

# 内倾角对中承式钢箱提篮拱桥抗震性能影响分析

隋伟宁<sup>1</sup>, 李航<sup>2</sup>, 王占飞<sup>2</sup>, 李天宇<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要** 目的 为了研究拱肋内倾角对拱桥抗震性能的影响, 比较不同内倾角拱桥的位移及内力响应. 方法 利用有限元分析软件 ABAQUS 建立拱肋内倾角分别为  $0^\circ$ 、 $4^\circ$  以及  $7^\circ$  的中承式钢箱提篮拱桥多尺度模型, 沿横桥向和顺桥向输入强震, 分析中承式钢拱桥的拱脚截面、拱顶截面、主梁跨中截面和  $1/4$  拱跨截面的位移和内力响应. 结果 在横桥向地震动作用下, 结构的位移响应随内倾角的增大而减小. 在内力响应方面, 随着内倾角的增大, 拱桥四个截面轴力均增大, 在  $1/4$  跨截面至拱顶截面的弯矩和剪力减小. 顺桥向地震作用下, 随着拱肋向内倾斜, 拱桥位移响应、轴力和剪力逐渐减小, 弯矩响应变化不明显. 结论 增大拱肋内倾角可有效提高拱桥的抗震性能.

**关键词** 桥梁工程; 提篮拱桥; 有限单元法; 内倾角; 抗震性能

中图分类号 U448.22 文献标志码 A

## Effect of Leaning Angle on Seismic Performance of Half-through Steel Box Basket-type Arch Bridges

SUI Weining<sup>1</sup>, LI Hang<sup>2</sup>, WANG Zhanfei<sup>2</sup>, LI Tianyu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. China Northeast Architecture Design & Research Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110000)

**Abstract:** In this paper, to study the effect of leaning angle on the seismic performance of arch bridges under ground motions and compare the force and displacement responses of arch bridges with different leaning angle ( $0^\circ$ ,  $4^\circ$  and  $7^\circ$ ), 3-D space finite element models of half-through steel basket-type arch bridges with leaning angles of  $0^\circ$ ,  $4^\circ$  and  $7^\circ$  based on a practical engineering are established by software ABAQUS, then strong ground motions are input along the transverse and longitudinal directions to analysis the displacement and force response of arch bridge sections (arch foot, arch vault, mid-span,  $1/4$  arch span). The results show that under the strong transverse ground motion, the displacement response of the structure decreases with the increase of the leaning

收稿日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378319)

作者简介: 隋伟宁(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事钢结构建筑等方面研究.

angle, which improves the seismic performance of the arch bridge. As for the force response, the axial force of each section of arch bridge increase, while the moment and shear decrease from the 1/4 span of bridge to vault section. Under the longitudinal ground motions, the axial force and displacement of the sections are getting smaller as the arch rib is inclined inward, however the change of moment is weak. Increasing the leaning angle can effectively improve the seismic performance of arch bridge

**Key words:** bridge engineering; basket-type arch bridge; finite element method; leaning angle; seismic performance

钢拱桥相比于传统混凝土和钢管混凝土拱桥,具有外形简洁美观、跨越能力强、施工周期短等优点,在我国得到了广泛的应用。而在我国地震频发及震级较高地区建设钢拱桥,当受到强震作用时,拱桥上部结构、桥面板等构件的破坏严重,会阻碍震后救援工作,并危及人们的生命财产安全。目前我国执行的桥梁抗震设计规范要求对处于抗震设防烈度大于9度地区的桥梁和有特殊要求的大跨径或特殊桥梁的抗震设计应做专门研究<sup>[1]</sup>,并没有明确强震作用下大跨径拱桥的具体抗震设计条例,为此大跨径拱桥在强震作用下的抗震性能需要进一步研究与分析。

近年来,国内外学者对拱桥的抗震性能多有研究,云迪等<sup>[2]</sup>利用 ANSYS 软件对一座中承式钢管混凝土拱桥进行弹塑性时程分析,研究表明,拱肋的节点位移随着地震动峰值加速度的增大而增大。Tang Z Z 等<sup>[3-9]</sup>研究了钢拱桥的地震响应分析。随着研究的深入,赵唯坚等<sup>[10-13]</sup>研究了拱桥内倾角对拱桥的静力特性、稳定性和动力特性的影响,得到拱肋内倾可以提高拱桥的平面外稳定性、横向刚度以及拱桥的静、动力特性的结论。

现有研究主要针对拱肋内倾角对拱桥动力特性等影响,关于拱肋内倾角对于拱桥在强震作用下抗震性能影响还鲜有报道,因此笔者利用有限元软件 ABAQUS,以一座在建中承式提篮钢拱桥为工程背景,建立内倾角分别为  $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $7^\circ$  的拱桥有限元模型,进行拱桥的动力时程分析以及在 JRT-NS 波作用下的抗震性能分析,提取拱脚截面、拱顶截面、

主梁跨中截面和 1/4 拱跨截面的位移和内力响应,分析拱肋内倾角对强震作用下中承式钢箱提篮拱桥抗震性能的影响,为该类桥梁在我国的应用提供理论依据。

## 1 计算模型

### 1.1 拱桥工程概况

笔者以一座在建中承式钢箱提篮拱桥为背景,该拱桥全长 362 m,主跨 350 m,面内矢高 63.3 m,矢跨比为 1/5.5,拱肋内倾角为  $4^\circ$ ,抗震设防等级为 9 度,场地类型为 II 类场地。拱桥采用两片钢箱型拱肋,12 对吊杆、4 根立柱和 12 根横撑(其中 8 根位于桥面上方);桥面为正交异性钢桥面板,沥青混凝土桥面铺装,厚 0.08 m。拱桥整体构造如图 1 所示,各构件截面形式及具体参数如图 2 所示。

### 1.2 模型建立

研究利用 ABAQUS 有限元软件采用多尺度建模方法建立中承式钢箱提篮拱桥分析模型<sup>[14-17]</sup>,有限元模型如图 3 所示。笔者重点研究拱脚的地震响应,桥面板、横隔板、横撑及拱肋等构件采用未考虑局部变形的梁单元 B31 建模;吊杆构件采用桁架单元 T3D2 模拟;拱脚部分采用考虑局部失稳变形的壳单元 S4R 建模;连接拱脚、拱肋的盖板同样采用壳单元 S4R 建模。其中拱脚截面沿长边方向划分为 12 个单元,短边方向划分为 8 个单元,纵向加劲肋沿长度方向划分为两个单元。拱脚和纵向加劲肋沿 1/2 拱脚高度上部划分为 25 个单元,下部划分为 35 个单元,拱脚(包含纵向加劲肋在内)共划分了 4 320 个

单元;盖板沿长边方向划分为 12 个单元,短边为 8 个单元,共划分为 96 个单元. 全桥模

型共划分了 2 162 个梁单元,以及 18 816 个壳单元.

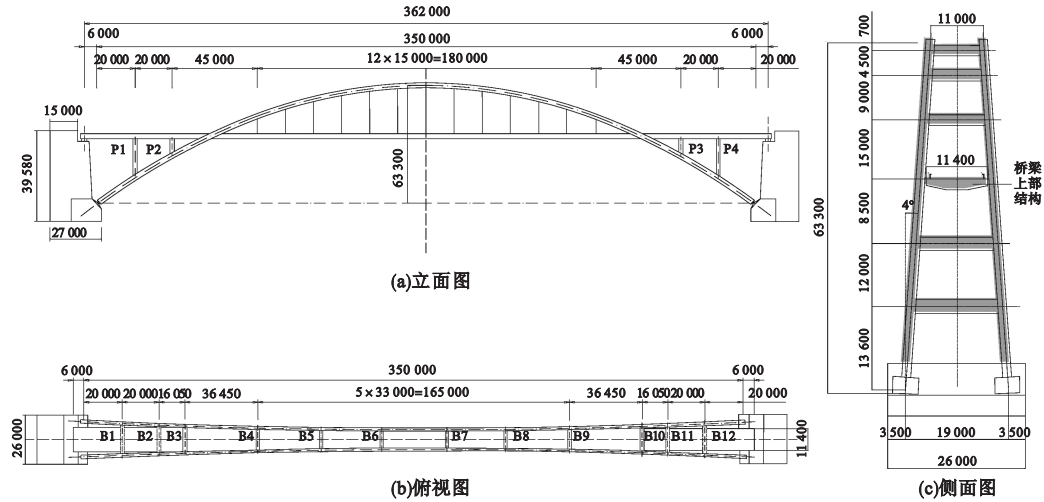


图 1 中承式钢箱提篮拱桥整体构造图

Fig. 1 Overview of the half-through steel box basket-type arch bridge

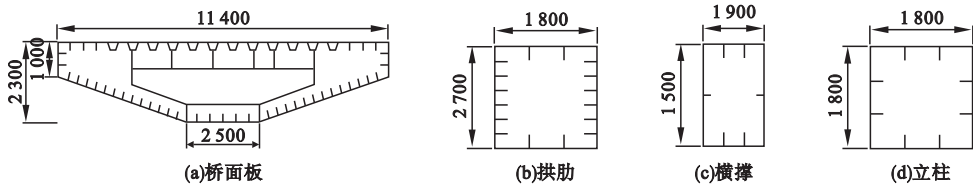


图 2 提篮拱桥构件截面形式

Fig. 2 Crossing-sections of components of basket-type arch bridge

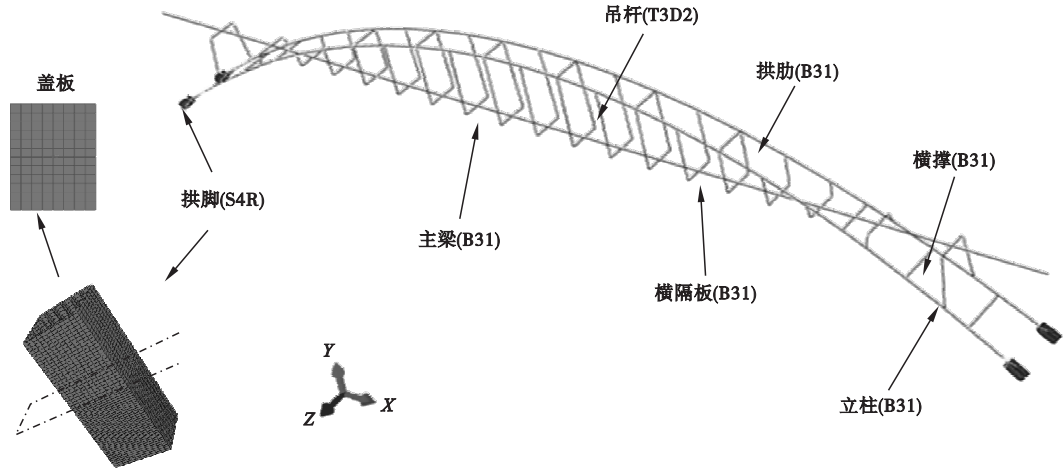


图 3 拱桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of arch bridge

各部位接触及边界条件设置:模型的盖板和拱脚之间采用绑定(Tie)约束;拱肋与盖板之间采用刚体(rigid)连接. 桥面板中每隔

15 m 设置一道横隔板,横隔板与桥面板之间采用刚体(rigid)连接;吊杆上下两端分别与拱肋、钢桥面板铰接,且不约束连接处横桥向

的平动. 整桥模型的边界条件为桥面板约束竖桥向和纵桥向平动, 释放顺桥向平动和三个转动自由度; 拱脚部位约束三个平动自由度, 释放三个转动自由度.

拱桥钢材选用 Q345 钢材, 屈服强度  $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$ , 弹性模量  $E_0 = 210 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.3$ , 本构关系选取考虑包辛格效应的二折线随动强化模型, 二次模量  $E_1 = E_0/100$ .

为了研究内倾角对该类钢箱提篮拱桥抗震性能的影响, 另建立拱肋内倾角为  $0^\circ$  及  $7^\circ$  的提篮拱桥模型.

## 2 内倾角对钢箱提篮拱桥动力特性的影响

采用兰索斯法 (Lanczos) 对三个拱桥模型进行动力特性分析得到拱桥模型的动力特性结果见表 1, 表中列出拱桥模型前 15 阶振型的周期、振型参与系数和振型描述. 如表 1 所示, 随着拱肋内倾角增大, 拱桥振动周期逐渐减小,  $4^\circ$  和  $7^\circ$  拱桥模型的振型描述相同, 其典型振型如图 4、图 5、图 6 所示.

表 1  $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $7^\circ$  拱桥前 15 阶自振周期和振型描述

Table 1 Description of the first fifteenth order period and mode shapes														
阶数	0°拱桥					4°拱桥				7°拱桥				
	周期/s	振型描述	振型参与系数 $\beta/\%$			周期/s	振型参与系数 $\beta/\%$			周期/s	振型参与系数 $\beta/\%$			振型描述
			$\beta_x$	$\beta_y$	$\beta_z$		$\beta_x$	$\beta_y$	$\beta_z$		$\beta_x$	$\beta_y$	$\beta_z$	
1	3.09	STR	0	0	68.9	2.95	25.5	0	0	2.93	25.4	0	0	ASVE
2	2.99	ASVE	25.9	0	0	2.70	0	0	70.5	2.40	0	0	73.2	STR
3	1.54	STR	0	0	8.71	1.59	0	0	5.97	1.48	0	0	1.78	STR
4	1.27	ASTR	0	0	0	1.22	0	0	0	1.18	0	0	0	ASTR
5	1.02	ASVE	18.5	0	0	0.99	17.5	0	0	0.99	17.7	0	0	ASVE
6	0.94	SVE	0	3.68	0	0.87	0	4.76	0	0.87	0	5.0	0	SVE
7	0.85	ASTR	0	0	0	0.81	0	0	0	0.78	0	0	0	ASTR
8	0.65	STR	0	0	1.57	0.63	0	0	2.34	0.63	0	0	2.60	STR
9	0.63	SVE	0	30	0	0.63	0	39.3	0	0.62	0	38.9	0	SVE
10	0.50	STR	0	0	9.26	0.49	0	0	9.36	0.48	0	0	9.44	STR
11	0.44	ASVE	5.83	0	0	0.43	4.29	0	0	0.42	4.20	0	0	ASVE
12	0.43	ASTR	0	40.7	0	0.41	0	40.9	0	0.39	0	41.1	0	SVE
13	0.43	SVE	0	0	0	0.39	0	0	0.18	0.39	0	0	0.58	STO
14	0.42	STO	0	0	0	0.39	0	0	0	0.39	0	0	0	ASTR
15	0.37	ASTR	0	0	0	0.33	0	0	0	0.32	0	0	0	ASTO

注: STR 表示对称横向振动、SVE 表示对称竖向振动、STO 表示对称扭转振动、ASTR 表示反对称横向振动、ASVE 表示反对称竖向振动、ASTO 表示反对称扭转振动;  $\beta_x$ 、 $\beta_y$ 、 $\beta_z$  分别表示横桥向、顺桥向和竖桥向有效参与系数.

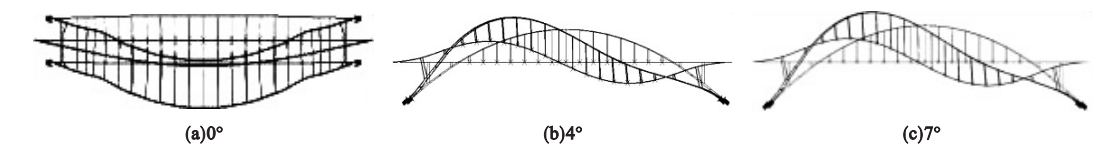


图 4 拱桥第一阶振型图

Fig. 4 First vibration mode of bridge

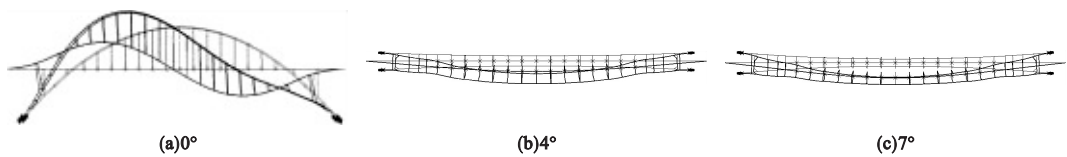


图 5 拱桥第二阶振型图

Fig. 5 Second vibration mode of bridge

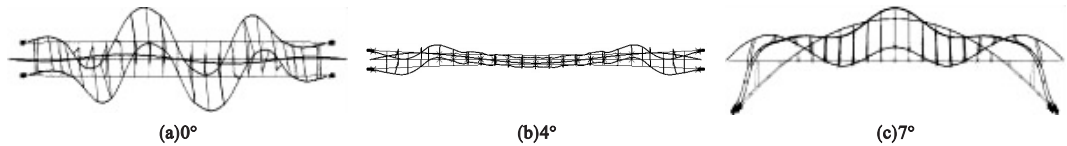


图 6 拱桥的第十二阶振型图

Fig. 6 Twelfth vibration mode of bridge

### 3 内倾角对钢箱提篮拱桥抗震性能的影响

为了研究不同内倾角拱桥在强震作用下的抗震性能及其影响,选取 JRT-NS 波<sup>[18-19]</sup>分别沿横桥向与顺桥向施加在内倾角为 0°、4°及 7°的拱桥模型上,加速度峰值为 0.70 g,持续时间为 30 s,波形如图 7 所示,分析采用非线性动力时程方法,自动划分时间步长,最大时间间隔 0.01 s,阻尼采用瑞利阻尼,第一、第二振型下的阻尼系数分别取 0.02. 研究拱桥在横桥向与顺桥向地震作用时拱顶、主梁跨中、1/4 拱跨、拱脚等截面的位移及内力响应结果,评价该拱桥的抗震性能.

#### 3.1 横桥向地震响应结果对比

笔者选取拱桥在地震波 JRT-NS 横向作用下,截面的位移响应. 1/4 跨、跨中和拱顶截面的位移时程曲线如图 8 所示,其中纵坐标为拱桥横桥向位移  $U_x$ ,横坐标为时间  $t$  (图中未

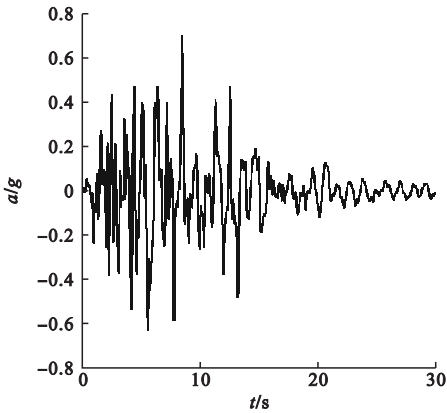


图 7 输入的地震波(JTR-NS 波)

Fig. 7 Earthquake wave input (JRT-NS wave)

考虑桥梁自重影响). 由图可知,随着拱肋内倾角的增加,关键截面的横桥向位移减小,其中拱顶截面减小效果明显,0°拱桥模型拱顶截面的  $U_x$  最大值为 1.952 m,4°拱桥模型的  $U_x$  最大值为 1.660 m,7°拱桥的  $U_x$  最大值 1.561 m;与 0°模型相比,4°与 7°模型分别减小了 14.9% 和 20%,有效地改善了拱桥的地震响应.

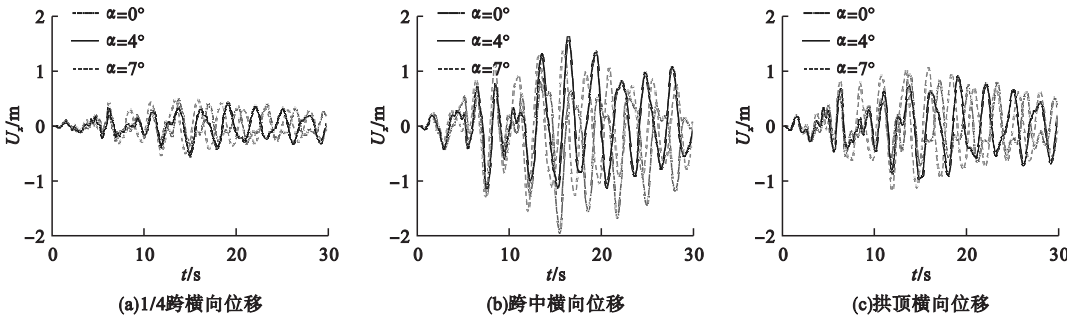


图 8 横桥向地震动下截面位移响应

Fig. 8 Displacement history of sections under transverse ground motions



图9表示在地震波 JRT-NS 作用下,拱桥截面的轴力时程曲线,其中纵坐标为承载力与屈服承载力比值  $F/F_y$ 。从曲线分析得到,随着拱肋向内倾斜,各截面轴力有增大的

趋势。在轴力最大的拱脚处,4°与7°拱桥的拱脚轴力较0°拱桥的拱脚轴力分别增大了37.1%和54.4%。但轴力的时程响应均小于拱肋轴向屈服承载力,拱桥仍处于安全状态。

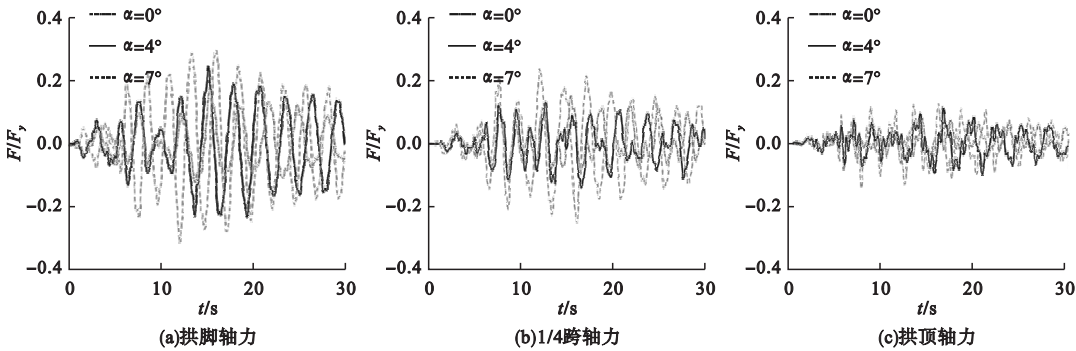


图9 横桥向地震动下的轴力时程曲线

Fig.9 Axial force response of sections under transverse ground motions

拱肋在 JRT-NS 波横桥向作用下的轴力包络图如图10(a)所示。由图可知,拱肋轴力响应沿着拱脚到拱顶方向逐渐减小,减速缓慢,而在拱顶处,4°和7°拱桥出现轴力增大的情况;其中三个拱桥模型均在拱脚处达到最大值,0°、4°、7°拱桥的拱脚轴力分别为0.39 $F_y$ 、0.45 $F_y$ 、0.49 $F_y$ 。拱桥面外弯矩包络如图10(b)所示,由图可知,拱肋面外弯矩在

$P_1$  立柱的位置达到第一个峰值,拱肋此点处面外弯矩为全拱肋最大值,0°、4°、7°拱桥的面外弯矩分别为0.21 $M_y$ 、0.25 $M_y$ 、0.36 $M_y$  ( $M_y$ 为拱肋的屈服弯矩);在拱肋与主梁交汇处达到第二个峰值,但此时面外弯矩仍小于 $P_1$ 立柱处面外弯矩。结果表明,拱脚和 $P_1$ 立柱处为拱桥轴力和面外弯矩薄弱处,应在设计时予以重视。

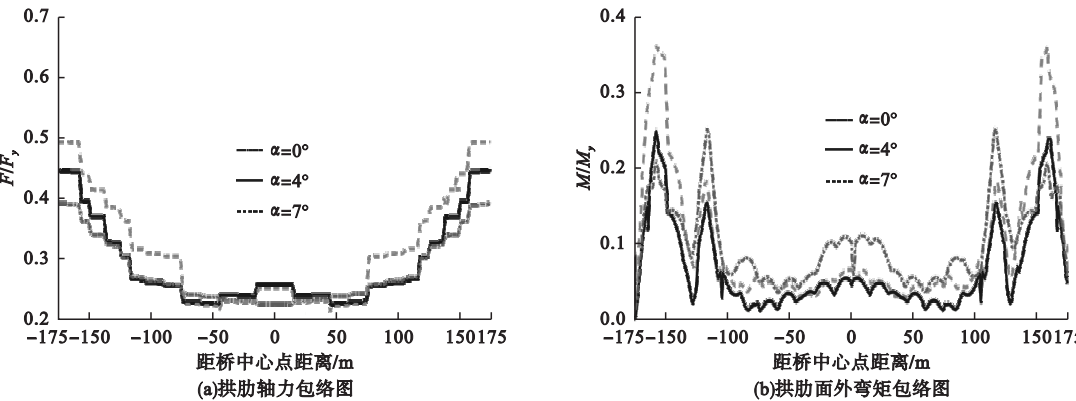


图10 横桥向拱桥内力包络图

Fig.10 Force response envelope diagram of arch bridges under transverse ground motions

图11和12分别为地震波 JRT-NS 横桥向作用下横撑  $B_4$  和拱脚处的应力-应变滞回曲线,其中纵坐标表示应力  $\sigma$  与屈服强度  $\sigma_y$  的比值,横坐标表示应变  $\varepsilon$  与屈服应变  $\varepsilon_y$  的比值<sup>[20]</sup>。从图11中看出,3个模型的横撑部

分均进入塑性阶段。由图12可知,只有7°拱桥的拱脚达到屈服,最大应变超过1.1倍屈服应变。由此看出,在横桥向地震下,3个拱桥模型均出现了横撑比拱脚更早进入屈服状态的现象,所以在进行设计时应注意横撑的设计。

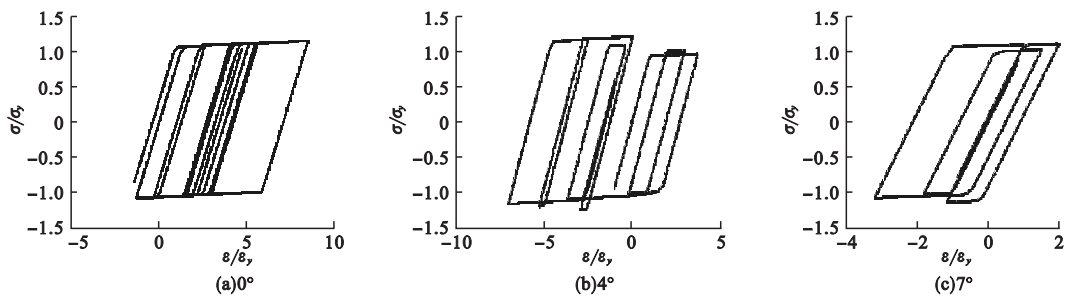


图 11 横撑应力-应变滞回曲线

Fig. 11 Stress-strain hysteresis curves of cross-brace

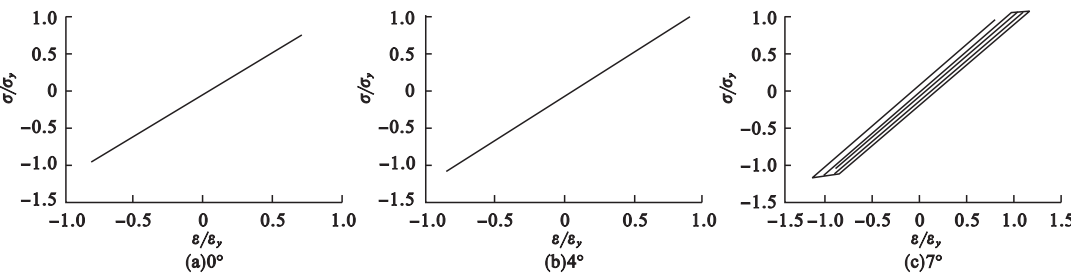


图 12 拱脚应力-应变滞回曲线

Fig. 12 Stress-strain hysteresis curves of arch foot

3.2 顺桥向地震结果对比

在 JRT-NS 波顺桥向作用下,0°、4°、7°拱桥模型的位移响应峰值结果见表 2,内力响应峰值结果见表 3。

表 2 顺桥向地震作用下拱桥的位移响应峰值  
Table 2 Peak value of displacement responses under longitudinal ground motions

截面	内倾角/(°)	竖向位移/m	纵向位移/m	与 0°模型 位移量差值/%	
				竖向	纵向
1/4 跨	0	0.086	0.038	—	—
	4	0.072	0.022	-16.3	-42.1
	7	0.072	0.025	-16.3	-34.2
跨中	0	0.190	0.010	—	—
	4	0.181	0.011	-4.7	10.0
	7	0.183	0.012	-3.6	20.0
拱顶	0	0.154	0.087	—	—
	4	0.150	0.079	-2.6	-9.2
	7	0.151	0.078	-1.9	-10.34

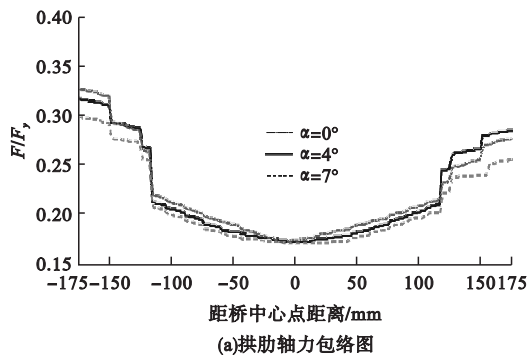
从表 2 中可以看出,顺桥向地震作用对跨中位移的影响最大,对 1/4 拱跨影响最小.并且所有截面的竖向位移均大于另外两个方向的位移.将顺桥向地震作用下 4°及 7°拱桥模

型的位移与 0°进行对比得出,4°及 7°拱桥模型在拱顶和跨中截面的位移响应较 0°均有减小,而 1/4 拱跨处 4°和 7°拱桥模型在两个方向的位移响应均大于 0°,其中 7°与 0°拱桥模型相差较大.从表 3 可以看出,在内力响应方面,在顺桥方向地震作用下,随着拱肋内倾角增大,拱桥的拱脚、1/4 跨和拱顶所受到的轴力和剪力是减小的,弯矩没有明显的减小效果。

表 3 顺桥向地震作用下拱桥的内力响应峰值  
Table 3 Peak value of force responses under longitudinal ground motions

截面	内倾角/(°)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
拱脚	0	21 708	12 404	—
	4	21 532	12 349	—
	7	20 882	11 124	—
1/4 跨	0	21 948	2 142	11 800
	4	18 512	779	9 072
	7	22 238	1 326	12 880
拱顶	0	15 200	1 179	1 714
	4	15 053	760	2 090
	7	14 747	863	2 185

顺桥向地震作用下,拱桥的轴力包络如图 13(a)所示。由图可知,拱肋在拱脚附近的轴力最大,从拱脚到拱顶范围内,轴力一直在减小,且轴力值均为  $7^\circ$  拱桥模型最小,表明在顺桥向地震作用下,增大拱肋内倾角可有效减小轴力响应值。拱桥的面内弯矩包络图



如图 13(b)所示,与横桥向地震作用下面内弯矩响应相似,拱肋面内弯矩在拱肋与主梁交汇处达到最大值,为  $0.12M_y$ ,其余位置相对较小。同时,与横桥向地震作用下拱肋轴力、弯矩结果对比,顺桥向地震作用下的拱肋轴力、弯矩响应较小。

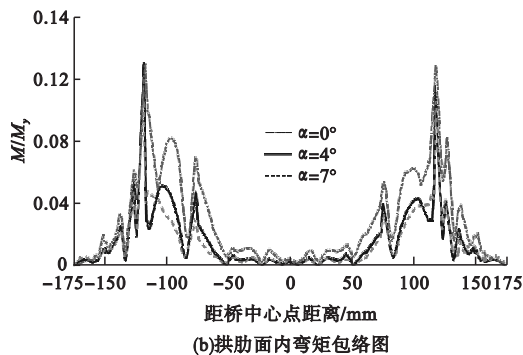


图 13 顺桥向拱桥内力包络图

Fig. 13 Force response envelope diagram of arch bridges under longitudinal ground motions

## 4 结 论

(1)随着拱肋内倾角的增大,提篮拱桥的周期响应减小,面外刚度增加,横向稳定性得到提高,但对提篮拱桥面内刚度及纵向稳定性影响较小。

(2)拱桥横桥向地震作用下,拱顶会产生比较大的竖向以及横向位移,且  $4^\circ$  模型与  $7^\circ$  模型在四个截面处的位移均小于  $0^\circ$  模型,表明增大拱肋内倾角可以降低拱桥截面的位移响应,改善拱桥的地震结构响应。

(3)拱桥在横桥向地震作用下,在拱脚截面附近达到最大轴力。随着拱肋内倾角增大,地震反应引起的拱肋各截面轴力及拱脚剪力均相应增大,但在  $1/4$  跨及拱顶截面的弯矩和剪力则随着拱肋内倾而减小。

(4)拱桥在顺桥向地震作用下,增大拱肋内倾角可以有效降低拱桥截面的位移响应;轴力及剪力随着拱肋内倾整体呈现减小趋势,弯矩变化不明显。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁抗震设计

细则:JTJ/T B02—01—2008[S]. 北京:人民交通出版社,2008.

(Ministry of Transportation of the People Republic of China. Guidelines for Seismic Design of Highway Bridge: JTJ/T B02—01—2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.)

[2] 云迪,刘贺,张素梅,等. 中承式钢管混凝土拱桥弹塑性地震时程分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(6):1633-1638.

(YUN Di, LIU He, ZHANG Sumei. Elastic-plastic time-history analysis of half-through CFST arch bridge [J]. Journal of Jinlin university (engineering and technology edition) 2014,44(6):1633-1638.)

[3] TANG Z Z, XIE X, WANG T, et al. Study on FE models in elasto-plastic seismic performance evaluation of steel arch bridge[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 113 (113):209-220.

[4] 唐利科. 大跨度提篮式钢箱拱桥动力特性及地震响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.

(TANG Like. Dynamic characteristic and seismic response analysis of long span basket steel box arch bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.)

[5] SEVIM B, BAYRAKTAR A, ALTUNIKK A C, et al. Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations[J]. Nonlinear dynamics, 2011, 63(4):755-770.

[6] XIA C, ZHONG T. Numerical analysis of the Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge subjected to non-uniform seismic excitations [J]. Journal of mechanical science & technolo-



- gy, 2011, 25(5): 1297 - 1306.
- [7] 王占飞, 邢宇玥, 陈小军. 上承式钢桁架拱桥抗震性能分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(11): 158 - 160.  
(WANG Zhanfei, XING Yuyue, CHEN Xiaojun. Study on deck-type steel truss arch bridge [J]. Highway transportation science and technology (applied technology edition), 2016 (11): 158 - 160.)
- [8] DUSSEAU R A, WEN R K. Seismic responses of deck-type arch bridges[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1989, 18(5): 701 - 715.
- [9] ÁLVAREZ J J, APARICIO A C, JARA J M, et al. Seismic assessment of a long-span arch bridge considering the variation in axial forces induced by earthquakes[J]. Engineering structures, 2012, 34: 69 - 80.
- [10] 赵唯坚, 刘欢, 王占飞, 等. 小矢跨比上承式钢提篮拱桥动力及稳定性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 193 - 201.  
(ZHAO Weijian, LIU Huan, WANG Zhanfei, et al. Dynamic characteristic and stability analysis of small rise-span ratio steel deck-type basket arch bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2): 193 - 201.)
- [11] 刘爱荣, 禹奇才, 张俊平, 等. 斜拱肋倾角变化对斜靠式拱桥地震响应的影响[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 276 - 272.  
(LIU Airong, YU Qicai, ZHANG Junping, et al. Influence of variation of incline angel of inclined arch rib on the seismic response of leaning-type arch bridge [J]. Journal of Ji'nan university (natural science), 2010, 31(3): 267 - 272.)
- [12] FULIN S, AIRONG L, RUI S, et al. Study of seismic performance of leaning-type arch bridge [C]// International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering. IEEE, USA: Curran Associates, 2010.
- [13] 卢东阳, 卢三平, 何旭辉, 等. 拱肋内倾角对大跨度钢箱提篮拱桥动力特性及地震响应影响的分析[J]. 中外公路, 2012, 32(6): 137 - 142.  
(LU Dongyang, LU Sanping, HE Xuehui. Influence of leaning angle on dynamic characteristic and seismic response of long-span box-section basket-type arch bridge. [J]. Journal of China and foreign highway, 2012, 32(6): 137 - 142.)
- [14] 唐站站. 钢桥弹塑性地震反应计算方法及钢材地震损伤指标研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
(TANG Zhanzhan. Research on seismic response evaluation method of steel bridges and seismic damage index of steel material [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.)
- [15] 谢旭, 唐站站, 胡欣科, 等. 梁模型在钢拱桥抗震设计中的适用性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 2: 33 - 42.  
(XIE Xu, TANG Zhanzhan, HU Xinke, et al. Study of application of fiber model in seismic design for steel arch bridge [J]. China journal of highway and transportation, 2015, 2: 33 - 42.)
- [16] 赵中伟, 陈志华, 刘红波, 等. 基于多尺度模型的大跨度钢结构弹塑性动力响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016(2): 165 - 172.  
(ZHAO Zhongwei, CHEN Zhihua, LIU Hongbo, et al. Elastic-plastic seismic response analysis of large-span steel structure based on multi-scaled model [J]. Earthquake engineering and engineering dynamic, 2016(2): 165 - 172.)
- [17] LI Zhongxian, CHEN Yu, SHI Yundong. Numerical failure analysis of a continuous reinforced concrete bridge under strong earthquakes using multi-scale models [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2017(2): 154 - 170.
- [18] USAMI T, LU Z, GE H, et al. Seismic performance evaluation of steel arch bridges against major earthquakes. Part1: dynamic analysis approach [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010, 33(14): 1337 - 1354.
- [19] LU Z, USAMI T, GE H. Seismic performance evaluation of steel arch bridges against major earthquakes. Part 2: simplified verification procedure [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010, 33(14): 1355 - 1372.
- [20] 卢东阳, 何旭辉, 秦红禧. 大跨度钢箱提篮拱桥拱脚过渡段局部应力分析[J]. 公路交通技术, 2011(1): 57 - 60.  
(LU Dongyang, HE Xuhui, QIN Hongxi. Analysis of local stress at transition sections of abutments in large-span steel-box handle basket arch bridge [J]. Technology of highway and transportation, 2011(1): 57 - 60.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)