

# 考虑梁端碰撞效应的单跨非对称 悬索桥地震响应分析

贾毅<sup>1,2</sup>, 王子浩<sup>1,2</sup>, 田浩<sup>1,2</sup>, 刘鹏曾<sup>1,2</sup>, 宋浩博<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

**摘要** 目的 研究主引桥伸缩缝处碰撞效应对大跨度悬索桥地震响应的影响。方法 以西南地区某单跨非对称悬索桥为研究对象, 基于 ANSYS 有限元软件建立主引桥模型, 采取接触单元法, 研究桥梁在考虑梁端碰撞效应下的地震响应, 并探究了伸缩缝间隙、碰撞单元刚度以及主引桥周期比对其影响规律。结果 主引桥间的相互碰撞会在梁端产生一个较大的碰撞力, 其峰值会随着伸缩缝间隙的增大而减小, 随着碰撞单元刚度的增加而增大; 同时, 碰撞作用使加劲梁的位移随着间隙宽度的增大而增大, 随着碰撞单元刚度的增加先减小后趋于稳定, 随着周期比的增大而减小; 结构产生的碰撞力峰值根据地震波不同表现出不同的变化规律; 塔顶位移和塔底内力基本不受参数变化的影响。结论 伸缩缝间隙和碰撞单元刚度是影响地震响应的重要参数, 需要在设计中合理考虑和选择。

**关键词** 桥梁工程; 悬索桥; 接触单元法; 碰撞效应; 地震

中图分类号 TU997; U448.25

文献标志码 A

## Analysis of Seismic Response of Single-span Asymmetric Suspension Bridge Incorporating Beam-end Collision Effects

JIA Yi<sup>1,2</sup>, WANG Zihao<sup>1,2</sup>, TIAN Hao<sup>1,2</sup>, LIU Pengceng<sup>1,2</sup>, SONG Haobo<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, China, 650500; 2. Yunnan Earthquake Engineering Research Institute, Kunming, China, 650500)

**Abstract:** To study the impact of the impact effect At the expansion influence on Seismic response of large span bridge. suspension bridges, and the results can provide reference for similar bridges to resist earthquakes. Taking a single-span asymmetrical suspension bridge in Southwest China as the

收稿日期: 2023-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068037); 云南省自然科学基金项目(140520210091); 云南省博士后科研基金项目(109820210012); 省级人培项目(241120200027)

作者简介: 贾毅(1988—), 男, 博士, 主要从事桥梁检测与承载能力评定等方面研究。

research object, the main approach bridge model was established based on the FEM of ANSYS, three suitable seismic waves were selected, and the contact element method was used. Used to simulate the bridge collision, and the seismic response of the bridge considering the beam end collision effect was studied, and explored the effect of changing the period ratio of the main approach bridge on the expansion joint clearance, the stiffness of the collision unit and the weight of the upper structure of the approach bridge. The mutual collision between the main approach bridges will generate a large collision force at the beam end, and its peak value will decrease with the increase of the expansion joint gap, and increase with the increase of the collision unit stiffness; at the same time, the collision As a result, the displacement of the stiffened beam increases as the gap width increases, and then becomes steady as the rigidity of the impact element increases, and decreases with the increasing of the cycle ratio. the peak value of the collision force generated by the structure is according to different seismic waves show different changing laws; the displacement of the tower top and the internal force of the tower bottom are basically not affected by the change of parameters. The changes of various parameters make the seismic response of the bridge more complicated, and the changes of these parameters should be considered reasonably in the aseismic design.

**Key words:** bridge engineering; suspension bridge; contact element method; collision effect; earthquake

我国西南地区地形较为奇特,山高谷深,峡谷多为“V”字形,地形起伏较大,故需要在这些地方建造一些结构形式特殊的桥梁以满足其需要,例如独塔单跨非对称悬索桥。相较于普通桥梁,这种悬索桥跨越空间更大,结构受力更为复杂,容易在地震作用下产生较大的动力响应,从而影响桥梁结构的安全。地震作用可能会造成桥梁的内部结构损伤,同时也可能会引发桥梁梁端碰撞<sup>[1]</sup>。

目前国内外有许多学者对桥梁碰撞效应进行了众多研究<sup>[2-5]</sup>,通过碰撞响应来评估和预防梁体之间或梁体与桥台之间的碰撞。李进等<sup>[6]</sup>以人字形曲线桥为背景,采用时程分析法,研究了该桥在地震波激励方向、伸缩缝宽度等因素影响下的反应。结果表明,在地震作用下,梁体与墩柱间的碰撞力受地震波大小的影响较大,且在碰撞过程中,梁体与墩柱更易发生碰撞。闫聚考等<sup>[7]</sup>以泰州长江大桥为背景,制定了缩尺比例模式,并开展了全桥振动台模型试验,输入不同的地震波,来研究主桥和引桥在伸缩缝处的碰撞效应。李兰平等<sup>[8]</sup>以连续刚构桥梁为研究对象,探讨了在非平稳地震作用下,桥梁在一致和非

一致场地条件下的碰撞空间需求,并构建了一种各种地震烈度下的碰撞空间需求谱。邬晓光等<sup>[9]</sup>通过建立三跨刚构连续梁桥的弹塑性动力分析模型,考虑了碰撞的能量耗散、支座和桥墩的非线性行为以及桩土和台背土的相互作用等因素。研究表明,伸缩缝处碰撞效应对桥台-引桥-刚构连续梁桥体系地震响应影响显著。J. Penzien<sup>[10]</sup>利用线性等效非线性理论,提出了一个合理计算相邻结构碰撞临界间隙值的方法,即结构所需的伸缩缝间隙可以依据结构自振频率计算出来。K. Bi<sup>[11]</sup>采用随机振动理论,分析了不同场地条件下和土-桩-桥相互作用对简支梁桥梁端碰撞间隙的影响。

上述研究多集中为梁式桥和高墩大跨刚构桥,而关于大跨度悬索桥的研究却相对较少。基于此,笔者以某独塔单跨非对称悬索桥为研究背景,基于 ANSYS 有限元软件建立主引桥模型,选用 Kelvin 模型作为碰撞接触单元模型,同时计算出碰撞接触单元参数取值,研究桥梁在考虑梁端碰撞效应下的地震响应,并探究了伸缩缝间隙、碰撞单元刚度以及主引桥周期比对其影响规律。

1 工程背景及算例模型

笔者以西南山区某大跨度悬索桥为工程背景,该桥主桥为独塔单跨钢箱梁悬索桥。主缆中跨长度为 708.6 m,边跨长度为 140 m,矢跨比为 1/11。两根主缆中心间距为 28 m,加劲梁采用流线型扁平钢箱梁,总体布置见图 1。桥塔是由梁和柱组成的承重结构。塔柱采用箱形断面,纵桥向为变宽截面,塔顶宽为 7 m,塔底宽为 9 m;横桥向为变宽截面,塔顶宽为 6 m,塔底宽为 8 m。吊索仅设置于中跨,吊索顺桥向间距除主塔处设置为 12.4 m(边吊索至主塔中心线距离),其余吊索间距均为 11.8 m。吊索采用销接式,每一吊点处设置两根吊索。大桥两岸地形陡峭,均采用隧道式锚碇结构。

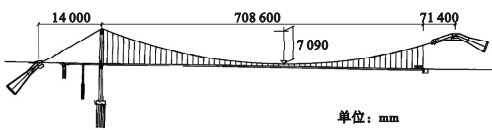


图 1 总体布置图

Fig. 1 General arrangement drawing

采用有限元软件 ANSYS 建立计算模型,模型中采用 BEAM4 单元模拟加劲梁构件、桥塔和无质量刚臂, LINK10 单元模拟主缆和吊索, COMBIN14 单元模拟弹簧单元和支座; COMBIN14 弹簧单元模拟桥塔中横梁、承台与加劲梁之间的支座。伸缩缝处的碰撞作用通过 Kelvin 碰撞模型来模拟。计算时选择 3 条天然地震波,信息见表 1。悬索桥主、引桥梁端碰撞的有限元模型如图 2 所示。

表 1 地震波记录信息

Table 1 Seismic wave recording information

地震编号	地震名称	地震记录序列号	年份	峰值加速度/g	持续时间/s
TR1	Chi-Chi	1 190	1999	0.194 53	81.46
TR2	Hector	1 837	1999	0.195 81	60.00
TR3	Chuetsu	5 230	2007	0.200 07	86.12



图 2 悬索桥主、引桥梁端碰撞的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of collision between the main and pilot bridge ends of suspension bridge

2 碰撞接触单元

在结构抗震分析中常采用接触单元法来模拟相邻结构的碰撞效应。其中接触单元有很多种,主要包括线性弹簧单元、Hertz 模型、Hertz-damp 模型、Kelvin 模型以及三维接触-摩擦模型等<sup>[12-13]</sup>。根据文献[7],笔者选取 Kelvin 模型来模拟碰撞。R. Jankowski 的研究指出<sup>[14]</sup>,只要参数合理, Kelvin 模型能够给出与实验结果比较吻合的结果。Kelvin 碰撞

模型及其碰撞力-位移关系见图 3。在 ANSYS 有限元软件中采用 COMBIN40 弹簧-阻尼单元来模拟桥梁梁体的碰撞问题,此单元物理意义明确,算法相对简单。

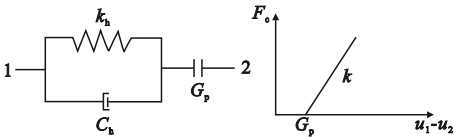


图 3 Kelvin 碰撞模型及其碰撞力-位移关系

Fig. 3 Kelvin collision model and its collision force-displacement relationship

伸缩缝处产生的碰撞力计算如下:

$$F_c = \begin{cases} k_h(u_1 - u_2 - G_p) + c_h(\dot{u}_1 - \dot{u}_2), & u_1 - u_2 - G_p \geq 0; \\ 0, & u_1 - u_2 - G_p < 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_1$  和  $u_2$  为两梁体自身的相对位移;  $\dot{u}_1$  和  $\dot{u}_2$  为两梁体发生碰撞后产生的速度;  $k_h$  为

弹簧的非线性刚度; $c_h$  为非线性阻尼系数; $F_c$  为梁体间的碰撞力; $G_p$  为伸缩缝的初始间隙值。

根据能量守恒定律,通过式(2)可以得到阻尼系数  $c$  和恢复系数  $e$  的关系:

$$c=2\zeta\sqrt{k\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}}.$$

(2)

$$\zeta=-\frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2+(\ln e)^2}}.$$

(3)

式中: $\zeta$  为碰撞阻尼比; $k$  为碰撞弹簧刚度; $e$  为碰撞恢复系数,用来表示碰撞过程中的能量损耗; $m_1$ 、 $m_2$  分别为碰撞的相邻梁体质量。

笔者就主引桥碰撞问题建立了有限元模型,令弹簧刚度  $K=K_0EL/A$ ,变量参数  $k_0$  取值 0.02 ~ 4.00,其中  $E$  为混凝土的弹性模量, $A$  为桥梁的横截面积(取引桥箱梁的横截

面积), $L$  为桥梁一侧的长度(取引桥的跨径)。采用 R. Jankowski 等<sup>[15]</sup> 所研究的碰撞单元弹簧刚度取值的结果,碰撞单元处的弹簧刚度取引桥梁体的 1 倍轴向刚度,取值为  $2.87\times10^8$  kN/m,阻尼系数  $c$  由式(2)和式(3)计算求得, $c=5.32\times10^4$  (N·s)/m。

3

考虑梁端碰撞效应的地震响应分析

不考虑碰撞的模型取其不发生碰撞时的伸缩缝间隙值,考虑碰撞的模型取其伸缩缝间隙值为 0.15 m,输入地震波,在仅考虑单边碰撞的作用下进行地震响应分析。

3.1

伸缩缝间隙对结构地震响应的影响

计算得到悬索桥和引桥不考虑碰撞作用的峰值响应结果见表 2。

表 2 未考虑碰撞作用的峰值响应

Table 2 The peak response of collision action is not considered

地震波种类	主引桥间相对位移/m	考虑碰撞端加劲梁的绝对位移/m	未考虑碰撞端加劲梁的绝对位移/m	桥塔塔顶位移/m	桥塔塔底剪力/ $10^3$ kN	桥塔塔底弯矩/ $10^3$ (kN·m)
Chi-Chi 地震波	0.364	0.376	0.399	0.057	20.731	900.472
Hector 地震波	0.374	0.422	0.421	0.046	28.863	841.952
Chuetsu 地震波	0.409	0.390	0.390	0.085	32.932	1 389.158

由表 2 可知,在三种地震波作用下,主引桥的相对位移峰值在 0.364 ~ 0.409 m,说明当桥梁间隙小于这个范围,主引桥就可能发生碰撞。笔者设置主引桥伸缩缝间隙值为 0.05 ~ 0.35 m,共取 7 个间隙变量进行分析,计算悬索桥在各种地震波及不同间隙值下的结构响应。

3.1.1

伸缩缝间隙对碰撞力的影响

悬索桥在不同地震波和不同伸缩缝间隙下的碰撞力峰值结果见表 3。从表 3 可以看出,悬索桥与引桥的碰撞力峰值总体上随着伸缩缝间隙的增大而减小;在相同的伸缩缝间隙下,地震波的不同会导致碰撞力的峰值有较大差异;在主引桥能够发生碰撞的情况下,最小碰撞力都达到 2 500 kN 左右,如此大

的碰撞力在主引桥的间隙设计时不应忽视,应设置合理的伸缩缝间隙。

表 3 不同地震波和伸缩缝间隙下的碰撞力峰值

Table 3 Peak value of collision force under different seismic waves and expansion gap

伸缩缝 间隙/m	碰撞力峰值/kN		
	Chi-Chi 地震波	Hector 地震波	Chuetsu 地震波
0.05	21 320	16 556	24 109
0.10	18 858	7 378	29 938
0.15	15 936	3 855	26 270
0.20	0	2 559	14 113
0.25	0	0	0
0.30	0	0	0
0.35	0	0	0

3.1.2 伸缩缝间隙对结构位移的影响

是否考虑碰撞端的加劲梁时,绝对位移峰值在不同伸缩缝间隙下的变化曲线如图4所示。从图中可以看出,在不同的地震波作用下,是否考虑碰撞端的加劲梁位移峰值相差很小,可以忽略不计,其差值主要取决于加劲梁的纵向刚度。加劲梁两端的位移都是随着伸缩缝间隙的增大而逐渐增大,最终增大到未碰撞时的加劲梁绝对位移峰值42%~43%,随后不再增大。其主要原因是主引桥的碰撞作用加大了加劲梁的位移。

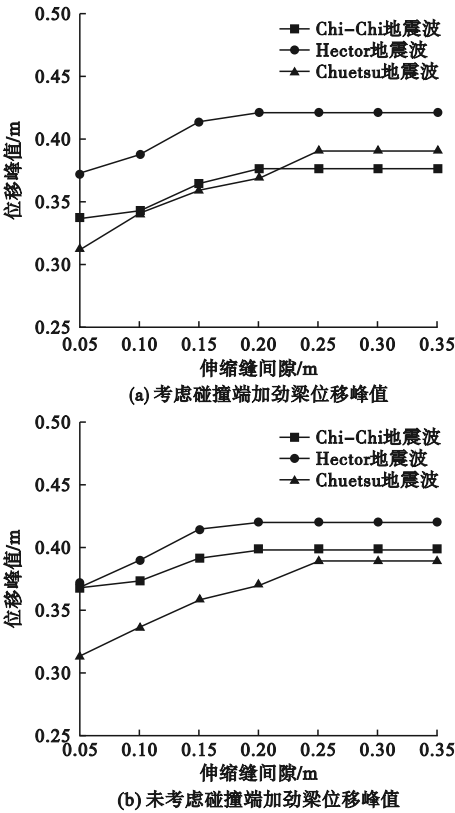


图4 加劲梁绝对位移峰值随伸缩缝间隙的变化  
Fig. 4 The change of peak absolute displacement of stiffened beam with the gap of expansion joint

悬索桥主塔塔顶位移峰值在不同伸缩缝间隙下的变化曲线如图5所示。从图中可以看出,在主引桥相互碰撞作用下,输入不同的地震波,悬索桥主塔塔顶位移峰值并没有随着伸缩缝间隙的增大而有较大变化,可以认为保持不变。

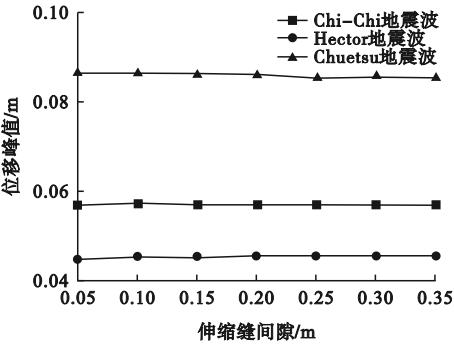


图5 主塔塔顶位移峰值随伸缩缝间隙的变化  
Fig. 5 The peak displacement of main tower top varies with the gap of expansion joint

3.1.3 伸缩缝间隙对结构内力的影响

悬索桥主塔塔底的内力峰值在不同伸缩缝间隙下的变化曲线如图6所示。由图可知,随着伸缩缝间隙的增大,考虑主引桥碰撞作用对主塔塔底剪力没有影响,塔底弯矩随着伸缩缝间隙的增大基本没有变化。

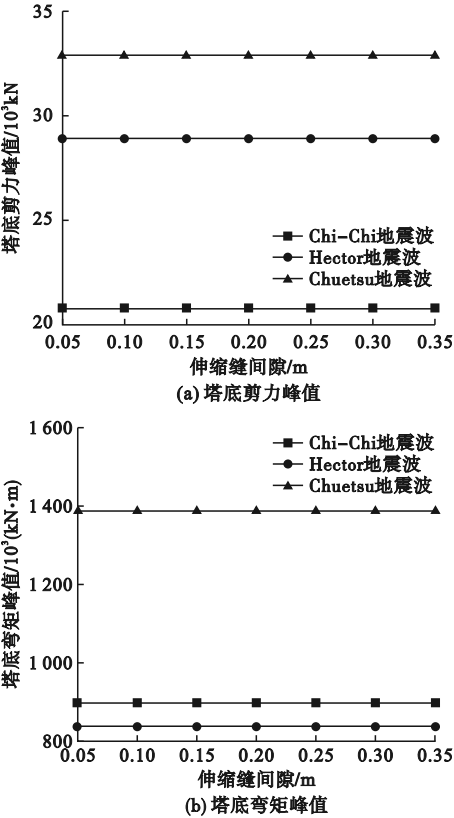


图6 主塔塔底内力峰值随伸缩缝间隙的变化  
Fig. 6 The change of peak internal forces at the bottom of main tower with the gap of expansion joint



3.2 碰撞单元刚度对结构地震响应的影响

为探究碰撞单元刚度对结构地震响应的影响,设置碰撞单元刚度为  $2.87 \times 10^2 \sim 2.87 \times 10^8$  kN/m, 共计 7 个变量。

3.2.1 伸缩缝处碰撞力的影响

悬索桥在不同地震波下和不同碰撞单元刚度下的碰撞力峰值见表 4。

表 4 不同地震波和碰撞单元刚度下的碰撞力峰值  
Table 4 Peak values of collision force under different seismic wave and collision element stiffness

碰撞单元 刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	碰撞力峰值/kN		
	Chi-Chi 地震波	Hector 地震波	Chuetsu 地震波
$2.87 \times 10^2$	14	17	28
$2.87 \times 10^3$	127	151	270
$2.87 \times 10^4$	771	645	2 009
$2.87 \times 10^5$	3 459	1 218	7 590
$2.87 \times 10^6$	8 038	2 907	14 881
$2.87 \times 10^7$	14 431	4 039	24 363
$2.87 \times 10^8$	15 936	3 855	26 270

由表 4 可以得到,主引桥在相互碰撞时,随着单元刚度的增加,碰撞力也在增大。当单元刚度小于  $2.87 \times 10^4$  kN/m 时,碰撞力增长的较为缓慢;当单元刚度在  $2.87 \times 10^4 \sim 2.87 \times 10^7$  kN/m 时,碰撞力显著增长;当单元刚度大于  $2.87 \times 10^7$  kN/m 时,碰撞力随刚度的增大而小幅度增长。但当单元刚度大于  $2.87 \times 10^4$  kN/m 时,在同一刚度下,Chuetsu 地震波产生的碰撞力要远远大于 Hector 和 Chuetsu 地震波产生的碰撞力。

3.2.2 碰撞单元刚度对结构位移的影响

是否考虑碰撞端加劲梁时,绝对位移峰值在不同碰撞单元刚度下的变化曲线如图 7 所示。从图中可以看出,在单边碰撞时,碰撞端加劲梁和未考虑碰撞端加劲梁的位移峰值基本一致,这是由于加劲梁的纵向刚度较大,两端不同的接触条件对纵向位移影响较小。加劲梁两端位移随着碰撞单元刚度的增大呈现出先减小后稳定的趋势,但变化幅度很小。

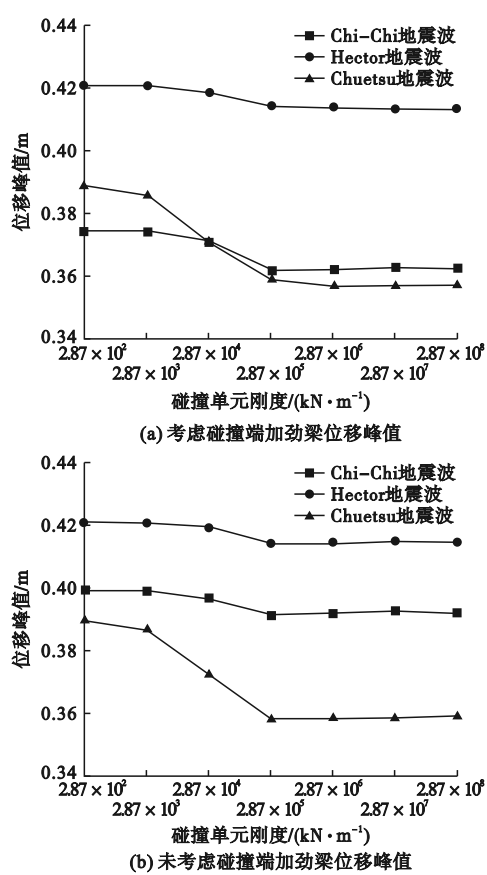


图 7 加劲梁绝对位移峰值随碰撞单元刚度的变化

Fig. 7 The absolute displacement peaks of the stiffener beam changes with the stiffness of the collision element

悬索桥主塔塔顶位移峰值在不同碰撞单元刚度下的变化曲线如图 8 所示。

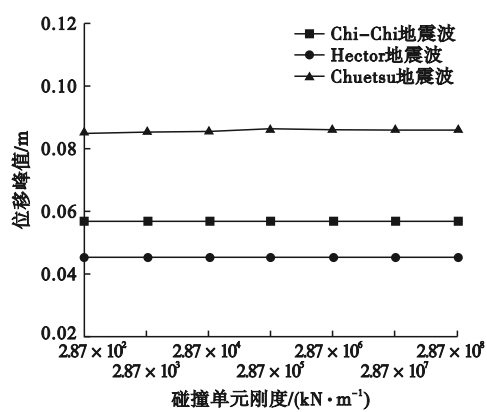


图 8 主塔塔顶位移峰值随碰撞单元刚度的变化

Fig. 8 The peak displacement peak of the top displacement of the main tower changes with the stiffness of the collision unit

由图 8 可以看出,在不同的地震波作用下,输入不同的单元刚度,悬索桥主塔塔顶位移峰值并没有随着单元刚度的增大而有较大改变,变化量可以忽略,所以塔顶位移基本不受碰撞单元刚度的影响。

3.2.3 碰撞单元刚度对结构内力的影响

悬索桥主塔塔底的内力峰值在不同碰撞单元刚度下的变化曲线如图 9 所示。从图中可以看出,碰撞单元刚度的改变对塔底剪力和塔底弯矩几乎没有影响。

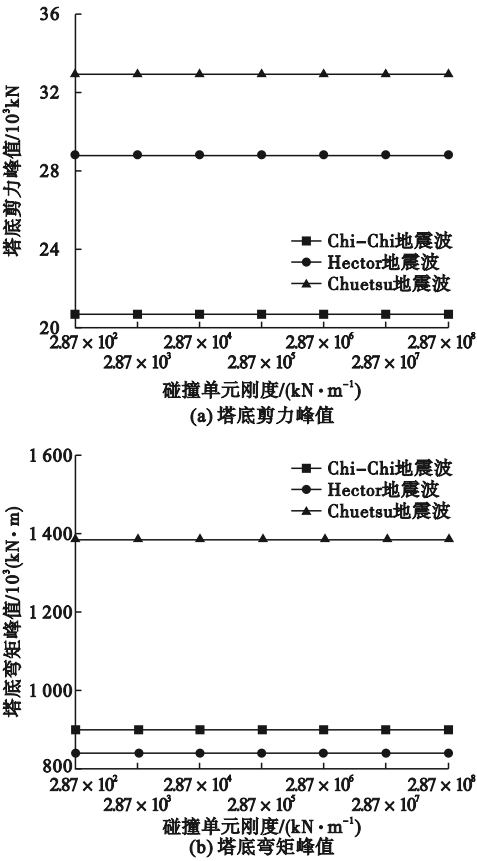


图 9 主塔塔底内力峰值随碰撞单元刚度的变化

Fig. 9 The displacement peaks of the top displacement of the main tower changes with the stiffness of the collision unit

3.3 主引桥周期比对结构地震响应的影响

笔者通过改变引桥上部结构的质量来改变引桥的动力特性,从而改变主引桥的周期比,研究主引桥周期比对结构地震响应的影响。引桥周期和主引桥的周期比如表 5 所示。

表 5 引桥周期和主引桥的周期比

Table 5 Cycle ratio of lead bridge period and main approach bridge

引桥周期	周期比(引桥/主桥)
1.51	0.17
3.36	0.32
4.51	0.48
5.42	0.63
6.55	0.85
9.15	1.03

3.3.1 伸缩缝处碰撞力的影响

悬索桥在不同周期比下的碰撞力峰值见表 6。

表 6 不同地震波和周期比下的碰撞力峰值

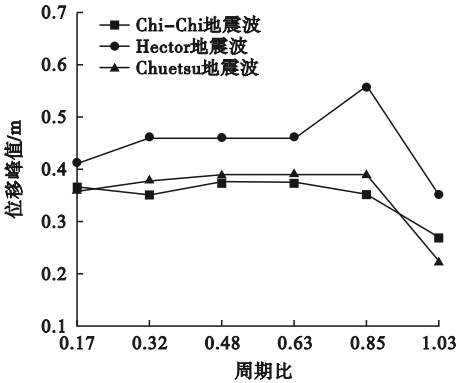
Table 6 Peak value of collision force under different seismic wave and period ratio

周期比	碰撞力峰值/kN		
	Chi-Chi地震波	Hector地震波	Chuetsu地震波
0.17	15 936	3 855	26 270
0.32	15 766	17 408	29 826
0.48	0	16 478	24 715
0.63	0	47 430	25 328
0.85	7 795	45 061	48 000
1.03	16 447	22 873	19 499

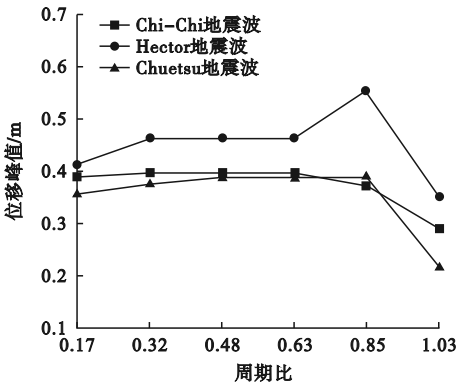
由表 6 可以看出,主引桥在相互碰撞时,在 Chi-Chi 地震波下,碰撞力峰值随着主引桥周期比的增加先减小再增大,碰撞力的最大值在周期比为 1.03 时;在 Hector 地震波下,碰撞力峰值先增大再减小,最大值在周期比为 0.63 时;Chuetsu 地震波下碰撞力的最大值在周期比为 0.85 时。

3.3.2 周期比的变化对结构位移的影响

是否考虑碰撞端加劲梁时,绝对位移峰值在不同周期比下的变化曲线如图 10 所示。从图中可以看出,在不同周期比下,主引桥的碰撞作用造成的加劲梁位移与未考虑碰撞端加劲梁两端的规律相近。在不同的地震波作用下,当周期比小于 0.85 时,加劲梁两端位移峰值基本保持不变,当周期比为 1.03 时,加劲梁两端位移峰值显著减小。



(a) 考虑碰撞端加劲梁位移峰值



(b) 未考虑碰撞端加劲梁位移峰值

图 10 加劲梁绝对位移峰值随周期比的变化

Fig. 10 The displacement peak of the top displacement of the main tower changes with the stiffness of the collision unit

悬索桥主塔塔顶位移峰值在不同周期比下的变化曲线如图 11 所示。从图中可以看出,在不同地震波作用下,主塔塔顶位移峰值随着周期比的增加几乎没有变化。

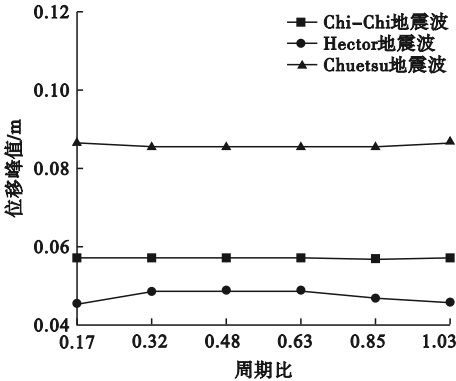
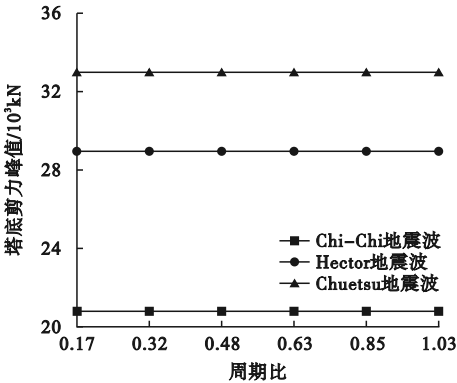


图 11 主塔塔顶位移峰值随周期比的变化

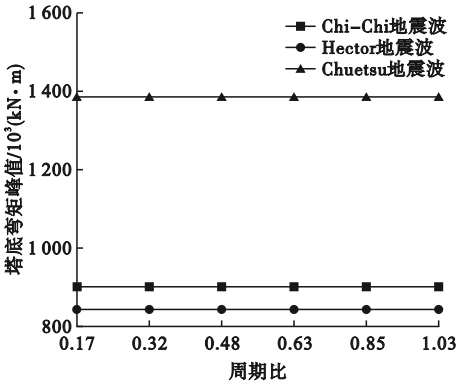
Fig. 11 Variation of displacement peak of main tower top with period ratio

3.3.3 周期比的变化对结构内力的影响

悬索桥主塔塔底的内力峰值在不同周期比下的变化如图 12 所示。从图中可以看出,塔底剪力和弯矩基本不随周期比的变化而发生改变。



(a) 塔底剪力峰值



(b) 塔底弯矩峰值

图 12 主塔塔底内力峰值随周期比的变化

Fig. 12 Variation of peak internal force at the bottom of main tower with period ratio

4 结 论

(1) 在地震波作用下,考虑主引桥碰撞作用会在伸缩缝间隙处产生较大的碰撞力,碰撞力的峰值随着间隙宽度的增大而减小,但最小碰撞力都达到了 2 500 kN 左右,在主引桥的间隙设计时不应忽视,应设置合理的伸缩缝间隙;加劲梁两端的位移随着间隙宽度的增大而增大。

(2) 考虑主引桥碰撞作用后,结构产生的碰撞力峰值会随着碰撞单元刚度的增加而



增大,到达一定的刚度后,碰撞力峰值基本不发生变化;加劲梁两端位移峰值随着碰撞单元刚度的增大呈现出先减小后稳定的趋势。

(3)结构产生的碰撞力峰值根据地震波不同的频谱特性表现出不同的变化规律。加劲梁两端位移峰值随着周期比的增大而减小,塔顶位移和塔底内力基本不受这些因素的影响。

## 参考文献

- [1] 高玉峰,蒲黔辉,李晓斌.考虑碰撞效应的双柱式高墩桥梁非线性地震反应特性研究[J].公路交通科技,2011,28(4):36-45.  
(GAO Yufeng, PU Qianhui, LI Xiaobin. Nonlinear seismic response characteristics of bridge with double-column high-rise piers considering pounding effect [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2011, 28(4):36-45.)
- [2] 陶源,徐略勤,姚凯,等.考虑双向碰撞效应的连续斜交桥地震响应研究[J].地震工程学报,2019,41(2):360-369.  
(TAO Yuan, XU Lueqing, YAO Kai, et al. Seismic response of continuous skewed bridges considering the bidirectional pounding effect [J]. China earthquake engineering journal, 2019, 41(2):360-369.)
- [3] MOHSEN A, ANILK A. Rigid-body motion of horizontally curved bridges subject to earthquake-include pounding [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21 ( 12 ): 1943-5592.
- [4] 李伟,邓育林,占诗琪,等.地震作用下桥台对多跨连续梁桥纵向碰撞效应的影响研究[J].武汉理工大学学报,2022,44(8):38-45.  
(LI Wei, DENG Yulin, ZHAN Shiqi, et al. Effects of abutment on the longitudinal seismic response of multi-span continuous beam bridge under earthquake [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2022, 44 ( 8 ): 38-45.)
- [5] 蓝先林,贾宏宇,郑史雄,等.实际土层对高墩桥梁端碰撞的影响[J].公路交通科技,2020,37(2):82-90.  
(LAN Xianlin, JIA Hongyu, ZHENG Shixiong, et al. Influence of actual soil layer on pounding beam end of high-pier bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2020, 37(2):82-90.)
- [6] 李进,刘松波,张娇磊,等.考虑碰撞效应曲线桥非线性响应及减隔震分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(6):971-980.  
(LI Jin, LIU Songbo, ZHANG Jiaolei, et al. Nonlinear responses and seismic isolation analysis of a curved bridge considering pounding effect [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2021, 37 ( 6 ): 971-980.)
- [7] 闫聚考,李建中,彭天波,等.大跨度悬索桥主引桥碰撞效应振动台试验及数值研究[J].振动与冲击,2017,36(7):234-240.  
(YAN Jukao, LI Jianzhong, PENG Tianbo, et al. Shaking table tests and numerical analysis for pounding effect between main span and approach span of long-span suspension bridges [J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36 ( 7 ): 234-240.)
- [8] 李兰平,卜一之,贾宏宇,等.非平稳地震作用下高墩桥梁体间隙需求分析[J].西南交通大学学报,2019,54(1):113-120.  
(LI Lanping, PU Yizhi, JIA Hongyu, et al. Analysis of required separation distances of high-pier bridges subjected to non-stationary ground motions [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2019, 54(1):113-120.)
- [9] 郭晓光,魏俊杰,胡科坚,等.考虑碰撞效应的桥台-引桥-钢构连续梁桥体系地震响应分析[J].武汉大学学报(工学版)2023,56(4):429-439.  
(WU Xiaoguang, WEI Junjie, HU Kejian, et al. Seismic response analysis of abutment-approach bridge-rigid frame continuous girder bridge system considering collision effect [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2023, 56(4):429-439.)
- [10] PENZIEN J. Evaluation of building separation distance required to prevent pounding during strong earthquakes [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1997, 26 ( 8 ): 849-858.
- [11] BI K, HAO H, CHOUW N. Required separation distance between decks and at abutments of a bridge crossing a canyon site to avoid seismic pounding [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2010, 39 ( 3 ): 303-323.
- [12] MUTHUKUMAR S, DESROCHES R. A Hertz contact model with non - linear damping for pounding simulation [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2006, 35 ( 7 ): 811-828.
- [13] 杨永强.地震落梁与结构碰撞的数值模拟研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2007.  
(YANG Yongqiang. Numerical simulation of earthquake falling beam collision with structure [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2007.)
- [14] JANKOWSKI R. Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural Pounding [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2005, 34(6):595-611.
- [15] JANKOWSKI R, WILDE K, FUJINO Y. Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2015, 29 ( 2 ): 195-212.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)