

文章编号: 1001-4632 (2006) 03-0008-05

高速铁路桥上无缝线路纵向附加力研究

徐庆元¹, 陈秀方¹, 李树德²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075; 2. 铁道第三勘察设计院, 天津 300142)

摘要: 采用实体单元模拟桥梁及桥梁墩台、空间梁单元模拟钢轨、弹簧单元模拟桥梁与墩台及轨道之间的连接, 建立梁—轨纵向相互作用三维有限元空间力学模型。以丰沙线永定河单线铁路桥梁、秦沈线沙河双线铁路桥梁对其进行计算验证。以秦沈客运专线 32 m 多跨双线整孔简支箱型梁桥为例进行纵向力分析, 研究结果表明: 列车在桥上双线对开, 钢轨挠曲附加力有明显增大; 列车在桥上单线制动, 四根钢轨的制动附加力有较大的差别; 列车在桥上双线对向制动, 相比单线制动, 钢轨制动附加力有一定程度增大, 但增大得并不多。

关键词: 高速铁路; 桥上无缝线路; 梁—轨纵向相互作用; 纵向附加力

中图分类号: U443.312; U213.9 **文献标识码:** A

无缝线路技术是一项现代化铁路技术, 具有良好的运营功能, 并可取得明显的经济效益。桥上铺设无缝线路, 可降低桥梁结构的振动与噪音, 提高列车运行的平稳性和安全性。桥上无缝线路已在国内外高速铁路桥梁上得到广泛采用。

国内外专家学者对桥上无缝线路进行了较多的研究^[1-15], 研究所用力学模型大多为平面模型, 但高速铁路桥较多采用箱型梁及板式桥墩, 其桥梁及墩台均具有很强的空间性, 高速列车在桥上单线行车(制动)或双线对向行车(制动), 荷载也具有空间性, 平面力学模型不能很好反映梁—轨纵向相互作用的空间力学特性, 有较大的局限性。文献[14, 15]虽从整体上考虑了双线铁路多轨线相互作用, 但模型没有考虑墩台的空间性, 也有一定的局限性。

本文利用有限元软件 Ansys, 建立梁—轨纵向相互作用模型。先在 AutoCAD 环境下绘制桥梁各断面图(二维图), 利用其内嵌的编程语言 VBA 结合 Ansys 进行二次开发, 根据各断面图自动生成梁体、桥墩、桥台的三维模型, 自动完成三维有限元力学模型(包括钢轨单元、轨枕单元及各种连接单元)的生成、荷载施加(约束条件施加)、方程求解及结果后处理等过程^[16]。

收稿日期: 2005-03-31

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2000G41)

作者简介: 徐庆元(1972—), 男, 湖北武汉人, 博士。

1 梁—轨纵向相互作用有限元空间力学模型

高速铁路桥梁空间力学模型有空间梁单元模型、板单元模型及实体单元模型, 笔者曾用空间梁单元及刚臂模拟桥梁, 用板单元模拟桥梁墩台, 对梁—轨纵向相互作用机理进行了研究。在计算中发现, 对于高速铁路双线箱形梁桥, 一方面空间梁单元桥梁模型不能很好地反映高速铁路箱形梁桥的空间力学特性, 用空间梁单元桥梁模型计算挠曲力有较大的误差; 另一方面, 横向刚臂刚度很大, 与横向刚臂连接各点具有几乎相同的转角, 导致箱形梁顶板同一断面各点纵向位移几乎相等, 不能很好反映双线铁路桥梁的梁—轨纵向相互作用。笔者在对空间板单元和实体单元桥梁模型进行的比较研究中发现, 采用空间板单元桥梁模型在速度上仅比实体单元桥梁模型快 2 倍, 且实体单元桥梁模型能更好反映梁体的空间力学特性, 因此本文采用实体单元模拟桥梁。同样的理由, 本文亦采用实体单元模拟桥梁墩台。梁单元可以很好模拟钢轨受力特性, 本文采用空间梁单元模拟钢轨。

对于桥梁支座约束的模拟, 用 Ansys 的自由

度耦合功能可方便地实现,但这样不能直接得到作用在墩台上的纵向作用力。本文模型采用在支座处设置纵向、竖向及横向线性弹簧单元,用以连接桥梁与墩台,可直接得到作用在墩台上的纵向作用力。

对于固定支座,纵向、竖向及横向是固定约束,弹簧单元的刚度系数取为充分大数(经过数值试验,当约束线刚度大于 $10^{11} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,结果趋于收敛,可满足计算精度的要求,但刚度太大,有可能出现数值稳定性问题,本文固定约束线刚度采用 $10^{14} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$)。对于活动支座,竖向及横向是固定约束,弹簧单元的刚度系数仍取 $10^{14} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$,但纵向没有约束,纵向刚度取为零。对于橡胶支座,则为其实际刚度。通过对支座处纵向、竖向及横向连接弹簧刚度系数的不同设置,该模型可以适用简支梁桥、连续梁桥、简支梁—连续梁组合桥、刚构桥等不同类型桥梁。若要考虑支座摩擦阻力的影响,可用Ansys提供的接触单元模拟这种工况。

类似于桥梁支座模拟,亦用纵向、竖向及横向弹簧单元模拟线路与桥梁相互作用。不过,线路纵向阻力模拟采用的是理想弹塑性线路纵向阻力模型^[16],需要用Ansys提供的非线性弹簧单元模拟。

表1 文献[17]与本文空间力学模型计算结果比较表

	A 1号墩	B (1号梁梁轨位移相等点)	C 2号墩	D (2号梁梁轨位移相等点)	E 3号墩
钢轨纵向附加力	文献[17]/(kN·轨 $^{-1}$)	25.677	-53.799	68.819	-51.943
	本文模型/(kN·轨 $^{-1}$)	24.978	-52.056	68.082	-48.598
	本文模型/文献[17]	0.97	0.97	0.99	0.94
梁轨位移相等点 距固定支座距离	文献[17]/cm		1.353		1.910
	本文模型/cm		1.342		1.899.5
	本文模型/文献[17]		0.99		0.99

由表1可知,两者比较接近,证明了本文力学模型能够正确模拟梁—轨纵向相互作用。

2.2 验证2

秦沈客运专线沙河特大桥是双线铁路桥梁,中南大学曾进行了试验研究。“先锋号”列车以 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度通过时,实测双线箱梁梁体有载侧跨中挠度为 0.72 mm ,无载侧跨中挠度为 0.5 mm ,左右侧的跨中挠度比为 0.7 ,对此工况进行理论计算。图1为有载侧跨中挠度时程曲线,图2为无载侧跨中挠度时程曲线,有载侧跨中挠度最大值为 0.84 mm ,无载侧跨中最大挠度为 0.54 mm ,挠度比为 0.65 。

根据文献[5]的研究,桥外路基上钢轨长度 $L_1 > L_0 + 40 \text{ m}$ (L_0 为各孔梁单孔跨度的平均值)时,可满足计算精度的要求。参照文献[13],长钢轨在路基上的长度取为 300 m ,以减少边界条件对计算精度的影响。

无碴轨道作为有碴轨道的一种特殊形式,区别在于没有道床,在实际计算时,可以将道床纵向阻力取为充分大(可取为扣件纵向阻力10倍),此时计算结果趋向于仅考虑扣件纵向阻力模型结果。因此,本文力学模型既适用于有碴轨道,也适用于无碴轨道,具有广泛的通用性。

2 模型验证

2.1 验证1

丰沙线永定河桥是单线铁路桥梁,铁道科学研究院曾在此桥进行了梁—轨纵向相互作用试验研究,文献[17]以此桥作为算例,并用该桥的实测数据对模型进行了验证。

该桥是单线桥,荷载是对称的,桥梁宽度较小,空间力学特性不显著,用本文空间模型计算(仅考虑二股钢轨),计算结果及与文献[17]比较见表1。

该桥是单线桥,荷载是对称的,桥梁宽度较小,空间力学特性不显著,用本文空间模型计算(仅考虑二股钢轨),计算结果及与文献[17]比较见表1。

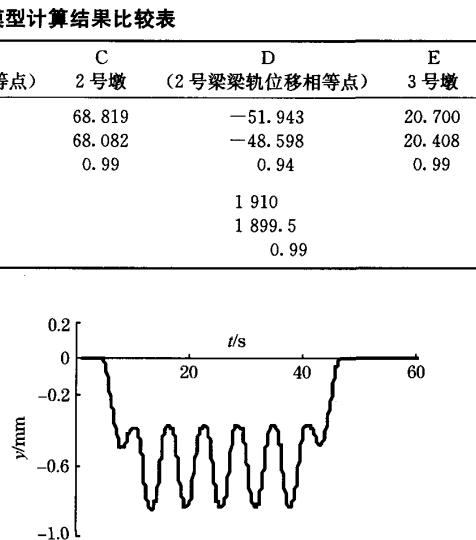


图1 有载侧跨中挠度时程曲线

对比文献[18]实测值及本文理论计算结果,理论与实测无论是波形、数值还是有载侧及无载侧跨中挠度比都比较接近,证明了以实体单元模拟高

速铁路箱形梁空间受力特性的合理性与正确性。

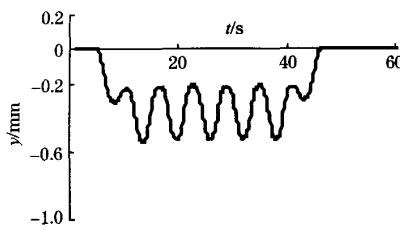


图2 无载侧跨中挠度时程曲线

3 计算算例

3.1 计算条件

秦沈客运专线多跨双线简支箱型梁桥，桥梁跨度32 m，跨数10跨，钢轨采用60 kg型钢轨，采用理想弹塑性线路纵向阻力模型，每根钢轨的线路纵向阻力在2 mm达最大值，其最大值为110 N·cm⁻¹，桥台双线纵向刚度取6 000 kN·cm⁻¹，桥墩双线纵向刚度取1 000 kN·cm⁻¹。竖向荷载采用ZK荷载，轨面制动力率取为0.164。

列车从进桥到出桥全过程中，梁—轨纵向相互作用力在每一时刻都不相同。对于单线行车，考虑列车在桥上制动、运行2种工况，加载长度取为列车的全长，并假设列车的初始位置为车头位于0号桥台处，考虑荷载的移动性，每一步长移动1个钢轨单元长度，以荷载尾部出桥作为计算终止条件。

双线运行情况十分复杂，与两列车上桥先后时间有关，本文仅考虑两列车同时上桥（双向对开或双线对向制动）这一工况，考虑荷载的移动性，每一步长移动1个钢轨单元长度，以荷载尾部出桥作为计算终止条件。

3.2 计算结果图示

计算所得的各种工况下钢轨挠曲附加力及制动附加力包络力图见图3—图10。

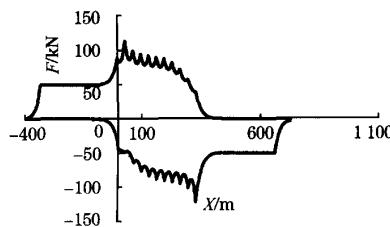


图3 单线制动时钢轨纵向附加力包络力（有载侧）

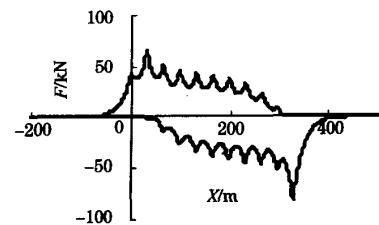


图4 单线制动时钢轨纵向附加力包络力（无载侧）

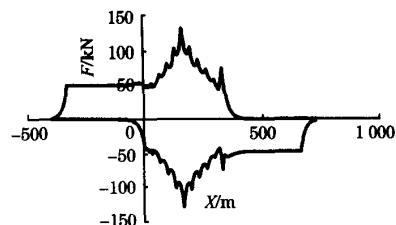


图5 双线对向制动时钢轨纵向附加力包络力（0号台上桥）

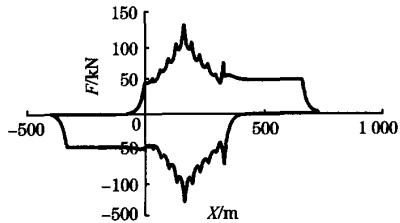


图6 双线对向制动时钢轨纵向附加力包络力（1号台上桥）

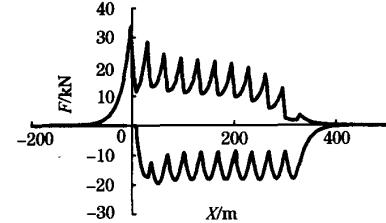


图7 单线运行时钢轨纵向附加力包络力（有载侧）

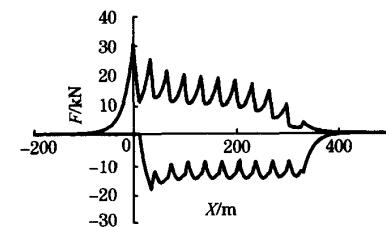


图8 单线运行时钢轨纵向附加力包络力（无载侧）

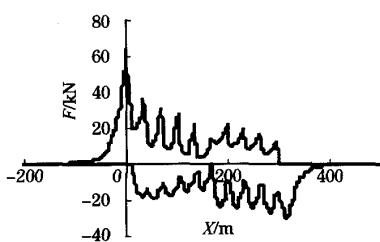


图9 双线对向运行时钢轨纵向附加力
(0号台至1号台运行侧钢轨)

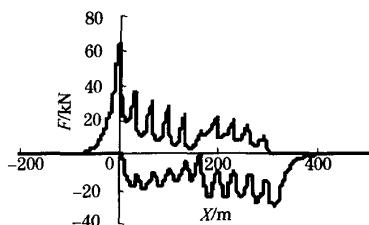


图10 双线对向运行时钢轨纵向附加力
(1号台至0号台运行侧钢轨)

3.3 计算结果分析

列车在双线整孔箱形梁桥上单线运行, 钢轨挠曲附加力较小, 这主要是由于高速铁路双线整孔箱梁具有很高的竖向刚度, 梁的挠曲变形小的缘故。由于一线有载一线无载, 荷载具有不对称性, 四根钢轨的挠曲附加力有所差别, 但差别不大。主要原因是双线箱梁具有很强的整体性, 尽管荷载偏心, 每股轨线下桥梁垂向位移有较大的差别, 但同一断面梁顶面各点的纵向位移近乎相等, 而由梁顶面纵向位移引起的挠曲力也很接近。

列车在桥上双线对开, 相比单线行车, 最大钢

轨挠曲附加力由 33.3 kN 增至 63.9 kN, 增加了 91%, 几乎增大了 1 倍, 主要是双线对开条件下垂向荷载增大的缘故。

列车在双线整孔箱形梁桥上单线制动, 四根钢轨的制动附加力有较大的差别, 主要是制动力引起桥墩较大纵向位移, 但桥墩是一空间结构, 在偏心荷载作用下, 桥墩各点的纵向位移并不相等, 桥墩纵向移动带动梁纵向位移, 各线梁的纵向位移也不相等, 从而引起各线钢轨制动附加力有较大差别。

列车在桥上双线对向制动, 钢轨制动附加力有一定程度增大, 最大钢轨制动附加力由 121 kN 增至 130 kN, 增加了 7.5%, 最大钢轨制动附加力在两列车交会处(桥梁中部), 而单线制动最大钢轨制动附加力则在靠近桥台附近桥墩处。

4 结 论

1) 高速铁路桥梁及其墩台具有很强的空间力学特性, 列车在桥上单线运行、单线制动、双线对向运行、双线对向制动, 荷载是不对称的。本文建立的梁—轨纵向相互作用三维有限元空间力学模型能够较好反映各种实际工况, 具有广泛的适用性。

2) 列车在桥上双线对开, 其最大钢轨挠曲附加力有明显增大, 主要是双线对开条件下垂向荷载增大的缘故。

3) 列车在双线整孔箱形梁桥上单线制动, 四根钢轨的制动附加力有较大的差别; 列车在桥上双线对向制动, 相比单线制动, 钢轨制动附加力有一定程度增大, 但增大得并不多。

参 考 文 献

- [1] Karsten G, Wolfgang G, Richard S. Zur Messwertgestützten Ermittlung der Verteilung der Brems- und Anfahrkrafte an der Eisenbahnhochbrücke Rendsburg [J]. Stahlbau, 2002, 71 (10): 735—747.
- [2] Carla E, Martin K. Langskraftabtragung bei Eisenbahnbrücken unter Temperatureinwirkung [J]. Eisenbahningieur, 2001, 52 (2): 36—40.
- [3] Ladislav F. Thermal Interaction of Long Welded Rails with Railway Bridges [J]. Rail International, 1985, 16 (3): 5—24.
- [4] Czyczula W, Solkowski J, Towpik K. Interaction between CWR Track and Bridges in Longitudinal Direction [J]. Archives of Civil Engineering, 1997, 43 (1): 51—69.
- [5] 黎国清, 庄军生, 张士臣. 高速铁路桥上无缝线路附加力的研究 [J]. 中国铁道科学, 1997, 18 (3): 15—23.
- [6] 蒋金洲. 桥上无缝线路钢轨附加纵向力及其对桥梁墩台的传递 [J]. 中国铁道科学, 1998, 19 (2): 67—75.
- [7] 杨梦蛟, 邢建鑫. 轨道结构与桥梁共同作用力学计算模型的研究 [J]. 中国铁道科学, 2001, 22 (3): 57—62.
- [8] 阴存欣, 庄军生, 潘家英. 梁桁组合结构材料非线性的一种简捷算法与高速铁路桥线纵向相互作用非线性分析 [J]. 中国铁道科学, 1998, 19 (2): 35—43.

- [9] 徐庆元, 陈秀方. 小阻力扣件桥上无缝线路附加力 [J]. 交通运输工程学报, 2003, 3 (1): 25—30.
- [10] 徐庆元, 陈秀方. 连续梁桥上无缝线路附加力研究 [J]. 中国铁道科学 [J], 2003, 24 (3) : 58—62.
- [11] 李宏年. 列车制动力荷载及对桥梁作用机理的研究 [D]. 北京: 北方交通大学, 2001.
- [12] 王锐锋, 李宏年. 铁路桥梁列车制动力荷载研究 [J]. 北方交通大学学报, 2003, 27 (1): 63—67.
- [13] 蔡成标. 高速铁路特大跨度桥上无缝线路纵向附加力计算 [J]. 西南交通大学学报, 2003, 38 (5): 609—614.
- [14] 田 振, 吴 讯. 高架桥纵向力分析模型 [J]. 城市轨道交通研究, 2002, 5 (1): 28—31.
- [15] 汪海波, 吴 迅. 城市轨道交通桥梁无缝线路纵向力的空间一体化模型分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6 (1): 33—37.
- [16] 徐庆元. 高速铁路桥上无缝线路纵向附加力三维有限元静力与动力分析研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [17] 广钟岩. 铁路无缝线路 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [18] 铁道科学研究院. 秦沈客运专线第二次综合试验报告 [R]. 北京: 铁道科学研究院, 2002.

Study on the Additional Longitudinal Forces Transmission between Continuously Welded Rails and High-Speed Railway Bridges

XU Qing-yuan¹, CHEN Xiu-fang¹, LI Shu-de²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;
2. The Third Railway Survey and Design Institute, Tianjin 300142, China)

Abstract: A three-dimensional finite element spatial mechanics model for calculating the additional longitudinal force transmission between continuously welded rails and high-speed railway bridges is established by using solid element to simulate bridges as well as pier and abutment, using space beam element to simulate rails, using spring element to simulate the link between bridges and tracks as well as pier and abutment. By using the experimental results of Yongdinghe single-track railway bridge on Fengtai—Shacheng railway as well as the results of Shahe double-track railway bridge on Qinhuangdao—Shenyang railway, the author verifies the model. Furthermore, taking a multi-span 32 m simple supported double-track box girder on Qinhuangdao—Shenyang passenger special line as an example, the author made a study on the additional longitudinal force caused by different load cases with the model. The calculation results show that: the winding additional longitudinal force increases significantly when two trains pass the bridge with the opposite direction; the rail braking additional longitudinal forces of four rails are of some discrepancy, when only one train passes the bridge; comparison with the load case of only one train braking on the bridge, when two trains brake on the bridge with the opposite direction, the rail braking additional longitudinal force increases, but the increase is slight.

Key words: High-speed railway; Continuously welded rails on bridge; Girder—rail longitudinal interaction; Additional longitudinal force

(责任编辑 刘卫华)