

文章编号:1671-1637(2013)05-0027-06

铁路斜拉桥上无缝线路纵向力规律分析

王 平, 刘 浩, 魏贤奎, 肖杰灵

(西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:运用梁轨相互作用原理,建立了斜拉桥上无缝线路纵向力计算模型,编制了计算软件,以一座铁路常用双塔钢桁斜拉桥为例,研究了斜拉桥上无缝线路纵向力规律。分析结果表明:可将斜拉桥简化为跨中设置固定支座的连续梁进行钢轨伸缩力计算;计算钢轨挠曲力时,可在斜拉桥主跨及其邻跨上布置荷载,或仅在斜拉桥主跨上布置荷载,而且不必考虑列车入桥方向的变化;铁路斜拉桥需设置速度锁定器以有效限制列车制动作用下的主梁纵向位移,减小线路受力变形;斜拉桥上铺设无缝线路应采用梁轨相互作用法以精确计算钢轨断缝值。

关键词:铁道工程;斜拉桥;梁轨相互作用;无缝线路;纵向力;CSBCWR 软件

中图分类号:U213.9

文献标志码:A

Analysis of longitudinal force regulation for CWR on railway cable-stayed bridge

WANG Ping, LIU Hao, WEI Xian-kui, XIAO Jie-ling

(Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Based on the theory of track-bridge interaction, the calculation model of longitudinal force for continuous welded rail(CWR) on cable-stayed bridge was established, and the related calculation software was compiled. Taking a double-tower steel truss cable-stayed bridge commonly used in the railway as an example, the longitudinal force regulations of CWR were analyzed. Analysis result shows that the cable-stayed bridge can be simplified as a continuous beam with fixed bearing in the middle to calculate rail expansion forces. Rail bending forces can be calculated under the conditions of loads laid on main span and its adjacent span or the separate main span, and the direction change of train needn't be considered. Speed locking devices should be set on railway cable-stayed bridge to effectively limit the main beam longitudinal displacement under train braking force, and rail deformation decreases simultaneously. The method of track-bridge interaction should be used for cable-stayed bridge with CWR to calculate rail broken gap value accurately. 10 figs, 13 refs.

Key words: railway engineering; cable-stayed bridge; track-bridge interaction; continuous welded rail; longitudinal force; CSBCWR software

Author resume: WANG Ping(1969-), male, professor, +86-28-87601210, wping@home.swjtu.edu.cn.

收稿日期:2013-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51078320);西南交通大学 2012 年博士生创新基金项目

作者简介:王 平(1969-),男,湖北宜昌人,西南交通大学教授,从事高速、重载轨道结构及动力学研究。

0 引 言

高速铁路修建以前,中国桥上无缝线路主要铺设在普通混凝土简支梁及连续梁上,而近年来,随着铁路建设的发展,大量新型桥梁结构在高速铁路上得到应用,较具有代表性的如拱桥、斜拉桥等,这些新型桥梁在温度、列车及制动荷载作用下的纵向变形规律均与普通桥梁不同,因而与线路间的纵向相互作用规律也发生了变化。

目前,国内外对普通桥上铺设无缝线路技术进行了较多的研究,徐庆元等建立了空间三维模型,对简支梁与连续梁桥上无缝线路静态与列车动力作用下的受力变形进行分析^[1-2];张建分析了刚构桥上钢轨纵向力传递规律^[3];李秋义等计算了桥墩两侧温差引起的墩顶位移,分析了桥墩温差引起的简支梁桥上钢轨附加力规律^[4];魏贤奎等介绍了基于梁轨相互作用原理开发的普通桥上无缝线路计算软件^[5];Ruge 等考虑荷载加载过程,模拟了实际的梁轨相互作用非线性变化过程^[6-7];李志辉通过优化分析,得出铁路 60 m 简支梁桥墩顶纵向水平线刚度的合理限值范围^[8];Battini 等考虑有砟轨道结构纵向非线性刚度,分析计算了简支梁桥上道砟层对结构振动的影响^[9]。在铁路斜拉桥铺设无缝线路研究方面,朱彬对一座钢箱混合梁斜拉桥无缝线路设计

方案进行了研究^[10];闫斌等对一座单塔预应力混凝土转体斜拉桥梁轨相互作用进行了分析^[11-12];赵卫华对斜拉桥上无缝线路设计及简化计算进行了研究^[13],但其计算模型中主梁采用纵向拉压杆单元模拟,忽略了结构体系的竖向耦合作用,不能直接计算钢轨挠曲力,同时也会增大其他工况结果的误差。

本文建立了铁路斜拉桥梁轨相互作用计算模型,编制了通用的计算软件,以一座铁路双塔钢桁斜拉桥为例,深入研究了线路纵向力规律。

1 纵向力计算模型及软件

1.1 计算模型

梁轨相互作用原理是分析桥上无缝线路纵向力产生的基础,以铁路上常用的下承式斜拉桥为例,典型的下承式斜拉桥上无缝线路的梁轨相互作用关系计算模型见图 1,系统结构特点如下:钢轨通过线路阻力与主梁下缘相互作用;主梁上缘与主塔墩通过斜拉索相互作用。不同计算工况下,线路纵向阻力作用于钢轨上时引起钢轨附加力,线路纵向阻力作用于主梁上时,通过斜拉索或纵向阻尼装置将力传至主塔墩上,引起主塔墩产生力和位移,钢轨、主梁、斜拉索及主塔墩是一相互作用的耦合系统,通过求解该系统的平衡位置,即可求得各部分的力和位移分布情况。图 1 中:F 为固定支座,M 为活动支座。

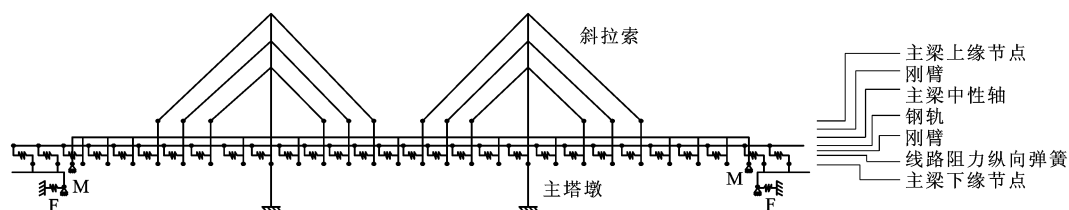


图 1 斜拉桥梁轨相互作用计算模型

Fig. 1 Calculation model of track-bridge interaction for cable-stayed bridge

计算模型中,主梁两端梁体可为任意跨度及跨度的简支梁、连续梁或连续刚构桥的组合;可以考虑单塔、双塔及多塔结构形式;可以考虑斜拉桥漂浮、半漂浮、塔梁固结及刚构等体系;斜拉索在计算模型中可任意布置;主塔墩结构形式通常不规则,可通过输入较多控制截面参数以准确建立;钢轨、轨条布置与阻力等参数可任意设置。

1.2 计算假定

由于斜拉桥结构的特殊性,除了《铁路无缝线路设计规范(送审稿)》中基本计算假定外,另需补充如下假定。

- (1)主塔墩墩底固结,不考虑基础的位移。
- (2)主塔墩只考虑纵向刚度,不考虑横向刚度及

抗扭刚度。

(3)斜拉索与主塔墩的连接点均在主塔墩中心线上。

(4)若有辅助墩,认为辅助墩竖向刚度足够大,可约束辅助墩处主梁的竖向位移。

(5)若主塔墩和主梁间设置有纵向阻尼装置,该装置在制动工况下视为纵向刚度无穷大的线性弹簧,列车制动力可通过该装置迅速传递至主塔墩。

1.3 计算软件

基于有限元理论,将图 1 中的计算模型按给定长度划分单元,将模型离散成有限个单元的集合体,采用 FORTRAN 语言和有限元软件 ANSYS 相结合的方法编制了斜拉桥上无缝线路纵向力计算软件

(简称 CSBCWR 软件),具体做法是利用 FORTRAN 语言编制的可执行程序“CSBCWR. EXE”读取参数输入文件“CSBCWR. IN”(该文件中包含了斜拉桥主梁结构、主塔墩布置、辅助墩布置、斜拉索布置、线路纵向阻力及工况设置等计算参数)中的数据,并对读入的数据进行预处理后生成一系列按约定格式排列的数据文件,利用基于 ANSYS 软件 APDL 语言二次开发的宏文件“CSBCWR. MAC”对上述生成的数据文件进行调用,随后便可进行建模、求解及结果输出。利用该软件可完成铁路斜拉桥上无缝线路的伸缩、挠曲、制动、断轨及相应组合工况的计算分析。

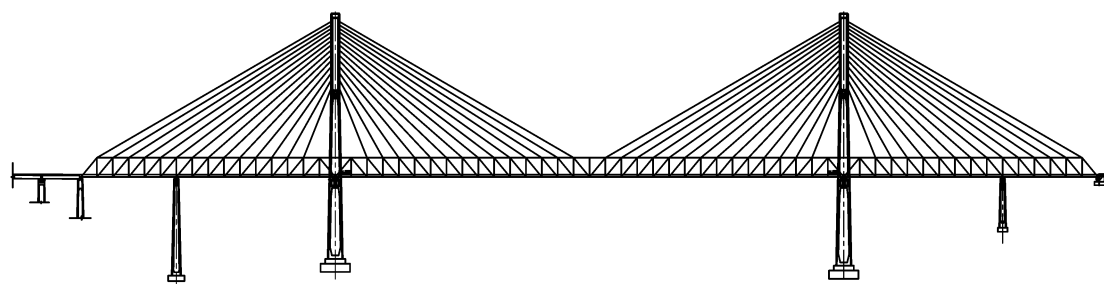


图2 桥梁布置

Fig. 2 Bridge arrangement

2.2 轨道设计资料

轨道采用 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 钢轨,材质为 U75V;全桥为单层碎石道床,道床厚度为 35 cm ,道床顶面宽度为 3.4 m ;弹条Ⅱ型扣件,采用Ⅲa型混凝土枕,每公里铺设 1 667 根;暂按铺设常阻力扣件进行无缝线路设计计算,线路纵向阻力无载取为 $15 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{轨}^{-1}$,有载取为 $24 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{轨}^{-1}$,极限位移均为 2 mm ;混凝土梁温差取为 15°C ,钢桁梁温差取为 25°C ,根据轨温设计资料,钢轨最大降温幅度为 42.2°C 。

2.3 桥梁参数

32 m 简支梁截面积为 $5.0 \text{ m}^2 \cdot \text{线}^{-1}$,截面惯性矩为 $7.00 \text{ m}^4 \cdot \text{线}^{-1}$;根据钢桁梁设计图,将钢桁梁等效为等截面梁体,截面积为 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{线}^{-1}$,截面惯性矩为 $34.00 \text{ m}^4 \cdot \text{线}^{-1}$;主塔墩墩底截面积为 $12.83 \text{ m}^2 \cdot \text{线}^{-1}$,截面惯性矩为 $150 \text{ m}^4 \cdot \text{线}^{-1}$,墩顶截面积为 $7.50 \text{ m}^2 \cdot \text{线}^{-1}$,截面惯性矩为 $80.00 \text{ m}^4 \cdot \text{线}^{-1}$ 。

3 纵向力规律研究

3.1 钢轨伸缩力分析

由于现有规范中没有关于主塔墩和斜拉索日温差的规定,考虑主塔墩和斜拉索日温差依次为 0 、 15 、 20 、 25°C 四种工况,钢轨伸缩力及桥面纵向位移

2 工程算例

2.1 桥梁概况

某新建铁路客货混运双线钢桁斜拉桥线路设计荷载为中-活载,旅客列车设计时速为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,货物列车设计时速为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。主桥采用 $(81+135+432+135+81) \text{ m}$ 半漂浮体系双塔钢桁梁斜拉桥,桥梁布置见图 2;主桥左侧为 8 跨 32 m 简支梁,主桥右侧直接进入路基段;每个主塔墩单侧各设 14 根斜拉索,每根斜拉索由 187 根直径为 7 mm 环氧涂层钢丝组成;主塔墩和主梁间设置有纵向阻尼装置(俗称“速度锁定器”)。

计算结果见图 3、4。

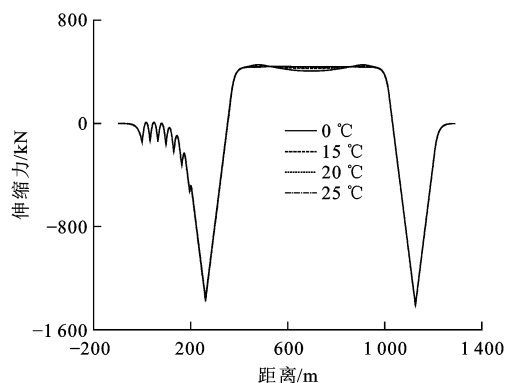


图3 钢轨伸缩力

Fig. 3 Rail expansion forces

由图 3 知,四种工况下钢轨最大伸缩力分别为 $1\,406.6$ 、 $1\,411.1$ 、 $1\,412.6$ 、 $1\,414.1 \text{ kN}$,说明主塔墩和斜拉索温差对钢轨伸缩力几乎无影响,这是因为钢轨伸缩力主要是由梁体的纵向伸缩位移引起的,而钢桁斜拉桥的斜拉索刚度和主梁刚度悬殊,主塔墩的伸缩变形又发生在竖向,主梁在温度作用下伸缩变形几乎不受斜拉索约束和主塔墩变形的影响,这可从图 4 中四种工况下的桥面纵向位移看出来,图 4 中主梁位移零点位于跨中附近,基于这一点,就可将该钢桁斜拉桥主桥简化为跨中设置固定支座等

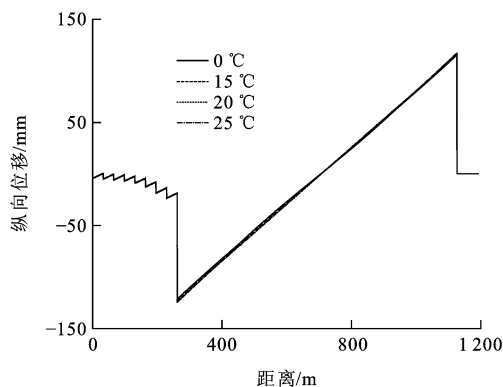


图 4 桥面纵向位移

Fig. 4 Bridge longitudinal displacements

长连续梁(图 5)进行钢轨伸缩力的计算,结果见图 6。

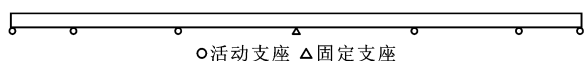


图 5 主桥简化

Fig. 5 Main bridge simplification

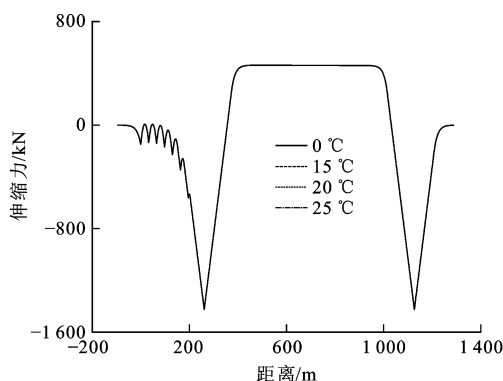


图 6 主桥简化钢轨伸缩力

Fig. 6 Rail expansion forces of main bridge simplification

图 6 中钢轨最大伸缩力为 1 425.2 kN,主桥简化算法与建立实际结构模型的计算结果差别较小,简化算法的梁体完全不受斜拉索的约束,故计算结果稍偏大些,考虑到钢轨伸缩力一般为该类桥上无缝线路的控制因素,因此,在方案研究阶段可采用简化算法对桥上无缝线路进行分析。

算例钢桁斜拉桥温度跨度较大,钢轨伸缩力超过 1 400 kN,即使在全桥铺设小阻力扣件,钢轨伸缩力仍超过 1 000 kN,此桥需设置伸缩调节器以避免轨道强度及稳定性问题,伸缩调节器设置可在主梁两端各设一组单向伸缩调节器,其中伸缩调节器尖轨指向主桥以外^[11]。

一般来说,大跨度斜拉桥上合理设置伸缩调节器以后,钢轨强度、线路稳定性等问题都可以得到解决,但为了揭示斜拉桥上无缝线路受力变形规律,本文仍以不设伸缩调节器的方案进行相关分析。

3.2 钢轨挠曲力分析

目前,斜拉桥上钢轨挠曲力计算规律尚无详细总结,在此假设中-活载从左端入桥,考虑斜拉桥结构对称性,选取以下 4 种典型计算工况:工况一,左一边跨和左二边跨布置荷载;工况二,左二边跨和主跨左半跨布置荷载;工况三,左二边跨和主跨布置荷载;工况四,主跨布置荷载。

荷载工况布置见图 7,图中“○”表示活动支座,钢轨挠曲力计算结果见图 8。

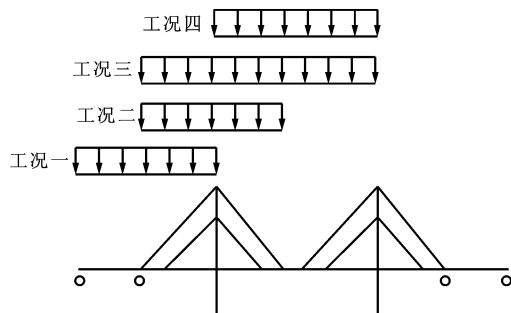


图 7 荷载工况

Fig. 7 Loading conditions

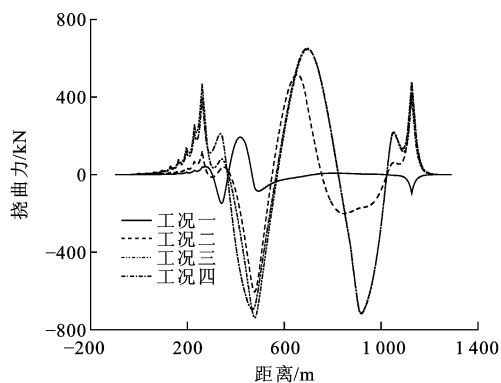


图 8 钢轨挠曲力

Fig. 8 Rail bending forces

由图 8 可知,工况三和工况四的钢轨挠曲力数值均较大且分布规律类似,这是因为斜拉桥主跨跨度较大,主跨上布置满荷载时主梁的变形会较大,进而引起钢轨内产生较大挠曲力,由于算例斜拉桥为下承式,主跨梁体下缘在荷载作用下发生受拉变形,因而图 8 中主跨跨中会出现挠曲拉力峰值。考虑到斜拉桥结构的对称性及主跨上布置荷载对钢轨挠曲力影响最大,因此,建议此类桥型可按工况三和工况四荷载布置方式计算钢轨挠曲力且不必考虑列车入桥方向的变化。

3.3 钢轨制动力分析

算例斜拉桥采用半漂浮体系,主梁在顺桥向不设置纵向约束,仅通过斜拉索间接与主塔墩相连,此种体系下为了减小列车制动作用下的结构变形,一

般都要在主梁与主塔墩连接处设置速度锁定器,速度锁定器只在列车制动或地震等结构变形发生急剧变化的情况下才发挥作用,能够强有力地约束主梁

纵向位移。以列车在主跨范围内制动为例,计算不设置速度锁定器和设置速度锁定器2种方案制动工况,结果见图9。

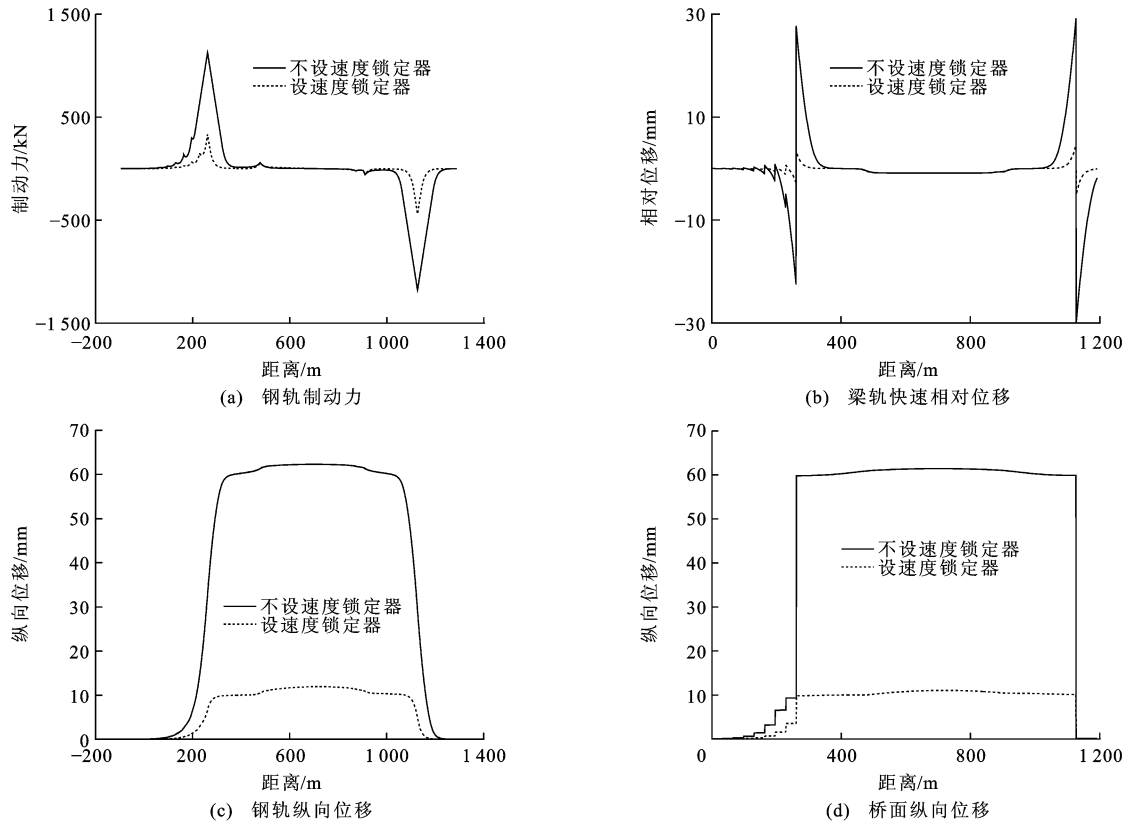


图9 制动工况计算结果

Fig. 9 Calculation results of brake conditions

由图9可知,制动工况下,如果主梁和主塔墩连接处不设置速度锁定器,钢轨制动力达到1 127.6 kN(应力为145.6 MPa),梁轨快速相对位移达到30.1 mm,钢轨纵向位移为62.3 mm,线路受力变形会较为严重,这主要是因为斜拉索能为主梁提供的纵向约束作用较小,制动工况下主梁发生了较大纵向位移所致,这点可从图9(d)中看出;而设置速度锁定器后,钢轨制动力、梁轨快速相对位移及钢轨纵向位移得到了大幅度的降低,这是因为大部分列车制动荷载可通过主梁并经由速度锁定器迅速传递到纵向刚度较大的主塔墩上,主梁的纵向位移可得到有效的限制,进而线路受力变形会得极大改善,这也说明了铁路斜拉桥需设置速度锁定器的必要性。

3.4 断缝值分析

目前,桥上无缝线路设计规范在计算断缝时一般采用公式法计算断缝值,即

$$\lambda = \frac{EF(\alpha\Delta T)^2}{Q} \quad (1)$$

式中: λ 为钢轨断缝值; ΔT 为钢轨最大降温幅度; Q

为线路纵向阻力梯度; E 为钢轨钢的弹性模量; F 为钢轨截面积; α 为钢轨钢线胀系数。

用公式法计算断缝值时,忽略了桥梁结构的影响,是按路基地段的无缝线路计算断缝,这在计算中小跨度简支梁或连续梁时的精度可以满足要求,但对于大跨桥梁断缝值的计算可能会与实际差别较大,需通过梁轨相互作用法才能精确计算断缝值。下面就通过CSBCWR计算软件,采用公式法和建立全桥模型的梁轨相互作用法分别计算断轨后的断缝值,其中根据图3中的钢轨伸缩力分布,在采用梁轨相互作用法分析时,计算主梁左右端梁缝处分别断轨2种工况,图10为断轨后钢轨位移分布。

由图10可知,采用公式法计算的断缝值约为28.6 mm,而采用梁轨相互作用法计算断缝值时,在主梁左右端梁缝处的断缝值分别为160.5、166.3 mm,这2种工况的断缝值约是公式法断缝值的5.7倍,这么大的差异主要是由于图3中发生断轨的折断轨的伸缩力急剧放散引起钢轨断口的收缩所致,这也说明了采用公式法将会严重低估斜拉桥上无缝线路

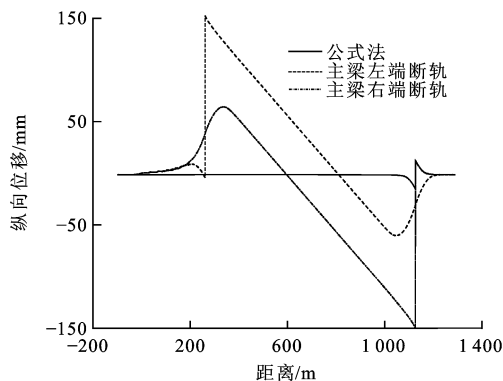


图 10 钢轨纵向位移

Fig. 10 Rail longitudinal displacements

断轨后的断缝值,因此,建议此类桥上铺设无缝线路应采用梁轨相互作用法以精确计算钢轨断缝值。

4 结 语

铁路斜拉桥主梁在温度作用下的伸缩变形几乎不受斜拉索约束和主塔墩变形的影响,基于这一点,可将斜拉桥简化为跨中设置固定支座的等长连续梁进行钢轨伸缩力的计算。考虑到斜拉桥结构的对称性及主跨上布置荷载对钢轨挠曲力影响最大,建议此类桥型可分在主跨及其邻跨和单独在主跨上布置荷载 2 种工况来计算钢轨挠曲力,而且不必考虑列车入桥方向的变化。斜拉桥斜拉索对主梁的纵向约束作用较小,这就要求铁路斜拉桥需在主梁和主塔墩连接处设置速度锁定器,从而有效限制列车制动作用下的主梁纵向位移,进而大幅度减小线路受力变形。采用公式法会低估斜拉桥上无缝线路断轨后的断缝值,建议此类桥上铺设无缝线路应采用梁轨相互作用法以精确计算钢轨断缝值。

参考文献:

References:

- [1] 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.
XU Qing-yuan. Static and dynamic 3D finite element analysis of additional longitudinal forces transmission between CWR and high-speed railway bridges[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)
- [2] 徐庆元, 陈秀方, 李树德. 高速铁路桥上无缝线路纵向附加力研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 8-12.
XU Qing-yuan, CHEN Xiu-fang, LI Shu-de. Study on the additional longitudinal forces transmission between continuously welded rails and high-speed railway bridges[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 8-12. (in Chinese)
- [3] 张 建. 刚构桥上无缝线路的 ANSYS 分析及二次开发[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

ZHANG Jian. ANSYS analysis and secondary exploitation of CWR on rigid frame bridge[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)

- [4] 李秋义, 孙 立. 桥墩温差荷载引起的桥上无缝线路钢轨附加力[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4): 50-54.
LI Qiu-yi, SUN Li. Additional longitudinal force of CWR track on bridge caused by temperature difference between one side and another side of pier[J]. China Railway Science, 2007, 28(4): 50-54. (in Chinese)
- [5] 魏贤奎, 陈小平, 王 平. 有砟轨道基础桥上无缝线路计算软件开发及应用[J]. 铁道建筑, 2010(8): 115-118.
WEI Xian-kui, CHEN Xiao-ping, WANG Ping. Development and application of calculation software of CWR with ballasted track on bridges[J]. Railway Engineering, 2010(8): 115-118. (in Chinese)
- [6] RUGE P, BIRK C. Longitudinal forces in continuously welded rails on bridge decks due to nonlinear track-bridge interaction[J]. Computers and Structures, 2007, 85(7/8): 458-475.
- [7] RUGE P, WIDARDA D R, SCHMALZLIN G, et al. Longitudinal track-bridge interaction due to sudden change of coupling interface[J]. Computers and Structures, 2009, 87(1/2): 47-58.
- [8] 李志辉. 铁路高墩、大跨、长联简支梁桥上无缝线路桥墩纵向水平线刚度优化[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LI Zhi-hui. The optimization of pier longitudinal linear stiffness of CWR on railway simply supported bridges with high-pier, long span and large-length[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [9] BATTINI J M, MAHIR U K. A simple finite element to consider the non-linear influence of the ballast on vibrations of railway bridges[J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2597-2602.
- [10] 朱 彬. 大跨度钢箱混合梁斜拉桥无缝线路设计研究[J]. 铁道标准设计, 2012(2): 4-6, 15.
ZHU Bin. Design of continuous welded rail upon long span cable-stayed bridge with steel-concrete composite box beam[J]. Railway Standard Design, 2012(2): 4-6, 15. (in Chinese)
- [11] 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 of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 83-87. (in Chinese)
- [12] 闫 斌, 戴公连, 董林育. 客运专线斜拉桥梁轨相互作用设计参数[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 31-37.
YAN Bin, DAI Gong-lian, DONG Lin-yu. Design parameters of track-bridge interaction on passenger dedicated line cable-stayed bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 31-37. (in Chinese)
- [13] 赵卫华. 斜拉桥上无缝线路设计计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
ZHAO Wei-hua. A study of calculation method of CWR on cable-stayed bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)