

考虑地震行波效应的高铁连续梁桥梁轨互制

闫斌, 戴公连, 魏标

(中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 为研究行波效应下高速铁路连续梁桥与无缝线路的非线性互制作用, 采用带刚臂的梁单元模拟梁体, 用非线性杆单元模拟梁轨间的互制作用, 建立了考虑纵向和竖向地震动行波效应的梁轨相互作用模型。以我国沪昆线上某(60+100+60)m连续梁桥为算例, 分析了轨道结构对梁体和墩台地震响应的影响, 研究了纵向和竖向行波效应下钢轨和墩台的受力特点。研究表明: 轨道的存在可提高系统基频, 降低连续梁桥地震响应; 但在地震动的行波效应下, 钢轨纵向力最大值可达一致激励下的1.2倍; 减小线路纵向阻力, 增加桥墩刚度可减小地震作用下的钢轨应力; 在检算钢轨时, 还应累计竖向行波效应对钢轨受力的影响。

关键词: 铁路桥梁; 无缝线路; 连续梁桥; 行波效应; 梁轨相互作用

中图分类号: U441.7

文献标识码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.05.016

Interaction between CWR and continuous beam bridge carrying high-speed railway under action of seismic traveling wave

YAN Bin, DAI Gong-lian, WEI Biao

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to study the nonlinear interaction between CWR (continuously welded rail) and continuous beam bridge carrying high-speed railway under traveling wave action, the beam element with rigid elements was used to simulate the beam and the nonlinear bar element was used to simulate the longitudinal interaction between the beam and tracks. A track-structure interaction model was established, considering the longitudinal and vertical seismic traveling wave effect. Taking a (60 + 100 + 60) m continuous beam bridge on Shanghai-Kunming line as an example case, the response analysis was carried out, it was shown that the track makes an impact on the seismic response of the beam and pier. The force characteristics of the track and pier were studied under the longitudinal and vertical traveling wave action. The results showed that the track can raise the system natural frequencies and reduce the seismic response of the continuous beam bridge; the maximum longitudinal stress in the track under seismic traveling wave action can be up to 1.2 times of that under uniform excitation; when calculating the track stress, the impact of the vertical traveling wave effect should be also considered.

Key words: railway bridges; continuously welded rail (CWR); continuous beam bridge; traveling wave effect; track-structure interaction

较之于普通铁路桥, 高速铁路桥对平顺性要求更高, 桥梁刚度更大, 其梁轨互制问题成为桥梁和轨道设计的重要课题之一。而对于地震作用下的梁轨相互作用, 国内外研究相对较少^[1-4]。既有研究中, 有的未考虑梁轨之间的非线性作用, 有的研究对象仅为联络线桥, 研究的桥型多为简支梁桥, 且均未考虑行波效应的影响。

本文采用带刚臂的梁单元模拟梁体, 用非线性杆单元模拟梁轨接触, 采用大质量法考虑地震动的非一致激励, 以沪昆高速铁路线上某(60+100+60)m大跨度连续梁桥为算例, 建立了考虑行波效应的无缝线路与连续梁桥一体化模型。分析了在纵向和竖向非一致激励下, 轨道、梁体和桥梁制墩的受力特点, 并对相关参数进行了敏感性分析。

1 考虑行波效应的梁轨模型及计算参数

1.1 非一致激励的梁轨相互作用模型

假设轨道横向与桥梁不发生相对位移, 竖向采用

线性弹簧模拟扣件竖向刚度,纵向采用截面和单元长度均为1的双线性杆单元模拟梁轨非线性作用。竖向无载时,无砟轨道线路阻力参照式(1)取值^[5]:

$$r = \begin{cases} 24u & u \leq 2 \\ 48 & u > 2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, r (kN/m)为线路纵向阻力, u (mm)为梁轨相对位移。

在桥梁范围外各模拟200 m路基上的钢轨,以减小边界条件的影响^[6]。

采用该模型计算单线50 m简支梁桥上有砟轨道纵向力,与相关文献的实验数据对比,钢轨纵向力误差为1%~4%,梁轨相对位移误差为1%,证明该模型可较为准确地模拟梁轨相互作用^[7]。

在计算地震作用下结构的动力响应时,采用多点激励的大质量法:释放桥墩支承点和路基本在激励方向上的约束,在各点附加一个大质量单元(其质量 M_L 取为结构总质量的10e6倍),在支承点和路基本上施加动力时程 P_b 以模拟基础运动^[8-9]。

$$P_b = M_L \ddot{u}_g \quad (2)$$

式中, \ddot{u}_g 为地震动加速度。

建立的梁轨相互作用模型见图1。

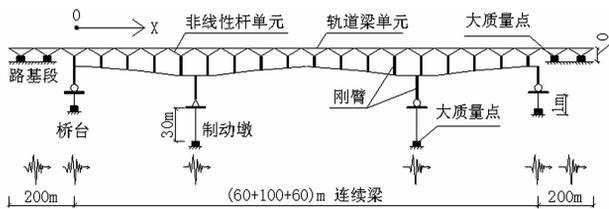


图1 本文建立的有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.2 工程算例及计算参数

以沪昆高速铁路线上某(60+100+60)m大跨度连续箱梁为算例,桥面宽12.2 m,跨中合拢段梁高4.53 m。桥上铺设双线无砟轨道,钢轨采用60 kg/m轨,线路纵向阻力按式(1)取值,二期恒载130 kN/m,桥墩为圆端性RC墩,在计算时,设桥台高1 m,桥墩高为30 m,墩底固结,见图1。

水平地震波选用El Centro波和天津波,分别对应三类场地和四类场地,竖向地震波按水平地震波的65%计^[10]。在计算行波效应时,仅考虑不同支承点输入时间上的差异,路基本采用与相邻桥台处相同的激励,视波速取为1 000 m/s。

阻尼比 h 为0.05, Rayleigh阻尼系数 α 和 β 按式(3)取值:

$$\alpha = 2h \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}, \beta = 2h \frac{1}{w_1 + w_2} \quad (3)$$

其中 w_1 和 w_2 为第一阶和对结构纵向或竖向振型贡献最大的一阶频率。

2 轨道结构对桥梁地震响应的影响

考虑和不考虑轨道时,分别对结构进行模态分析,前10阶自振频率及振型特征见表1。

表1 考虑与不考虑轨道时系统的自振特性

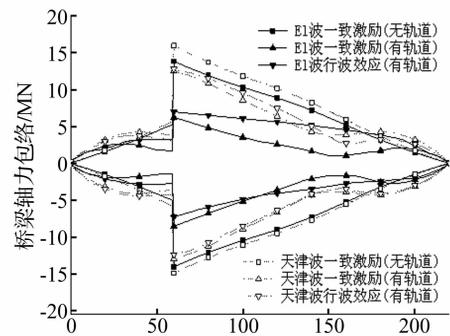
Tab. 1 Dynamic characteristic with and without considering track

阶数	不考虑轨道时		考虑轨道时	
	频率/Hz	振型特征	频率/Hz	振型特征
1	0.570	墩梁纵漂	0.997	墩梁纵漂
2	1.106	梁横弯	1.104	梁横弯
3	1.537	梁对称横弯	1.540	梁对称横弯
...
8	3.863	梁竖弯	3.863	梁竖弯
9	5.257	梁反对称横弯	4.084	轨道对称横弯
10	5.553	梁反对称横弯	4.090	轨道横弯

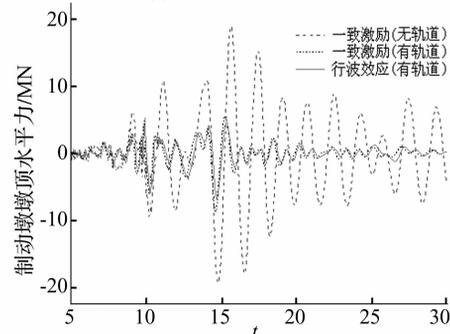
注:在模态分析时,不考虑杆单元的非线性。

由表1可知,轨道的存在大大提高了系统一阶自振频率。而轨道在第9阶时出现了局部振动,说明轨道对于结构的高阶振动较为敏感。

分别计算El Centro波和天津波(加速度峰值均调整为0.3 g)的水平向一致激励作用下桥梁的轴力和墩顶水平力,由于地震动的频谱特性,梁轨系统对接近其



(a) 梁轴力包络图



(b) 制动墩墩顶水平力时间历程曲线

图2 轨道对桥梁地震响应的影响

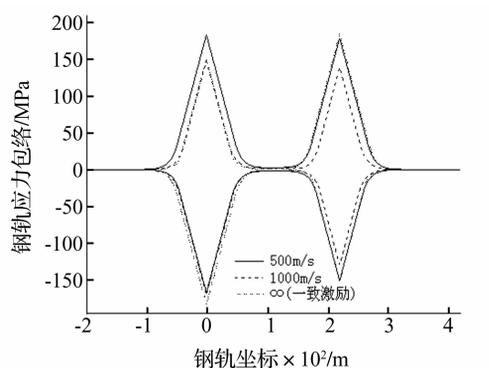
Fig. 2 Impact of track on seismic response of bridge

自振频率的天津波较为敏感。

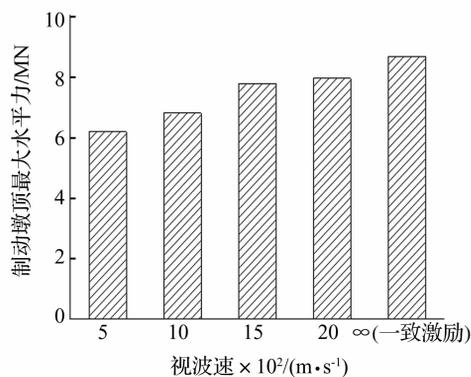
考虑轨道时,梁体和桥墩的受力均有明显下降,证明轨道对地震动能有一定的耗散作用。图2(a)显示了两种地震波一致激励下,轨道对连续梁轴力的影响,图2(b)为 El Centro 波一致激励下,制动墩墩顶水平力的时程曲线。

3 纵向行波效应下的梁轨相互作用

为考察纵向(顺桥向)行波效应对梁轨受力的影响,分别计算视波速为 500 ~ 2 000 m/s 时的钢轨应力及制动墩顶水平力,与一致激励(相当于视波速为 ∞ 时)下的地震响应作对比,见图3(El Centro 波,下同)。



(a) 钢轨纵向应力包络图



(b) 制动墩墩顶最大水平力

图3 视波速对梁轨受力的影响(纵向激励)

Fig.3 Impact of apparent velocity on beam and track force

地震作用下,钢轨纵向力在连续梁两端桥台处取得最大值。考虑行波效应时,钢轨纵向力有所提高,增幅约为20%,随着视波速的降低,钢轨纵向力略有减小。行波效应对制动墩的受力是有利的,随着视波速的降低,制动墩所受水平力也降低。

4 设计参数对纵向行波效应的影响

行波效应分析的主要设计参数除前面涉及的地震波类型、视波速外,还包括线路纵向阻力及下部结构刚度等。

4.1 线路阻力的影响

为比较线路阻力对梁轨系统地震响应的影响,参照文献[5],将有砟轨道的线路阻力按式(4)取值:

$$r = \begin{cases} 15u & u \leq 2 \\ 30 & u > 2 \end{cases} \quad (4)$$

与无砟轨道阻力模型的计算结果对比见图4。

随着线路阻力的增加,梁轨之间相互作用增强,轨道将从桥梁上获得更多的动能,使得钢轨受力有大幅度的增加。对本桥而言,行波效应下无砟轨道最大应力约为有砟轨道的2.08倍。

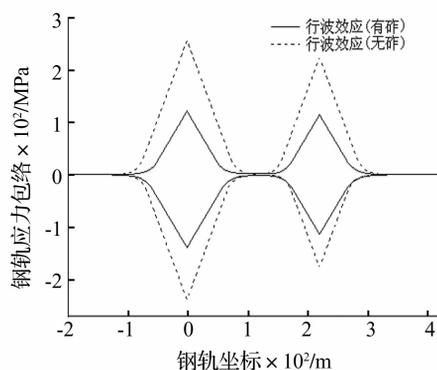


图4 线路阻力对钢轨纵向力的影响

Fig.4 Impact of track resistance on track stress

对制动墩而言,桥上铺设无砟轨道时其所受水平力略有减小,为7 956 kN,约为铺设有砟轨道时的92%。

4.2 桥墩刚度的影响

为考察桥墩刚度对行波效应下梁轨地震响应的影响,假设桥墩截面特性保持不变,仅将桥墩高度进行调整,调整幅度为10 ~ 50 m。分析结果显示:随着桥墩刚度的增大,制动墩相邻桥台处钢轨纵向力有所降低,墩顶水平力增大。图5显示了桥墩高度对行波效应下钢轨纵向力的影响。

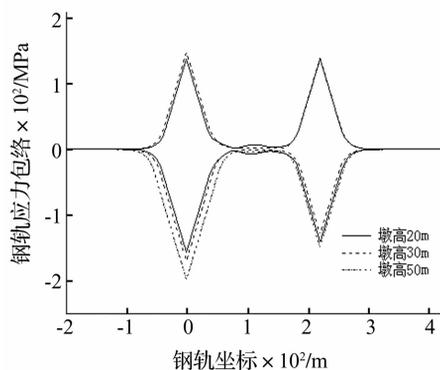


图5 桥墩高度对钢轨应力的影响

Fig.5 Impact of pier height on track stress

5 竖向行波效应下的梁轨相互作用

现有研究中,在检算墩台受力时,通常仅对桥梁进行纵向一致激励^[3,11]。本文还考虑了竖向地震对梁轨互制作用的影响。

对制动墩受力而言,竖向地震的行波效应与一致激励下计算结果相差不大,均为 1 000 kN 左右。但竖向地震对钢轨应力影响较大。图 6 列举了在视波速为 500 ~ 1 500 m/s 时竖向地震波产生的钢轨纵向力。

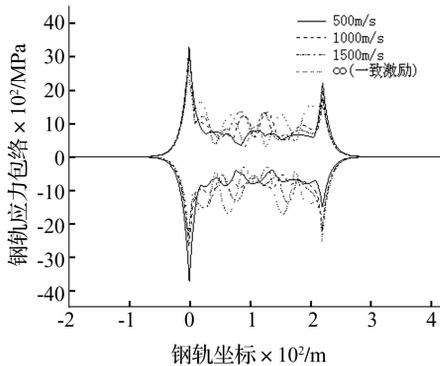


图 6 竖向行波效应对钢轨纵向力的影响

Fig. 6 Impact of vertical traveling effect on track stress

随着视波速的降低,钢轨纵向力有大幅度增加,最大可达纵向行波效应激励下的 20%,因此,在检算钢轨强度和稳定性时,应考虑竖向行波效应的影响。

6 结论

对于铺设无缝线路的高速铁路连续梁桥,可采用本文所述的方法分析行波效应下的梁轨地震响应。

轨道的存在可一定程度上提高系统基频,起到耗能作用,降低桥梁和墩台的地震响应。

与一致激励相比,纵向行波效应作用下,钢轨纵向力最大值可增加 20%,连续梁制动墩受力有所减小。当线路阻力减小,桥墩刚度增大时,可减少行波效应下的钢轨受力。

在检算墩台和钢轨时,除应计算纵向地震波的行波效应外,还应考虑竖向地震波行波效应的影响。

参考文献

- [1] Maragakis E, Douglas B M, Chen Q, et al. Full-resonance tests of a railway bridge [C]//Structures Congress-proceedings 1, ASCE, 1996: 183 - 190.
- [2] Davis S G. Controlling track-structure interaction in seismic conditions [C]//Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways, London: Taylor & Francis Group, 2007: 29 - 35.
- [3] 黄 艳. 考虑轨道约束的铁路桥梁抗震研究 [D]. 北京: 北方交通大学, 2003.
- [4] 翟婉明, 蔡成标, 王开云. 高速列车 - 轨道 - 桥梁动态相互作用原理及模型 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 132:137.
ZHAI Wan-ming, CAI Cheng-biao, WANG Kai-yun. Mechanism and model of high-speed train-track-bridge dynamic interaction [J]. China civil engineering journal, 2005, 38(11): 132:137.
- [5] 铁路无缝线路设计规范(送审稿)[S]. 北京:铁道部经济规划研究院, 2008.
- [6] Yan B, Dai G I, Zhang H P. Beam-track interaction of high-speed railway bridge with ballast track [J]. Journal of Central South University, 2012. 19(5):1447 - 1453.
- [7] 闫 斌, 戴公连. 高速铁路斜拉桥上无缝线路纵向力研究 [J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 83 - 87.
YAN Bin, DAI Gong-lian. CWR Longitudinal force of cable-stayed bridge on high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 83 - 87.
- [8] 周国良, 李小军, 刘必灯, 等. 大质量法在多点激励分析中的应用误差分析与改进 [J]. 工程力学, 2011, 28(1): 48 - 54.
ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun, LIU Bi-deng, et al. Error analysis and improvements of large mass method used in multi-support seismic excitation analysis [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 48 - 54.
- [9] 杨庆山, 刘文华, 田玉基. 国家体育场在多点激励作用下的地震反应分析 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 36 - 41.
YANG Qing-shan, LIU Wen-hua, TIAN Yu-ji. Response analysis of national stadium under specially variable earthquake ground motions [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1): 36 - 41.
- [10] GB50111 - 2006, 铁路工程抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [11] Union Internationale des Chemins de fer. UIC Code 774 - 3R, Track/bridge interaction. Recommendations for calculations [S]. Paris: International Union of Railways, 2001.