

文章编号:1673-2049(2017)03-0024-07

# 半整体式桥台无缝化斜交桥的抗震性能分析

庄一舟,李增锋,程俊峰,徐 亮

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

**摘要:**为了掌握半整体无缝斜交桥的动力特性和地震响应特点,采用 MIDAS/Civil 建立了湖州贯边桥的有限元模型,进行了动力特性分析,并运用反应谱法和地震时程法对无缝化斜交桥进行了地震响应分析。结果表明:梁端台后土对桥梁的约束作用随斜交角的增大而逐渐减弱;主梁梁端台后土的作用对桥梁结构是有利的,可以有效约束桥梁纵飘;在进行地震安全性分析时,用反应谱法所得的墩底内力和墩顶位移均大于时程分析法;在进行半整体无缝斜交桥的工程设计时,应以垂直于盖梁方向输入地震动计算固定支座所产生的墩顶位移来控制桥梁的抗震安全性;所得研究成果为半整体式桥台无缝化斜交桥的抗震设计和研究提供了可参考资料,对该桥型的实际工程应用和发展起到了推动作用。

**关键词:**半整体无缝斜交桥;动力反应谱;时程分析;斜交角;桥台-土相互作用

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

## Analysis on Seismic Performance of Semi-integral Abutment Jointless Skew Bridge

ZHUANG Yi-zhou, LI Zeng-feng, CHENG Jun-feng, XU Liang

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

**Abstract:** In order to grasp the features of vibration and seismic response of semi-integral jointless skew bridge, a finite element model of Huzhou Guanbian bridge was established with MIDAS/Civil. The dynamic characteristic analysis was carried out, and the response spectra method and time history were conducted to analyze the seismic response of semi-integral jointless skew bridge. The results show that the constraining effect of soil behind the abutment is weakened gradually with the decrease of skew angle of bridge. The effect of soil behind abutment is benefit to semi-integral abutment jointless skew bridge, which can restrict its longitudinal float effectively. The internal force of pier bottom and displacement of pier top calculated with response spectra method are even larger than those with time history analysis method during seismic safety analysis. The seismic safety of the type of bridge should be governed by the displacement of pier top caused by the fixed bearing while inputting the earthquake motion perpendicular to cap. The study results provide references data for the seismic design and research of semi-integral jointless skew bridge and promote the development and actual engineering application of the semi-integral jointless skew bridge.

**Key words:** semi-integral abutment jointless skew bridge; dynamic response spectra; time history analysis; skew angle; abutment-soil interaction

收稿日期:2016-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51278126,51578161);福建省自然科学基金项目(2013J01187)

作者简介:庄一舟(1964-),男,浙江奉化人,教授,工学博士,E-mail:yizhouzhuang@qq.com。

## 0 引言

随着中国经济的迅猛发展,交通压力日益增大,现有常规桥梁的伸缩缝损坏普遍且严重<sup>[1]</sup>。无缝桥梁的提出不仅很好地解决了这一问题,还大幅节省了桥梁的建造及维护费用<sup>[2]</sup>。实际工程中,因地形情况等限制,往往需要将桥台与桥梁纵向设置成一定的角度<sup>[3-4]</sup>。斜交式半整体桥梁作为无缝桥的一种主要类型,既满足了无缝化的需要,又满足了路线走向和桥梁并重的需要,在中小桥梁的设计中具有巨大的应用价值。然而,相比直线桥,斜交式半整体桥梁的扭转中心和质量中心不重合,扭转半径较大,在地震作用下的响应更为复杂<sup>[5]</sup>。桥梁上下部结构具有显著的空间耦合作用,并在梁端产生非线性接触效应和刚体转动,又因扭转中心距桥梁端部距离较长,梁体微小的转角就可在梁端产生较大的位移,甚至发生桥台与主梁的碰撞现象和落梁事故<sup>[6]</sup>。斜交式半整体桥相较于传统的斜交桥,其基本的动力特性、抗震性能以及地震反应等会有较显著的不同,对改善传统斜交桥的抗震性能具有明显的作用。因此,研究整体或半整体式桥台无缝化斜交桥的抗震性能具有较大的理论意义和应用价值。

近年来,国内外在桥梁抗震特性方面进行了许多研究工作,也取得了较多的研究成果,但针对斜交式半整体桥梁抗震性能方面的研究却较少。综合查阅各国的桥梁抗震设计规范,各国对于斜交桥的抗震设计还只是停留在概念性的设计理念上,没有具体到简易可行的计算方法,涉及到的只是普通斜交桥或者是无缝桥的内容。美国 AASHTO 规范<sup>[7]</sup>规定:对于斜交桥,应该采用多振型反应谱法或时程分析方法进行结构地震反应的计算。当使用多振型反应谱法时,考虑的振型数必须大于跨数的3倍。美国加利福尼亚州 CALTRANS 规范<sup>[8]</sup>规定:当桥梁为斜交桥时,应进行动态时程分析,从而获得桥梁的地震反应特性。新西兰桥梁抗震设计准则<sup>[9]</sup>规定:对于斜交桥,应进行地震反应时程分析。欧洲规范<sup>[10]</sup>规定:斜交桥属于特殊桥梁,应使用振型分解法进行结构的地震反应分析,并依据能力设计原理进行安全设计。中国桥梁抗震规范<sup>[11-12]</sup>规定:桥梁分为A类、B类、C类和D类4个抗震设防类别,其中,A类桥梁指主跨径超过150 m的特大桥;B类桥梁指高速公路和一级公路上的除A类以外的桥梁及二级公路上的大桥、特大桥等;C类桥梁指属A、B、D类以外的公路桥梁;D类桥梁指位于三、四级公

路上的中、小桥梁。该规范将斜交角小于 $20^\circ$ 的斜交桥定义为规则桥梁,按规则桥梁进行抗震设计,将斜交角大于等于 $20^\circ$ 的斜交桥定义为非规则桥。中国《铁路工程抗震设计规范》<sup>[13]</sup>未对斜交桥的抗震设计做出任何相关规定。

为了掌握半整体式桥梁的振动和地震响应特点,本文以浙江省湖州贯边桥为工程背景,建立半整体无缝斜交桥的动力有限元模型,对该桥型的动力特性进行相关参数分析,并运用反应谱法和动态时程分析法对此桥型的地震响应进行计算,对2种方法的计算结果进行对比分析。

## 1 计算模型

湖州贯边桥为半整体无缝斜交桥<sup>[14]</sup>,该桥梁全长112 m,设计配跨采用 $7\times 16$  m,斜交角为 $30^\circ$ ,桥梁上部结构采用后张法预应力混凝土空心板,为先简支后连续结构体系,下部采用桩柱式墩台,桥下净空满足泄洪断面要求。台后填土采用水泥稳定碎石基。该半整体无缝斜交桥的结构布置和半整体桥台构造如图1(a),(b)所示。

采用有限元分析软件 MIDAS/Civil 建立了全桥动力分析基准模型(不考虑台后土作用,斜交角为 $30^\circ$ ),如图1(c)所示。有限元模型总共有1 186个节点和1 425个单元,单元类型全为梁单元。全桥混凝土等级为C30,弹性模量为 $2\times 10^4$  MPa,泊松比为0.2;HRB335钢筋弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3,密度为 $7\ 850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,屈服应力为300 MPa。

为了研究斜交角在地震作用下对主梁受力性能的影响,对空心板式主梁、矩形盖梁和圆柱式截面桥墩均采用平面梁格法进行建模分析。主梁梁端台后土的接触处用弹性支承来模拟,土体弹簧刚度取值方法参考《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)附录P的m值法<sup>[15]</sup>。本文模型还考虑了二期荷载的影响,主要是栏杆和桥面铺装等。

## 2 动力特性分析

结构的动力特性是抗震分析的基础,故本文分别建立了有无台后土作用、不同斜交角和不同支座设置的桥梁有限元模型,计算它们的结构动力特性,以了解其抗震性能。

### 2.1 梁端台后土作用的影响

为了分析梁端台后土-结构相互作用对半整体无缝斜交桥动力特性的影响,分别建立了不考虑主

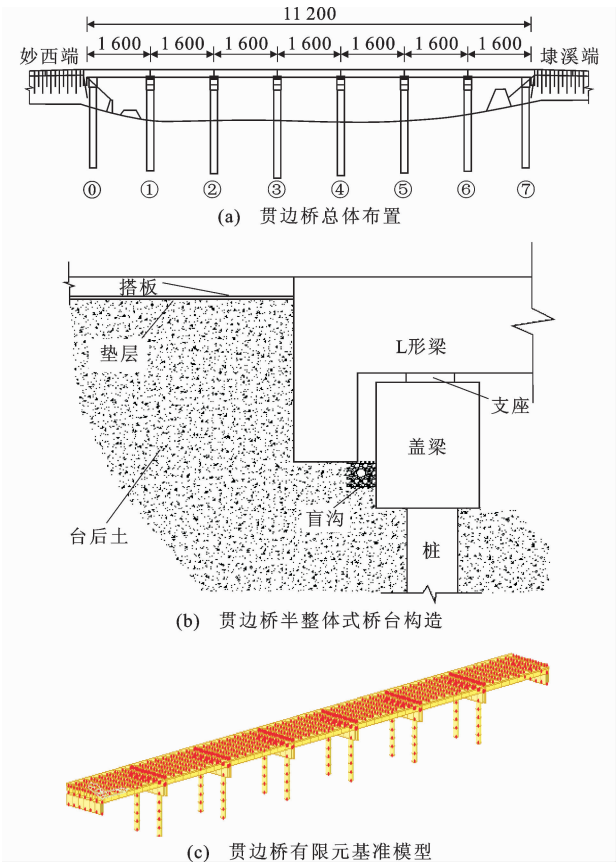


图 1 湖州贯边桥结构及有限元模型(单位:cm)  
Fig.1 Structure and Finite Element Model of  
Huzhou Guanbian Bridge (Unit:cm)

梁梁端台后土作用的模型(即基准模型)和考虑主梁梁端台后土作用的桥梁有限元模型。土体弹簧刚度  $K$  按照规范<sup>[9]</sup>推荐的  $m$  值法取值,即

表 1 考虑台后土作用和不考虑台后土作用模型的前 15 阶动力特性

模态阶次	不考虑梁端台后土作用			考虑梁端台后土作用		
	自振频率/Hz	周期/s	振型	自振频率/Hz	周期/s	振型
1	1.948	0.513	纵飘	2.065	0.484	纵飘
2	2.069	0.483	纵飘	2.074	0.482	纵飘
3	2.140	0.467	纵飘	2.814	0.355	纵飘
4	3.266	0.306	横弯	3.282	0.306	横弯
5	5.808	0.172	反对称横弯	5.823	0.172	反对称横弯
6	6.377	0.156	竖弯	6.381	0.157	竖弯
7	6.605	0.151	竖弯	6.613	0.151	竖弯
8	7.396	0.135	竖弯	7.401	0.135	竖弯
9	8.310	0.120	竖弯+扭转	8.316	0.120	竖弯+扭转
10	8.598	0.116	扭转	8.599	0.116	扭转+横弯
11	8.638	0.115	扭转	8.642	0.115	扭转
12	8.734	0.114	扭转	8.735	0.114	横弯+扭转
13	8.804	0.113	扭转	8.809	0.113	横弯+扭转
14	8.840	0.113	扭转+横弯	8.841	0.113	扭转+横弯
15	8.841	0.113	扭转	8.844	0.113	扭转

$$K=C_z a_z b_z = m z a_z b_z$$

(1)

式中: $a_z$ 、 $b_z$  分别为土体的厚度和宽度,此处  $b_z$  取桥台宽度; $m$  为地基反力系数随深度增长的比值系数,  $m$  取值通过试验确定<sup>[16]</sup>,而且在动力分析中  $m_d = (2\sim 3)m_s$ ,  $m_d$  为动力分析中的  $m$  值,  $m_s$  为静力分析中的  $m$  值; $C_z$  为单位面积土在弹性极限内产生单位形变所需要的力,取值与  $m$  有关。

经过计算分析,考虑梁端台后土作用和不考虑梁端台后土作用模型的前 15 阶模态的动力特性如表 1 所示。

从表 1 可以看出:考虑了梁端台后土作用的最小自振频率比不考虑梁端台后土作用的最小自振频率大 5.6%,因频率与刚度之间是平方关系,则说明考虑梁端台后土作用后的结构整体刚度增大 31.36%,增大显著。2 个模型的前 15 阶振型中,振型参与系数分别如下:考虑台后土作用的纵向为 85.17%,横向为 80.68%;不考虑台后土作用的纵向为 84.91%,横向为 80.65%。可见,高阶振型对 2 个模型都有较大影响。两者的第 1 阶振型都发生了纵飘,说明桥梁的纵向刚度较弱,对比两者的第 1 阶模态可以看出,主梁梁端台后土对结构的纵飘有一定的约束作用。两者的第 4、5 阶振型都发生了横弯,说明主梁的横向抗弯刚度较弱,因此在进行此类桥梁抗震设计时应保证以上部位的抗弯刚度,从而确保桥梁结构的安全。

2.2 斜交角的影响

为了分析不同斜交角对半整体无缝桥的动力特

性影响,分别建立了  $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$  五个斜交角的桥梁 FEM 模型。不同斜交角的同一个桥梁模型会导致桥梁整体质量的不同。为消除不同质量对斜交角参数分析的影响,将  $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$  模型通过更改部分构件的密度来将结构质量统一为  $30^{\circ}$  模型的结构质量。5 种斜交角模型前 5 阶模态的动力特性见表 2。

表 2 不同斜交角模型的动力特性

Tab. 2 Dynamic Characteristics of Different Skew Angle Models

斜交角/( $^{\circ}$ )	模态阶次	自振频率/Hz	周期/s	振型
0	1	2.114	0.473	横飘
	2	2.135	0.468	反对称横飘
	3	2.600	0.362	纵飘
	4	3.321	0.301	对称横弯
	5	5.876	0.170	反对称横弯
15	1	2.095	0.477	反对称横飘
	2	2.100	0.476	横飘
	3	2.790	0.358	纵飘
	4	3.303	0.303	横弯
	5	5.854	0.171	反对称横弯
30	1	2.065	0.484	纵飘+横飘
	2	2.074	0.482	纵飘
	3	2.814	0.355	纵飘
	4	3.282	0.305	横弯
	5	5.823	0.172	反对称横弯
45	1	1.992	0.502	纵飘+横飘
	2	2.030	0.493	反对称横飘
	3	2.849	0.351	纵飘
	4	3.230	0.310	横弯
	5	5.717	0.175	反对称横弯
60	1	1.887	0.530	纵飘+横飘
	2	1.971	0.507	反对称横飘
	3	2.872	0.348	横飘+横弯
	4	3.131	0.319	横弯
	5	5.426	0.184	反对称横弯

从表 2 可以看出:对比第 1 阶模态可知,桥梁纵飘成分随着斜交角的增大逐渐增大,说明大的斜交角对桥梁纵向稳定不利;此外,从周期大小的比较可得,前两阶自振周期随着斜交角的增大而增大,说明梁端台后土对桥梁的约束作用随斜交角的增大而逐渐减弱。

3 地震响应分析

3.1 反应谱分析

根据湖州贯边桥的工程地质情况,结构阻尼比均取为 0.05,桥梁类型为 C 类,分区特征周期为

0.35 s,场地类型为一类,设防烈度为 7 度,峰值加速度为  $0.05g$  ( $g$  为重力加速度),设计加速度反应谱曲线如图 2 所示。组合方法采用 SRSS 法。此外,半整体无缝斜交桥属不规则桥梁,地震动输入有不确定性。国内外对不规则桥梁的最不利地震动方向有一定的研究<sup>[17-18]</sup>;斜交桥的最不利地震动为沿着垂直于盖梁方向( $v$  向)和平行于盖梁方向( $p$  向)分别输入的地震动,由此计算得到单向地震作用下的变形和内力即为最大值<sup>[19]</sup>。沿  $v$  向和  $p$  向的单向水平输入情况见图 3。

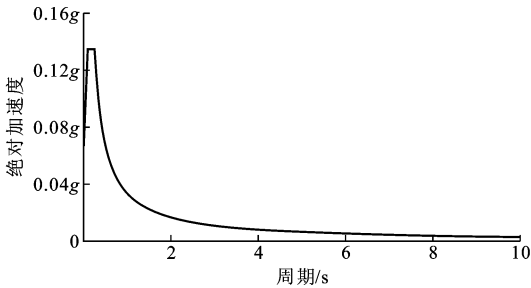


图 2 加速度反应谱曲线

Fig. 2 Acceleration Response Spectrum Curve

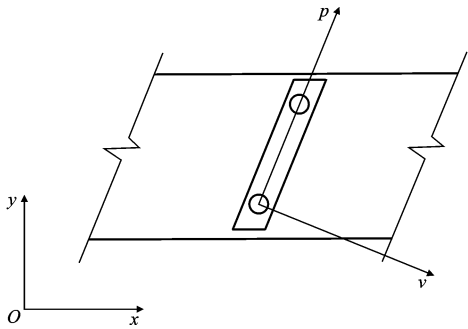
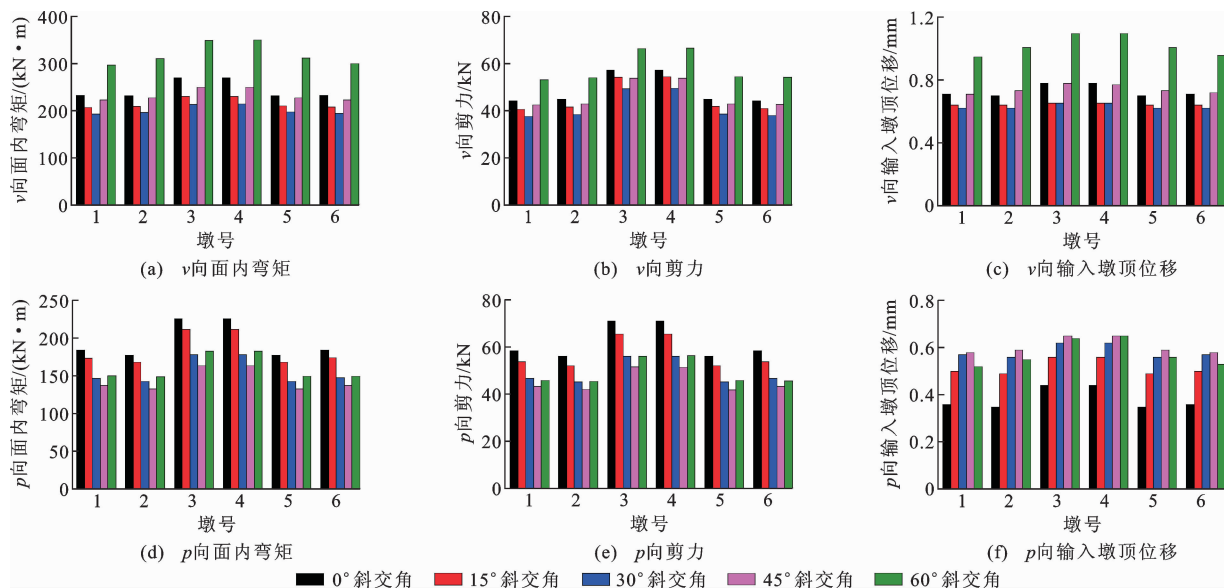


图 3 地震动输入方向

Fig. 3 Direction of Earthquake Motion Input

基准模型的计算结果表明:地震动沿  $v$  向输入时,由于耦合性,不仅产生了该方向上较大的墩底剪力  $F_v$  与相应的面内弯矩  $M_p$ ,也会产生较小的墩底剪力  $F_p$  与相应的面内弯矩  $M_v$ 。地震动沿  $p$  向输入时也产生了类似的结果。 $v$  向地震动下的最大剪力为 49 kN,最大面内弯矩为  $132 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ;  $p$  向地震动下的最大剪力为 63 kN,最大面内弯矩为  $178 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。对比 2 个方向内力可得,在此类桥梁抗震设计中, $p$  向桥墩的墩底抗剪能力和相应的抗弯刚度设计比  $v$  向更强,其中 3,4 号桥墩的内力最大。沿  $v$  向输入地震动时产生的墩顶位移都比  $p$  向产生的墩顶位移大。不同斜交角时  $v, p$  向地震动输入的计算结果、墩顶位移计算结果见图 4。

从图 4 可以看出,  $v$  向输入地震动时,  $F_v$  和面

图4  $v$  向和  $p$  向响应Fig. 4 Responses of  $v$  and  $p$  Directions

内弯矩  $M_p$  随斜交角的增大先减小后增加, 3 号和 4 号桥墩(固定支座)的内力较其他桥墩大。沿  $p$  向单向输入地震动时也有类似结论。 $v$  向单向输入地震动时产生的墩顶位移比  $p$  向单向输入地震动时产生的大, 且固定支座桥墩的墩顶位移最大, 因此在进行半整体无缝斜交桥的结构设计时, 应以  $v$  向单向输入地震动时计算得到的固定支座墩顶位移来控制桥梁的抗震安全性。此外, 最大位移值随斜交角的增大先减小后增大。

### 3.2 时程分析

半整体无缝斜交桥属于特殊结构,《公路桥梁抗震设计细则》中明确规定,特殊桥梁结构宜采用动态时程分析法进行抗震分析。地震波的峰值、频谱特性和持续时间是地震波的三大特性<sup>[20-22]</sup>, 这 3 个特性与地震时结构的破坏紧密相关, 此处选择地震波时同时考虑。结合湖州贯边桥的地质条件, 选用 Cheonan 波作为输入波, 场地类型为一类。该波有效峰值加速度为  $0.042g$ , 持续时间为  $10.8s$ , 湖州贯边桥的抗震设防烈度为 6 度( $0.05g$ ), 因此要对 Cheonan 波进行修正<sup>[23]</sup>, 即

$$a'(t) = \frac{A'_{\max}}{A_{\max}} a(t) \quad (2)$$

式中:  $a'(t)$  为修正之后的加速度;  $A'_{\max}$  为修正后的有效峰值加速度;  $a(t)$  为输入的实际地震波加速度;  $A_{\max}$  为实际地震波有效峰值加速度。

修正后的地震波加速度曲线见图 5。湖州贯边桥全长  $112m$ , 桥址处的地质连续, 所以根据中、小桥梁所有支承点的运动是相同的假定, 在分析时仅

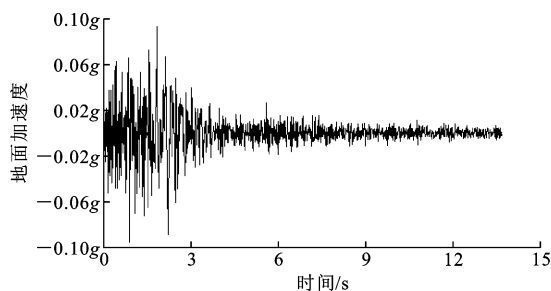


图5 修正后的 Cheonan 地震波加速度曲线

Fig. 5 Acceleration Curve of Fixed Cheonan Seismic Wave

计算一致激励的情况。计算结果表明:  $v$  向地震动输入下的墩底最大剪力为  $46kN$ , 最大面内弯矩为  $103kN \cdot m$ ;  $p$  向地震动输入下的最大剪力为  $60kN$ , 最大面内弯矩为  $133kN \cdot m$ 。地震动  $v$  向输入时的墩顶位移较  $p$  向输入时大, 其中固定支座对应桥墩的位移最大。

### 3.3 对比分析

基于反应谱法和地震时程法所得的湖州贯边桥计算结果, 进行墩底最大剪力、墩底最大弯矩和墩顶最大位移对比分析, 结果见图 6。

从图 6 可以看出, 反应谱分析所得的计算结果(墩底内力、墩顶位移)都大于时程分析法, 那么在设计环节使用反应谱法分析是偏保守的。

## 4 结语

(1) 考虑了主梁梁端台后土作用的半整体无缝斜交桥模型整体结构刚度将变大, 自振周期减小; 主梁梁端台后土对无缝斜交桥的约束作用随斜交角的

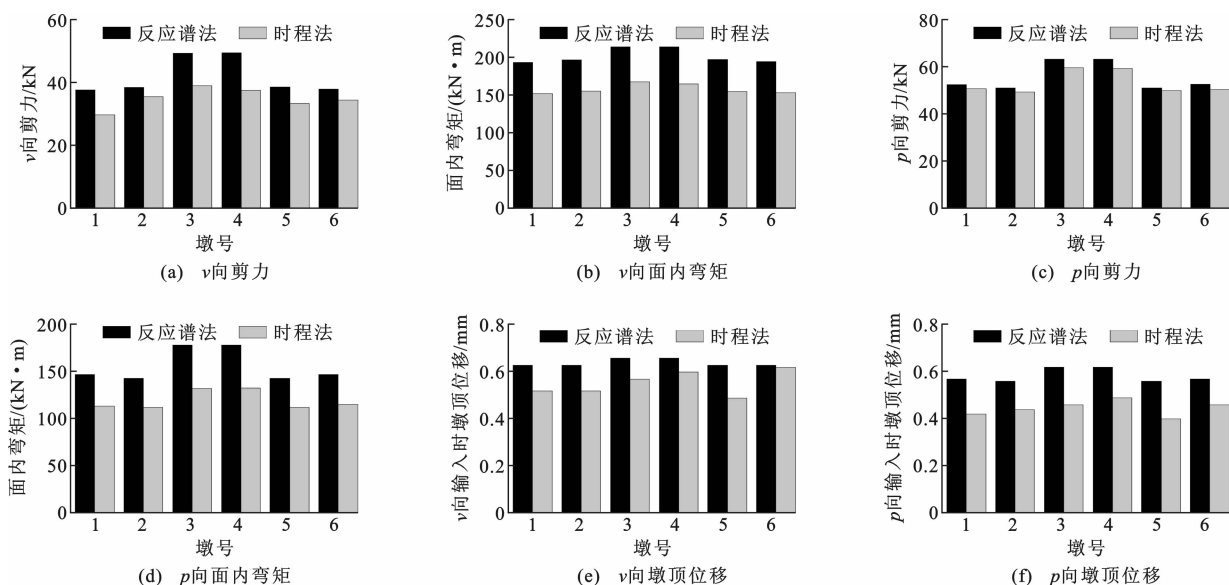


图6 反应谱法和时程法计算结果对比

Fig. 6 Calculating Results Comparison Between Response Spectrum Method and Time History Method

增大而逐渐减弱;固定支座的设置也可以使桥梁整体结构刚度变大,自振周期减小。

(2)考虑梁端台后土对主梁梁端的作用会较大程度地加强该类结构内力的空间耦联性;桥墩的最大位移随斜交角的增加先减小后增大。在进行半整体无缝斜交桥的结构设计时,应以沿垂直于盖梁方向单向输入地震动所得的固定支座桥墩墩顶位移值来控制桥梁的抗震安全性。

(3)使用反应谱法分析该半整体无缝斜交桥所得的墩底内力和墩顶位移均大于时程分析法,因此在此类桥梁的设计过程中,采用反应谱法偏保守。主梁梁端台后土的作用对桥梁结构是有利的,可以有效约束桥梁纵飘。

## 参考文献:

## References:

- [1] 李扬海.公路桥梁伸缩装置[M].北京:人民交通出版社,1999.  
LI Yang-hai. Expansion Device of Highway Bridge [M]. Beijing:China Communications Press,1999.
- [2] 董桔灿,陈宝春, BRISEGHHELLA Bruno,等.多跨空心板简支梁桥整体化改造设计[J].建筑科学与工程学报,2015,32(5):73-80.  
DONG Ju-can, CHEN Bao-chun, BRISEGHHELLA Bruno, et al. Integral Transformation Design of Multi-span Hollow Slab Simply-supported Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32 (5):73-80.
- [3] 陈宝春,庄一舟, BRISEGHHELLA Bruno.无伸缩缝桥

梁[M].北京:人民交通出版社,2013.

CHEN Bao-chun, ZHUANG Yi-zhou, BRISEGHHELLA Bruno. Jointless Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,2013.

- [4] WESEMAN W A. Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges[R]. Washington DC: Federal Highway Administration,1995.
- [5] 卢明奇,杨庆山,李英勇.斜度对斜交桥地震作用下的扭转效应影响[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(2):155-159.  
LU Ming-qi, YANG Qing-shan, LI Ying-yong. Torsion Effects of Skew Angles on Skew Bridges During Earthquakes[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(2):155-159.
- [6] 亓兴军,孙庆凯,曹三鹏.强震下斜交简支梁桥落梁及挡块破坏模式研究[J].山东建筑大学学报,2015,30(5):416-422.  
QI Xing-jun, SUN Qing-kai, CAO San-peng. Unseating Mode of Simply Supported Skew Beam Bridge Under Strong Earthquakes[J]. Journal of Shangdong Jianzhu University, 2015, 30(5):416-422.
- [7] AASHTO-1995, Standard Specifications for Highway Bridges[S].
- [8] AASHTO LRFD 1998, Bridge Design Specifications Manual[S].
- [9] TNZ-1994, Bridge Design Specifications Manual[S].
- [10] EN 1998-2, Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures — Part 2: Bridges[S].
- [11] JTG/T B02-01—2008,公路桥梁抗震设计细则[S].

- JTG/T B02-01—2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S].
- [12] 王克海,李冲,李悦. 中国公路桥梁抗震设计规范中存在的问题及改进建议[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 95-103.
- WANG Ke-hai, LI Chong, LI Yue. Problems in Chinese Highway Bridge Seismic Specifications and Suggestions for Improvement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 95-103.
- [13] GBJ 111—87, 铁路工程抗震设计规范[S].
- GBJ 111—87, Code for Seismic Design of Railway Engineering[S].
- [14] 庄一舟,钱海敏,韩裕添,等. 温度荷载下半整体无缝斜桥搭板的力学性能研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2016, 44(4): 480-486.
- ZHUANG Yi-zhou, QIAN Hai-min, HAN Yu-tian, et al. Study on the Mechanical Properties of Approach Slab of Semi-integral Abutment Skew Bridges Under Thermal Load[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2016, 44(4): 480-486.
- [15] JTG D63—2007, 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- JTG D63—2007, Code for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts[S].
- [16] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- JGJ 94—2008, Technical Code for Building Pile Foundations[S].
- [17] 朱东生,虞庐松,刘世忠. 不规则桥梁地震动输入主方向的研究[J]. 兰州铁道学院学报: 自然科学版, 2000, 19(6): 37-40.
- ZHU Dong-sheng, YU Lu-song, LIU Shi-zhong. The Study of Earthquake Input Principal Direction for Irregular Bridges[J]. Journal of Lanzhou Railway University: Natural Sciences, 2000, 19(6): 37-40.
- [18] 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 Yun-tian, LI Ming-rui, LIN Chun-zhe. Elastic Earthquake Response Analysis for Complex Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1991, 11(4): 77-86.
- [19] ZEMBATY Z. Spatial Seismic Coefficient, Some Sensitivity Results[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(4): 379-382.
- [20] 王亚勇. 结构抗震设计时程分析法中地震波的选择[J]. 工程抗震, 1988(4): 15-22.
- WANG Ya-yong. Selections of Ground Motions in Time History Analysis for Structures Seismic Design[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1988(4): 15-22.
- [21] 王东升,岳茂光,李晓莉,等. 高墩桥梁抗震时程分析输入地震波选择[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增1): 208-213.
- WANG Dong-sheng, YUE Mao-guang, LI Xiao-li, et al. Selections of Real Ground Motions in Seismic History Analysis for Bridges with High Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 208-213.
- [22] 陈亮,张继文,任伟新,等. 桥墩地震易损性对地震波反应谱概率分布的敏感度[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 593-600.
- CHEN Liang, ZHANG Ji-wen, REN Wei-xin, et al. Sensitivity of Seismic Fragility of Bridge Columns on Probability Distributions of Response Spectra of Earthquake Ground Motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 593-600.
- [23] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- HU Yu-xian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1998.