

双向地震作用下互通式斜交桥梁地震响应及碰撞效应分析^①

孙元帝^{1,2}, 王贵和¹, 苏强², 周振鸿²

(1.中国地质大学(北京),北京 100083; 2.建设综合勘察研究设计院有限公司,北京 100007)

摘要:斜交桥梁由于其不规则的结构形式使其受力规律与规则桥梁相比具有特殊性和复杂性,在地震作用下梁体的平动与转动存在弯扭耦合效应,导致结构动力响应分析复杂。针对斜交桥梁的结构特点,建立包含桩土相互作用的三维有限元模型,在考虑水平双向地震作用下,采用反应谱法及时程分析法对京包高速公路某互通式斜交桥梁进行地震反应分析。结果表明:互通式简支斜交桥梁的地震响应受地震动输入方向的影响较大,在考虑碰撞效应后,碰撞涉及结构部位的地震位移显著增加,地震内力也出现较大差异,即说明在斜交桥梁抗震设计时有必要适当考虑地震动输入方向和梁端与墩台及相邻梁端的碰撞效应。

关键词:斜交桥梁;双向地震作用;地震响应;碰撞效应

中图分类号:TU448

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)05-0693-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0693

Seismic Response and Pounding Effect of an Interchange Skewed Bridge under Bi-directional Earthquake Motions

SUN Yuan-di^{1,2}, WANG Gui-he¹, SU Qiang², ZHOU Zhen-hong²

(1.China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Special bridges, like skewed bridges, are increasingly used at highway intersections and interchanges mainly to overcome space constraints. Skewed bridges require special considerations in their analysis, design, and construction. Moreover, these bridges exhibit complex behavior in which the vertical, lateral, and torsional motions are often strongly coupled, raising many concerns regarding their behavior under dynamic loads. Research on the effect of bi-directional seismic excitation is essential for the analysis and design of seismically isolated bridges because the bi-directional motion is coupled and two independent unidirectional models cannot accurately describe the bi-directional behavior. The seismic response of an interchange skewed bridge model under bi-directional earthquake ground motions is investigated in this paper. A 3D finite element model has been developed, in which the pounding of decks at cap-beams, the friction of beams at bearings, and the interaction relation of pile and earth have been accounted for. The beam, piers, and piles are simulated by the three-dimensional beam element; the contact element is applied to simulate the pounding effect between the abutment and the adjacent beam end. Rayleigh damping was used to model the damping in the system, and the damping ratio of the concrete is assumed

① 收稿日期:2015-10-07

基金项目:中央高校基本科研业务费(53200859027)

作者简介:孙元帝(1975—),男,黑龙江泰来人,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程、地质灾害防治工程、地震工程等领域的科研与实践工作。E-mail:sunyuandi2008@sina.com。

to be equal to 5%. In this study, the piles were regarded as elastic laterally loaded beams, and the soil surrounding them were idealized as a series of independent springs with constant stiffness, where the lateral stiffness at one point does not affect the lateral stiffness at other points along the depth of the pile. The numerical analysis showed that the direction of ground motion greatly influenced the forces and displacements of piers and girders of skewed bridges; therefore, these factors must be accurately taken into account for the future design and vulnerability assessment of skewed bridges. We conclude that the pounding effect resulted in an increasing possibility of structure failure of the beam decks and changed the regularity of stress and strain on the bridge structures. From the numerical results, the deformation with consideration of the pounding effect was about twice that without the consideration of the pounding effect, which also has an obvious impact on the bending moment of the beam.

Key words: skewed bridge; bi-directional earthquake motion; seismic response; pounding effect

0 引言

为适应地形地貌并实现和已建交通网络平顺、流畅的连接,斜交桥梁在国内外高速公路、城市立交、跨河跨线等交通工程中被广泛设计和应用^[1-2]。与常规的正交支承桥梁结构不同,斜交桥梁由于其不规则的结构布置直接影响了其结构系统的荷载传递机理,不仅在静力方面表现出许多特殊的受力规律^[3],而且在地震作用下梁体的平动与转动存在弯扭耦合效应,导致结构动力响应分析复杂化^[4]。在国内外已有地震(如 1971 年美国圣费尔南多地震和 2008 年我国汶川地震)震后关于桥梁震害调查和分析中均发现,斜交桥地震反应的复杂性和特殊性导致其地震的破坏程度明显高于正常规则桥梁,其震害类型较多且具有明显不同于正交桥的震害特点^[5-6]。

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震活动频繁,包括 23 个省会城市和 2/3 的百万人以上的大城市均处于高烈度地震区,这些地区在建或已建桥梁工程面临潜在的地震威胁。桥梁是交通生命线的枢纽工程,一旦遭到地震破坏,将会导致巨大的经济损失,且震后修复极其困难,因而抗震设计往往成为桥梁设计中的控制因素^[7-9]。作为一种应用广泛的非规则桥梁,斜交桥梁的抗震性能和地震反应一直以来倍受国内外学者关注^[10-13],但迄今为止包括我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01-2008)、美国 AASHTO 规范等在内的各国规范对斜交桥的抗震设计只做了部分说明,并未明确定义斜交桥梁是规则桥梁还是非规则桥梁,也未给出斜交桥的实用抗震设计方法。加之斜交桥的斜交角度、桥面宽度、支承形式等的不确定性,使得对其自身振动特性、地震作用下的动力特性、结构反应

规律等都缺乏全面认识。因此,对面临潜在地震威胁地区新建或已建斜交桥的抗震性能及地震反应进行分析是很有必要的。

在实际地震过程中地震动方向具有任意性,但一般进行桥梁抗震计算时仅选取主轴方向(顺桥向)的地震动输入。已有研究表明双向地震动对结构反应有较大影响,在结构抗震设计时应该充分考虑,并且最不利地震波进入方向不一定是结构的主轴方向^[14-16]。Deepu 等^[17]认为对于斜交桥梁,有关地震脆弱性的破坏机理研究不应该仅停留在单一方向地震动作用情况下,这是因为对于既不规则也不对称的斜交桥梁结构,来自纵横桥向的地震作用对桥梁结构的破坏程度几乎是等同的。在双向地震作用下,斜交梁体的扭转模态和横向模态耦合,会导致梁体与桥台相撞而使桥梁上部结构发生转动,如果转动大而支座支承面较小,在锐角处有失去支承的可能,从而导致在桥面锐角处易落梁,任何角度的横向反应都可能导致梁体在一个钝角处受到约束,易发生碰撞损坏^[18]。这进一步说明对于包括斜交桥梁在内的各种不规则桥梁结构,仅考虑顺桥向地震作用远远不够,抗震计算时进行双向地震作用下结构动力响应分析是非常有必要的。

为此,本文选取具有典型斜交梁特点的玉河南路互通式立交主线桥作为研究对象,建立斜交简支梁桥动力计算模型。桥址区的抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度值为 0.20g,设计地震分组为第一组,拟建桥梁工程的场地类别为Ⅲ类。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001),考虑双向地震作用,分析地震作用下该斜交简支梁桥的抗震性能及地震响应。

1 斜交桥动力分析模型

以京包高速公路某互通式立交主线桥简支斜交箱梁桥为工程背景,建立计算模型。该桥斜交角为 67.5°,单跨跨度为 30 m。横断面由 5 片装配式单箱

单室箱梁组成,单幅桥梁总宽度为 17.1 m,单个箱梁顶板宽除两侧 2 片边梁为 3.45 m 外,其他 3 片中梁宽度均为 3.4 m,中心距为 3.4 m,纵向分别设 2 道端横梁和 1 道中隔板,箱梁采用 C50 混凝土。横断面布置如图 1 所示。

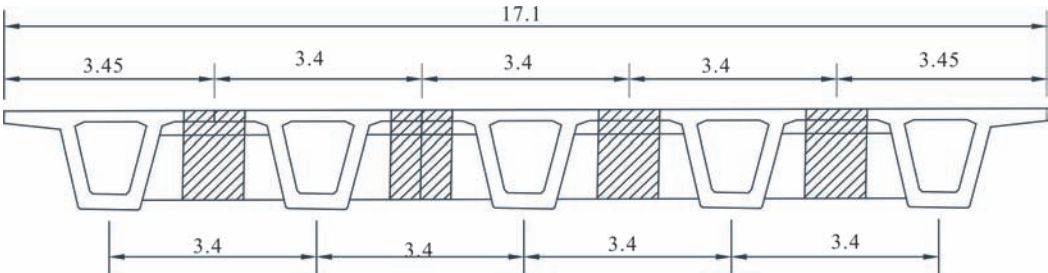


图 1 箱梁横断面布置图

Fig.1 Cross sectional drawing of box girder

上部结构基于多梁模型采用弹性梁单元模拟,板式橡胶支座用弹性连接单元模拟,各个方向的刚度系数的确定方法参见文献[19]。混凝土结构的阻尼比取 5%,采用 Rayleigh 阻尼,并考虑桥台和相邻梁体的碰撞效应,采用 Midas 中的间隙单元(图 2),碰撞力-变形关系为:

$$f = \begin{cases} k(d + o) & d + o \leq 0 \\ 0 & d + o > 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: f 为撞击力; k 为碰撞刚度; o 为初始缝宽度; d 为接触单元变形。

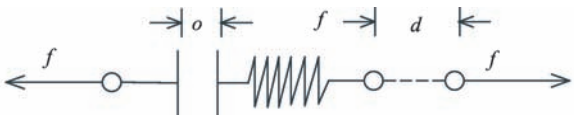


图 2 接触单元模型

Fig.2 Contact element model

实际桥梁中横向的 5 片主梁并不是独立存在的,通过横隔板及桥面铺装等连接后具有一定的整体性,因此在有限元模型中加入了只有刚度而没有质量的横向连接单元以便更加接近实际桥梁的受力形式。桥面铺装厚度 20 km,上层为 10 cm 厚沥青混凝土,其中 4 cm 为青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13(改性沥青),6 cm 为中粒式沥青混凝土 AC-20C(改性沥青);下层为 10 cm 厚桥面铺装混凝土。根据不同铺装材料的容重计算得到铺装层重量,以均布荷载的形式加载到主梁单元上,并通过荷载转换为质量参与到动力响应分析。

上部结构及支座的计算模型如图 3 所示。

下部结构中桥墩为双柱墩,墩柱为八边形,其中横桥向长 1.6 m,纵桥向长 1.3 m,抹角 0.3×0.15 m;基础为承台接钻孔灌注桩,基桩直径均为 1.5 m,

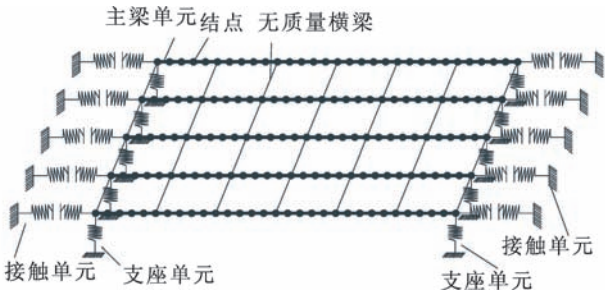


图 3 简支斜交梁桥上部结构有限元模型示意图

Fig.3 Finite element model of superstructure of the skewed bridge

桩长为 48 m,为一侧两组共 4 根桩。桥台为肋板式桥台,钻孔灌注桩基础,桥台基桩直径均为 1.2 m,桩长为 35 m,为一侧三组共 6 根桩。

桥梁在抗震设计和计算时为简化计算会假定为刚性基底,即将桥梁的墩底或桩底固结,忽略桩-土体系与结构间的动力相互作用,这种简化处理方法可能会给设计计算带来较大误差^[20-21]。因此本文在建立有限元动力计算模型时考虑了桩基及桩土、桥台及台后填土间的相互作用。地基土是非常复杂的非线性材料,在进行有限元模拟时只能采取近似的方法,即用土弹簧来模拟。本文采用铁路、公路等基础设计时广泛应用的 m 法确定土弹簧系数,其基本原理是将桩作为弹性地基梁,按 Winkler 假定(桩身任一点的土抗力和该点的位移成正比)求解,从承台向下土质依次为填土、粉土、亚黏土、粉质黏土和中粗砂。桥台后侧填土压力按照静止土压力的方式计算和加载,并通过荷载转换为质量参与动力响应分析。

有限元三维模型如图 4 所示。

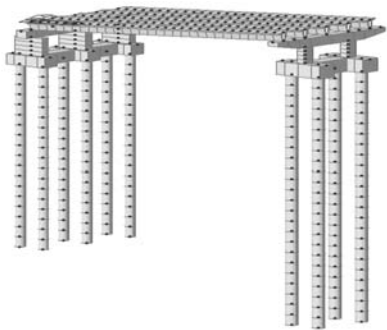


图 4 简支斜交梁桥三维有限元模型示意图
Fig.4 Three-dimensional finite element model
of the skewed bridge

2 斜交桥地震响应分析

2.1 模态分析

对桥梁结构进行动力响应预测和结构性能评估时,需准确把握结构自身的动力性能,包含振型、周期、质量参与系数等参数^[22-23]。运用子空间迭代法对单跨斜交桥梁进行模态分析,前 10 阶的自振特性由表 1 和表 2 列出。

表 1 斜交桥梁前十阶振型的自振周期和振型模式

Table 1 Natural period and vibration mode of the first ten modes

振型号	自振频率/(rad·s ⁻¹)	自振周期/s	振型模式
1	6.832 4	0.919 6	横桥向平动和纵向扭转
2	7.103 3	0.884 5	顺桥向平动和横向扭转
3	10.838 7	0.579 7	竖向扭转
4	16.980 7	0.370 0	竖向振动
5	17.952 7	0.350 0	竖向和纵向扭转
6	18.224 0	0.344 8	竖向和纵向扭转
7	21.468 7	0.292 7	顺桥向桥台侧振动
8	22.069 2	0.284 7	竖向振动
9	23.404 5	0.268 5	顺桥向桥墩侧振动
10	24.754 1	0.253 8	横桥向平动和竖向扭转

表 2 斜交桥梁前十阶振型的振型参与质量系数

Table 2 The participation mass coefficient of the first ten modes

振 型 号	振型参与质量系数					
	纵向平动 <i>U_x</i> /%	横向平动 <i>U_y</i> /%	竖向平动 <i>U_z</i> /%	纵向转动 <i>R_x</i> /%	横向转动 <i>R_y</i> /%	竖向转动 <i>R_z</i> /%
1	7.41	24.62	0	17.79	3.06	0.04
2	25.98	6.11	0	4.61	11.32	0.01
3	0	0.02	0	0	0	19.44
4	0	0	23.51	0	0.02	0.01
5	0.06	0.04	0	0.82	0.2	1.42
6	0	0.01	0.01	0.76	0.09	1.49
7	11.66	2.01	0.03	0.56	1.81	1.29
8	0.01	0	0.02	0	0	0.01
9	8.68	2.83	0.02	0.82	1.42	0.42
10	3.68	15.76	0	4.25	0.62	14.24

从自振特性可以看出,斜交桥的振型模式不仅有桥梁纵向、横向和扭转振动,而且它们之间的相互

耦合效应明显,这可能导致在实际地震过程中桥梁地震反应空间耦合效应,同时也证实了对于斜交桥梁有必要在地震分析时考虑双向地震动作用。

2.2 反应谱分析

(1) 地震反应谱

反应谱采用《公路工程抗震规范 JTGB02-2013》中的设计加速度反应谱,见式(2)和图 5。

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T < 0.1\text{ s} \\ S_{\max} & 0.1\text{ s} \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T > T_g \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_g 为特征周期(s); T 为结构自振周期(s); $S_{\max}$ 为水平设计加速度反应谱最大值。

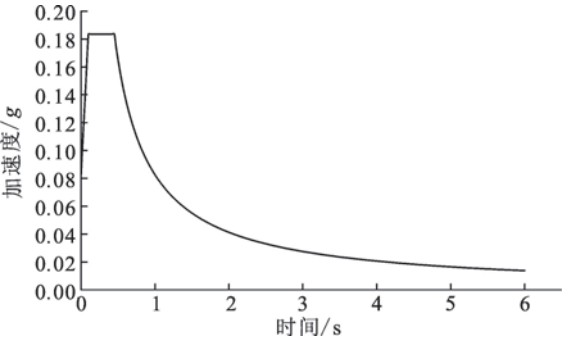


图 5 规范反应谱曲线

Fig.5 The earthquake response spectrum curve of the code

(2) 输入方向对响应的影响

斜交桥作为一种特殊的梁桥,其桥轴线方向和支座支承线方向并不垂直。对斜交桥而言,地震动输入方向通常采用两种方式来处理,一种是沿整体坐标系 XY 方向输入,另一种是沿桥轴线及其垂直 NT 方向输入。

在反应谱分析中对 XY 方向和 NT 方向两种输入方式分别进行分析,结果表明,地震动输入方向对斜交桥梁内力分布影响巨大。以绕 Z 轴扭转弯矩为例,图 6、7 分别为斜交梁在 XY 和 NT 两种不同输入方向下绕 Z 轴扭转弯矩图。由图 6、7 可以看出,当反应谱函数沿整体坐标系 XY 方向输入计算时,绕 Z 轴扭转弯矩最大值出现在上部结构纵向主梁跨中位置;而当沿桥轴线及垂直 NT 方向输入反应谱函数时,扭转弯矩最大值则转移到了下部结构桩头的位置。对斜交桥梁而言,由于其结构不规则,在动力分析中扭转弯矩是控制梁体安全的关键因素,这就要求在斜交桥梁设计计算时结合当地地震记录合理选择地震动输入方向,才能准确分析地震作用的控制截面,从而为选择合理的抗震防护措施提供依据。

2.3 时程分析

(1) 地震波选取

对特殊桥梁、不规则桥梁进行时程分析在抗震

设计中是必要的,本文选取经典的 El Centro 波、Taft 波进行斜交桥梁地震时程分析,地震波加速度时程曲线见图 8。

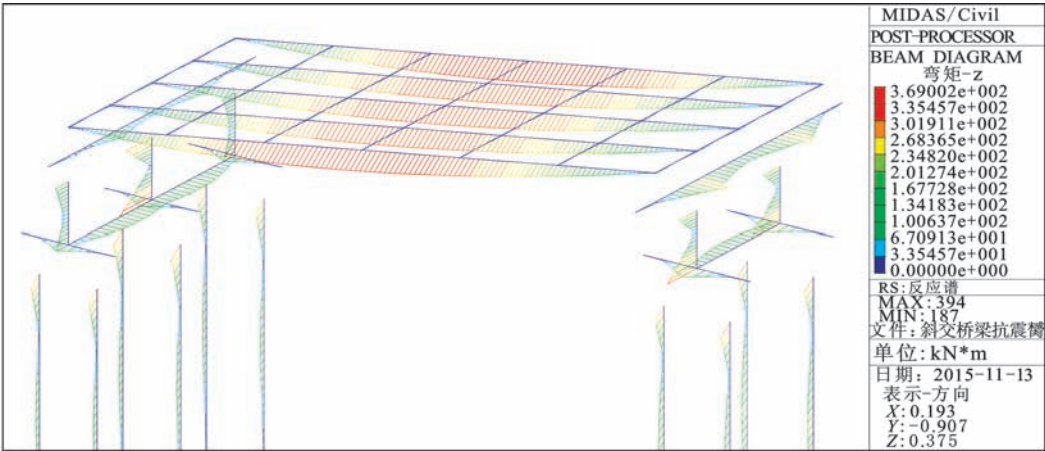


图 6 整体坐标系 XY 方向输入地震波
Fig.6 Input of seismic wave in the XY direction

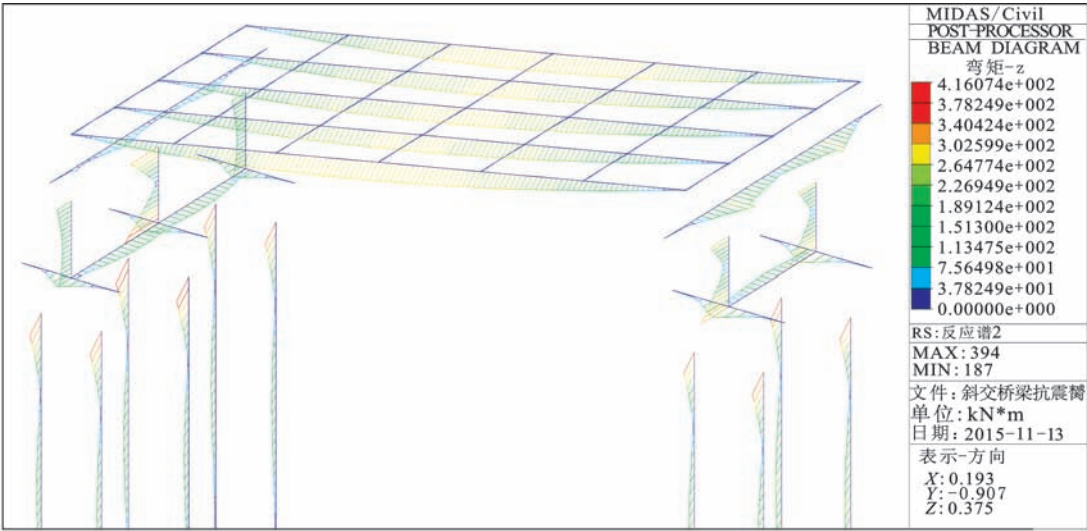


图 7 桥轴线及其垂直 NT 方向输入地震波
Fig.7 Input of seismic wave in the bridge axis and the vertical NT direction

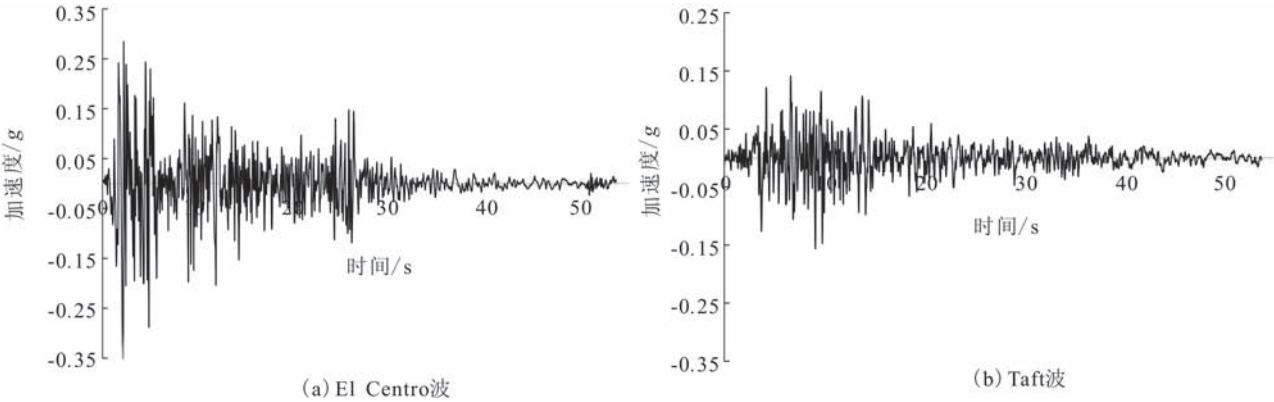


图 8 地震波加速度时程曲线
Fig.8 Time history curves of seismic waves

该互通式斜交简支梁桥属于小跨度桥梁,通过上述模态分析可知其自振周期相对较短,行波效应对小跨度桥梁地震反应的影响并不显著,因此地震反应分析采取了一致激励地震波作用。

(2) 碰撞效应的影响

在地震作用下,当位移较大时梁体与桥台及相邻梁端的碰撞是在所难免的,碰撞的类型可分为邻梁碰撞和墩(台)梁碰撞。地震时邻梁发生碰撞的位置都位于伸缩缝两侧的相邻结构之间,即纵向主梁之间以及主梁与桥台背墙之间的碰撞。从破坏角度来考虑,碰撞会加大桥梁发生破坏或落梁的可能性。实际上,碰撞不仅是导致梁体破坏最主要的原因,而且会对被碰撞的其他梁体或桥墩台受力和位移变化产生较大影响,因此桥梁设计计算时如果不考虑碰

撞效应会低估部分构件的受力要求,对抗震设计不利。

本文分两种情况建立模型:第一种不考虑碰撞效应,第二种以接触单元的形式模拟碰撞效应。计算结果表明,碰撞效应对桥台受力和位移产生的影响是不能忽略的。以桥台顶部位移为例(图 9)可以明显看出,考虑梁端与桥台碰撞效应后桥台的顶部位移最大值 3.65 cm,发生在 2.24 s 时刻,而未考虑碰撞效应的模型桥台顶部位移的最大值为 1.22 cm,发生在 2.45 s 时刻,最大值相差达 3 倍。图中也可以看出两种模型的位移时程曲线趋势也有较大差别。

同样,内力差异也很明显。图 10 给出了在地震波到达 2.08 s 时刻该斜交桥梁中一条主梁的弯矩

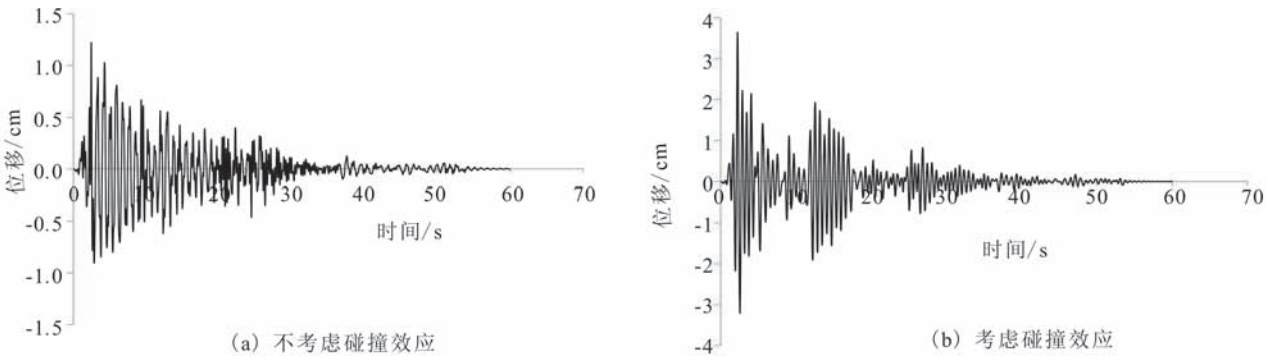


图 9 两种不同模型在桥台顶部的位移响应曲线

Fig.9 Time history curves of displacement at the top of bridge abutment for two different models

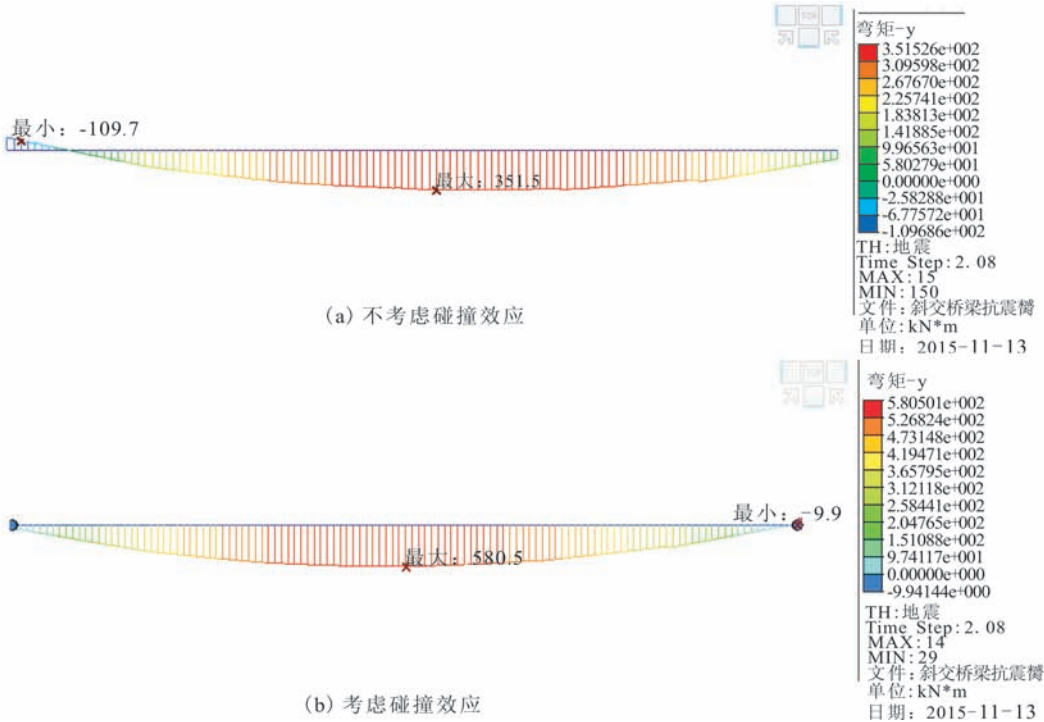


图 10 不考虑和考虑碰撞效应时地震某时刻主梁弯矩图

Fig.10 Bending moment diagrams of main girder at a certain time with and without considering pounding effect

图。对比两图可以看出考虑碰撞效应后主梁正弯矩明显增大,即梁端与桥台碰撞后产生的碰撞力抵消了梁端负弯矩,同时跨中正弯矩随之增大;而不考虑碰撞效应时桥台一侧梁端存在较大负弯矩。

3 结论

以京包高速公路上某互通式斜交简支梁桥为工程背景,建立考虑桩土相互作用和桥台及台后填土相互作用的三维动力有限元模型,在考虑双向地震作用的情况下分别用反应谱法和时程分析法对该桥梁地震响应进行分析。

考虑到斜交桥梁上部梁体与下部墩台中心线非正交关系,因此地震动输入方向有整体坐标系 XY 方向和桥梁纵轴线及其垂直方向两种方式。在反应谱分析过程中对这两种输入方式进行模拟分析,发现两种输入方式对斜交桥梁桥梁动力响应有显著影响,在抗震设计和计算时需要结合实际地震台记录资料加以考虑。

考虑到地震过程中梁端碰撞现象非常普遍,在时程分析过程中考虑地震作用下梁端与桥台及相邻梁端的碰撞效应。分析发现碰撞效应不仅增加了梁体破坏的可能性,更重要的是改变了碰撞及被碰撞构件的受力及变形规律。考虑碰撞效应和不考虑碰撞效应计算结果表明,碰撞效应对斜交桥梁墩台位移具有非常显著的影响,在碰撞过程中瞬时位移可能达到不考虑碰撞时的两倍以上,因此是否考虑碰撞对桥梁墩台的抗震设计有着很大的影响,为保护墩柱以及防止落梁可以适当增加防撞挡块。同样发现碰撞对结构的受力产生了非常不利的影响,以主梁弯矩来说,正负最大弯矩值及其截面位置的变化将直接影响到抗震配筋设计。

总之,通过上述分析可以得出,对于包括斜交桥梁在内的非规则桥梁或特殊桥梁,在抗震设计计算时既要选择合理的地震动输入方向,还要考虑因碰撞效应引起的结构受力和变形规律的变化。

参考文献(References)

- [1] Nikhil V Deshmukh, Dr U P Waghe. Analysis and Design of Skew Bridges[J]. International Journal of Science and Research (IJSR), 2015, 4(4): 399-402.
- [2] 赵书学. 斜交桥梁的受力性能研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(9): 57-59.
ZHAO Shu-xue. Study on the Mechanical Behavior of Skew Bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9): 57-59. (in Chinese)

- [3] 周冬, 于向东. 斜交角对斜交箱梁桥横梁内力的影响分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(4): 61-66.
ZHOU Dong, YU Xiang-dong. Analysis on Inner Forces of Transverse Beams of Skew Box Girder Bridge Affected by Skew Angle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(4): 61-66. (in Chinese)
- [4] 王军文, 沈贤, 李建中. 地震作用下斜交简支梁桥旋转机理及斜度影响研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 32-37.
WANG Jun-wen, SHEN Xian, LI Jian-zhong. Study of Rotation Mechanism and Skew Degree Influence of Skewed Simply-Supported Beam Bridge under Earthquake Excitation [J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 32-37. (in Chinese)
- [5] 庄卫林, 刘振宇, 蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1377-1387.
ZHUANG Wei-lin, LIU Zhen-yu, JIANG Jin-song. Earthquake-Induced Damage Analysis of Highway Bridges in Wenchuan Earthquake and Countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1377-1387. (in Chinese)
- [6] Ahmed Abdel-Mohti, Gokhan Pekcan. Assessment of Seismic Performance of Skew Reinforced Concrete Box Girder Bridges [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2013, 5(1): 1-18.
- [7] 张永亮, 孙建飞, 徐家林. 高速铁路大跨连续梁桥地震反应分析及抗震校核[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 226-231.
ZHANG Yong-liang, SUN Jian-fei, XU Jia-lin. Analysis of Seismic Response and Seismic Checking in a Long-span Continuous Beam Bridge on a High-speed Railway [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 226-231. (in Chinese)
- [8] 杜修力, 韩强. 桥梁抗震研究若干进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 1-14.
DU Xiu-li, HAN Qiang. Research Progress on Seismic Design of Bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 1-14. (in Chinese)
- [9] 蒋知之, 李永义, 孙庆峰, 等. 震后公路桥梁通行能力理论模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(2): 226-231.
JANG Zhi-zhi, LI Yong-yi, SUN Qing-feng, et al. Research on Theoretical Model of Traffic Capacity of Highway Bridges after Earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(2): 226-231. (in Chinese)
- [10] Mallick M, Raychowdhury P. Seismic Analysis of Highway Skew Bridges with Nonlinear Soil-pile Interaction [J]. Transportation Geotechnics, 2015, 3: 36-47.
- [11] Meng J Y, Lui E M. Seismic Analysis and Assessment of a Skew Highway Bridge [J]. Engineering Structures, 2000, 22(11): 1433-1452.
- [12] 卢明奇, 杨庆山, 李英勇. 地震作用下斜交连续梁桥碰撞效应分析[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2): 289-292.
LU Ming-qi, YANG Qing-shan, LI Ying-yong. Collision Effect Analysis of Skew Continuous Bridge under Seismic Response [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 289-292. (in Chinese)

- [13] 沈贤,王军文,李建中,等.地震作用下斜交简支梁桥桥面旋转反应的参数分析[J].振动与冲击,2015,34(5):61-65.
SHEN Xian,WANG Jun-wen,LI Jian-zhong, et al.Parametric Analysis on the Deck's Inplane Rotation Responses of Simply-supported Skewed Girder Bridges under Ground Motions[J].Journal of Vibration and Shock,2015,34(5):61-65.(in Chinese)
- [14] De Stefano M, Faella G, Ramasco R. Inelastic Seismic Response of One-way Plan-asymmetric under Bi-dimensional Ground Motions[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1998,27:363-376.
- [15] 李全旺,樊健生,聂建国.地震动方向随机性对结构动力反应的影响[J].工程力学,2010(12):135-140.
LI Quan-Wang,FAN Jian-sheng,NIE Jian-guo.Effect of Directional Uncertainty of Earthquake Ground Motion on Structural Responses[J].Engineering Mechanics,2010,27(12):135-140.(in Chinese)
- [16] Lopez O A,Torres R.The Critical Angle of Seismic Incidence and the Maximum Structural Response[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1997,26:881-894.
- [17] Deepu S P,Kanta Prajapat,Samit Ray-chaudhuri. Seismic Vulnerability of Skew Bridges under Bi-directional Ground Motions[J].Engineering Structures,2014,71:150-160.
- [18] 石岩,王军文,秦洪果,等.桥梁横向地震碰撞响应研究进展[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012,25(1):20-24.
SHI Yan,WANG Jun-wen,QIN Hong-guo, et al.Recent Development in Pounding Response of Bridges under Transverse Earthquakes[J].Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science Edition,2012,25(1):20-24.(in Chinese)
- [19] 孙广俊,李鸿晶,赵鹏飞,等.非规则多跨简支梁桥纵向地震反应及参数影响分析[J].防灾减灾工程学报,2013,33(4):441-448.
SUN Guang-jun,LI Hong-Jing,ZHAO Peng-fei, et al.Longitudinal Seismic Response and Parameter Influence Analysis for Multi-span Simply Supported Girder Bridge with Unconventional Configurations[J].Journal of Disaster Prevention & Mitigation Engineering,2013,33(4):441-448.(in Chinese)
- [20] 李黎,陈元坤,杨金虎,等.桩-土-桥相互作用对隔震连续梁桥地震响应的影响[J].工程抗震与加固改造,2010,32(1):50-56.
LI Li,CHEN Yuan-kun,YANG Jin-hu, et al.Influences of Soil-Pile-Structure Interaction on Seismic Response of Continuous Bridge[J].Earthquake Resistant Engineering & Retrofitting,2010,32(1):50-56.(in Chinese)
- [21] 李雨润,孙伟民,张建华,等.地震作用下群桩水平动力响应特性及 P - Y 曲线试验研究[J].地震工程学报,2014,36(3):468-475.
LI Yu-run,SUN Wei-min,ZHANG Jian-hua, et al.Experimental Study of Horizontal Dynamic Response and P - Y Curves of Piles during Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(3):468-475.(in Chinese)
- [22] 何健,叶爱君.连续斜交梁桥地震下碰撞效应分析[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(4):1475-1481.
HE Jian,YE Ai-Jun.Seismic Response of Continuous Skew Bridges with Pounding Effect[J].Journal of Central South University:Science and Technology,2012,43(4):1475-1481.(in Chinese)
- [23] 李建明.铁路多跨矮塔斜拉桥抗震性能评估[J].地震工程学报,2014,36(1):34-38.
LI Jian-ming.Evaluation of Seismic Performance of a Railway Cable-stayed Bridge with Multi-span and Low Towers[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):34-38.(in Chinese)