

# 高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应研究

贾毅<sup>1</sup>,王永宝<sup>2</sup>,李福海<sup>1</sup>,赵人达<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031;

2. 太原理工大学建筑与土木工程学院,山西 太原 030024)

**摘要** 目的 研究桩土相互作用和行波效应对高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应的影响. 方法 采用有限元程序,建立跨度为(70+3×127+70)m的曲线刚构桥有限元模型,采用动态时程分析方法,分析了桩土相互作用和行波效应在不同参数取值下的桥梁结构地震响应. 结果 纵桥向激励下,考虑桩土相互作用比不考虑桩土相互作用桥梁各桥墩控制截面内力增大30%~40%;横桥向激励下,考虑桩土相互作用比不考虑桩土相互作用桥梁各桥墩控制截面内力减小17%~25%. 考虑桩土相互作用,将显著增大墩顶和墩底截面纵桥向内力,减小横桥向墩顶和墩底内力;考虑地震波传播速度引起的行波效应,使得桥墩内力在不同桥墩之间呈现更加不均匀分布状态,增大部分桥墩破坏的危险;由于地震波入射角度不同而引起的行波效应时,入射角度为0°时各个桥墩内力和位移响应略大于10°和-10°两个入射角度的激励结果. 结论 地震波入射角度引起的行波效应时对该类桥型地震响应影响较小. 桩土相互作用对该类桥型的动力特性有一定的影响. 随着桩土弹性连接土介质参数的增大,结构体系的自振频率也随之增大,但结构的低阶振型基本未变.

**关键词** 曲线连续刚构桥;桩土相互作用;行波效应;地震响应;有限元法;动态时程

中图分类号 TU279.7<sup>+</sup>41;U448.23;U442.59

文献标志码 A

## Seismic Response Study of High Pier and Long-span Curved Continuous Rigid Frame Bridge

JIA Yi<sup>1</sup>, WANG Yongbao<sup>2</sup>, LI Fuhai<sup>1</sup>, ZHAO Renda<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, 030024)

**Abstract:** This paper aims at the seismic response of high pier and long-span curved continuous rigid frame bridge influenced by the pile-soil interaction and traveling wave effect. A curved rigid frame bridge with a span of (70+3×127+70)m was simulated by a finite element program, and the bridge seismic response under different parameters of pile-soil interaction and traveling wave

收稿日期:2017-12-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200401);国家自然科学基金项目(51308471);广东省科技厅科技计划项目(2014-02-015)

作者简介:贾毅(1988—),男,博士研究生,主要从事大跨度桥梁抗震方面研究.

were analyzed by using dynamic time history analysis method. Under longitudinal bridge excitation, the internal force of the control section of each bridge pier with considering the interaction between pile and soil is 30% ~40% higher than that of no-considering interaction between pile and soil; Under the cross-bridge excitation, the internal force of the bridge cross section of the bridge with considering the interaction between pile and soil is 17% ~25% less than that of no-considering interaction between pile and soil. The pile-soil interaction can enlarge the internal force of top and bottom of the pier along the direction of the bridge and decrease the internal force along the transverse direction of the bridge. The traveling wave effect with considering the seismic wave propagation velocity can make the internal force of the bridge pier more uneven distribution in different piers, and increases the risk of damage to part of the pier; considering the traveling wave effect caused by seismic wave incident angle, the internal force and displacement of the bridge pier with incident angle 0 degree are slightly larger than that of the two other incident angle 10 degree and -10 degree. The traveling wave effect caused by the incident angle of seismic waves has little effect on the seismic response of this type of bridge. Pile-soil interaction has a certain influence on the dynamic characteristics of this type of bridge. With the increase of the media parameters of the elastic soil of the pile-soil, the natural vibration frequency of the structural system also increases, but the low-order vibration mode of the structure remains basically unchanged.

**Key words:** curved continuous rigid frame bridge; pile-soil interaction; traveling wave effect; seismic response; finite element method; dynamic time history analysis

我国是一个地震频发的国家,高烈度地区往往位于高山峡谷等复杂地理位置,导致在这些地区修建高速公路桥梁的跨径较大,墩高较高,桥梁结构形式也比较复杂<sup>[1]</sup>.高墩大跨曲线刚构桥是梁桥中比较特殊的一类,该桥型具有曲线梁桥和高墩刚构桥的力学特性,特别是在地震荷载作用下,这类桥型的地震响应更加复杂<sup>[2]</sup>.因此,对该类桥型进行抗震研究具有重要的意义.在地震作用下,桥梁结构的桩土相互作用对其抗震性能有较大影响.桩土相互作用主要体现在两个方面:一方面考虑桩土相互作用后地基的柔性改变了桥梁结构的动力特性;另一方面桥梁上部结构对其底部地震波的反馈作用改变了地基运动的频谱组成.大跨度桥梁结构由于各支承点受到的地震波不同,因而结构的地震响应存在一定的差异.李永波等<sup>[3]</sup>对多年冻土区的简支梁桥地震响应是否考虑桩土相互作用进行了研究,结果表明多年冻土区多跨简支梁桥抗震性能评估时,需特别注意夏季地震动低速行波效应可能发生的震害;陈清军等<sup>[4]</sup>建立了桩土与桥梁结

构相互作用模型,研究了桩土间的边界非线性对结构地震响应的影响,结果表明在强震作用下,桩土会产生较强的接触非线性,考虑这种效应将使结构的位移反应结果较基于桩土间位移协调情形有所增大;魏凯等<sup>[5]</sup>通过建立多联长跨组合结构桥梁模型,对地震波激励形式、视波速以及行波效应等因素进行了参数分析,结果表明行波效应会使组合结构桥梁的位移响应增大;洪浩等<sup>[6]</sup>研究了不同墩高和视波速时,考虑行波效应对高墩大跨刚构桥地震响应的特点,结果表明行波效应对结构的影响与结构自身的特性和视波速有关;高月琪<sup>[7]</sup>以万县长江大桥为研究对象,对该桥进行了多点激励和一致激励下的地震响应分析,结果表明行波效应对大跨度桥梁结构地震响应有较大地影响.然而到目前为止,针对高墩大跨曲线连续刚构桥考虑桩土相互作用和行波效应<sup>[8-13]</sup>的地震响应研究较少文献报道.因此,笔者以高墩大跨曲线连续刚构桥为工程背景,采用通用有限元软件建立了全桥动力分析模型,运用动态时程分析法探讨桩土相互作用、行波效应对

高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应的影响.

# 1 工程概况及有限元模型

## 1.1 工程概况

以某高速公路上一座跨度为 (70 + 3 × 127 + 70) m 高墩大跨曲线连续刚构桥为工程背景,该桥位于曲率半径为 805 m 的圆曲线上,单向横坡为 4%,桥梁纵向线形为 2.5% 纵坡的直线接半径为 16 000 m 的竖曲线.主梁为单箱单室预应力混凝土直腹板箱

形梁,主梁根部梁高 7.30 m,跨中梁高 3 m,箱梁高度按 1.8 次抛物线变化.箱梁顶板宽 13.25 m,底板宽 7 m,翼缘板悬臂长度 3.125 m,桥面横坡为 4%,由腹板高度调整.上部结构采用纵、横、竖三向预应力体系.桥墩采用变截面矩形空心墩,该桥 5 个桥墩的平均高度为 99.90 m,最高为 120.5 m,最低为 84.9 m<sup>[2]</sup>.桥梁总体布置如图 1 所示,主梁横断面如图 2 所示.

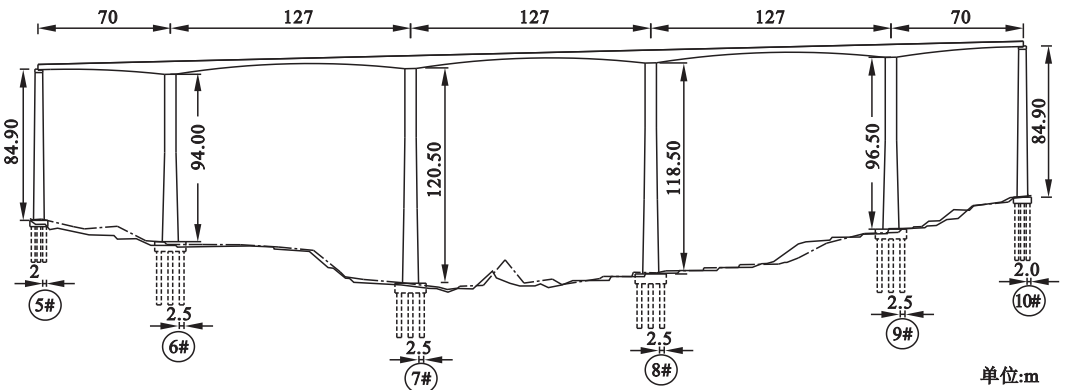


图 1 桥梁总体布置图

Fig. 1 The general arrangement of bridge

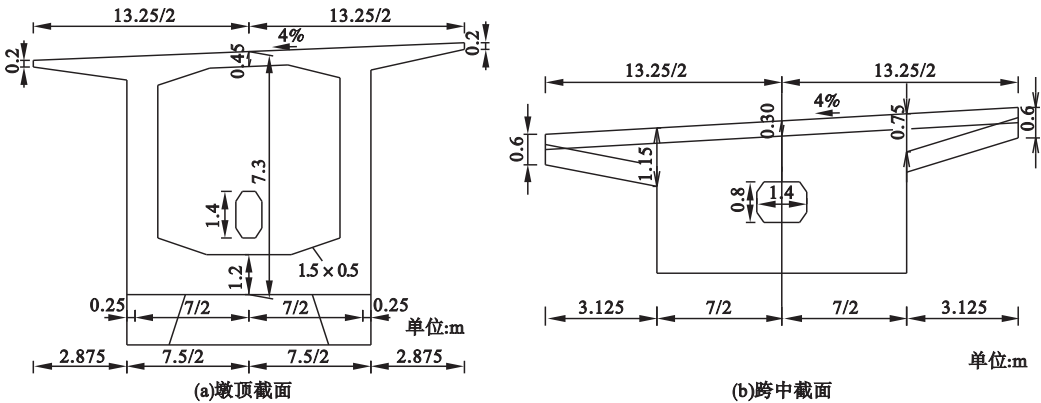


图 2 主梁横断面图

Fig. 2 The cross section graph of main beam

## 1.2 有限元模型

采用桥梁通用有限元软件 Midas Civil 建立全桥动力分析模型(见图 3).采用空间杆系梁单元模拟主梁和桥墩,承台和桩基础采用线性梁单元模拟,主梁与桥墩之间边界条件为刚性连接方式,二期恒载以均布荷载的形式施加在主梁单元上.

为探讨桩土相互作用对该类桥梁结构地震响应的影响规律,笔者采用等代土弹簧模拟桩土相互作用,通过非岩石地基水平抗力系数的比例系数  $m$  值来计算等代土弹簧的刚度,建立了以  $m$  值作为分析参数的 4 个对比模型,参考《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)中非岩石类土的  $m$  值

及桥址处土层分布,计算分析中将  $m$  值变量分别取  $m_1 = 20\ 000$ ,  $m_2 = 50\ 000$ ,  $m_3 = 80\ 000$ ,  $m_4 = \infty$ ,其他建模参数不变。 $m$  值为无穷大即不考虑桩土之间的相互作用,建模时将各个桥墩墩底按固结处理。

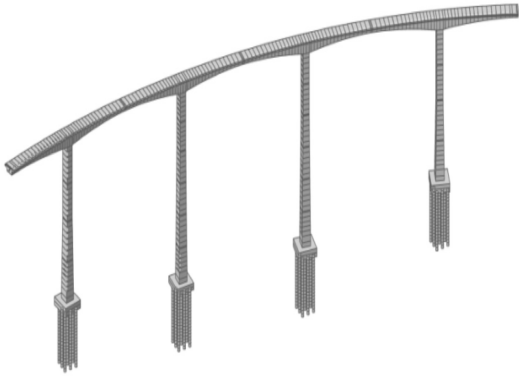


图3 全桥有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of the Whole Bridge

为研究由于地震波传至各桥墩所需时间不一致而引起的行波效应时,假定地震波传播方向与顺桥向平行,地震波从6#桥墩向9#桥墩传播。由于结构地震响应受表面视波速影响未知,而表面视波速又很难确定,考虑地震波传播速度的可能性并结合桥址处的地质条件。笔者考虑地震波传播速度为  $500\text{ m/s}$ 、 $1\ 000\text{ m/s}$ 、 $1\ 500\text{ m/s}$ 、 $2\ 000\text{ m/s}$ 、 $\infty$ ,共建立5种荷载工况,地震波波速无穷大即不考虑行波效应,可以近似看作一致激励。当研究地震波入射角度不同而引起的行波效应时,假定地震波传播速度为定值,对入射角度取  $-10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 特定输入方向,并建立相应的3种荷载工况。

## 2 桥梁动力特性及地震动输入

### 2.1 桥梁动力特性

桥梁结构动力特性分析是进行抗震性能研究的前期工作,桥梁的抗震性能与结构的动力特性密切相关<sup>[14-15]</sup>。公路桥梁和城市桥梁抗震规范中规定:采用动态时程分析中的振型叠加法进行地震响应分析,振型阶数在计算方向给出的有效振型参与质量应大于

90%。该桥的振型质量参与系数达到《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)要求需要考虑的计算阶数为146阶,实际分析时计算了前150阶模态。笔者研究了桩土相互作用对结构动力特性的影响规律,表1为不同土介质弹性值下桥梁结构的前5阶动力特性。

表1 不同土介质弹性值下桥梁自振特性

Table 1 Natural vibration characteristics of bridge under different elasticity value of soil medium

模态阶数	自振频率/Hz				振型描述
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	
1	0.259	0.260	0.260	0.274	正对称横弯
2	0.307	0.308	0.308	0.340	全桥纵飘
3	0.462	0.463	0.463	0.478	反对称横弯
4	0.825	0.826	0.826	0.842	正对称横弯
5	0.898	0.900	0.901	0.940	正对称竖弯

对4个不同  $m$  值的模型动力特性分析可知,结构的自振频率随着  $m$  值的增大而增大。当  $m$  值从  $20\ 000$  增至  $80\ 000$  时,结构的自振频率变化幅度不大,最大增幅为1%。当  $m$  值取  $\infty$  时,结构的自振频率变化较大,最大增幅达到13.6%。结构的前5阶振型对比分析可知,当  $m$  值在  $20\ 000 \sim 80\ 000$  变化时,结构前5阶振型无变化。由此可知,桩土相互作用对高墩大跨曲线连续刚构桥自振频率有一定的影响,对结构低阶振型影响较小。

### 2.2 地震动输入

文中地震波选择与桥址场地特性比较接近的 THSTG045(1979, Impwrial Valley#10-v)波(见图4)。该条地震波的特征周期为  $0.48\text{ s}$ ,桥址处场地的特征周期为  $0.45\text{ s}$ ,两者相差6.17%,满足频谱特性要求。本条地震波的有效持时为  $32.64\text{ s}$ ,计算该桥动力特性知基本周期为  $3.66\text{ s}$ ,满足有效持时为结构基本周期的  $5 \sim 10$  倍<sup>[16-17]</sup>。

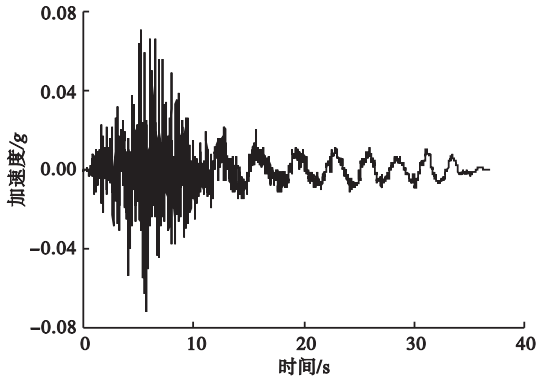


图 4 调整后的 THSTG045 地震波

Fig. 4 Adjusted THSTG045 wave

### 3 桩土相互作用对结构地震响应的影响分析

为了研究桩土相互作用对高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应的影响,笔者以不考虑桩土相互作用模型(模型 I)和考虑桩土相互作用模型(模型 II)为研究对象,分别进行了纵桥向和横桥向地震波激励,并对这两种不同边界的处理模型进行弹性阶段动力时程分析。

#### 3.1 纵桥向激励分析结果

当结构仅在纵桥向激励时,桥墩墩顶及墩底截面内力响应值如表 2 和表 3 所示。

表 2 各模型桥墩墩底截面内力

Table 2 Pier bottom section internal force of each models

模 墩	纵向弯矩/ 型 号 (kN·m)	横向弯矩/ (kN·m)	纵向剪力/ kN	横向剪力/ kN	
I	6#	290 538.1	84 200.2	4 658.0	1 070.4
	7#	228 502.1	55 376.7	2 961.5	507.0
	8#	229 402.3	68 798.7	2 986.1	683.1
	9#	273 501.8	45 315.1	4 091.6	524.3
	6#	381 388.8	105 349.3	6 496.0	1 367.6
II	7#	304 488.8	50 827.9	4 397.2	459.6
	8#	299 928.3	76 546.9	4 405.9	814.1
	9#	345 842.4	57 596.8	5 940.8	680.9

表 3 各模型桥墩墩顶截面内力

Table 3 Pier top section internal force of each models

模 墩	纵向弯矩/ 型 号 (kN·m)	横向弯矩/ (kN·m)	纵向剪力/ kN	横向剪力/ kN	
I	6#	136 578.0	10 020.8	3 946.8	846.2
	7#	101 011.1	1 134.2	1 847.3	288.4
	8#	97 839.5	1 057.6	1 883.8	349.4
	9#	126 783.4	3 483.2	3 472.4	392.7
	6#	195 391.6	16 282.7	5 131.3	1 066.3
II	7#	144 489.7	1 507.1	2 388.5	248.7
	8#	142 783.9	1 082.1	2 484.4	323.5
	9#	183 590.7	4 681.3	4 571.8	469.8

由表 2 可知,当结构考虑桩土相互作用时,桥墩墩底最大弯矩和剪力分别为 381 388.8 kN·m和 6 496.0 kN,相对不考虑桩土相互作用模型分别增大了 31.3% 和 39.5%。

由表 3 可知,当结构考虑桩土相互作用时,桥墩墩顶最大弯矩和剪力为 195 391.6 kN·m和 5 131.3 kN,相对不考虑桩土相互作用模型分别增大 43.1% 和 30.0%。

#### 3.2 横桥向激励分析结果

当结构仅在横桥向激励时,桥墩墩顶及墩底截面内力响应值表 4 和表 5 所示。

表 4 各模型墩底截面内力

Table 4 Pier bottom section internal force of each models

模 墩	纵向弯矩/ 型 号 (kN·m)	横向弯矩/ (kN·m)	纵向剪力/ kN	横向剪力/ kN	
I	6#	78 126.8	62 357.6	1 285.4	1 019.1
	7#	30 994.7	295 118.6	498.6	2 699.9
	8#	64 430.9	289 980.3	910.4	2 676.5
	9#	124 412.8	58 614.1	2 031.3	1 128.3
	6#	73 795.4	44 651.5	1 300.1	856.9
II	7#	40 339.2	222 611.7	581.6	1 981.9
	8#	61 605.2	220 204.9	904.6	2 023.5
	9#	98 657.2	47 936.7	1 629.1	924.8



表5 各模型墩顶截面内力

Table 5 Pier top section internal force of each models

模型	墩号	纵向弯矩/ (kN·m)	横向弯矩/ (kN·m)	纵向剪力/ kN	横向剪力/ kN
I	6#	36 761.4	11 975.0	1 124.7	564.3
	7#	14 828.9	4 422.8	284.9	1 533.9
	8#	30 529.6	5 285.3	614.5	1 587.3
	9#	62 657.9	10 636.2	1 778.7	494.7
II	6#	39 346.8	9 697.5	1 075.0	479.8
	7#	19 294.5	3 853.2	332.7	1 141.5
	8#	30 928.4	3 296.3	557.4	1 177.8
	9#	52 097.2	8 435.6	1 344.7	526.2

由表4可知,当考虑桩土相互作用时,桥墩墩底最大弯矩和剪力分别为222 611.7 kN·m和2 023.5 kN,相对不考虑桩土相互作用模型分别减小了24.6%和25.1%。

由表5可知,当考虑桩土相互作用时,桥墩墩顶最大弯矩和剪力分别为52 097.2 kN·m和1 344.7 kN,相对不考虑桩土相互作用模型分别减少了16.9%和24.4%。

### 4 行波效应对结构地震响应的影响分析

#### 4.1 不同传播波速下的行波效应分析结果

##### 4.1.1 位移分析

桥墩墩顶位移和主梁跨中位移如图5和图6所示。由图5分析可知,当结构考虑由于地震波传播速度引起的行波效应时,各桥墩墩顶位移随着地震波波速地增大而增大。当波速达到2 000 m/s时,各桥墩墩顶顺桥向位移达到最大值。考虑行波效应与不考虑行波效应比较可知,6#~9#桥墩墩顶顺桥向位移分别增大了14.9%、21.2%、22.6%、23.3%。由图6分析可知,当结构考虑由于地震波传播速度引起的行波效应时,各跨跨中顺桥向位移随着地震波波速地增大而增大,当波速达到2 000 m/s时各跨跨中顺桥向位移达到最大值。当结构不考虑行波效应时,各跨跨中顺桥向位移分别为104.5 mm、

99.3 mm、94.4 mm、93.5 mm和93.4 mm。考虑行波效应与不考虑行波效应比较可知,各跨跨中顺桥向位移分别增大了12.1%、18.0%、21.8%、22.2%和22.3%。综上分析可知,考虑行波效应时结构在地震作用下的位移响应比不考虑行波效应时大,因此,该类桥型设计时考虑行波效应的影响。

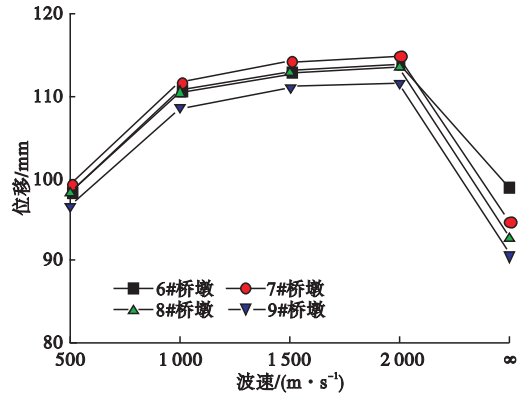


图5 桥墩墩顶顺桥向位移随波速的变化

Fig. 5 Displacement of bridge piers top in axial direction with wave velocity

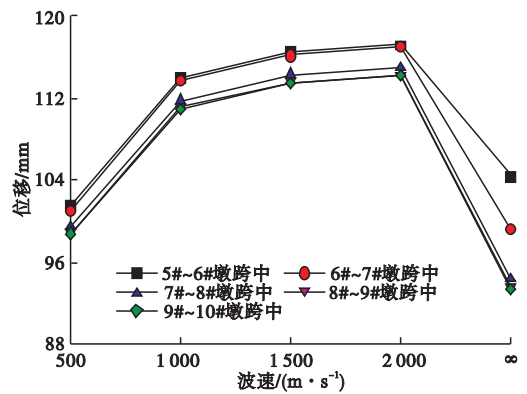


图6 主梁跨中顺桥向位移随波速的变化

Fig. 6 Displacement of main girder in axial direction with wave velocity

##### 4.1.2 内力分析

研究桥梁结构在地震荷载作用下各个桥墩顺桥向内力特点。6#~9#桥墩墩顶及墩底轴力最大值随波速的变化如图7和图8所示,6#~9#桥墩墩顶及墩底顺桥向剪力随波速的变化如图9和图10所示,6#~9#桥墩顺桥向弯矩值随波速的变化如图11和图12所示。

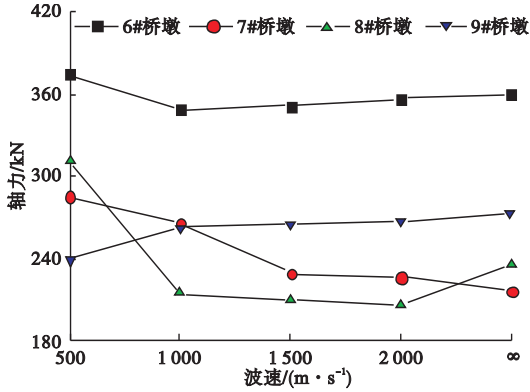


图 7 桥墩墩顶轴力最大值随波速的变化

Fig. 7 Maximum axial force of bridge piers top with wave velocity

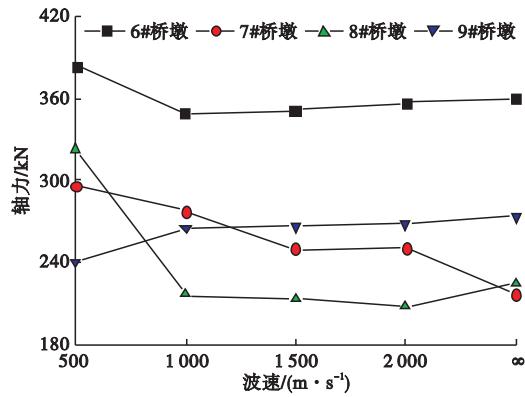


图 8 桥墩墩底轴力最大值随波速的变化

Fig. 8 Maximum axial force of bridge piers bottom with wave velocity

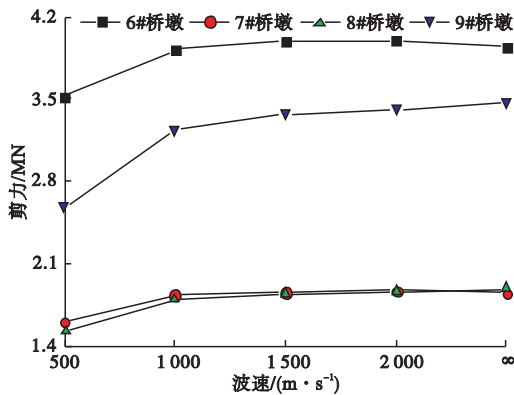


图 9 桥墩墩顶顺桥向剪力随波速的变化

Fig. 9 Maximum shear force of bridge piers top in axial direction with wave velocity

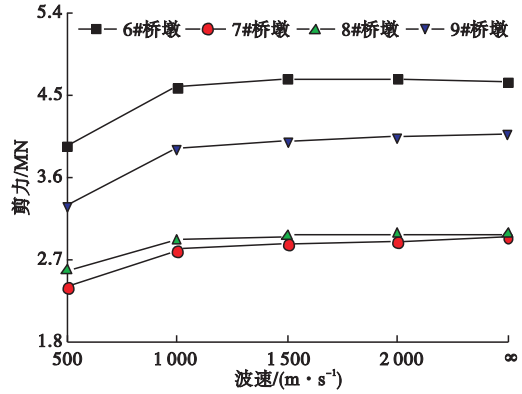


图 10 桥墩墩底顺桥向剪力随波速的变化

Fig. 10 Maximum shear force of bridge piers bottom in axial direction with wave velocity

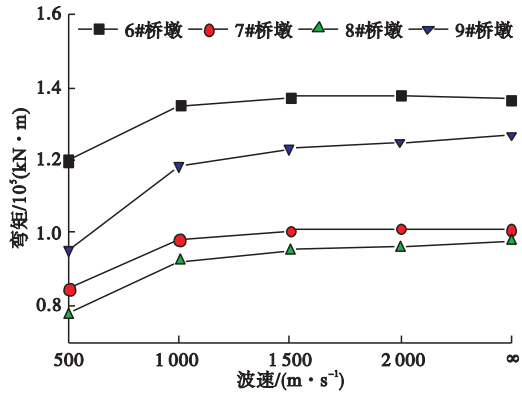


图 11 桥墩墩顶顺桥向弯矩值随波速的变化

Fig. 11 Maximum moment of bridge piers top in axial direction with wave velocity

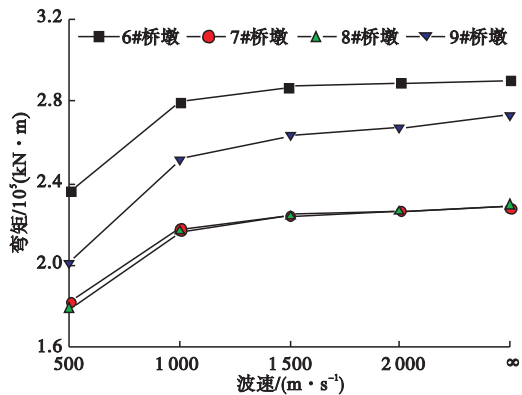


图 12 桥墩墩底顺桥向弯矩值随波速的变化

Fig. 12 Maximum moment of bridge piers bottom in axial direction with wave velocity

由图 7、图 8 可知,当结构考虑行波效应时,随着地震波波速地增大,6#~8#桥墩墩顶及墩底的轴力逐渐减小,9#桥墩轴力却逐渐

增大.当结构考虑行波效应且波速为500 m/s时,6#~8#桥墩墩顶及墩底的轴力均大于不考虑行波效应分析的结果.9#桥墩墩顶及墩底轴力按一致激励分析结果大于考虑行波效应计算结果,因而对于9#桥墩轴力按一致激励进行抗震设计则偏安全.

由图9、图10可知,当结构考虑行波效应时,随着地震波波速地增大,各桥墩墩顶及墩底剪力也逐渐增大.6#和7#桥墩当考虑行波效应且波速为2 000 m/s时其计算结果均小于一致激励分析的结果.因而,对6#和7#桥墩则需要考虑行波效应的影响,8#和9#桥墩按一致激励分析则偏安全.

由图11、图12可知,当结构考虑行波效应时,随着地震波波速地增大,各桥墩墩顶及墩底顺桥向弯矩也逐渐增大.除6#和7#桥墩墩顶顺桥向弯矩在考虑行波效应且波速为2 000 m/s计算结果大于按一致激励分析结果.其余各桥墩墩顶及墩底顺桥向弯矩计算结果均小于按一致激励分析结果.

#### 4.2 不同传播角度下的行波效应分析结果

各个桥墩墩顶及墩底顺桥向内力随入射角度的变化如图13~图18所示,各个桥墩墩顶顺桥向位移如图19所示.

由图13~图18可知,地震波入射角度不同引起的行波效应对桥墩顺桥向内力影响不大,6#~9#桥墩墩顶和墩底顺桥向内力值相差较小,最大相差为8.7%.当地震入射角度为0°时,即不考虑地震波入射角引起的行波效应时,其内力响应结果略大于另外两个入射角度的地震响应值.

由图19可知,当地震波入射角度为-10°时,6#桥墩墩顶顺桥向位移值大于其他两个入射角度产生的位移值.当入射角度为0°时,7#~9#墩墩顶顺桥向位移值大于-10°和10°两个方向产生的位移值.当地震波入射角度分别为-10°、0°、10°激励时,各桥墩墩顶顺桥向位移值相差较小,最大相差4.3%,即考虑由于地震波入射角度引起的行波效应时

对该类桥型墩顶位移响应影响较小.

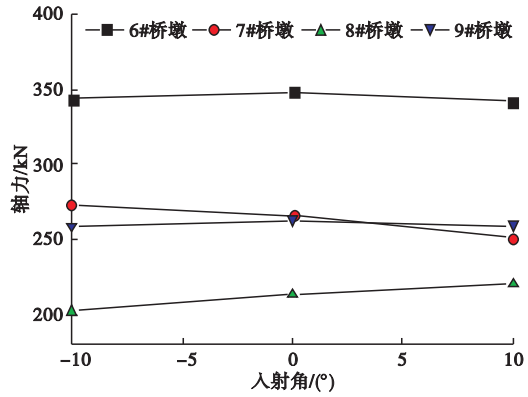


图13 桥墩墩顶轴力随入射角度的变化

Fig. 13 Axial force of bridge piers top with incident angle

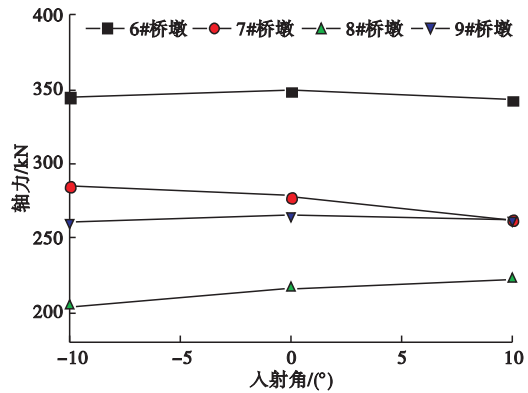


图14 桥墩墩底轴力随入射角度的变化

Fig. 14 Axial force of bridge piers bottom with incident angle

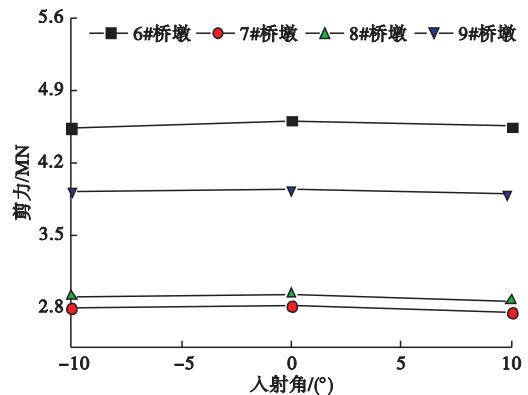


图15 桥墩墩顶剪力随入射角度的变化

Fig. 15 Shear force of bridge piers top with incident angle



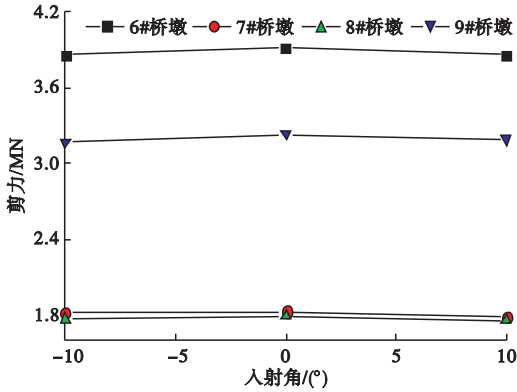


图 16 桥墩墩底剪力随入射角度的变化

Fig. 16 Shear force of bridge piers bottom with incident angle

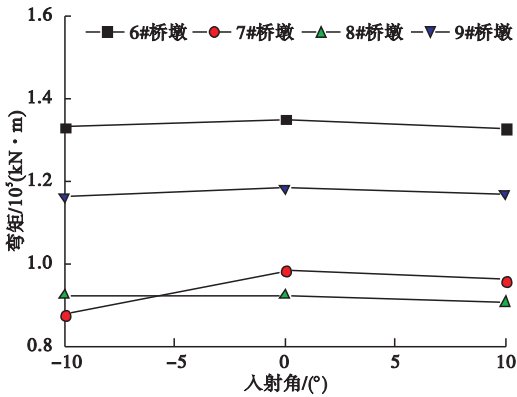


图 17 桥墩墩顶弯矩随入射角度的变化

Fig. 17 Moment of bridge piers top with incident angle

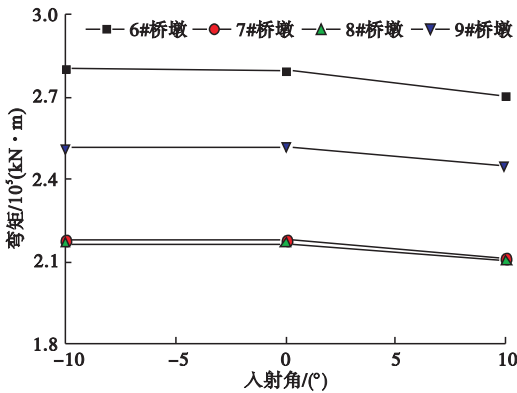


图 18 桥墩墩底弯矩随入射角度的变化

Fig. 18 Moment of bridge piers bottom with incident angle

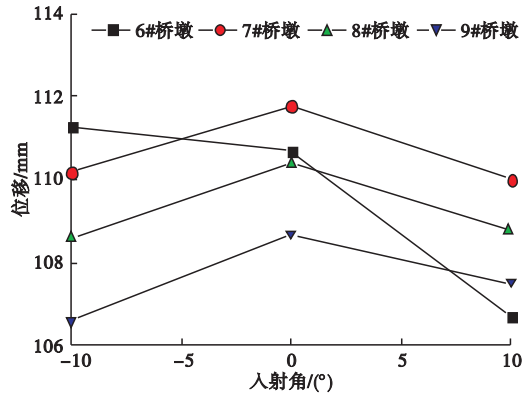


图 19 桥墩墩顶位移随入射角度的变化

Fig. 19 Displacement of bridge piers top with incident angle

### 5 结 论

(1) 桩土相互作用对该类桥型的动力特性有一定的影响;随着桩土弹性连接土介质参数的增大,结构体系的自振频率也随之增大,但结构的低阶振型基本未变.

(2) 考虑桩土相互作用时,纵桥向激励下,考虑桩土相互作用比不考虑桩土相互作用桥梁各桥墩控制截面内力增大 30% ~ 40%;横桥向激励下,考虑桩土相互作用比不考虑桩土相互作用桥梁各桥墩控制截面内力减小 17% ~ 25%.

(3) 当考虑由于地震波传播速度不等引起的行波效应时,部分桥墩的内力响应大于按一致激励分析结果,而个别桥墩内力响应结果却恰恰相反,说明行波效应对该类桥型的地震响应影响复杂.

(4) 当考虑由于地震波入射角度不同而引起的行波效应时,入射角度为 0°时各个桥墩内力和位移响应略大于 10°和 -10°两个入射角度的激励结果.考虑由于地震波入射角度引起的行波效应对该类桥型地震响应影响较小.

### 参考文献

[ 1 ] 张永亮,陈兴冲,夏修身.行波效应对铁路大跨连续刚构桥地震反应的影响[J].西北地震学报,2010,32(3):268-272.

- (ZHANG Yongliang, CHEN Xingchong, XIA Xiushen. The excitation effect of traveling waves on seismic response of railway long-span continuous rigid-frame bridge[J]. North western seismological journal, 2010, 32(3): 268 - 272.)
- [2] 贾毅. 高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[D]. 昆明: 云南大学, 2014.  
(JIA Yi. Seismic response analysis of high pier and long-span curve continuous rigid frame bridge [D]. Kunming: Yunnan University, 2014.)
- [3] 李永波, 张鸿儒, 郜新军. 考虑桩-土相互作用的多年冻土区多跨简支梁桥地震响应分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 183 - 190.  
(LI Yongbo, ZHANG Hongru, GAO Xingjun. Seismic response analysis of MSSS bridge in permafrost including pile-soil interaction [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(11): 183 - 190.)
- [4] 陈清军, 姜文辉, 李哲明. 桩-土接触效应及对桥梁结构地震反应的影响[J]. 力学季刊, 2005, 26(4): 609 - 613.  
(CHEN Qingjun, JIANG Wenhui, LI Zheming. Effect of pile soil contact and its influence on seismic response of bridge structure [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2005, 26(4): 609 - 613.)
- [5] 魏凯, 郭平, 韩萍, 等. 行波效应下多联长跨组合结构桥梁地震响应分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 119 - 125.  
(WEI Kai, GUO Ping, HAN Ping, et al. Seismic responses of a long multi-span composite bridge under traveling wave excitation [J]. Structural engineers, 2010, 26(2): 119 - 125.)
- [6] 洪浩, 郑史雄, 贾宏宇, 等. 考虑行波效应的高墩大跨刚构桥随机地震响应研究[J]. 世界地震工程, 2013, 29(2): 132 - 137.  
(HONG Hao, ZHENG Shixiong, JIA Hongyu, et al. Stochastic seismic responses analysis of long-span rigid-framed bridge with high piers considering travelling wave effect [J]. World earthquake engineering, 2013, 29(2): 132 - 137.)
- [7] 高月琪. 基于行波效应的大跨度钢-混凝土组合拱桥地震响应分析[J]. 公路交通技术, 2015, 1(1): 45 - 50.  
(GAO Yueqi. Analysis for seismic response of large-span steel-concrete combined arch bridge based on traveling wave effect [J]. Technology of highway and transport, 2015, 1(1): 45 - 50.)
- [8] 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.)
- [9] 揭志羽, 卫星, 李亚东, 等. 大跨高墩小半径刚构-连续组合梁桥地震响应分析[J]. 桥梁建设, 2013, 43(1): 52 - 58.  
(JIE Zhiyu, WEI Xin, LI Yadong, et al. Analysis of seismic response of long span, high-rise pier and short radius curved hybrid bridge of rigid frame and continuous girder [J]. Bridge construction, 2013, 43(1): 52 - 58.)
- [10] 黄小国, 胡大琳, 张后举. 行波效应对大跨度连续刚构桥地震反应的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(1): 72 - 76.  
(HUANG Xiaoguo, HU Dalin, ZHANG Houju. Effects of traveling wave to seismic response of long span rigid-framed bridge [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2008, 28(1): 72 - 76.)
- [11] 李忠献, 史志利. 行波激励下大跨度连续刚构桥的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 68 - 76.  
(LI Zhongxian, SHI Zhili. Seismic response analysis for long-span continuous rigid-framed bridge under excitation of traveling waves [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2003, 23(2): 68 - 76.)
- [12] HARICHANDRAN R S, HAWWARI A, SWEIDAN B N. Response of long-span bridges to spatially varying ground motion [J]. Journal of structural engineering, 1996, 122(122): 476 - 484.
- [13] SOYLUK K, DUMANOGLU A A. Comparison of asynchronous and stochastic dynamic responses of a cable-stayed bridges [J]. Engineering structures, 2000, 22(5): 435 - 445.
- [14] 李忠献, 黄信. 行波效应对深水连续刚构桥地震响应的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 120 - 125.  
(LI Zhongxian, HUANG Xin. Influence of traveling wave effect on seismic responses of continuous rigid-framed bridge in deep water [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(3): 120 - 125.)
- [15] 贾毅, 李福海, 赵人达, 等. 曲率半径和激励角度对刚构桥地震响应的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 243 - 250.  
(JIA Yi, LI Fuhai, ZHAO Renda, et al. Study on the effect of the curvature radius and seismic excitation angle on the seismic responses of high pier and long-span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(2): 243 - 250.)
- [16] 代攀, 杨涛, 胡大琳. 高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 181 - 187.  
(DAI Pan, YANG Tao, HU Dalin. The seismic response analysis of continuous rigid frame bridge with high piers and long span [J]. World earthquake engineering, 2009, 25(4): 181 - 187.)
- [17] 胡明刚. 曲线梁桥的动力分析及抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
(HU Minggang. Dynamic and seismic behavior researches on curved girder bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)