

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111061

## 近场地震作用下单跨斜交桥地震反应分析\*

陈敬<sup>1</sup>, 王利辉<sup>2</sup>, 周雨龙<sup>3</sup>, 袁小祥<sup>4</sup>

- (1. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;  
3. 交通运输部公路科学研究院 旧桥检测与加固交通行业重点实验室, 北京 100088;  
4. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

**摘要:** 斜交桥动力特性复杂、震害多样, 准确评估斜交桥地震反应意义重大, 尤其在基于性能桥梁抗震设计中, 需要对斜交桥三维精细化模型进行非线性地震反应分析。以单跨斜交桥为研究对象, 建立考虑桥台非线性特性和双向碰撞作用的桥梁三维精细化有限元模型, 开展水平双向近场地震动作用下结构的非线性地震反应分析, 研究不同桥台横向约束模型对斜交桥地震反应的影响以及不同斜交角度斜交桥地震反应规律。结果表明: 桥台横向约束条件对斜交桥地震反应有较大影响, 在抗震性能分析中需对桥台和碰撞作用进行合理考虑; 桥台双向碰撞作用对上、下部结构平面转动的影响显著, 且易导致桥台钝角处的回填土失效和锐角处的挡块损伤; 斜交桥的碰撞力明显高于直桥, 纵向位移和平面转角随斜交角度的增大而增大。

**关键词:** 斜交桥; 地震反应; 桥台横向约束; 双向碰撞; 斜交角

**中图分类号:** U442.55    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1314-10

## Seismic Response Analysis of Skewed Bridges under Near-field Ground Motions

CHEN Jingyi<sup>1</sup>, WANG Lihui<sup>2</sup>, ZHOU Yulong<sup>3</sup>, YUAN Xiaoxiang<sup>4</sup>

- (1. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China;  
2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Key Laboratory of Old Bridge Inspection and Reinforcement Technology Industry, Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;  
4. Institute of Earthquake Forecasting, Beijing 100036, China)

**Abstract:** Skew bridges have complex dynamic characteristics and a variety of earthquake damage. It is of vital importance to evaluate the seismic response of skew bridges accurately. It is necessary to analyze the nonlinear seismic response based on the three-dimensional refined model of skew bridges, especially in the performance-based seismic design of bridges. A three-dimensional refined finite element model of a single-span skew bridge considering nonlinear characteristics of skew-angled abutments and the pounding effect between the superstructure and the abutments was established. Nonlinear time history analyses were performed to investigate different transversal restraint models of the abutment on

\* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 高分卫星遥感城市高层建筑地震风险评估应用示范项目(31-Y30F09-9001-20/22-09)、基于桥梁地震易损性的路网震后可恢复性评估项目(CEAEDM202223)资助

作者简介: 陈敬一(1990—), 女, 工程师, 博士。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: Chenbjut@163.com

通讯作者: 王利辉(1984—), 男, 实验师, 硕士。主要从事工程结构抗震和抗震试验技术研究。E-mail: wlh2016@bjut.edu.cn

the seismic response of sewed bridges under horizontal near-fault ground motion. The influence of skew angles on the nonlinear seismic response of the bridge was analyzed using seven sets of horizontal two-way near-fault ground motions. The results show that the transversal restraint models of the abutment have a significant effect on the seismic response of skewed bridges, which should be reasonably considered in the performance-based seismic design of bridges. The pounding effect between the deck and abutments both in transverse and longitudinal directions can change the rotation response obviously, and the impact also makes the abutment backfill at the obtuse corner and abutment shear keys at the acute corner fail easily. The pounding force of skewed bridges is higher than that of the straight bridge and the displacement in the longitudinal direction and the rotation response increases with the increase of the skew angle apparently.

**Keywords:** skewed bridges; seismic response; transverse constraint of abutment; bi-directional pounding; skew angle

## 引 言

斜交桥具有良好的地形适应能力和线形改善能力,常作为公路交汇和立交线路的枢纽,在高速公路、城市立交中得到广泛应用。震害调查表明斜交桥比常规直桥更易遭受地震破坏<sup>[1-2]</sup>。在1971年美国 San Fernando 地震,1994年美国 Northridge 地震,1995年日本 Kobe 地震,2008年汶川地震和2010年智利地震中,均出现大量斜交桥不同程度的地震破坏,诸如主梁横向位移过大,桥台回填土失效,桥台挡块碎裂甚至落梁等震害<sup>[2-5]</sup>。

1971年 San Fernando 地震中斜交桥的严重破坏首次引起研究人员的重视。针对此次地震中 Foothill Boulevard 桥的震害机理,A. A. Ghobarah 等<sup>[6]</sup>采用梁单元模型模拟了桥墩弯扭耦合破坏,但该模型无法解释上部结构发生的平面转动和横向残余位移;E. A. Maragakis 等<sup>[7]</sup>采用刚体模型分析斜交桥地震反应,得出上部结构与桥台发生的碰撞引起了桥面转动;R. R. Wakefield 等<sup>[8]</sup>组合梁单元和板单元建立斜交桥分析模型,得出水平地震作用下上部结构的运动形式为刚体运动,这与 E. A. Maragakis 等<sup>[7]</sup>的研究结果一致;J. Y. Meng 等<sup>[9]</sup>分别采用板单元模型与双梁模型分析斜交桥震害机理,研究发现地震动耦合作用造成了桥面转动,并导致桥面横向位移过大。可见,不同的模型假定对斜交桥震害机理分析结果有重要影响,而上述研究采用竖向约束模拟桥台对上部结构的相互作用,得出的斜交桥震害机理分析结果与结构实际震害有较大偏差。

随后,学者们分析了桥梁构件的力学性能和碰撞作用等因素对斜交桥抗震性能的影响,并在此过程中对斜交桥分析模型进行了完善。A. Shamsabadi<sup>[10]</sup>采用非线性弹簧模拟土-桥台-结构相互作用,对斜交桥三维有限元模型进行了非线性动力反应分析,得出桥台-土相互作用是导致上部结构转动的主要原因。P. Kaviani 等<sup>[11]</sup>建立了支座式桥台斜交桥的三维有限元分析模型,根据结构地震反应分析得出挡块对限制桥面转动和防止落梁有关键作用。A. Abdel-Mohti 等<sup>[12]</sup>基于修正的梁单元模型分析得出挡块的力学性能对斜交桥的地震反应有显著影响。Q. Han 等<sup>[13-14]</sup>建立了考虑斜交桥梁构件力学性能的斜交桥桥梁三维精细化有限元模型,并分析了水平双向近断层地震动作用下斜交、碰撞等因素对桥梁地震反应等影响规律。湛敏等<sup>[15-16]</sup>以典型三跨斜交简支梁桥为研究对象,探讨不同碰撞假定对桥面地震转动机理的影响,得出纵向碰撞和结构自身动力特性是引起桥面旋转的两个主要因素。陶源等<sup>[17]</sup>分析了双向碰撞效应对某三跨连续斜交桥地震反应的影响,得出横向碰撞对墩柱的影响远大于纵向碰撞。S. Wu 等<sup>[18]</sup>着重考虑了上部结构-桥台之间纵向碰撞和摩擦作用建立斜交桥分析模型,并通过对比振动台试验结果验证了该分析模型的准确性。目前针对斜交桥整体分析模型的研究多关注上部结构和桥台间的纵向边界条件的设置,如回填土力学特性和纵向伸缩缝处碰撞作用等,而对于桥台横向边界条件包括横向初始间隙和挡块作用对结构整体抗震性能的影响分析的研究仍有不足。

在地震作用下,特别是近场脉冲型地震动易触发斜交桥平面转动反应,从而引发上部结构与桥台

发生水平双向碰撞,致使桥梁抗震构件如挡块、桥台回填土等进入非线性阶段,甚至发生破坏,进而改变桥梁整体结构的动力行为,使其地震反应规律更为复杂<sup>[19-22]</sup>。因此,有必要在考虑桥台力学性能和碰撞作用等影响结构抗震性能的关键因素的基础上,建立桥梁精细化非线性分析模型分析斜交桥地震反应。本文以典型单跨简支斜交桥为研究对象,建立考虑斜交桥纵横向非线性约束的精细化有限元模型,在水平双向近场地震动作用下,分析不同桥台横向约束模型对斜交桥地震反应的影响以及不同斜交角度的斜交桥地震反应规律,为斜交桥在近场地震动作用下的抗震设计提供参考依据。

# 1 斜交桥分析模型

## 1.1 基桥概况

实际公路线路中单跨斜交桥较为常见,且斜交桥的桥墩等下部结构出现结构性损伤的比例较低<sup>[22-23]</sup>,因此选取典型单跨简支公路斜交桥为研究对象。桥梁跨径为30 m,斜交角为45°,上部结构为钢筋混凝土单箱三室箱梁结构,箱梁高1.67 m,桥面宽12.75 m,上部结构采用C50混凝土和1860预

应力钢绞线。上部结构通过支座与桥台连接,全桥设置8个盆式橡胶支座,支座型号为JPZ(II)-0.5-SX。支座式桥台背墙高1.92 m,宽10.36 m,上部结构与桥台的纵向接合处分别设置有两道宽度为4 cm的SSFB240型钢伸缩缝,挡块与上部结构之间的横向初始间隙为4 cm。

## 1.2 斜交桥分析模型

本文建立的斜交桥精细化有限元分析模型如图1所示。分析模型采用三维壳单元模拟桥梁上部结构的刚度特性和质量分布。采用等效弹塑性连接单元组来模拟桥台的非线性特性,单元组分别设置在箱梁的腹板顶和腹板底,其力学特性可根据Caltrans<sup>[24]</sup>给出的回填土弹塑性力一位移关系确定。桥台抗震挡块由设置在箱梁两侧的多段塑性单元模拟,其单元的力学特性根据S. H. Megally等<sup>[25]</sup>提出钢筋混凝土挡块斜截面剪切破坏滞回模型确定。采用Wen塑形单元模拟支座的非线性特性,其中支座活动向临界滑动摩擦力和初始刚度根据《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[26]</sup>6.3.7给出的方法确定,滑动摩擦系数 $u_0$ 为0.02。上部结构与桥台回填土在纵桥向伸缩缝之间发生的碰撞采用Kelvin碰撞模型,其参数可参考文献<sup>[27]</sup>。

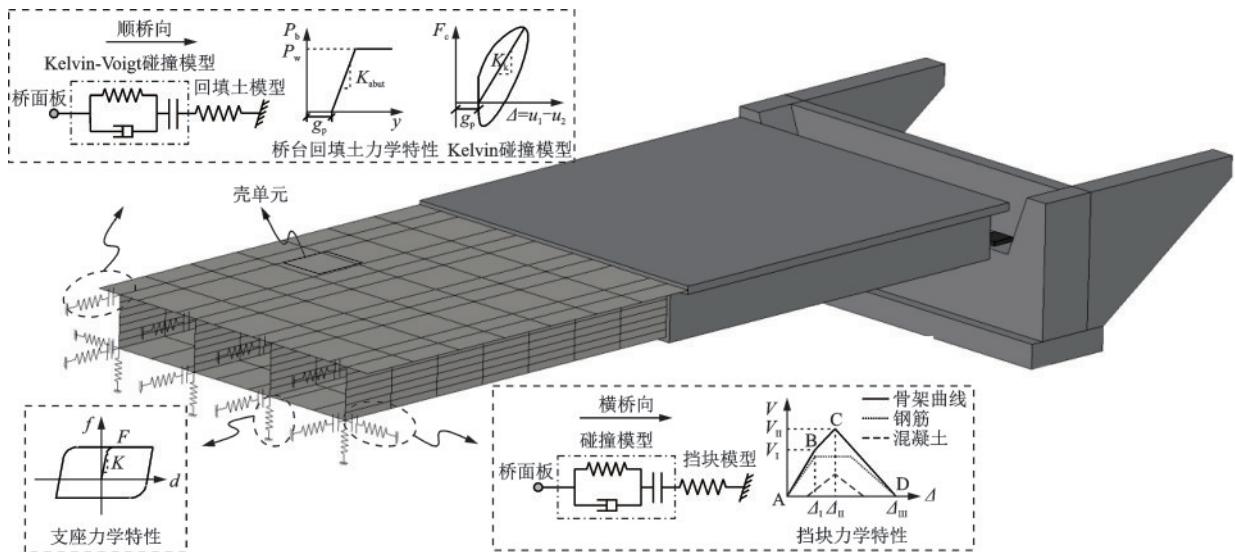


图1 全桥模型三维示意

Fig.1 The bridge analytical model

## 1.3 横向初始间隙的碰撞作用模拟

针对碰撞作用这一复杂的力学行为,学者们提出了各种分析模型来研究结构碰撞作用,主要有基

于动量守恒原理的立体动力学方法和基于碰撞力与变形之间关系的接触法,其中接触法有线性弹簧模型<sup>[28]</sup>,Kelvin模型<sup>[29]</sup>,Hertz模型<sup>[30]</sup>,Hertz-damp模型<sup>[31]</sup>,修正的Hertz-damp模型<sup>[32]</sup>和三维接触摩擦模

型<sup>[33]</sup>等。为提高计算效率并考虑碰撞时发生的能量耗散,本文采用Kelvin模型来模拟桥梁上部结构在桥台横向初始间隙与挡块发生的碰撞作用<sup>[13]</sup>,模型公式如下:

$$\begin{cases} F_c = K_k(\Delta - g_p) + c_k(\dot{u}_1 - \dot{u}_2), & \Delta - g_p \geq 0 \\ F_c = 0, & \Delta - g_p < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $F_c$ 为碰撞力; $K_k$ 为碰撞刚度; $\Delta$ 为上部结构与桥台之间的相对位移; $g_p$ 为伸缩缝尺寸; $\dot{u}_1$ 、 $\dot{u}_2$ 分别为上部结构和桥台的运动速度; $c_k$ 为阻尼系数,由式(2)和式(3)确定:

$$c_k = 2\xi \sqrt{K_k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{-\ln r}{\sqrt{(\ln r)^2 + \pi^2}} \quad (3)$$

式中, $r$ 为恢复系数,参考文献[27]确定 $r$ 取0.65; $\xi$ 为阻尼比。

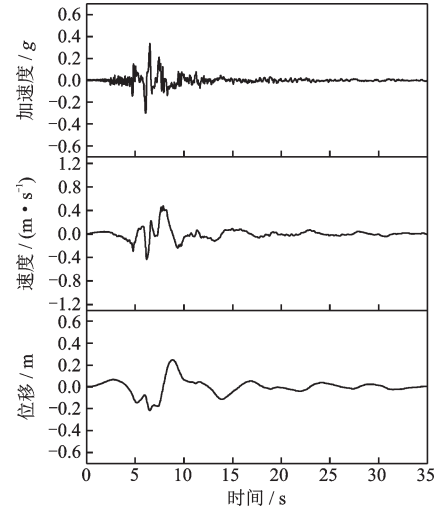
## 2 碰撞影响分析

### 2.1 结构非线性地震反应分析

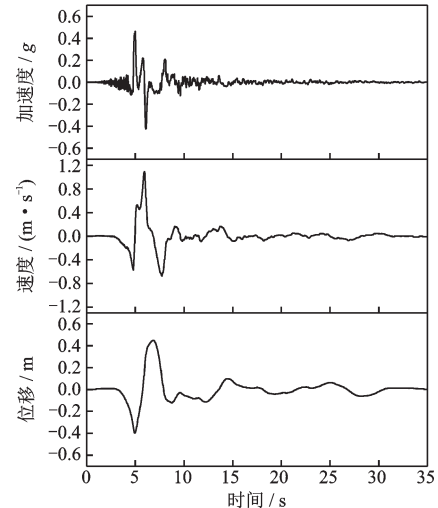
为了分析上部结构与桥台横向挡块在初始间隙发生的碰撞对结构地震反应的影响,本文基于不同桥台横向约束假定建立不同斜交桥梁分析模型,分别为M1、M2、M3和M4。模型M1不考虑挡块的力学特性及碰撞作用;模型M2仅考虑挡块的力学特性但不考虑初始间隙及碰撞作用,即假定挡块直接限制上部结构横向位移;模型M3考虑初始间隙及挡块的力学特性,采用间隙单元模拟上部结构和挡块之间的接触,当间隙闭合时,挡块与上部结构发生接触;模型M4考虑挡块及初始间隙发生的碰撞作用,采用Kelvin模型模拟上部结构和挡块之间的碰撞行为。

选取具有速度脉冲的近场地震动Imperial Valley作为输入地震动,图2为地震动的两水平分量的加速度时程、速度时程和位移时程。设置地震动记录中速度脉冲较大的水平分量作为纵向地震动,脉冲速度较小的分量作为横向地震动,纵向地震动沿垂直于桥台方向输入,横向地震动沿平行于桥台方向输入。将纵向地震动加速度峰值调整为0.4g,横向地震动等比例缩放。采用有限元软件SAP2000建立斜交桥分型模型,应用Newmark直接积分法对

结构有限元模型进行非线性时程分析,结构阻尼为5%的瑞利阻尼。上部结构与桥台之间的相互作用由两排四组非线性连接单元模拟,从桥面的钝角到锐角处分别为A、B、C和D,斜交桥模型如图3所示。桥梁模型参数值根据前文中给出的斜交桥分析模型建立方法确定,桥台参数值见表1。



(a) 纵桥向地震动时程



(b) 横桥向地震动时程

图2 Imperial Valley地震动加速度、速度及位移时程

Fig.2 Acceleration, velocity and displacement time histories of the input Imperial Valley ground motion

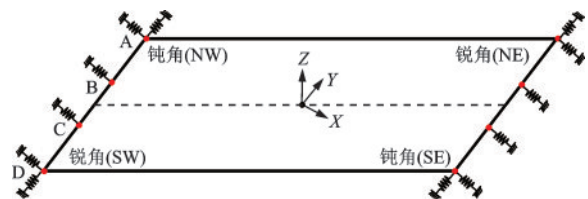


图3 桥梁简化模型示意

Fig.3 The bridge model

表1 分析模型参数值

分析模型	参数值
回填土	$P_{bw}=351 \text{ kN}$ , $K_k=16\ 875 \text{ kN/m}$ , $g_p=0.04 \text{ m}$
纵桥向碰撞模型	$K_k=16\ 875 \text{ kN/m}$ , $c_k=245.1 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$
挡块	$V_c=584 \text{ kN}$ , $V_n=1\ 257 \text{ kN}$ , $\Delta_{in}=0.012 \text{ m}$ , $\Delta_{II}=0.024 \text{ m}$ , $\Delta_{III}=0.12 \text{ m}$
横桥向碰撞模型	$g_p=0.04 \text{ m}$ , $K_k=48\ 667 \text{ kN/m}$ , $c_k=764.2 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$

图4为Imperial Valley地震动作用下的结构位移时程,图4(a)~(d)分别为上部结构各角点的纵向位移时程,图4(e)、(f)分别为上部结构各角点的横向位移时程,图4(g)为上部结构绕竖直轴的平面转

角时程。由图4可见,不考虑挡块和碰撞作用的模型M1位移较其他模型的位移更大,模型M1的纵向峰值位移和横向峰值位移分别达到0.96 m和0.86 m;考虑挡块作用而忽略间隙作用的模型M2较考虑间隙作用的模型M3和M4的位移反应小,模型M3和M4的横向峰值位移分别为0.86 m和0.51 m,达到模型M2的横向峰值位移的2.15倍和1.3倍;而采用Kelvin模型考虑能量耗散的模型M4较未考虑能量耗散的模型M3位移反应更小,模型M3的峰值转角约为模型M4的1.9倍。综上,不考虑挡块横向约束有可能会高估斜交桥地震位移反应,碰撞作用具有耗散地震能量的作用,从一定程度降低了结构位移反应,因此在分析斜交桥地震反应时应考虑初始间隙处的碰撞作用进行适当考虑,从而获得更为准确的斜交桥抗震性能评估结果。

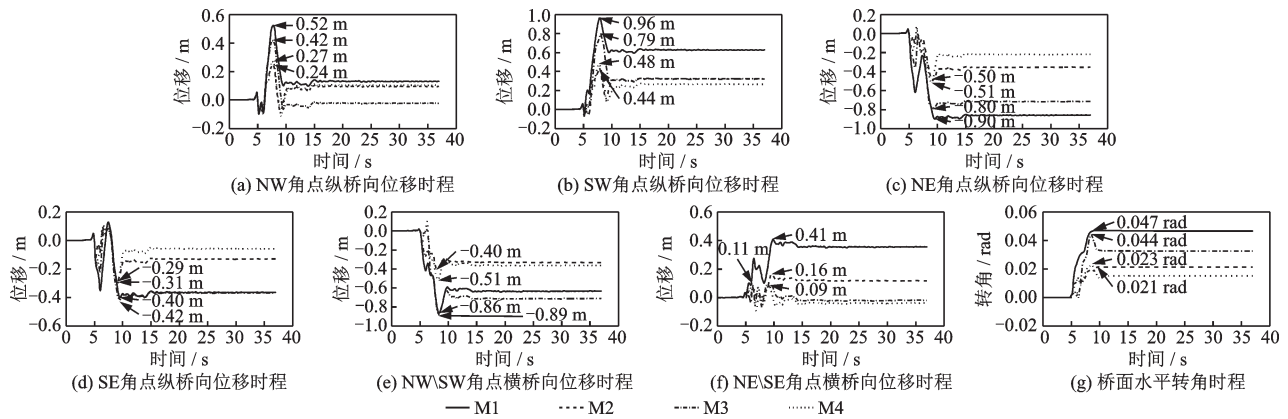


图4 地震动Imperial Valley作用下结构地震反应对比

Fig.4 Seismic response of various structures under the Imperial Valley ground motion

## 2.2 碰撞作用对结构地震反应影响分析

采用模型M4作为结构非线性地震反应分析模型,分析碰撞作用对结构整体地震反应的影响。图5为Imperial Valley地震动作用下的上部结构的纵向地震反应。从图5(a)可以看出,上部结构在约5.1 s时与桥台发生纵向碰撞,碰撞力峰值自钝角至锐角处递减,碰撞持续约6.0 s;第二次碰撞发生在约8.8 s时,仅发生在A和B处,且A处碰撞力远大于B处。从图5(b)可以看出,在上部结构向桥台回填土纵向挤压的方向上,纵向峰值位移自钝角A处至锐角D处呈减小趋势,而在相反方向上,峰值位移自A处至D处呈增大趋势。由图5(c)可见,地震

动作用下的各回填土单元变形有所不同,持续的碰撞作用使得钝角处桥台回填土单元达到最大承载力,并发生塑性变形,而锐角处的回填土单元未达到最大承载力因此仅发生了弹性变形。回填土单元的不同地震响应影响桥面转动,上部结构钝角被推入桥台填土,而锐角则向背离桥台方向移动,这一结果与A. Shamsabadi等<sup>[20]</sup>的研究结果相符。

图6为Imperial Valley地震动作用下上部结构的横桥向地震反应。从图6中可以看出,锐角处碰撞力明显大于钝角处,锐角D处碰撞力峰值达钝角A的1.71倍。在地震动作用过程中,桥面锐角处横向位移峰值达到0.51 m,导致该处挡块失效,而钝角处挡块变形为锐角处变形的四分之一,发生弹性变形而未发生破坏。

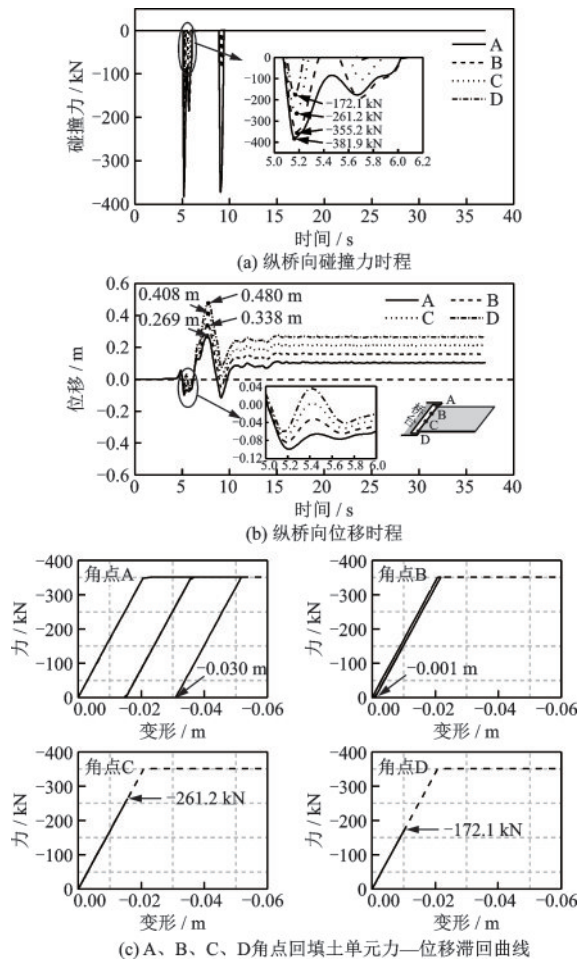


图5 地震动Imperial Valley作用下桥梁纵向地震反应  
Fig.5 Longitudinal seismic response of the model M4 under the Imperial Valley ground motion

图7为上部结构的转角时程,结构在水平双向地震动作用下发生绕竖直轴的逆时针转动,并与桥台回填土发生碰撞,随后上部结构与锐角处的挡块发生首次碰撞,碰撞作用致使结构反向转动同时转角减小,当 $t=6.29$  s时,上部结构发生顺时针转动,继而与钝角处的挡块发生碰撞,导致上部结构反向转动,在 $t=8.68$  s时,上部结构逆时针转角达到峰值 $0.0226$  rad,在地震动作用结束时产生残余转角。

综上,在水平双向地震动作用下,上部结构和桥台之间的碰撞对斜交桥上部结构平面转动有显著影响,在地震动作用结束后结构偏离初始位置,有较大残余位移,同时,碰撞也造成了斜交桥在钝角处的桥台回填土失效和锐角处的桥台挡块损坏。

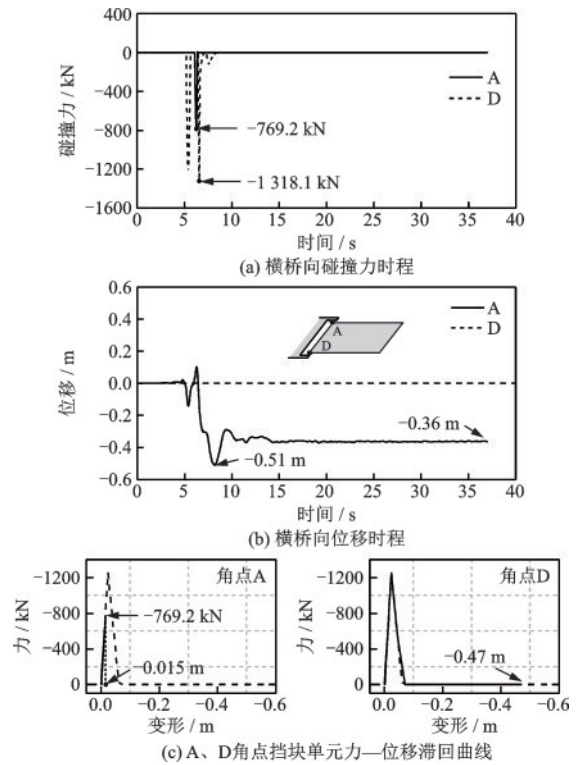


图6 地震动Imperial Valley作用下桥梁横向地震反应  
Fig.6 Transverse seismic response of the model M4 under the Imperial Valley ground motion

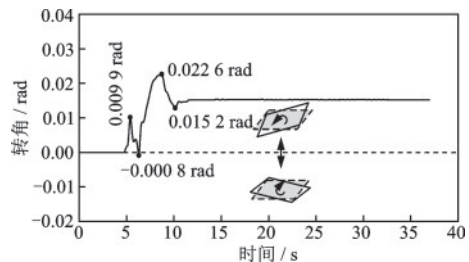


图7 地震动Imperial Valley作用下桥面转角时程响应  
Fig.7 Rotation response of the model M4 under the Imperial Valley ground motion

### 3 斜交角影响分析

#### 3.1 地震动选取

本文选取近场速度脉冲型地震动对斜交桥进行地震反应分析,通过基桥场地条件(8度区,D类场地)选取7组强震记录<sup>[34]</sup>(表2),采用缩放系数使得所选取地震动SRSS谱的均值在场地特征周期 $[0.1, T_g]$ 和结构自振周期附近 $[T-\Delta T_1, T+\Delta T_1]$ 目标设计谱偏差不超过20%(图8)。地震动输入方向和缩放比例与前文相同。

表 2 地震动记录

Table 2 Selected earthquake recorders

地震动编号	地震名称	年份	台站	纵桥向		横桥向	
				PGA/PGV/ g (m·s <sup>-1</sup> )	PGA/PGV/ g (m·s <sup>-1</sup> )	PGA/PGV/ g (m·s <sup>-1</sup> )	PGA/PGV/ g (m·s <sup>-1</sup> )
1	Imperial Valley	1979	Array#7	0.46	1.09	0.34	0.48
2	Northridge	1994	Rinaldi	0.84	1.66	0.47	0.73
3	Northridge	1994	Sylmar	0.61	1.17	0.90	1.02
4	Landers	1992	Lucerne	0.72	0.98	0.78	0.32
5	Kobe	1995	0Takatori	0.61	1.27	0.62	1.21
6	Erzincan	1992	Erzincan	0.52	0.84	0.50	0.64
7	Duzce	1999	Duzce	0.35	0.60	0.54	0.84

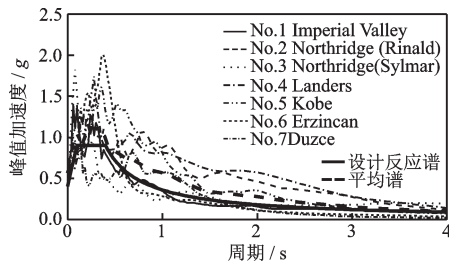


图 8 地震动反应谱

Fig.8 Acceleration response spectrum of the selected motions

### 3.2 斜交角影响分析

为分析斜交角对斜交桥地震反应的影响,建立不同斜交角(0°、15°、30°、45°、60°)桥梁的三维非线性有限元模型,开展水平双向近场地震动作用下结构地震反应分析。图 9 为 Imperial Valley 地震动作用下不同斜交角桥梁的地震反应对比,其中图 9(a)、(b)分别为结构纵向和横向的碰撞力时程,图 9(c)、(d)分别为桥梁桥台回填土和挡块的变形时程,图 9(e)~(g)分别为上部结构纵向位移、横向位移和平面转角时程。从图 9 可以看出,结构地震反应随着斜交角的变化呈现一定的规律性变化,随着斜交角的增加,结构纵向位移峰值和平面转角峰值呈增大趋势,而横向碰撞力峰值和挡块变形峰值呈先增大后减小趋势。因此,本文采用结构地震反应峰值及其均值作为对比指标来分析斜交角对斜交桥地震反应的影响。

图 10 为水平双向地震动作用下斜交桥地震反应峰值。图 10(a)、(b)分别为纵向碰撞力和横向碰撞力,纵向碰撞力随着斜交角的增加而呈增大趋势,斜交角为 60° 的桥梁纵向碰撞力均值大,约为直桥的 1.3 倍,而横向碰撞力随着斜交角的增加呈先

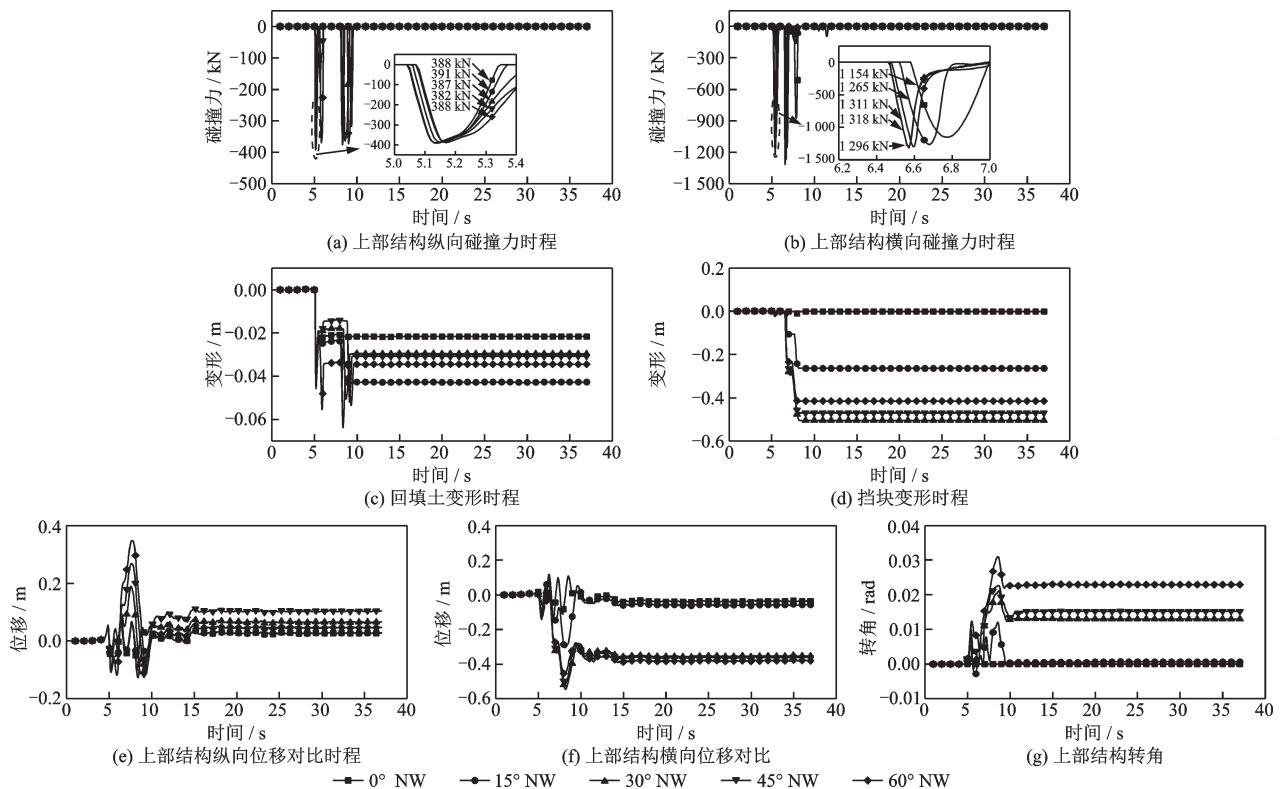


图 9 地震动 Imperial Valley 作用下不同斜交角度的桥梁地震反应

Fig.9 Seismic response of bridges with various skew angles under the Imperial Valley ground motion

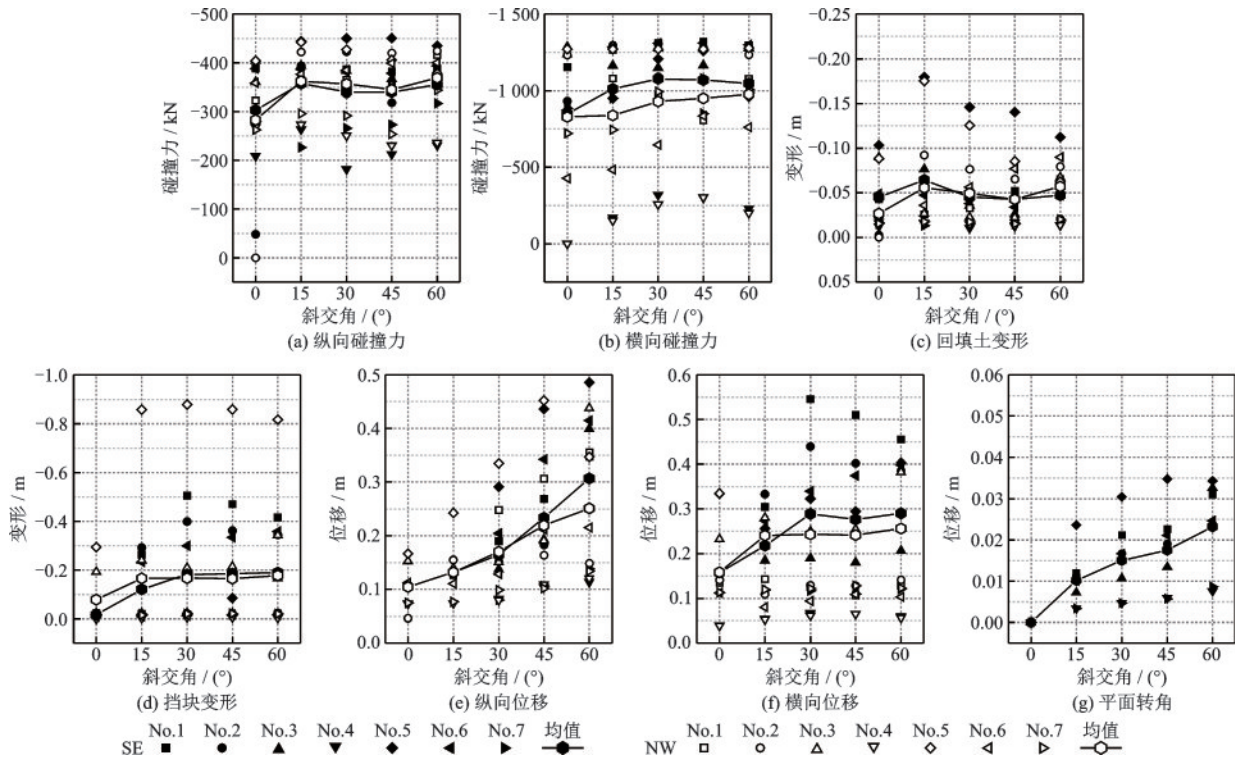


图10 不同斜交角桥梁地震反应

Fig.10 Seismic response of single-span bridges with various skew angles

增大后减小的趋势,其中30°斜交桥的横向碰撞力最大。图10(c)为桥面钝角处桥台回填土的变形值,回填土变形随着斜交角度的增加呈先增大后减小的趋势,其中斜交角为15°的桥梁回填土变形最为明显,约为0.064 m。图10(d)挡块在桥面锐角处的变形值,斜交角由0°到30°挡块变形明显呈增加趋势,之后增加趋势不明显,斜交角度为30°的桥梁最大变形为0.18 m,约为直桥的2.3倍。图10(e)~(g)分别为纵向位移、横向位移和平面转角,结构纵向位移和转角随着斜交角的增加呈现明显的增加趋势,其中斜交角为60°的桥梁纵向位移均值最大,达到0.3 m,约为直桥位移的3倍,而横向位移在斜交角由0°到30°呈增加趋势,之后其增加趋势不明显,其中斜交角为30°的桥梁横向位移均值最大(0.29 m)。

## 4 结论

本文在考虑斜交桥桥台非线性力学性能和双向碰撞作用的基础上,建立单跨斜交桥的三维精细化有限元模型,分析水平双向近场地震动作用下结构非线性地震反应,得出以下结论:

(1)斜交桥桥台横向约束对结构地震反应有显

著影响,尤其是上部结构与挡块在横向初始间隙处发生的碰撞作用,在分析斜交桥抗震性能时应采用合理的碰撞模型对其进行考虑。

(2)斜交桥上部结构与桥台之间发生的双向碰撞对结构平面转动反应有明显影响,导致桥台回填土和挡块发生损伤甚至失效,并造成上部结构发生较大残余位移。

(3)斜交桥的纵向位移和平面转角随斜交角度的增大而增大,而斜交角增至30°后对横向位移影响不显著。此外,斜交桥的碰撞力高于直桥,并导致桥台回填土和挡块失效的可能性较直桥更大。

(4)在桥梁抗震设计中对能力保护构件进行合理的设计,可满足牺牲构件失效的抗震要求。由此,在斜交角度大于15°时,宜对桥台和挡块进行合理设计,从而有效保障斜交桥抗震能力。

## 参考文献:

- [1] Priesley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [2] Han Q, Du X L, Liu J B. The seismic damage of highway bridges during 2008 Wenchuan earthquake [J].

- Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(2): 263-273.
- [3] Earthquake Engineering Research Laboratory. Engineering features of the San Fernando earthquake of February 9, 1971 [R]. California: California Institute of Technology, 1971.
- [4] Earthquake Engineering Research Institute. Northridge earthquake reconnaissance report[R]. California: Earthquake Engineering Research Institute, 1995.
- [5] 杜修力, 韩强, 李忠献, 等. 5.12汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1270-1279.  
Du X L, Han Q, Li Z X, et al. The seismic damage of bridges in the 2008 Wenchuan earthquake and lessons from its damage [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1270-1279. (in Chinese)
- [6] Ghobarah A A, Tso W K. Seismic analysis of skewed highway bridges with intermediate supports [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1974, 2: 235-248.
- [7] Margakis E A, Jennings P C. Analytical models for rigid body motions of skew bridges [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1987, 15 (2) : 923-944.
- [8] Wakefield R R, Nazmy A S, Billington D P. Analysis of seismic failure in skew RC bridge [J]. Structure Engineering, 1991, 117(3): 972-986.
- [9] Meng J Y, Lui E M. Refined stick model for dynamic analysis of skew highway bridges [J]. Bridge Engineering, 2002, 7(3): 184-194.
- [10] Shamsabadi A. Three-dimensional nonlinear seismic soil-abutment-foundation-structure interaction analysis of skewed bridges[D]. California: University of Southern California, 2007.
- [11] Kaviani P, Zareian F, Taciroglu E. Seismic behavior of reinforced concrete bridges with skewangled seat-type abutments [J]. Engineering Structures, 2012, 45: 137-150.
- [12] Abdel-Mohti A, Pekcan G. Assessment of seismic performance of skew reinforced concrete box girder bridges [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2013, 5(1): 1-18.
- [13] Han Q, Chen J Y, Du X L, et al. Nonlinear seismic response of skewed highway bridges subjected to bidirectional near-fault ground motions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 04017032.1-04017032. 14.
- [14] Chen J, Han Q, Liang X, et al. Effect of pounding on nonlinear seismic response of skewed highway bridges [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017 (103): 151-165.
- [15] 湛敏, 王军文, 闫聚考. 三跨斜交简支梁桥动力计算模型简化方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(17): 231-237.  
Zhan M, Wang J W, Yan J K. Simplified method of dynamic calculation model for a 3-span simply supported skewed girder bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(17): 231-237. (in Chinese)
- [16] 王军文, 湛敏, 邓琴, 等. 三跨斜交简支梁桥地震旋转机理及斜度影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1357-1362. (in Chinese)  
Wang J W, Zhan M, Deng Q, et al. Study on earthquake rotation mechanism and skew degree influence on three-span simply supported skewed girder bridge [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39 (8): 1357-1362.
- [17] 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 Y, Xu L Q, Yao K, et al. Seismic response of continuous skewed bridges considering the bidirectional pounding effect [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 360-369. (in Chinese)
- [18] Wu S, Buckle I G. Effect of skew on the minimum support length requirements of single-span bridges with seat-type abutments [J]. Earthquake Spectra, 2020, 36 (3): 1119-1140.
- [19] Ghotbi A R. Performance-based seismic assessment of skewed bridges with and without considering soil-foundation interaction effects for various site classes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(3): 357-73.
- [20] Shamsabadi A, Kapuskar M. Nonlinear soil-abutment-foundation-structure interaction analysis of skewed bridges subjected to near-field ground motions [J]. Transportation Research Record, 2018, 2202 (1) : 192-205.
- [21] Chow N, Hao H. Significance of SSI and nonuniform near-fault ground motions in bridge response I: effect on response with conventional expansion joint [J]. Engineering Structures, 2008, 30(1): 141-153.
- [22] Motlagh H R E, Rahai A. Dynamic response of a continuous-deck bridge with different skew degrees to near-field ground motions [J]. International Journal of Civil Engineering, 2017, 15(1): 1-11.
- [23] 孙得璋, 陈斌, 孙柏涛, 等. 桥梁多灾害研究综述[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 32-37.

- Sun D Z, Chen B, Sun B T, et al. A summary review of multiple hazards study on bridges[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 32-37. (in Chinese)
- [24] Caltrans 1.6: 2010, Bridge design specifications [S]. California: California Department of Transportation, 2013.
- [25] Megally S H, Silva P F, Seible F. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments [R]. California: University of California San Diego, 2001.
- [26] 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.
- [27] Malhotra P K. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1999, 28(11): 1309-1326.
- [28] Maison B F, Kasai K. Analysis for a type of structural pounding [J]. Journal of Structure Engineering, 1990, 116(4): 957-977.
- [29] Anagnostopoulos S A. Pounding of buildings in series during earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1988, 16(3): 443-456.
- [30] Jankowski R, Wilde K, Fujino Y. Pounding of super-structure segments in isolated elevated bridge during earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1998, 27(5): 487-502.
- [31] Muthukumar S, DesRoches R. A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2006, 35(7): 811-828.
- [32] Jankowski R. Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2005, 34(6): 595-611.
- [33] Zhu P, Abe M, Fujino Y. Modelling three-dimensional non-linear seismic performance of elevated bridges with emphasis on pounding of girders [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2002, 31(11): 1891-1913.
- [34] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [EB/OL]. 2011-1-1 [2014-11-2]. [http://peer.berkeley.edu/products/strong\\_ground\\_motion\\_db.html](http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html).

(本文责编:池营营)