对象,设计了缩尺比例为1:10的曲线桥缩尺模型,选取不同场地条件的地震波进行了振动台试验. 研究表明:场地条件对曲线桥结构响应的影响显著,从I类到IV类场地,曲线桥结构响应逐渐增大,双向地震激励下结构响应较单向激励显著;主梁结构响应具有空间性,顺桥向地震激励时,主梁平动的同时沿固定墩产生转动,横桥向地震激励时,主梁则以平动为主;曲线桥结构响应与曲线桥和主震方向的相对位置有关,平行于主震方向时,切向位移显著,垂直于主震方向时,径向位移更加敏感;桥墩位移方向与地震激励方向夹角越小,相应的位移响应越大. 墩高越高,桥墩位移的放大作用越显著,固定墩切向位移对地震响应比较敏感;当曲线桥平行于主震方向单向激励时,低墩处支座容易脱落,双向激励和垂直主震方向时,高墩处支座容易脱落,在曲线桥抗震设计分析中应予以重视.

关键词: 桥梁工程;曲线桥;振动台试验;场地条件;抗震分析

中图分类号: TU311.3; U448.121

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0020-07

Shaking table test of curved bridge under ground motion under different site conditions

SU Peng, CHEN Yanjiang, YAN Weiming

(Beijing Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China)

Abstract: To study the effects of different site ground motions on curved bridges, a scale model of a curved bridge with the scale ratio of 1:10 was designed by taking a curved bridge with 5% longitudinal slopes as the research object. Ground motions in different site conditions were selected for shaking table test. The results show that the influence of site conditions on the response of the curved bridge was significant. The structural response increased gradually with the site classification changing from I to IV. Compared to unidirectional input, the structural response under bidirectional input was obviously large. The structural response of the main girder was affected the directions of the excitation. When the bridge was excited by the ground motion in the longitudinal direction, the main girder moved horizontally and rotated along the fixed pier simultaneously. When the bridge was excited by the ground motion in the transverse direction, the movement of main girder was mainly translational. The structural response of the curved bridge was related to the bridge arrangement and the direction of the principal seismic. When the curved bridge was parallel to the direction of the principal seismic, the tangential displacement response was remarkable. The radial displacement was more significant when it was perpendicular to the direction of the principal seismic. The smaller the angle between the displacement direction of the pier and the direction of the ground motion excitation was, the greater the displacement response of the pier became. The higher the pier height was, the more obvious the magnification of the displacement of the pier was, and the more sensitive the tangential displacement of the fixed pier was to the seismic response. When the curved bridge was parallel to the direction of the principal seismic in unidirectional input, the bearing of the low pier was easy to fall off. When bidirectional input and the curved bridge were perpendicular to the direction of the principal seismic, the high pier was easy to fall off. Therefore, much attention should be paid to the seismic design and analysis of curved bridges.

Keywords: bridge engineering; curved bridge; shaking table test; site condition; seismic analysis

随着基础设施建设投资的不断增大,中国在公

路桥梁建设上取得了很大成就^[1]. 由于曲线桥能很好地适应地形,对于线路布置相对灵活等优点,在高速公路及城市交通系统中得到广泛应用^[2]. 曲线桥在平面上存在曲率,在竖向存在墩高差等特点,使得曲线桥存在弯扭耦合效应,结构受力更加复杂^[3]. 在历次地震中曲线桥破损比较严重^[4-6],如2008年

收稿日期: 2018-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51378037)

作者简介: 苏鹏(1986—),男,博士研究生;

陈彦江(1963—),男,教授,博士生导师;

闫维明(1960—),男,教授,博士生导师

通信作者: 陈彦江,cyjrx@sina.com

汶川地震中破坏比较严重的百花大桥,因此对于曲线桥抗震性能的研究是必要的。

国内外学者对曲线桥进行研究,文献[7-9]对曲线桥的弯曲效应进行了分析;文献[10-11]提出了计算平面钢梁桥的力学要素和变形的公式,分析了曲率半径、跨度和梁的数量等参数变化的影响;文献[12]探讨了地震冲击对水平曲线桥梁刚体运动的影响.随着试验设备完善和试验技术提高,许多学者对桥梁结构进行了振动台试验研究,文献[13-15]针对曲线桥进行了振动台试验研究;文献[16]对一个相似比为 1:2.5 的曲线桥模型进行振动台试验,并对铅芯橡胶支座的减震效果进行了研究;文献[17]进行简支梁桥振动台的隔震试验.以往的振动台试验主要针对常规桥梁和一般曲线桥,对于带有纵坡的曲线桥目前还很少见,大多集中在理论和数值分析上。

本文以 5% 纵坡的曲线桥为研究对象,设计并制作了缩尺比例为 1:10 曲线桥缩尺模型,选取了不同场地条件的地震波,分析了不同场地条件地震激励下曲线桥结构响应规律,为带有纵坡的曲线桥的研究提供试验依据。

1 试验概况

1.1 模型设计与制作

原型桥为一座 3 跨曲线桥,桥跨布置为 $3 \times 40 \text{ m}$,曲率半径为 $R = 50 \text{ m}$,纵向坡度为 5%。主梁为混凝土连续箱梁,主梁截面见图 1(a)。下部结构为对称布置的双柱式桥墩,桥墩直径为 1.5 m,墩高分别为 15、17、19、21 m。根据相似原理^[18],采用相似比 1:10 进行缩尺,相似关系见表 1。桥墩的纵向钢筋和箍筋按与原桥配筋率相同的原则进行设置,纵向钢筋采用直径为 10 mm 的 HRB335 型钢筋,配筋率为 3.554%。箍筋采用直径为 6 mm 的 R235 型螺旋箍筋,间距为 5 cm,体积配箍率为 2.264%。主梁采用钢箱梁来替代混凝土箱梁,采用 4.3 t 的配重来代替质量差。2#墩设置固定支座,其余各墩设置单向滑动支座,试验模型见图 2。

表 1 曲线桥模型的相似条件

Tab. 1 Similitude requirements of the curved bridge model

物理量	量纲	相似系数
尺寸 l	[L]	取 1/10
位移 δ	[L]	0.1
等效质量密度 ρ_e	[FL ⁻⁴ T ²]	取 2
时间 t	[T]	0.14
加速度 a	[LT ⁻²]	5
质量 m	[FL ⁻¹ T ²]	0.002

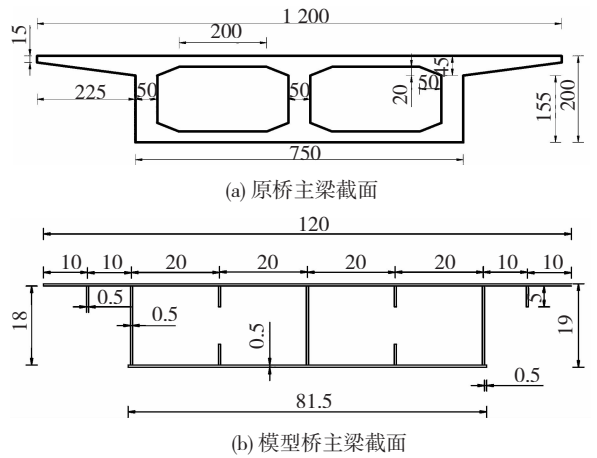


图 1 主梁截面尺寸 (cm)

Fig. 1 Section size of main girder (cm)

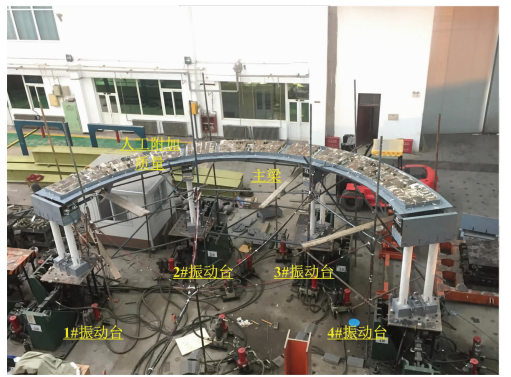


图 2 曲线桥梁模型照片

Fig. 2 Photo of the curved bridge model

1.2 振动台及测点布置

根据曲线桥线型布置了 4 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的振动台,其中,1#墩(69°)与 4#墩(-69°)、2#墩(23°)与 3#墩(-23°)对称布置(图 3)。由于模型桥存在 5% 纵坡,在模型设计的过程中,通过调整 4 个桥墩的高度,使模型桥具有 5% 纵坡。

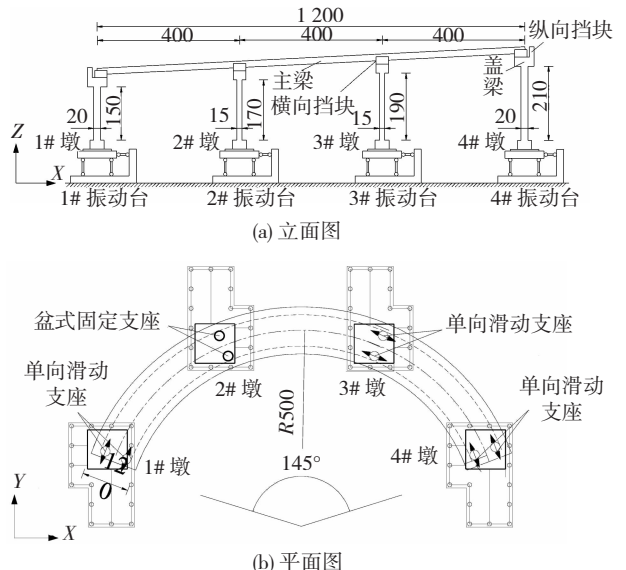


图 3 曲线桥模型布置 (cm)

Fig. 3 Layout of the curved bridge model (cm)

在主梁的跨中、墩顶和墩底分别沿切向和径向布置 ICP 加速度传感器和 941B 位移传感器,对跨中和桥墩的结构响应进行测量. 其中,941B 位移传感

器结合放大器用来测量结构的位移. 在 1#墩、3#墩和 4#墩单向滑动支座处设置拉线位移计,用来测量支座的相对位移,传感器布置见图 4.

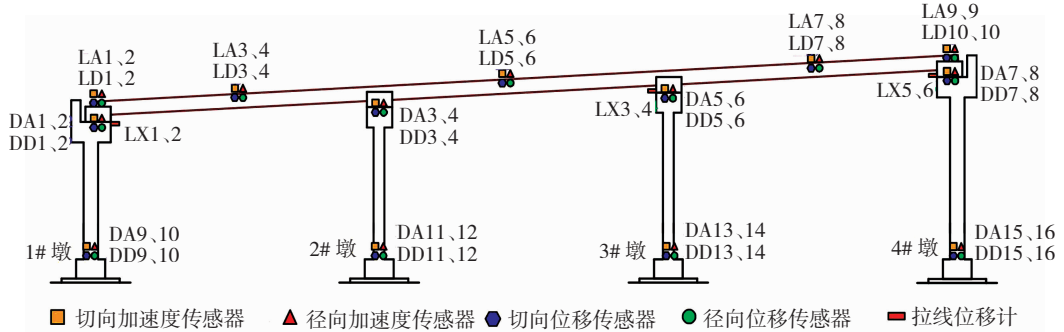


图 4 传感器布置

Fig. 4 Layout of the sensors

2 地震波选取及工况设置

2.1 地震波选取

为了研究不同场地条件地震对 5% 纵坡的曲线桥结构响应的影响,假定原桥抗震设防烈度为 7 度,将《公路桥梁抗震设计细则》^[19] 规定的不同场地的设计反应谱作为目标谱(图 5),具体参数见表 2,从太平洋地震工程研究中心地震数据库^[20] 的地震记录中分别选取 I 类场地、II 类场地、III 类场地、IV 类场地的天然波,所选地震动反应谱见图 6.

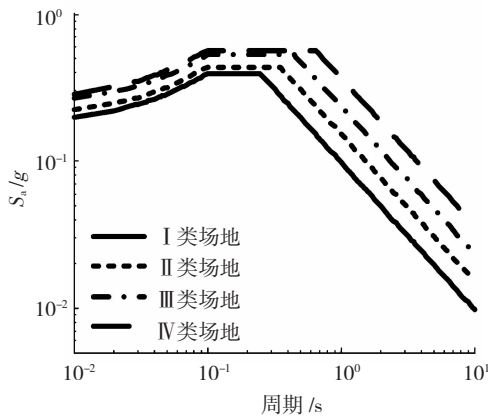


图 5 不同场地条件下的目标谱

Fig. 5 Target spectra under different site conditions

表 2 不同场地条件下的目标谱参数

Tab. 2 Parameters of target spectra under different site conditions

场地类型	特征周期 T_g/s	场地系数 C_s	抗震重要系数 C_i	阻尼调整系数 C_d	基本加速度峰值 A
I 类场地	0.25	0.9			
II 类场地	0.35	1.0			
III 类场地	0.45	1.2	1.3	1.0	0.15
IV 类场地	0.65	1.3			

为了使试验数据具有统计意义,每种场地选取五条地震波,选取结构响应均值作为分析依据. 通过均方根误差 M_{SE} 来衡量所选地震波与目标谱的匹配程度,见式(1). M_{SE} 的数值越小说明地震动与目标谱匹配的越好,所选地震波的详细信息见表 3. 可看出 M_{SE} 值在 0.037 ~ 0.101,说明所选地震波与目标谱具有很好的兼容性.

$$M_{SE} = \frac{\sum_i w(T_i) \{ \ln[S_a^{target}(T_i)] - \ln[f \times S_a^{record}(T_i)] \}}{\sum_i w(T_i)}, \quad (1)$$

式中: S_a^{target} 、 $S_a^{record}(T_i)$ 分别为目标谱与所选地震记录反应谱; $w(T_i)$ 为权重函数,可以在感兴趣的周期范围定义不同的权重函数; f 为应用于整个天然地震记录反应谱的线性比例因子.

2.2 工况设置

由于所选的天然地震记录在水平方向包含两个相互垂直的加速度分量,将加速度峰值较大的分量定义为主震方向,用 P 表示,峰值较小的分量定义为次震方向,用 S 表示,以两桥台连线方向为参考,分别考虑曲线桥平行于主震方向和垂直于主震方向时的结构响应. 当曲线桥平行于主震方向时,单向激励记为 X_p ,双向激励记为 $X_p + Y_s$. 当曲线桥垂直于主震方向时,单向激励记为 Y_p ,双向激励记为 $X_s + Y_p$,具体工况见表 4.

3 试验结果分析

3.1 动力性能测试

采用随机子空间法 (stochastic subspace identification, SSI) 对模型桥在白噪声激励下的动力特征进行识别,共识别出模型桥的前四阶模态信息,见表 5. 图 7 给出了模型桥的前四阶振型,其中第一阶为纵向振动,第二 ~ 四阶为横向振动.

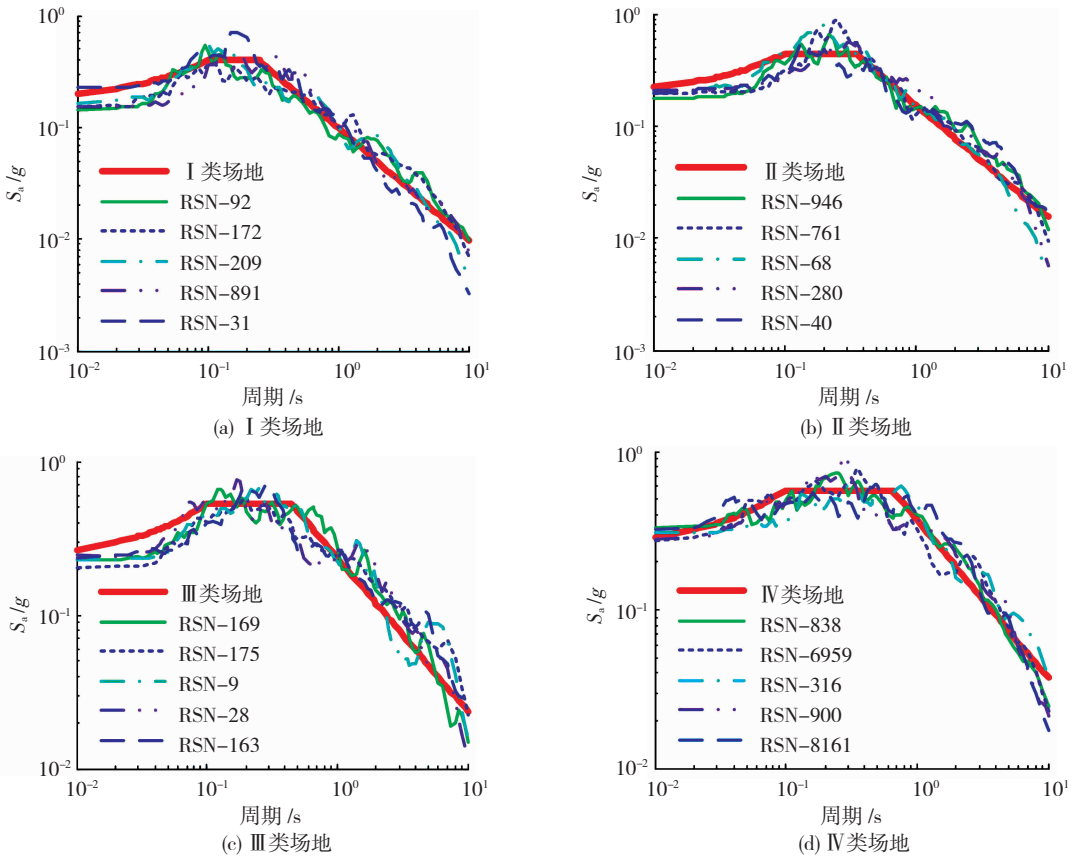


图 6 所选地震动反应谱

Fig. 6 Spectra of selected ground motions

表 3 所选天然地震记录详细信息

Tab. 3 Detailed information of selected earthquake records

场地类型	编号	台站名称	年份	震级	PGA/g	M_{SE}
I 类场地	RSN - 92	Wheeler Ridge-Ground	1971	6. 61	0. 190/0. 155	0. 037
	RSN - 172	El Centro Array #1	1979	6. 53	0. 146/0. 141	0. 070
	RSN - 209	Westmoreland Fire Sta	1979	5. 62	0. 188/0. 140	0. 076
	RSN - 891	Silent Valley-Poppet Flat	1992	7. 28	0. 164/0. 132	0. 099
	RSN - 31	Cholame-Shandon Array #8	1966	6. 19	0. 237/0. 216	0. 101
II 类场地	RSN - 946	Antelope Buttes	1994	6. 69	0. 304/0. 205	0. 041
	RSN - 761	Fremont-Emerson Court	1989	6. 93	0. 255/0. 187	0. 050
	RSN - 68	LA-Hollywood Stor FF	1971	6. 61	0. 201/0. 175	0. 052
	RSN - 280	Rio Dell Overpass - FF	1980	7. 20	0. 338/0. 142	0. 090
	RSN - 40	San Onofre-So Cal Edison	1968	6. 63	0. 222/0. 194	0. 094
III 类场地	RSN - 169	Delta	1979	6. 53	0. 273/0. 184	0. 060
	RSN - 175	El Centro Array #12	1979	6. 53	0. 222/0. 181	0. 097
	RSN - 9	El Centro Array #9	1942	6. 50	0. 275/0. 189	0. 088
	RSN - 28	Coolidge Shandon Array #12	1966	6. 19	0. 245/0. 231	0. 097
	RSN - 163	California Fire Station	1979	6. 53	0. 302/0. 185	0. 092
IV 类场地	RSN - 838	Barstow	1992	7. 28	0. 309/0. 297	0. 049
	RSN - 6959	Christchurch Resthaven	2010	7. 00	0. 259/0. 234	0. 072
	RSN - 316	Parachute Test Site	1981	5. 90	0. 310/0. 199	0. 075
	RSN - 900	Yuma Fire Station	1992	7. 28	0. 324/0. 201	0. 086
	RSN - 8161	El Centro Array #12	2010	7. 20	0. 300/0. 245	0. 088

表 4 不同场地条件的工况

Tab.4 Cases of different site conditions

工况号	地震记录	场地类别	激励方向
#1 ~ #20	RSN - 92、RSN - 172、RSN - 209、RSN - 891、RSN - 31	I 类场地	$X_p, Y_p, X_p + Y_s, X_s + Y_p$
#21 ~ #40	RSN - 946、RSN - 761、RSN - 68、RSN - 280、RSN - 40	II 类场地	$X_p, Y_p, X_p + Y_s, X_s + Y_p$
#41 ~ #60	RSN - 169、RSN - 175、RSN - 9、RSN - 28、RSN - 163	III 类场地	$X_p, Y_p, X_p + Y_s, X_s + Y_p$
#61 ~ #80	RSN - 838、RSN - 6959、RSN - 316、RSN - 900、RSN - 8161	IV 类场地	$X_p, Y_p, X_p + Y_s, X_s + Y_p$

表 5 曲线桥动力特性

Tab.5 Dynamic characteristics of the curved bridge

阶数	频率/Hz	阵型
一阶	2.549	主梁纵漂
二阶	3.306	主梁横向对称侧弯
三阶	5.701	主梁横向反对称侧弯
四阶	13.520	主梁横向对称侧弯

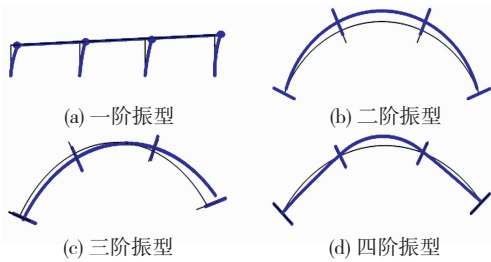


图 7 曲线桥模型的振型

Fig.7 Mode shapes of the curved bridge model

3.2 跨中位移响应

如图 8 所示,从 I 类场地到 IV 类场地,跨中位移响应依次增大。 X_p 向激励时,第二跨中切向位移最大。第一跨中切向位移大于第三跨中,这是由于 2#墩为固定墩,主梁沿地震激励方向平动的同时,兼有沿着 2#固定墩产生转动,而在 1#墩顶沿切向设置了单向滑动支座,限制主梁的径向位移,2#墩将位移直

接传递给主梁,增大了第一跨中的切向位移。 Y_p 向激励时,第三跨中位移响应均大于第一跨中,这是由于 Y 向地震激励时,主梁以平动为主,转动效应相对较小,第三跨中高度大于第一跨中,由于墩高的放大作用使得相应的主梁产生较大位移。双向地震激励时,第三跨中的位移响应均大于第一跨中,这是由于 Y 向地震激励的参与,曲线桥整体以平动为主,墩高的放大作用增大了第三跨中位移响应。双向地震激励下主梁跨中位移响应均大于单向激励。可见,在桥梁抗震分析中应重视桥梁与主震方向的相对位置和双向地震激励。

相对于 I 类场地,从 II 类场地到 IV 类场地,跨中位移放大系数依次增大,IV 类场地地震作用下放大作用最显著。 X_p 向激励时,跨中切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 3.75、3.56。 $X_p + Y_s$ 向激励时,跨中切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 4.09、3.41。 Y_p 向激励时,跨中切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 4.07、4.32。 $X_s + Y_p$ 向激励时,跨中切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 3.93、5.19。可看出,曲线桥平行于主震方向时,主梁跨中切向位移放大作用显著,而垂直于主震方向时,主梁的径向位移放大作用显著。

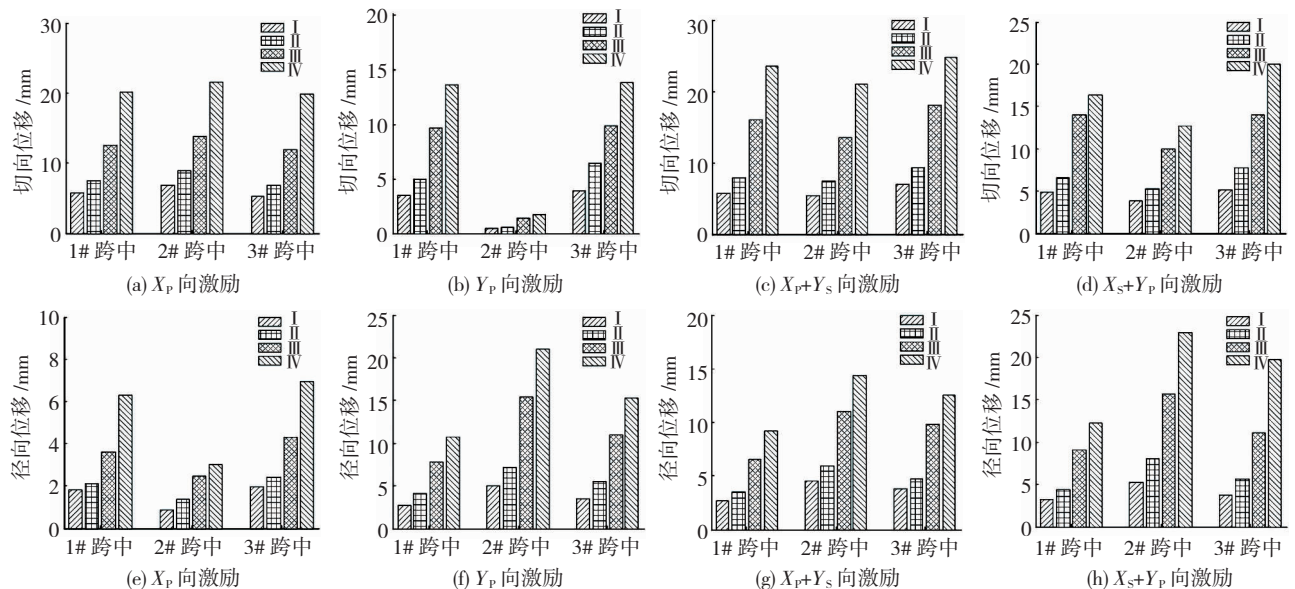


图 8 跨中位移响应

Fig.8 Displacement response of midspan

3.3 桥墩位移响应

图 9 给出了不同场地条件地震作用下桥墩位移响应. 从 I 类场地到 IV 类场地, 桥墩位移响应不断的增大. X_p 向激励时, 1#墩和 4#墩切向位移小于径向位移, 2#墩和 3#墩则大于其径向位移, 这是由于 X_p 向与 1#墩和 4#墩切向夹角为 $\pm 69^\circ$, 与径向夹角为 $\pm 21^\circ$, 而与 2#墩和 3#墩的切向夹角为 $\pm 23^\circ$, 与径向夹角为 $\pm 67^\circ$. 同理, 当 Y_p 向激励时, 1#墩和 4#墩切向位移大于径向位移, 2#墩和 3#墩切向位移小于径向位移. 可见, 桥墩位移响应与地震激励方向有关, 两者夹角越小, 相应的位移响应越显著. 4#墩的位移响应大于 1#墩, 这是由于 1#墩和 4#墩、2#墩与 3#墩对称布置, 4#墩高大于 1#墩, 说明墩高对桥墩位移具有一定的放大作用.

X_p 、 $X_p + Y_s$ 和 $X_s + Y_p$ 向激励时, 桥墩切向位移具有相似的规律, 说明 X 向的激励对桥墩切向位移影响显著. 2#墩为固定墩, 使得墩梁共同运动, 承受了主梁的惯性力, 增大了桥墩位移, 使得 2#墩的切向位移均大于其他各墩位移. Y_p 、 $X_p + Y_s$ 和 $X_s + Y_p$ 向激励时, 桥墩径向位移具有相似的规律, 说明 Y 向的激励对桥墩径向位移影响显著. 由于墩高的放大作用, 4#墩径向位移大于 1#墩, 3#墩径向位移大

于 2#墩.

相对于 I 类场地, 从 II 类场地到 IV 类场地桥墩位移放大系数依次增大, IV 类场地地震作用下放大作用最显著. X_p 向激励时, 桥墩切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 3.91、3.52. $X_p + Y_s$ 向激励时, 桥墩切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 4.04、3.55. Y_p 向激励时, 桥墩切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 3.39、4.44. $X_s + Y_p$ 向激励时, 桥墩切向位移和径向位移放大系数最大值分别为 3.74、5.99. 由此可以看出, 曲线桥平行于主震方向时, 桥墩切向位移放大作用明显. 曲线桥垂直于主震方向时, 桥墩径向位移放大作用显著.

3.4 支座位移响应

如图 10 所示, 从 I 类场地到 IV 类场地, 支座位移响应不断增大. X_p 向激励时, 1#墩处支座位移大于 4#墩, 这是由于顺桥向地震激励使主梁产生转动, 主梁与 2#固定墩共同运动, 将位移直接传递给主梁, 使得 1#墩处支座沿滑动方向产生较大切向位移. Y_p 、 $X_p + Y_s$ 和 $X_s + Y_p$ 向激励时, 由于 Y 向地震激励的参与, 主梁以平动为主, 墩高的放大作用使得高墩处的墩梁相对位移显著, 导致了 4#墩处支座位移响应大于 1#墩处. 双向激励时, 支座位移均大于单

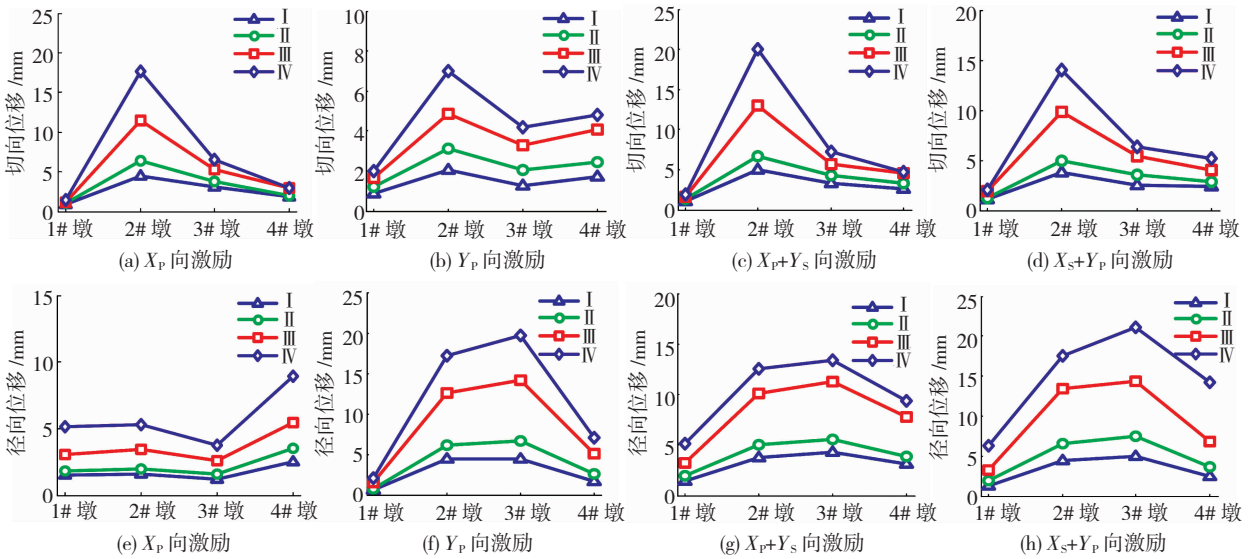


图 9 桥墩位移响应

Fig. 9 Displacement response of piers

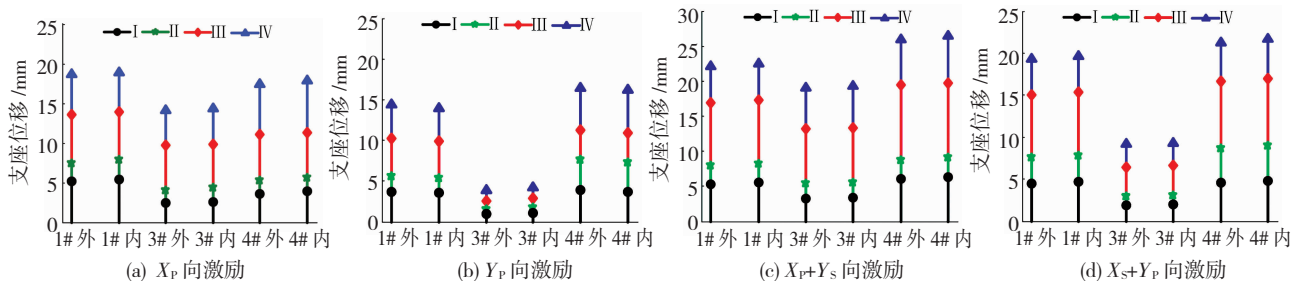


图 10 支座相对位移响应

Fig. 10 Relative displacement response of bearings

向激励.可以看出,在曲线桥平行于主震方向单向激励激励时,低墩处支座更容易脱落,在平行于主震方向双向激励和垂直于主震方向激励时,高墩处支座容易产生脱落,双向地震激励不容忽视.

4 结 论

1)场地条件对曲线桥结构响应影响显著,从 I 类场地到 IV 类场地,曲线桥结构响应逐渐增大,结构放大作用明显.双向激励时的结构响应均大于单向激励,因此,在结构抗震分析中应考虑场地条件和双向地震激励的影响.

2)曲线桥主梁结构响应存在空间性,在顺桥向地震激励参与下,主梁沿振动方向平动的同时,沿固定墩产生转动.横桥向地震激励时,主梁以平动为主.

3)曲线桥结构响应与主震方向有关.曲线桥与主震方向平行时,结构的切向位移响应较为显著,垂直于主震方向时,结构的径向位移响应更为敏感.因此,应对桥梁布置及地震激励方向进行合理分析.

4)桥墩位移响应与地震激励方向和墩高差有关,位移方向与地震激励方向夹角越小,相应的位移越大.墩高越高,桥墩位移的放大作用越显著.固定墩切向位移对地震比较敏感.

5)曲线桥平行于主震方向单向激励时,主梁的转动效应显著,使得低墩处支座位移显著,双向激励和垂直主震方向时,高墩处位移较大,容易引起支座脱落,在抗震设计与分析应予以重视.

参考文献

- [1] 张菊辉,管仲国.匝道桥地震响应影响要素分析[J].桥梁建设, 2015, 45(4): 59
ZHANG Juhui, GUAN Zhongguo. Analysis of factors influencing seismic responses of ramp bridges[J]. Bridge Construction, 2015, 45(4): 59
- [2] 张菊辉,管仲国.立交匝道桥地震响应及合理抗震体系研究[J].振动与冲击, 2015, 34(13): 191
ZHANG Juhui, GUAN Zhongguo. Seismic response analysis and reasonable seismic system design for a viaduct ramp bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 191. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.13.032
- [3] 王吉文.城市立交匝道桥梁的下部结构设计及要点[J].工程建设与设计,2017(19):81
WANG Jiwen. The design and essentials for the substructure of interchange ramp of urban bridge[J]. Municipal Traffic Water Resources Engineering Design, 2017(19): 81. DOI: 10.13616/j.cnki.gejsysj.2017.10.024
- [4] 黄勇,李瑞,朱文骏.汶川地震中小半径曲线连续梁桥震害机理分析[J].地震工程与工程振动,2014, 34(增刊1): 384
HUANG Yong, LI Rui, ZHU Wenjun. Analysis of damage mechanism of small radius curve continuous beam bridge during the Wenchuan Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S1): 384. DOI: 10.13197/j.eeev.2014.S0.383.huangy.060
- [5] 王秋萍.汶川地震桥梁震害模糊综合评价方法研究[D].成都:西南交通大学,2011
WANG Qiuping. Study of fuzzy comprehensive evaluation of bridge

- damages in Wenchuan Earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011
- [6] 孙宗光,孙占琦,李晓飞.曲线连续梁桥侧向失稳破坏机理与行为分析[J].公路交通科技,2006(7): 68
SUN Zongguang, SUN Zhanqi, LI Xiaofei. Lateral slippage mechanism and behavior of curved bridge deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(7): 68
- [7] ANDROUS A, AFEFY H M, SENNAH K. Investigation of free vibration and ultimate behavior of composite twin-box girder bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 130: 189. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.12.017
- [8] GUPTA T, KUMAR M. Flexural response of skew-curved concrete box-girder bridges[J]. Engineering Structures, 2018, 163: 360. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.02.063
- [9] BANERJEE A, CHANDA A, DAS R. Seismic analysis of a curved bridge considering deck-abutment pounding interaction: An analytical investigation on the post-impact response[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(2): 269. DOI: 10.1002/eqe.2791
- [10]SIDERIS P, AREF A J, FILIATRAULT A. Experimental seismic performance of a hybrid sliding-Rocking bridge for various specimen configurations and seismic loading conditions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(11): 186. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000742
- [11]ALVAREZ-ACOSTA R, VALDES-GONZALEZ J. Structural response of plan-curved steel I-girder bridges from an equivalent straight bridge analysis[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(3): 5. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001187
- [12]AMJADIAN M, AGRAWAL A K. Rigid-body motion of horizontally curved bridges subjected to earthquake-induced pounding [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(12): 16. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000962
- [13]李晰,贾宏宇,李倩.近断层地震动作用下大跨度曲线刚构桥台阵试验研究[J].振动与冲击,2017,36(5):206
LI Xi, JIA Hongyu, LI Qian. Shaking table tests for a long-span curved rigid bridge under near-fault ground motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5): 206. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.032
- [14]程麦理,李青宁,尹俊红,等.非规则高墩曲线桥梁振动台试验研究[J].振动与冲击,2016,35(2):28
CHENG Maili, LI Qingning, YIN Junhong, et al. Shaking tables tests of irregular curved bridge with high piers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 28. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.02.005
- [15]闫磊,李青宁,程麦理,等.曲线桥梁漂浮抗震体系地震模拟振动台试验及有限元分析[J].振动与冲击,2016,35(2):5
YAN Lei, LI Qingning, CHENG Maili, et al. Shaking table tested and finite element analysis on the curved bridge with floating seismic system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 5. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.02.001
- [16]MONZON E V, BUCKLE I G, ITANI A M. Seismic performance and response of seismically isolated curved steel I-girder bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 15. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001594.
- [17]OH J, JANG C, KIM J H. Seismic behavior characteristic of high damping rubber bearing through shaking table test [J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(3): 1598. DOI: 10.21595/jve.2016.15973
- [18]王天稳.土木工程结构试验[M].武汉:武汉理工大学出版社, 2006:16
WANG Tianwen. Structure experiment of civil engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006: 16
- [19]公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社, 2008:15
Guideline for seismic design for highway bridges: JTG/T B02-01-2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008: 15
- [20]PEER. Technical report for the PEER ground motion database web application [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2010