

考虑节点刚域影响的钢-混组合桁架梁桥 行车动力响应分析*

朱志辉^{1,2†}, 张鹏¹, 赵婷婷¹, 李宗建³, 周凌宇¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要:为研究节点刚域对钢-混组合桁架梁桥行车动力响应的影响规律,以某新建桥梁为例,利用自主开发的 TRBF-DYNA 软件开展列车-轨道-桥梁耦合系统振动响应研究.分别采用有限元方法建立考虑节点刚域的轨道-桥梁子系统整体三维模型;采用多刚体动力学方法建立 31 自由度车辆子系统模型,应用轮轨空间滚动接触模型模拟轮轨间可分离的接触关系.首先分析了节点刚域对桥梁自振特性的影响;继而研究了节点刚域和行驶线路对列车走行性以及桥梁整体和局部杆件动力响应的影响.结果表明:考虑节点刚域显著提高桥梁刚度;同时,桥梁的竖向振动位移峰值和加速度峰值减小 30.00%~35.15%;钢腹杆内力显著提升,其中弯矩会增大 90.41%~224.02%;但节点刚域对列车行车安全性指标影响较小.双线行车较单线行车引起的桥梁动力响应显著增强,其中横竖向加速度峰值将分别增大 114.29%和 100%;钢腹杆的应力有所增加,但并非成倍增加.建议在研究钢-混组合桁架梁桥行车动力响应时考虑节点刚域的影响.

关键词:高速铁路;钢-混组合桁架梁桥;车-轨-桥耦合振动;节点刚域;动力响应

中图分类号:U238;U24

文献标志码:A

Driving Dynamic Response Analysis of a Steel-concrete Composite Trussed Girder Bridge Considering the Effect of Nodal Rigid Zone

ZHU Zhihui^{1,2†}, ZHANG Peng¹, ZHAO Tingting¹, LI Zongjian³, ZHOU Lingyu¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, China;

3. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract:In order to study the influence of nodal rigid zone on the dynamic responses of a steel-concrete composite trussed girder bridge under high-speed train, one railway bridge is taken as a numerical example and the self-developed software TRBF-DYNA is utilized to calculate the dynamic responses of train-track-bridge coupled system. The whole three-dimensional model of the track-bridge subsystem is established by using finite element method, where each vehicle of the train is modeled as 31 degrees of freedom

* 收稿日期:2017-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678576,51378511), National Nature Science Foundation of China(51678576,51378511); 牵引动力国家重点实验室开放课题资助项目(TPL1601), Project of the Open Project Foundation of State Key Laboratory of Traction Power(TPL1601)

作者简介:朱志辉(1979-),男,河南潢川人,中南大学教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: zzh0703@163.com

model by applying the rigid-body dynamics theory, and the spatial rolling contact model is used to simulate the interaction between wheel and rail. Firstly, the influence of nodal rigid zone on the bridge vibration characteristics is studied. Then, the effects of the nodal rigid zone and running lane on the vehicle running safety indexes and dynamic responses of local steel truss webs and global bridge are investigated. The analysis results show that the nodal rigid zone improves the stiffness of the bridge. Meanwhile, the maximum vertical displacement and vertical acceleration of the bridge are reduced by 30.00%~35.15%. Moreover, the internal force of steel truss webs increases significantly, particularly the bending moment increases up to 90.41%~224.02%, and the nodal rigid zone has little influence on the safety indexes of vehicle. Compared with single-lane driving, the dynamic responses of the bridge with double-lane driving are markedly increased, and the peak value of the lateral and vertical accelerations are increased by 114.29% and 100%, respectively. Stress of the steel truss webs increases, but it is not linearly increased according to the number of running lane. It is suggested that the influence of the nodal rigid zone should be considered in the evaluation of the dynamic responses of steel-concrete composite trussed girder bridges.

Key words: high-speed railway; steel-concrete composite trussed bridge; train-track-bridge coupled system; nodal rigid zone; dynamic response

钢-混组合桁架梁桥由桁架腹杆和混凝土桥面板组合而成,采用钢腹杆代替混凝土箱梁中的混凝土腹板,将腹杆端部节点嵌固在混凝土翼板中,形成由混凝土桥面板、钢桁腹杆、体外和(或)体内预应力钢束共同工作的组合结构体系^[1]. 随着我国高速铁路快速发展,2005年,中铁第一勘察设计院结合京郑铁路黄河公路铁路两用桥设计方案,首次提出了用组合桁架作为腹板的空腹式箱梁结构主梁^[2-3];2008年起,依托西-平铁路、兰-新客专、大-西客专建设,研究人员对该桥型做了进一步深入研究^[2-4]. 其中,周凌宇等^[3-4]通过试验和有限元分析,研究了钢-混组合桁架梁桥节点部位应力状态及分布规律;王海波等^[5]研究了钢-混组合桁架节点处PBL剪力键群的负载分布及受力性能. 黄永辉等^[6]以东莞东江大桥为例,研究发现节点刚域对桥梁受力性能的影响不能忽略. 上述研究主要集中在节点构造和静力学性能方面,对于节点刚域对桥梁动力性能影响的研究还较少. 杨咏昕等^[7]建议进行结构动力特性分析时,必须考虑节点刚性区对桥梁动力响应的影响.

为确保高速铁路列车和桥梁的安全性和稳定性,我国《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)^[8]中明确规定,特殊桥型须开展车桥耦合动力响应分析. 翟婉明等^[9]建立了列车-轨道-桥梁耦合系统动力学模型,并采用显隐结合的数值分析方法求解轮轨空间非线性接触问题;夏禾等^[10]针对香港青马大跨度悬索桥,采用空间车-桥耦合振动模型,开展了

车-桥耦合振动研究;Li等^[11]采用有限元直接刚度法建立京通铁路白河桥精细化数值模型,研究了车-桥耦合振动引起的钢桁架梁桥腹杆应力;朱志辉等^[12]针对京沪高铁96m跨度钢箱系杆拱桥,建立精细化轨道-桥梁有限元模型,开展多线行车条件下的车-桥空间耦合振动研究. 虽然以上针对车-桥耦合振动分析方法和复杂桥梁开展了深入研究,但针对钢-混组合桁架梁桥的车-桥耦合振动研究还较少. 郭薇薇^[2]以西-平铁路上64m跨马屋泾河特大桥主桥为对象,研究了简支钢-混组合桁架桥在列车下的动力响应. 但该研究没有考虑节点刚域对车-桥耦合系统动力响应的影响.

本文以某新建钢-混组合桁架梁桥为研究对象,建立考虑钢-混组合桁架节点刚域的列车-轨道-桥梁空间耦合振动模型,对比分析了节点刚域对列车走行性以及桥梁整体和局部杆件动力响应的影响.

1 列车-轨道-桥梁耦合系统模型

1.1 车辆空间动力分析模型

当列车匀速运行时,如不考虑车辆之间的纵向相互作用,则列车编组的总体矩阵可由各节车辆的相应动力矩阵按顺序以对角线排列的方式组成^[9]. 每节车辆由一个车体、两个转向架以及四个轮对组成,其中转向架与轮对由一系悬挂连接,转向架和车体由二系悬挂连接,如图1所示. 当不考虑车体柔性时,根据刚体动力学理论,车辆模型可简化为31

个自由度模型,分别考虑了车体和前后转向架的沉浮、点头、横移、侧滚及摇头运动,以及每一轮对的沉浮、横移、侧滚和摇头运动^[13]。

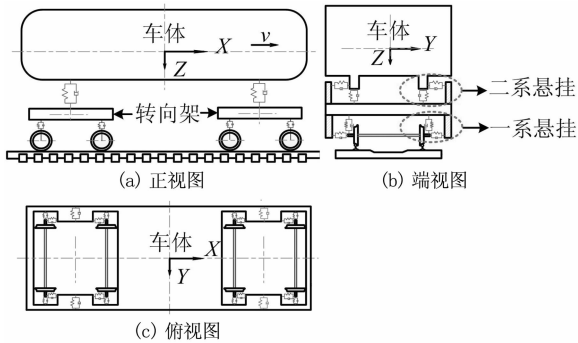


图1 车辆模型示意图
Fig. 1 Sketch of vehicle model

列车编组的运动方程如式(1)所示:

$$\mathbf{M}_V \ddot{\mathbf{U}}_V(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{U}}_V(t) + \mathbf{K}_V \mathbf{U}_V(t) = \mathbf{F}_V(t), \quad (1)$$

式中: \mathbf{M}_V 、 \mathbf{C}_V 、 \mathbf{K}_V 、 \mathbf{U}_V 分别为列车的总体质量矩阵、总体阻尼矩阵、总体刚度矩阵和位移列向量^[14]; \mathbf{F}_V 为车辆所受外力列向量。

1.2 轨道-桥梁整体有限元模型

在以往的车-桥耦合振动分析中,为简化建模及降低计算分析的难度,通常忽略轨道结构^[15]。Li等^[11]、Zhai等^[9]认为,由于轨道结构在车-桥耦合振动分析中起到重要的支撑和弹性减振作用,忽略轨道结构将导致难以准确评估列车行车安全性和桥梁动力响应。当考虑轨道结构时,通常采用有限元法建立轨道-桥梁结构整体有限元模型^[16]。其中,钢轨、轨枕和桥墩采用三维空间梁单元模拟;钢轨扣件、轨下橡胶垫以及有砟道床层采用弹簧-阻尼器单元模拟,扣件以及轨下结构参数按文献^[17]取值;主梁采用空间梁单元或壳单元模拟。所有材料均假设为线弹性,混凝土密度以及强度均按照规范取值,桥上二期恒载等效为均布质量分配到桥梁模型中。

采用有限元直接刚度法,可以建立轨道-桥梁子系统的动力方程为:

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{U}}_B(t) + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{U}}_B(t) + \mathbf{K}_B \mathbf{U}_B(t) = \mathbf{F}_B(t), \quad (2)$$

式中: \mathbf{M}_B 、 \mathbf{C}_B 、 \mathbf{K}_B 、 \mathbf{U}_B 分别为轨道-桥梁子系统的总体质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和位移列向量; \mathbf{F}_B 为轨道-桥梁子系统所受外力列向量^[18]。

阻尼矩阵 \mathbf{C}_B 包括桥梁阻尼和轨下弹簧-阻尼器单元阻尼,如式(3)所示:

$$\mathbf{C}_B = \alpha \mathbf{M}_B + \beta \mathbf{K}_B + \sum_{j=1}^{N_c} \mathbf{C}_j. \quad (3)$$

式中: α 、 β 为 Rayleigh 阻尼系数; N_c 为弹簧-阻尼器单元的数量; \mathbf{C}_j 为第 j 个弹簧-阻尼器单元的阻尼矩阵。

对于钢-混组合桁架梁桥的腹杆,常采用梁单元模拟腹杆,以考虑杆端弯矩影响。在实际结构中,当钢腹杆和混凝土之间通过节点板连接时,由于节点局部加强作用,杆端抗弯刚度、轴向刚度和扭转刚度会不同程度地增大,存在节点刚域问题,如图2所示。目前处理节点刚域问题的方法主要有3种:主从节点法、刚性材料法、带刚臂的空间梁单元法^[6]。其中主从节点法假定主从节点之间相应自由度上的平动位移完全相同,排除了其所模拟的“刚性体”发生转动的可能,而实际结构中的“刚性体”可以发生转动和平动。带刚臂的空间梁单元法将节点区域中刚度较大的部分等效为刚臂处理,需要建立位移转换矩阵,过程繁琐。刚性材料法通过增大刚性区单元的抗弯刚度、轴向刚度和扭转刚度来模拟节点部位的刚化作用。就有限元数值模拟而言,提高材料弹性模量更为简单。

本文采用刚性材料法模拟节点刚域,钢腹杆采用空间梁单元模拟。取节点板区域为节点刚性区,钢腹杆在节点刚性区外的部分,其材料参数根据实际材料设计参数输入;在节点刚性区内的部分,忽略节点刚性域的局部变形,通过提高刚性区梁单元材料弹性模量模拟节点刚域作用,弹性模量一般提高10倍以上,如图2所示。

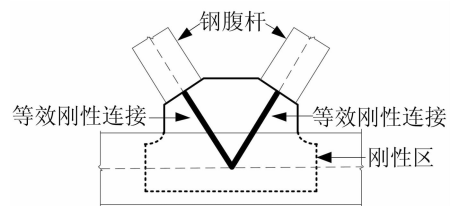


图2 节点刚域模型
Fig. 2 Model of nodal rigid zone

1.3 轮轨接触模型

轮轨关系是车桥系统动力相互作用分析中的核心问题之一^[13]。本文利用空间迹线法研究车轮踏面与钢轨之间的相对位置关系,从代数学角度描述车辆横向位移、侧滚角、摇头角坐标间的依赖关系和相关参数;并利用轮轨滚动接触理论,根据赫兹非线性接触理论确定轮轨间的法向接触力,蠕滑力计算首先按 Kalker 线性理论计算,然后采用 Johnson-

Vermeulen 理论进行非线性修正。

当轮轨踏面接触时,基于赫兹非线性接触理论的轮轨法向接触力计算公式如式(4)所示:

$$P_j(t) = \left(\frac{1}{G} [\delta N_j] \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (4)$$

式中: $P_j(t)$ 是第 j 个车轮 t 时刻法向接触力; G 为轮轨接触常数; δN_j 为第 j 个车轮处的轮轨接触法向压缩量;当轮轨分离时, $P_j(t)=0$ 。

对于轮轨间的蠕滑作用,首先采用基于 Kalker 线性蠕滑理论计算,然后再采用 Johnson-Vermeulen 非线性理论对蠕滑力进行修正。轮轨纵向蠕滑力 F_x 、横向蠕滑力 F_y 、旋转蠕滑力矩 M_z 的表达式为:

$$F_x = -\epsilon f_{11} \zeta_x, \quad (5)$$

$$F_y = -\epsilon (f_{22} \zeta_y + f_{23} \zeta_{sp}), \quad (6)$$

$$M_z = \epsilon (f_{23} \zeta_y - f_{33} \zeta_{sp}). \quad (7)$$

式中: ϵ 是修正系数; f_{ij} 是蠕滑系数; ζ_x 、 ζ_y 和 ζ_{sp} 分别为纵向蠕滑率、横向蠕滑率和自旋蠕滑率。

2 工程概况

2.1 基本参数

某新建钢-混组合桁架梁桥上铺设双线有砟轨道,铁路 I 级,设计行车速度 250 km/h,设计二期恒载为 176 kN/m,桥梁整体布置如图 3 所示。梁体混凝土等级为 C55,容重采用 26.5 kN/m³。主梁采用钢腹杆组合结构,梁长 181.5 m,计算跨径 180 m,梁高 6 m,节间距 6 m。上弦杆采用 12.6 m 宽、1.2 m 高的钢筋混凝土截面,下弦杆采用 7.2 m 宽、1.2 m 高的钢筋混凝土截面。腹杆采用材质为 Q345qE 的 650 mm×550 mm 矩形钢箱,钢箱截面分别采用 16 mm、24 mm、32 mm 三种尺寸。桥墩编号为 1~4,其中 2 号墩设置纵向固定支座,其余桥墩设置活动支座。支座和跨中横截面及尺寸如图 4 所示,钢腹杆-混凝土板节点连接部分如图 5 所示。

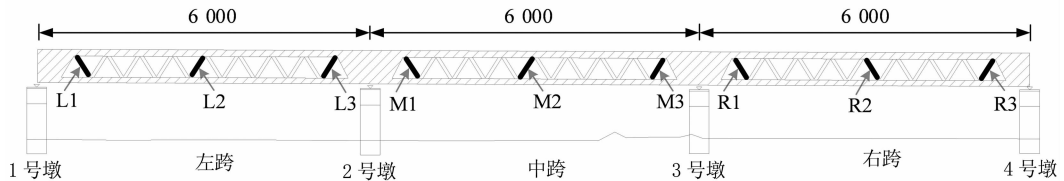


图 3 桥梁布置示意图(单位:cm)

Fig. 3 Configuration of the bridge(unit: cm)

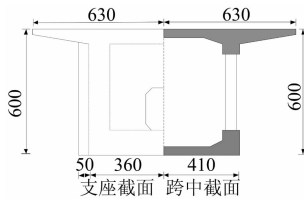


图 4 横截面示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of cross section(unit: cm)

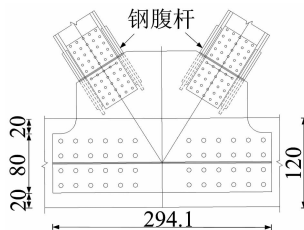


图 5 钢腹杆-混凝土板节点连接部分示意图(单位:cm)

Fig. 5 Schematic diagram of node connection of steel truss webs and concrete slab(unit: cm)

2.2 轨道-桥梁有限元模型

根据 1.2 节所述理论,采用有限元软件 ANSYS 建立了轨道-桥梁有限元模型,并采用自主开发的列车-轨道-桥梁耦合动力学软件 TRBF-DYNA 读取轨道-桥梁有限元模型的整体质量、刚度和阻尼矩阵^[12]。其中钢轨、轨枕和钢腹杆采用空间梁单元 BEAM188 模拟;钢轨扣件、轨下胶垫以及道床对轨枕的支撑作用采用弹簧-阻尼器 COMBIN14 单元模拟;桥梁的上、下桥面板采用空间壳单元 SHELL181 模拟;桥梁阻尼比取 2%。轨道-桥梁整体有限元模型如图 6 所示。

3 桥梁自振特性分析

桥梁自振特性不仅反映了桥梁的刚度指标^[19],也是列车-轨道-桥梁耦合系统动力响应的重要影响因素。分别对考虑和不考虑节点刚域的两种模型进

行模态分析. 采用子空间迭代法计算的2种桥梁模型前10阶自振频率和振型特征见表1, 其中自振频率相对差值 $\gamma = (Val_B - Val_A) / Val_A \times 100\%$, Val_A 为不考虑节点刚域的桥梁自振频率, Val_B 为考虑节点刚域的桥梁自振频率.

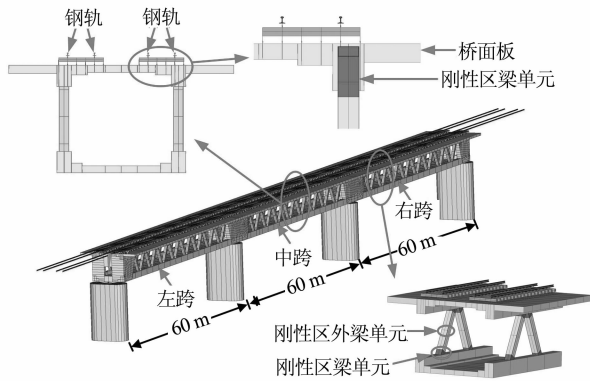


图6 轨道-桥梁有限元模型
Fig. 6 FE model of track-bridge

从表1可看出, 考虑节点刚域后, 桥梁模型自振频率增大, 最大增幅达到19.70%, 表明节点刚域对桥梁刚度影响显著; 但节点刚域并不影响桥梁各阶振型出现的顺序. 另一方面, 从振型出现顺序来看, 桥梁一阶振型为竖向振型, 且各阶竖向振型较相应阶次的横向振型出现得早, 说明该桥竖向刚度比横向刚度弱; 第9阶为扭转振型, 表明该桥的抗扭刚度较大.

表1 桥梁振型和频率

Tab. 1 Modal shape and frequency of bridge

阶数	自振频率/Hz		振型主要特点	$\gamma / \%$
	不考虑节点刚域	考虑节点刚域		
1	2.40	2.50	主梁竖弯	4.17
2	2.60	2.64	主梁竖弯	1.54
3	2.62	2.76	边跨横弯	5.34
4	2.74	2.84	边跨横弯	3.65
5	2.84	3.16	边跨竖弯	11.27
6	3.19	3.36	中跨竖弯	5.33
7	3.33	3.85	主梁对称横弯	15.62
8	4.77	4.80	主梁反对称横弯	0.63
9	5.25	5.87	主梁扭转	11.81
10	5.28	6.32	边跨扭转	19.70

4 列车-桥梁空间振动响应分析

4.1 计算工况

为研究节点刚域和行车线路对列车-轨道-桥梁耦合系统空间振动响应以及列车走行性、舒适性的

影响, 在设计车速250 km/h的条件下, 分别选取表2所示的3种典型工况进行对比研究. 选用8车编组的CRH3高速列车(动+拖+动+拖+拖+动+拖+动), 列车参数详见文献[20]. 其中, 单线工况行车方向为西安北至惠安堡方向; 双线工况的列车交会点设在中跨跨中处. 根据设计列车运营时速和轨道结构形式, 本文采用德国低干扰轨道谱, 根据三角级数法生成轨道不平顺样本, 轨道不平顺样本点间距0.25 m, 空间波长范围为1~80 m.

表2 计算工况
Tab. 2 Calculation case

工况	模型类型	行驶线路
Case1	不考虑节点刚域	单线
Case2	考虑节点刚域	单线
Case3	考虑节点刚域	双线对开

4.2 节点刚域影响分析

本节对比研究了不考虑节点刚域(Case1)和考虑节点刚域(Case2)两种条件下, 列车-轨道-桥梁耦合系统的桥梁整体动力响应指标、钢腹杆内力以及列车走行安全性指标.

4.2.1 桥梁动力响应分析

表3给出了Case1和Case2两种工况下桥梁的动力系数、梁端转角及振动位移、加速度响应最值, 以及两种工况计算指标之间的相对差值 $\gamma = (Val_B - Val_A) / Val_A \times 100\%$, Val_A 为不考虑节点刚域的动力响应值, Val_B 为考虑节点刚域的动力响应值. 图7和图8分别给出了两种工况下跨中位移和加速度时程曲线.

从表3以及图7、图8中可知, 在列车-轨道-桥梁耦合系统振动过程中, 考虑节点刚域的桥梁动力响应指标均小于不考虑节点刚域模型的计算结果, 节点刚域对桥梁动力响应影响显著. 由于节点刚域主要影响桥梁竖向刚度, 因此, 对桥梁竖向位移和加速度响应的影响较为显著, 分别达到了35.15%和30.00%; 节点刚域对桥梁横向位移幅值影响较小.

4.2.2 钢腹杆局部动力响应分析

在列车动力荷载作用下, 钢腹杆是钢-混组合桁架结构的薄弱环节^[21]. 为精确分析节点刚域对钢腹杆应力和内力的影响程度, 表4给出了钢腹杆应力、轴力、弯矩动力响应最值, 以及2种工况计算指标之间的相对差值 γ . 图9给出了应力相对差值最大的L1杆的动力响应时程曲线, 表5给出了每跨

钢腹杆的最大应力动力系数.

表3 桥梁动力响应最大值汇总

Tab.3 Summary of maximum dynamic responses of bridge

工况	动力系数	梁端转角/(10 ⁻⁵ rad)		横向位移/mm			竖向位移/mm			横向加速度/(m·s ⁻²)			竖向加速度/(m·s ⁻²)		
		水平	竖向	左跨	中跨	右跨	左跨	中跨	右跨	左跨	中跨	右跨	左跨	中跨	右跨
Case1	1.10	0.67	10.30	0.23	0.16	0.28	2.71	2.02	2.59	0.17	0.21	0.23	0.60	0.44	0.32
Case2	1.11	0.45	8.91	0.22	0.15	0.27	1.84	1.31	1.95	0.14	0.16	0.19	0.42	0.32	0.28
$\gamma / \%$	0.91	-32.84	-13.50	-4.35	-6.25	-3.57	-32.10	-35.15	-24.71	-17.65	-23.81	-17.39	-30.00	-27.27	-12.50

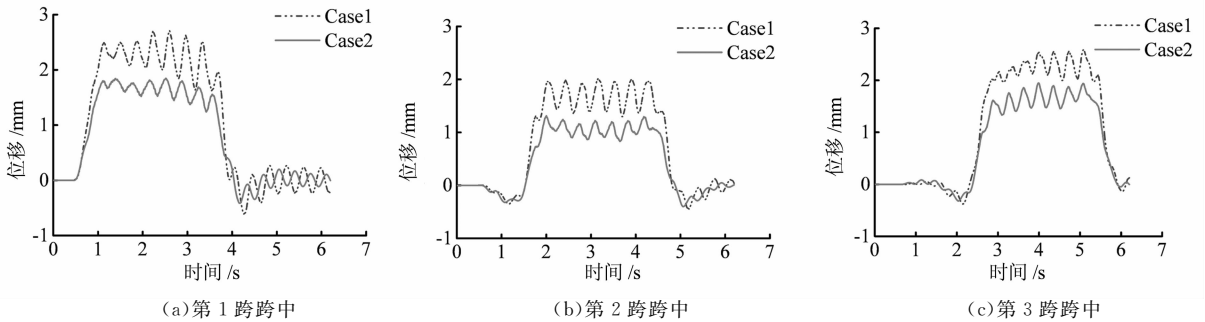


图7 桥梁竖向位移时程曲线

Fig.7 Time history curves of bridge vertical displacement

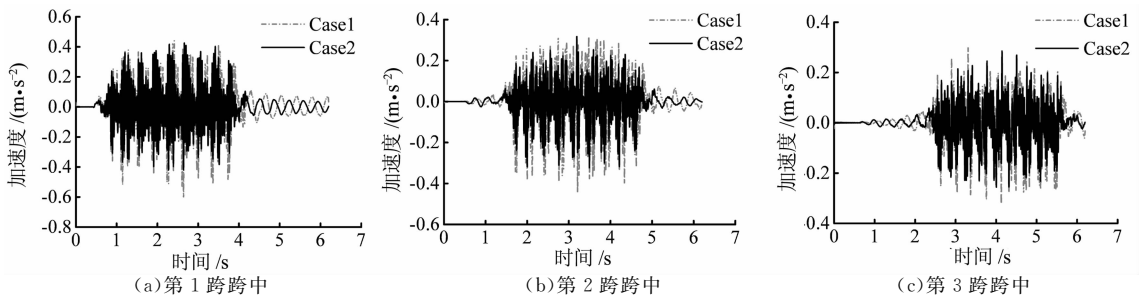


图8 桥梁竖向加速度时程曲线

Fig.8 Time history curves of bridge vertical acceleration

表4 钢腹杆应力、轴力、弯矩响应最大值比较

Tab.4 Comparison of maximum stress, axial force and bending moment of steel truss webs

杆件	应力/MPa		$\gamma / \%$	弯矩/(kN·m)		$\gamma / \%$	轴力/kN		$\gamma / \%$
	Case1	Case2		Case1	Case2		Case1	Case2	
L1	6.12	9.08	48.37	12.05	38.41	218.76	356.35	374.30	5.04
L2	4.09	5.69	39.12	7.76	16.43	111.73	107.71	128.05	18.88
L3	9.44	12.97	37.39	15.01	48.27	221.59	535.69	589.91	10.12
M1	7.60	10.86	42.89	12.32	38.72	214.29	436.05	466.44	6.97
M2	3.95	4.00	1.27	5.42	10.32	90.41	166.41	184.44	10.83
M3	7.56	11.20	48.15	13.03	42.22	224.02	434.29	493.63	13.66
R1	9.45	13.08	38.41	13.62	43.31	217.99	507.87	536.80	5.70
R2	4.88	6.05	23.98	7.54	16.79	122.68	114.48	126.07	10.12
R3	6.35	8.98	41.42	12.97	38.17	194.29	342.23	372.59	8.87

从表4可看出,相比不考虑节点刚域工况,考虑节点刚域工况的钢腹杆应力、轴力以及弯矩最大增幅分别达到了48.37%、224.02%和18.88%。Case1和Case2工况所计算的钢腹杆最大应力分别是9.45 MPa和13.08 MPa,列车动力荷载引起的

钢腹杆应力处于较低水平。由于节点刚域对钢腹杆抗弯刚度提升显著,因此钢腹杆的弯矩增幅最大;同时,钢腹杆应力增幅中弯矩增幅起主要控制作用。由于钢腹杆内力影响线长度较短,从图9中可看出,2种工况下,钢腹杆应力、弯矩和轴力均表现出与列

车编组数量相关的高周循环. 从表 5 可知,考虑节点刚域影响的 Case2 工况中跨钢腹杆应力动力系数

增加显著;且钢腹杆应力动力系数与表 3 中桥梁跨中位移动力系数并不相等.

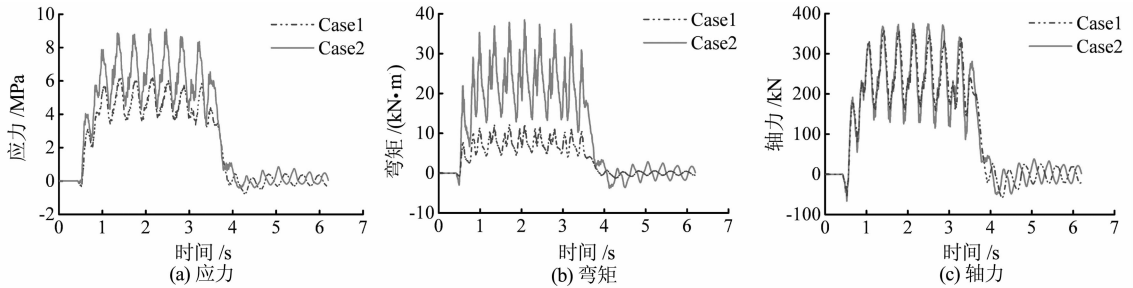


图 9 L1 杆件应力、弯矩、轴力动力响应时程曲线

Fig. 9 Time history curves of stress, bending moment and axial force of truss web L1

表 5 钢腹杆应力动力系数最大值

Tab. 5 Maximum stress dynamic coefficient of steel truss webs

工况	左跨	中跨	右跨
Case1	1.029	1.063	1.002
Case2	1.060	1.286	1.016

4.2.3 列车动力响应分析

表 6 中分别给出了考虑和不考虑节点刚域条件下的列车走行安全性指标(脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力)和乘坐舒适性指标(车体加速度和 Sperling 指标)最值,以及两种工况计算指标之间的

相对差值 γ . 图 10 给出了两种工况下第一节车辆的横、竖向加速度,横、竖向轮轨力以及轮重减载率和脱轨系数时程曲线.

从表 6 可以看出,除横向轮轨力相对差值为 15.38%外,Case1 和 Case2 两种工况下列车其余各项指标最大相对差值均较小,表明考虑节点刚域对列车动力响应影响不大;另一方面,Case2 工况下列车的各项指标较 Case1 工况均有增大的趋势,说明考虑节点刚域后行车安全性和舒适性有所下降. 2 种工况下动车和拖车的走行安全性指标均满足规范要求, Sperling 舒适性指标达到“优秀”级别.

表 6 列车动力响应最值汇总

Tab. 6 Summary of maximum dynamic responses of vehicle

工况	动车							拖车						
	脱轨系数	轮重减载率	横向力 /kN	加速度 / (m · s ⁻²) 竖向	加速度 / (m · s ⁻²) 横向	Sperling 指标 竖向	Sperling 指标 横向	脱轨系数	轮重减载率	横向力 /kN	加速度 / (m · s ⁻²) 竖向	加速度 / (m · s ⁻²) 横向	Sperling 指标 竖向	Sperling 指标 横向
Case1	0.12	0.38	18.33	0.20	0.14	1.12	1.03	0.12	0.26	15.4	0.19	0.18	1.17	1.08
Case2	0.13	0.40	20.53	0.21	0.15	1.13	1.08	0.13	0.30	17.0	0.20	0.19	1.19	1.10
γ / %	8.33	5.26	12.00	5.00	7.14	0.89	4.85	8.33	15.38	10.39	5.26	5.56	1.71	1.85

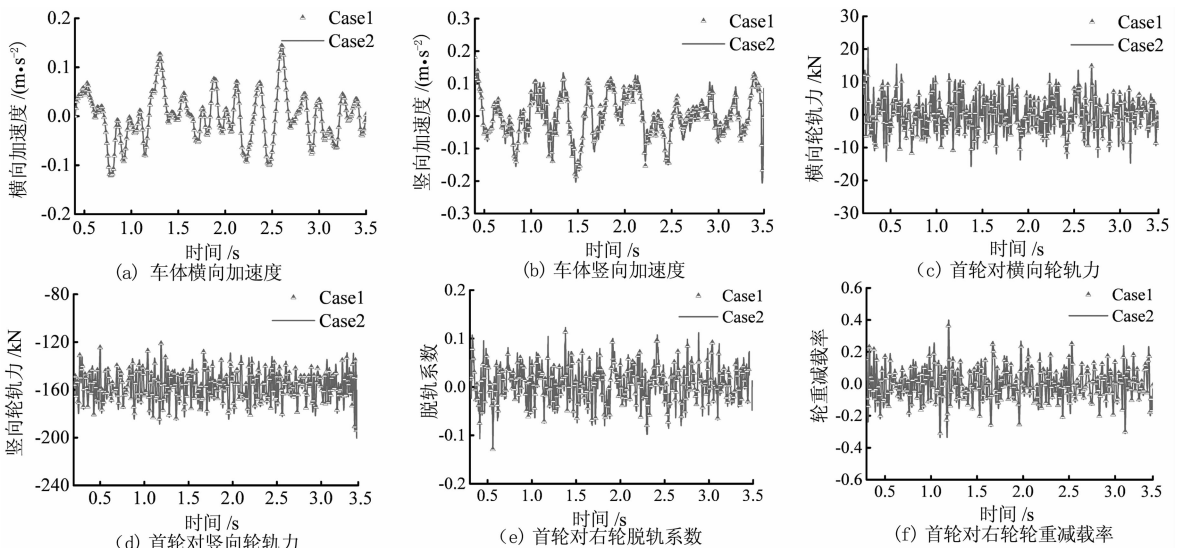


图 10 第一节车辆动力响应时程曲线

Fig. 10 Time history curves of dynamic responses of the first vehicle

4.3 行车线路影响分析

基于考虑节点刚域的轨道-桥梁模型,本节对比分析了单线(Case2)和双线(Case3)行车条件下的列车-轨道-桥梁耦合系统动力响应。

4.3.1 桥梁动力响应分析

表7给出了考虑节点刚域条件下,Case2和Case3行车工况下桥梁的动力系数、梁端转角及振动位移、加速度响应最值,以及2种工况计算指标之间的相对差值 $\gamma = (Val_B - Val_A) / Val_A \times 100\%$, Val_A 为Case2动力响应值, Val_B 为Case3动力响应值。

从表7可知,由于Case3中同时上桥的列车数量

增加,除动力系数和横向位移略有降低外,桥梁其余动力响应最值均增幅显著。加速度指标受行车线路的影响大于位移指标,横向和竖向加速度最值的最大增幅分别是114.29%和100%。由于单线行车工况属于偏载加载,而双线行车工况属于对称加载,因此,桥梁竖向位移响应最大增幅仅为72.52%。桥梁横向振动位移主要受轮轨横向力控制,而轮轨横向力具有随机特征,不同轮对轮轨力之间不具备叠加特征,因此桥梁横向位移在2种工况下均较小。两种工况下桥梁最大竖向加速度为0.79 m/s²,满足《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)关于有砟轨道桥面板振动加速度不应大于3.5 m/s²的要求。

表7 桥梁动力响应最值汇总

Tab.7 Summary of maximum dynamic responses of bridge

工况	动力系数	梁端转角/(10 ⁻⁵ rad)		横向位移/mm			竖向位移/mm			横向加速度/(m·s ⁻²)			竖向加速度/(m·s ⁻²)		
		水平	竖向	左跨	中跨	右跨	左跨	中跨	右跨	左跨	中跨	右跨	左跨	中跨	右跨
Case2	1.11	0.45	8.91	0.24	0.16	0.29	1.84	1.31	1.95	0.14	0.16	0.19	0.42	0.32	0.28
Case3	1.07	0.61	13.65	0.22	0.10	0.27	3.10	2.26	2.93	0.30	0.30	0.29	0.79	0.64	0.54
$\gamma/\%$	-3.60	35.56	53.20	-8.33	-37.50	-6.90	68.48	72.52	50.26	114.29	87.50	52.63	88.10	100.00	92.86

4.3.2 钢腹杆局部动力响应分析

表8给出了考虑节点刚域条件下,单线(Case2)和双线(Case3)行车工况下钢腹杆应力、轴力、弯矩动力响应最大值,以及2种工况计算指标之间的相对差值 γ 。图11给出了应力水平最大的杆件L3的应力、轴力和弯矩时程图。

从表8中可看出,双线行车工况下钢腹杆的应力、轴力、弯矩均比单线行车工况的大;但由于单线行车的偏载作用,使得钢腹杆应力、弯矩、轴力最大增幅分别为75.87%、29.87%、37.03%,增长幅度并不是2倍关系。从图11可看出,在双线荷载作用下,钢腹杆的应力水平比较低,应力最大值为18.16 MPa。

表8 钢腹杆应力、弯矩、轴力响应最值比较

Tab.8 Comparison of maximum stress, bending moment and axial force of steel truss webs

杆件	应力/MPa		$\gamma/\%$	弯矩/(kN·m)		$\gamma/\%$	轴力/kN		$\gamma/\%$
	Case2	Case3		Case2	Case3		Case2	Case3	
L1	9.08	11.51	26.76	38.41	46.02	19.81	374.30	473.44	26.49
L2	5.69	10.00	75.75	16.43	19.95	21.42	128.05	149.17	16.49
L3	12.97	18.16	40.02	48.27	62.69	29.87	589.91	805.35	36.52
M1	10.86	14.03	29.19	38.72	47.16	21.80	466.44	636.13	36.38
M2	4.00	4.49	12.25	10.32	12.68	22.87	184.44	190.74	3.42
M3	11.20	14.82	32.32	42.22	52.30	23.87	493.63	661.18	33.94
R1	13.08	16.21	23.93	43.31	53.43	23.37	536.80	735.60	37.03
R2	6.05	10.64	75.87	16.79	20.45	21.80	126.07	163.09	29.36
R3	8.98	10.87	21.05	38.17	43.76	14.65	372.59	444.68	19.35

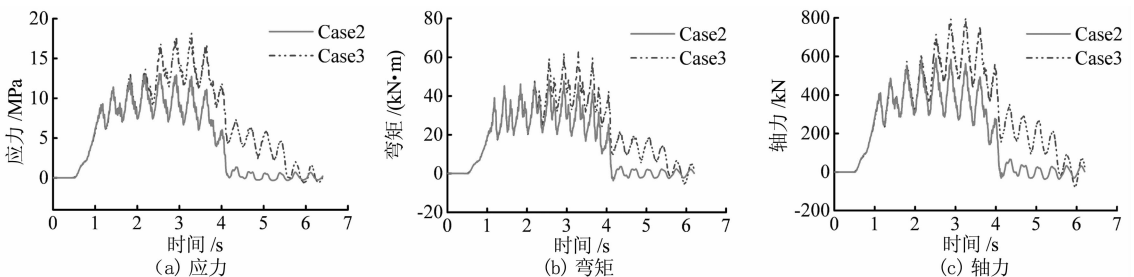


图11 L3杆应力、弯矩、轴力动力响应时程曲线

Fig.11 Time history curves of stress, bending moment and axial force of truss web L3

4.3.3 列车动力响应分析

表9给出了考虑节点刚域条件下,单线行车工况(Case2)和双线对开工况(Case3)的列车安全性和舒适性的各项指标的最值,以及2种工况计算指标之间的相对差值 γ 。

从表9可看出,双线行车工况下,除脱轨系数外,列车的各项指标较单线行车均有不同程度的增大,行车安全性和平稳性降低。根据《高速铁路设计

规范》(TB 10621—2014)可知,2种工况的脱轨系数最大值均小于0.8,轮重减载率最大值小于0.6,最大横向水平力为 $20.54 \text{ kN} < 10 \text{ kN} + P_0/3 = 63.33 \text{ kN}$ (P_0 为静轴重, $P_0 = 160 \text{ kN}$),满足安全性要求;最大车体横向加速度小于 1.00 m/s^2 ,最大车体竖向加速度小于 1.30 m/s^2 ,Sperling舒适性指标最大值为 $1.16 < 2.50$,达到优良级别,满足舒适性要求。

表9 列车动力响应最值汇总

Tab.9 Summary of maximum dynamic responses of vehicle

工况	动车							拖车						
	脱轨系数	轮重减载率	横向力/kN	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		Sperling 指标		脱轨系数	轮重减载率	横向力/kN	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		Sperling 指标	
				竖向	横向	竖向	横向				竖向	横向		
Case2	0.13	0.40	20.53	0.21	0.15	1.13	1.08	0.13	0.30	17.00	0.20	0.19	1.19	1.08
Case3	0.13	0.44	20.54	0.24	0.16	1.39	1.11	0.13	0.46	17.78	0.24	0.22	1.46	1.17
$\gamma/\%$	0.00	10.00	0.05	14.29	6.67	23.01	2.78	0.00	53.33	4.59	20.00	15.79	22.69	8.33

5 结论

本文基于列车-轨道-桥梁耦合动力学理论,分析了节点刚域对高速铁路钢-混组合桁架连续梁桥行车动力响应的影响,可得出如下结论:

1)节点刚域对桥梁的动力特性有显著影响,考虑节点刚域后桥梁的自振频率有所增大,两者最大相差19.70%。

2)考虑节点刚域后,列车引起的桥梁振动位移和加速度显著减小,列车走行性指标和舒适性指标受节点刚域影响不大;考虑节点刚域后,钢腹杆内力增大,其中弯矩增大90%~220%;故而在同类型桥梁车桥耦合振动分析过程中,建议考虑节点刚域建模,准确分析列车、桥梁和局部钢腹杆的动力响应。

3)双线行车引起的桥梁动力响应较单线行车显著增强,横竖向加速度最值的最大增幅达到114.29%和100%;钢腹杆的内力和应力较单线偏载行车最大增幅为75.87%,并非成倍增长关系;双线行车工况下(运营荷载),列车走行安全性指标和乘坐舒适性指标有增大的趋势,但均满足规范要求。

参考文献

[1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社, 2011:236—249.
NIE J G. Steel-concrete composite bridge[M]. Beijing: China Communication Press, 2011:236—249. (In Chinese)

[2] 郭薇薇, 夏禾, 李慧乐, 等. 铁路新型钢-混凝土组合桁架桥在

列车作用下的动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4): 128—133.

GUO W W, XIA H, LI H L, *et al.* Dynamic analysis of a new type of railway steel-concrete composite trussed bridge under running trains excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(4): 128—133. (In Chinese)

[3] 周凌云, 贺桂超. 大跨度钢-混凝土组合桁架铁路桥端节点模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 92—99.

ZHOU L Y, HE G C. Model test for the end joint of long span steel-concrete composite truss railway bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 92—99. (In Chinese)

[4] ZHOU L Y, HE G C. Experimental research on end joint of steel-concrete composite truss [J]. Baltic Journal of Road & Bridge Engineering, 2012, 7(4): 305—313.

[5] 王海波, 杜元涛. 钢-混组合桁架节点处PBL剪力键群受力性能研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(2): 33—40.

WANG H B, DU Y T. Mechanical behaviors of PBL shear connector group at steel-concrete composite truss joints [J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 33—40. (In Chinese)

[6] 黄永辉, 王荣辉, 饶瑞. 考虑整体节点刚域影响的钢桁梁桥空间受力计算分析[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(5): 8—14.

HUANG Y H, WANG R H, RAO R. The calculation and analysis of the spatial mechanical behavior for steel truss bridge considering the effect of integral joint rigid zone [J]. China Railway Science, 2012, 33(5): 8—14. (In Chinese)

[7] 杨咏昕, 陈艾荣, 项海帆. 桥梁结构动力特性分析中节点刚性区问题的处理[J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 14—18.

YANG Y X, CHEN A R, XIANG H F. Problems of nodal rigid zone in modeling bridge structures for dynamic analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(1): 14—18. (In Chinese)

[8] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出

- 版社, 2014: 69—71.
TB 10621—2014 Code for design of high speed railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014: 69—71. (In Chinese)
- [9] ZHAI W M, XIA H, CAI C B, *et al.* High-speed train-track-bridge dynamic interactions—part I: theoretical model and numerical simulation [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2013, 1(1/2): 3—24.
- [10] XIA H, XU Y L, CHAN T H T. Dynamic interaction of long suspension bridges with running trains [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2000, 237(2): 263—280.
- [11] LI H, XIA H, SOLIMAN M, *et al.* Bridge stress calculation based on the dynamic response of coupled train-bridge system [J]. *Engineering Structures*, 2015, 99(5): 334—345.
- [12] 朱志辉, 朱玉龙, 余志武, 等. 96 m 钢箱系杆拱桥动力响应及行车安全性分析[J]. *中国铁道科学*, 2013, 34(6): 21—29.
ZHU Z H, ZHU Y L, YU Z W, *et al.* Analysis on the dynamic response and running safety of 96 m steel box tied arch bridge [J]. *China Railway Science*, 2013, 34(6): 21—29. (In Chinese)
- [13] 翟婉明, 夏禾. 列车-线路-桥梁动力相互作用理论与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 29—51.
ZHAI W M, XIA H. Train-track-bridge dynamic interaction theory and engineering applications [M]. Beijing: Science Press, 2011: 29—51. (In Chinese)
- [14] 朱志辉, 王力东, 龚威, 等. 基于改进迭代模型的车桥耦合系统竖向随机振动研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(11): 120—130.
ZHU Z H, WANG L D, GONG W, *et al.* Study of train-bridge coupled system vertical random vibration based on improved iteration model [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2016, 43(11): 120—130. (In Chinese)
- [15] LOU P, ZENG Q Y. Formulation of equations of motion for a simply supported bridge under a moving railway freight vehicle [J]. *Shock & Vibration*, 2007, 14(6): 429—446.
- [16] LOU P, YU Z W, AU F T K. Rail-bridge coupling element of unequal lengths for analysing train-track-bridge interaction systems [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(4): 1395—1414.
- [17] 刘玮, 曲村. 高速铁路桥上有砟轨道轨枕选型方案研究[J]. *高速铁路技术*, 2011, 2(3): 38—42.
LIU W, QU C. Study on selection of sleeper for ballasted track on bridges of high-speed railway [J]. *Technology of High-Speed Railway*, 2011, 2(3): 38—42. (In Chinese)
- [18] 殷新锋, 刘扬, 彭晖, 等. 路面破损的桥梁在车辆作用下冲击系数分析[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(4): 531—538.
YIN X F, LIU Y, PENG H, *et al.* Impact factors of a bridge with poor road roughness under moving vehicular loads [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(4): 531—538. (In Chinese)
- [19] 朱志辉, 王力东, 杨乐, 等. 轨道不平顺短波分量对列车-简支梁桥耦合振动的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 53—60.
ZHU Z H, WANG L D, YANG L, *et al.* Effect of short-wavelength components in rail irregularity on the coupled dynamic responses of train and simple-supported bridge [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2016, 43(1): 53—60. (In Chinese)
- [20] 马利衡. 沪宁城际高速铁路振动及其对周围环境影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2014: 65—79.
MA L H. Research on vibration of Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway and its environmental impact [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2014: 65—79. (In Chinese)
- [21] 尹国安, 王海波. 一种钢-混组合桁架桥下弦杆节点极限承载力研究 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(4): 88—95.
YIN G A, WANG H B. Study on ultimate bearing capacity of steel-concrete composite truss bridge bottom-chord joints [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(4): 88—95. (In Chinese)