

100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值研究

徐浩¹, 李泽宇², 向芬¹, 谢铠泽², 蔡文锋¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为研究客货共线 100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值,建立了线-桥-墩一体化空间有限元模型,研究了桥墩纵向水平刚度对无缝线路受力特性的影响规律,以钢轨强度、梁轨相对位移和断缝值为控制指标,提出了客货共线 100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度取值。结果表明,随着简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度的增大,钢轨伸缩附加力增大,钢轨制动附加力和梁轨相对位移降低;对于 100 m 简支钢桁梁,控制桥墩纵向水平刚度的指标是钢轨强度,且受钢轨温度变化幅值影响较大;综合考虑钢轨附加力和桥梁工程经济性,通过全桥铺设小阻力扣件可显著降低桥墩纵向水平刚度限值,此时桥墩纵向水平刚度建议为 1 400 kN/(cm·线);研究成果可为 100 m 简支钢桁梁的桥墩设计提供参考。

关键词:客货共线铁路;桥墩纵向水平刚度;数值计算;简支钢桁梁;无缝线路

中图分类号: U213.912 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)01-0019-07

0 引言

桥上无缝线路因其能提高行车平稳性、减少轨道养护维修工作量等优势,在国内外铁路上得到广泛应用,为此国内外研究人员对桥上无缝线路的梁轨相互作用规律进行了大量研究^[1-8]。如 Song et al^[1]和 Ruge et al^[2]提出了桥上无缝线路的模型及计算方法;广钟岩^[3]阐述了普通铁路桥上无缝线路的梁轨相互作用机理;王平等^[4]详细分析了高速铁路各种类型轨道和桥梁的相互作用规律及无缝线路状态检测与监测技术;徐庆元等^[5]提出了高速铁路桥上无缝线路纵向附加力三维有限元建模方法,并进行了验证;Wang et al^[6]、Dai et al^[7]和蔡小培等^[8]对斜拉桥上梁轨相互作用规律及简化计算方法进行了研究,探讨了斜拉桥上无缝线路设计方案。

由于铁路简支钢桁梁具有跨度大、自重轻等优点^[9-10],因而在简支钢桁梁上铺设无缝线路越来越多,相关研究人员对简支钢桁梁上无缝线路纵向相互作用规律进行了研究。沙嵩^[9]、林孔斌^[10]和于向东等^[11]针对黄韩侯铁路上某 156 m 简支钢桁梁桥上无缝线路纵向相互作用及其影响因素进行了研究;江万红等^[12]建立了明桥面钢桁梁桥上无缝线路分析模型,研究了制动架设置及纵梁断开对梁轨相互作用规律的影响。曲村等^[13]提出了钢桁梁桥上无缝线路空间耦合模型建立方法,并基于实例研究了钢桁梁桥上梁轨相互作用规律。桥墩纵向水平刚度限值作为桥上无缝线路设计的关键参数^[14],研究人员对混凝土简支桥梁的桥墩刚度限值进行了不少研究^[15-20]。杨艳丽^[15]提出了常用桥式的桥墩纵向线刚度合理取值;戴公连等^[16]针对门式墩,研究了门式墩纵向刚度对梁轨相互作用的影响,结果表明为减小钢轨纵向力,应保证门式墩纵向刚度与相邻桥墩纵向刚度接近;刘刚等^[17]通过建立客货共线连续梁桥上无缝线路及计算模型,给出了 40 m+64 m+40 m 跨度连续梁桥的墩顶纵向水平刚度限值;乔建东等^[18]建立了 64 m 简支梁桥上无缝线路计算模型,给出了 64 m 有砟轨道简支梁桥的墩顶纵向水平刚度限值;徐浩等^[19]针对混凝土简支梁桥改建无缝线路桥墩刚度缺少参数的情况,研究了桥墩刚度对桥上无缝线路附加力的影响规律;

收稿日期:2021-12-03 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210267

基金项目:中国科协青年人才托举工程项目(2019QNR001);中铁二院科技开发计划(KYY2019032(19-22))

作者简介:徐浩(1989—),男,高级工程师,研究方向为道路与铁道工程。E-mail:xhao0@163.com

徐浩,李泽宇,向芬,等.100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):19-25.

蔡小培等^[20]则针对简支梁桥上无砟轨道无缝线路,给出了桥墩纵向刚度限值建议;然而未见简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值研究的相关报道。

以某客货共线铁路上 5×100 m 简支钢桁梁桥上无缝线路为研究对象,建立客货共线简支钢桁梁桥上无缝线路计算模型,研究不同桥墩纵向水平刚度对钢桁梁桥上无缝线路受力特性的影响规律,并以钢轨强度、梁轨相对位移为控制指标,提出客货共线 100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值,从而为客货共线 100 m 简支钢桁梁的设计提供参考。

1 计算模型与参数

本工程位于某单线客货共线铁路上,为简化计算,仅以 5 跨 100 m 简支钢桁梁为研究对象。其中钢桁梁桁高 12 m,主桁中心宽 7 m,桥面设有混凝土桥面板,混凝土桥面板与桥面纵横梁采用焊钉剪力键连接。桥上轨道拟采用单层长枕埋入式无砟轨道,无砟轨道的道床板通过 4 列“门”型钢筋与混凝土桥面板连接^[21]。由于无砟轨道的道床板与混凝土桥面板连接良好,因此建模时可认为线路纵向阻力即为扣件纵向阻力,钢轨采用 60 kg/m 钢轨。

文献[22]和文献[23],采用 ANSYS 软件建立有限元模型,其中钢桁梁的杆件采用空间梁单元模拟,钢桁梁的混凝土桥面板用板壳单元模拟,轨道与桥梁的相互作用用非线性弹簧模拟,桥墩纵向水平刚度用线性弹簧单元模拟,为准确模拟边界条件,路基长度取 100 m,计算模型及桥跨布置如图 1 所示。

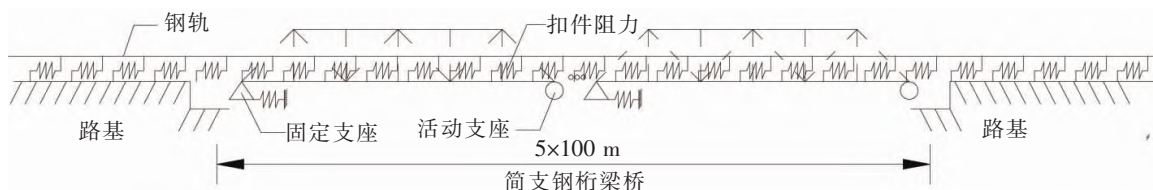


图 1 计算模型及桥跨布置

100 m 简支钢桁梁的桥墩纵向水平刚度取 500 kN/cm,桥台纵向水平刚度取为 1 500 kN/cm。扣件纵向阻力采用双线性模型,无砟轨道常阻力和小阻力扣件纵向阻力

$$r = \begin{cases} 18.6u (\text{机车下}), u > 2 \text{ mm} \\ 12u (\text{车辆下/无载}), u \leq 2 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

$$r = \begin{cases} 20.2u (\text{机车下}), u > 0.5 \text{ mm} \\ 13u (\text{车辆下/无载}), u \leq 0.5 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

式中, r 为线路阻力; u 为位移。

由于目前尚未有 100 m 简支钢桁梁上无缝线路研究结果,为验证模型的准确性,采用相同的方法建立了 32 m 混凝土简支箱梁上无缝线路计算模型,计算参数与文献[4]相同,并与其结果进行对比,当桥梁升温 15 °C 时,本文模型计算结果与文献[4]的结果对比如图 2 所示。

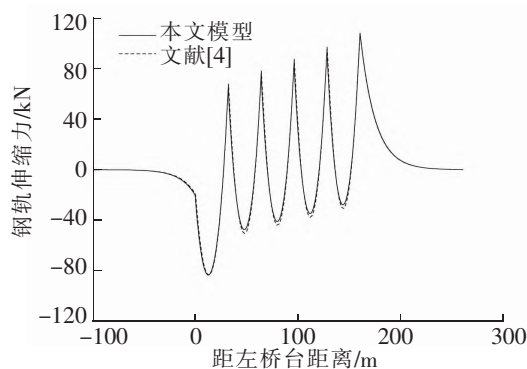


图 2 计算结果对比

从图 2 可知,本文模型计算的最大伸缩力为 108.3 kN,文献[4]中最大伸缩力为 108.2 kN,可见两者的计算结果基本相同,证明本文建模方法的准确性,可采用相同的建模方法分析 100 m 简支钢桁梁上无缝线路的受力规律。

计算钢轨伸缩力时,不考虑桥梁升降温交替变化的影响,仅考虑钢桁梁钢结构升温 25 °C,混凝土桥面板和混凝土箱梁升温 15 °C。

计算钢轨挠曲力时,采用客货共线铁路用的 ZKH 荷载,等效均布加载于桥梁上,加载长度为两跨桥梁,针对本桥,加载方式如图 3 所示。

计算钢轨制动力时,轮轨黏着系数取 0.164,加载长度为 400 m,加载于钢轨上,考虑列车左入桥和右

入桥 2 种情况,加载位置如图 4 所示。

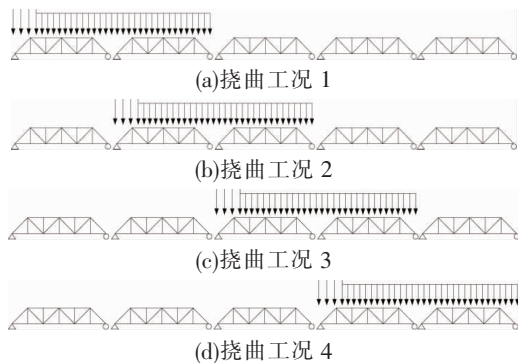


图 3 挠曲加载工况

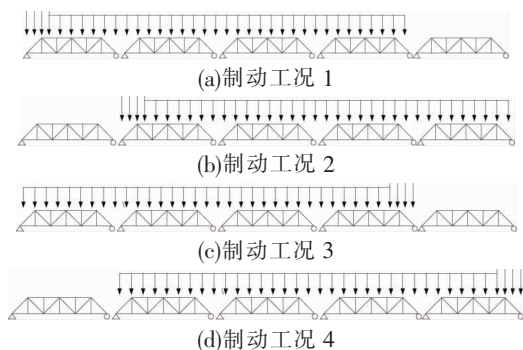


图 4 制动加载工况

计算断轨力时,为涵盖我国寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区,轨温变化幅度分别取为 50、40 和 30 ℃,考虑在钢轨伸缩力最大处折断。

2 桥墩纵向水平刚度限值判定标准

(1) 钢轨强度控制要求。根据《铁路无缝线路设计规范》(TB 10015—2012)中规定的钢轨强度检算标准

$$\sigma_d + \sigma_t + \sigma_f + \sigma_z \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{K} \quad (3)$$

式中, σ_d 为动弯应力; σ_t 为钢轨最大温度应力; σ_f 为钢轨最大附加应力; σ_z 为钢轨牵引(制动)应力; $[\sigma]$ 为钢轨容许应力; σ_s 为钢轨屈服强度; K 为安全系数。钢轨屈服强度取为 472 MPa,安全系数采用《铁路无缝线路设计规范》规定的 1.3,因此得到的钢轨容许应力为 363 MPa。

(2) 梁轨相对位移。为了保证轨下胶垫的正常使用以及扣件系统的稳定性,在制动(牵引)条件下要求钢轨与轨道板间的相对位移不大于 4 mm^[20]。

(3) 钢轨断缝值。《铁路无缝线路设计规范》(TB 10015—2012)规定:钢轨断缝允许值,一般情况取 70 mm,困难条件下取 90 mm。

3 计算结果及分析

为确定简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度的限值,研究了不同桥墩纵向水平刚度对桥上无缝线路受力特性的影响规律,假定单线 100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度分别取为 300、500(基本工况)、800、1 000、1 200、1 500、2 000、3 000 kN/cm。

3.1 伸缩工况

当简支钢桁梁的桥墩纵向水平刚度为 500 kN/cm 时,钢轨伸缩力如图 5 所示。改变简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度,桥梁升温时不同桥墩纵向水平刚度下的最大钢轨伸缩力变化如图 6 所示。

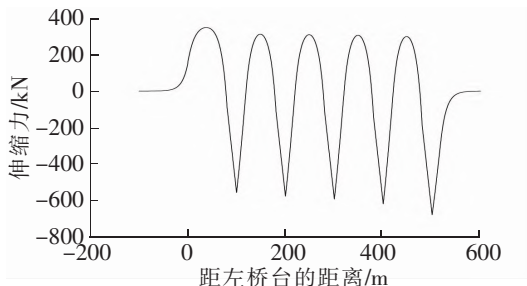


图 5 钢轨伸缩力

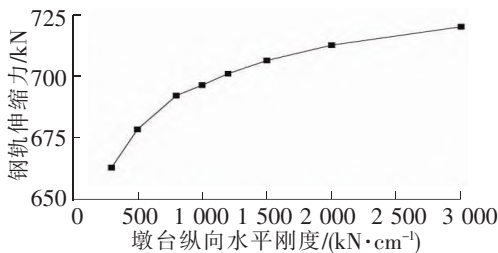


图 6 不同桥墩纵向水平刚度下钢轨伸缩力

从图 5 可知,桥梁升温时,钢轨最大伸缩压力出现在右桥台活动支座附近,为 678.19 kN;钢轨最大伸缩拉力出现在左桥台附近,为 363.31 kN。这是由于固定支座设置在桥梁左侧,桥梁向右伸缩所致。

从图 6 可知,随着简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度的增大,钢轨伸缩压力随之增大,但增加幅度逐渐减缓。当简支钢桁梁的桥梁桥墩纵向水平刚度为 300 kN/cm 时,钢轨伸缩压力为 662.67 kN;当桥墩纵向水平刚度增大至 3 000 kN/cm 时,钢轨伸缩压力和拉力为 719.86 kN,增大了 8.63%。这是因为桥梁墩台纵向水平刚度越大,在钢轨反作用力下桥梁整体位移所受约束越强,梁轨位移相等点越靠近固定支座,相等点两侧的纵向阻力之和越大,致使钢轨纵向力越大,当墩台刚度增加到一定程度后,这种影响越来越小,故钢轨伸缩力增加趋势减缓。

3.2 挠曲工况

不同加载工况下的钢轨挠曲力如图 7 所示。

从图 7 可知,当桥墩纵向水平刚度为 500 kN/cm 时,不同工况下钢轨最大挠曲压力为 158.75 kN,最大挠曲拉力为 58.10 kN。可见在桥墩纵向水平刚度相同的情况下,钢轨挠曲力远小于钢轨伸缩力,钢轨挠曲力不控制钢轨强度,因此不分析桥墩纵向水平刚度对钢轨挠曲力的影响。

3.3 制动工况

不同制动工况下的钢轨制动力及梁轨相对位移对比如图 8 所示。

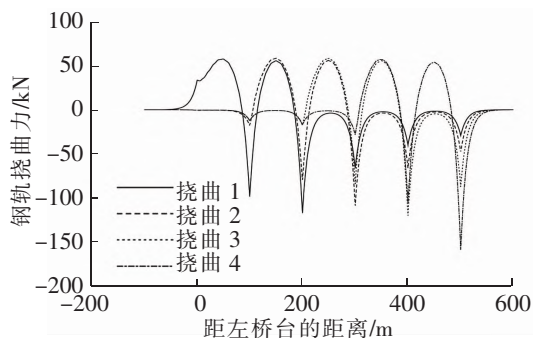
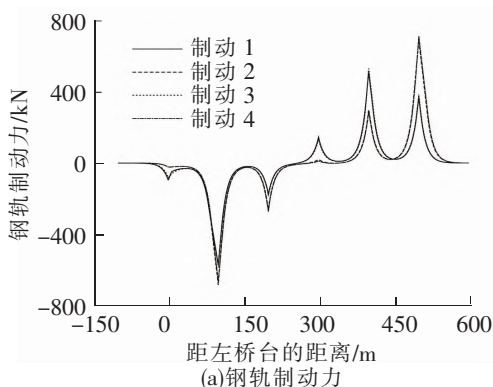


图 7 钢轨挠曲力

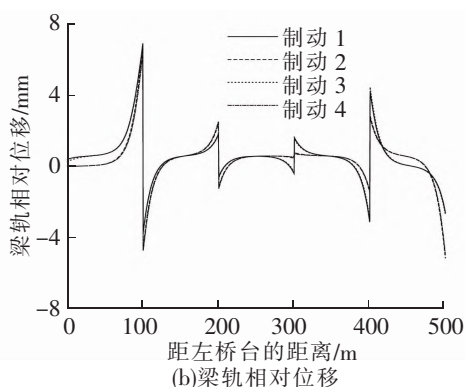


图 8 钢轨制动力和梁轨相对位移

从图 8 可知,不同制动工况下的钢轨制动力最大为 708.82 kN,梁轨相对位移最大为 6.91 mm。不同简支梁墩台刚度下钢轨最大制动力及梁轨相对位移如表 1 所示。

表 1 不同墩台刚度下钢轨制动力和梁轨相对位移

桥墩纵向水平刚度/(kN · cm ⁻¹)	钢轨制动力/kN	梁轨相对位移/mm
300	840.94	9.43
500	708.82	6.91
800	594.58	4.56
1 000	539.73	3.89
1 200	497.37	3.40
1 500	448.61	2.89
2 000	390.04	2.35
3 000	317.77	1.80

从表 1 可知,钢轨制动力和梁轨相对位移随简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度的增大而减小,这是由于

桥梁桥墩纵向水平刚度越大,承担的墩台力越大,所以钢轨制动力和梁轨相对位移反而越小。当简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度为 300 kN/cm 时,钢轨制动力和梁轨相对位移分别为 840.94 kN 和 9.43 mm,当简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度增大至 3 000 kN/cm 时,钢轨制动力和梁轨相对位移分别为 317.77 kN 和 1.80 mm,分别降低了 62.21%和 80.91%,说明增大桥墩纵向水平刚度对降低钢轨制动力和梁轨相对位移有利。

3.4 断轨工况

不同简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度下,钢轨断缝值变化如表 2 所示。

表 2 钢轨断缝值	
桥墩纵向水平刚度/(kN·cm ⁻¹)	钢轨断缝值/mm
300	50.77
500	43.98
800	39.09
1 000	37.19
1 200	35.82
1 500	34.36
2 000	32.77
3 000	31.02

从表 2 可知,钢轨断缝值随简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度的增大而降低,且当桥墩纵向水平刚度为 300 kN/cm 时,钢轨断缝值为 50.77 mm,远小于规范规定的 70 mm 要求,因此钢轨断缝值不是简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值的控制指标。

4 桥墩纵向水平刚度限值及其优化

从上述分析可知,钢轨断缝值对 100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值不控制,因此将钢轨强度和梁轨相对位移作为桥墩纵向水平刚度控制指标。

4.1 桥墩纵向水平刚度取值

不同工况下钢轨应力通过钢轨纵向力除以钢轨截面积得到,对于最大轴重 25 t 的客货共线铁路,不同轨温变化幅度下不同桥墩纵向水平刚度下的钢轨强度和梁轨相对位移如图 9 所示。

从图 9 可知,梁轨相对位移与钢轨温度变化无关,以梁轨相对位移 4 mm 作为控制指标,当简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度为 1 000 kN/cm 时,梁轨相对位移为 3.89 mm,满足梁轨相对位移 4 mm 限值的要求。

以钢轨强度作为控制指标,当钢轨温度变化为 30 ℃时,桥墩纵向水平刚度不应小于 1 000 kN/cm;当钢轨温度变化为 40 ℃时,桥墩纵向水平刚度不应小于 2 000 kN/cm;当钢轨温度变化为 50 ℃时,桥墩纵向水平刚度不应小于 11 000 kN/cm。可见,对于 100 m 简支钢桁梁,桥墩纵向水平刚度限值主要受桥梁所在地区轨温变化幅度控制。

4.2 桥墩纵向水平刚度优化

铺设常阻力扣件时,轨温变化幅度为 50 ℃时,100 m 简支钢桁梁桥墩纵向水平刚度限值远大于单线桥台刚度,因此需要对桥墩纵向水平刚度进行优化。由于小阻力扣件能显著降低钢轨附加力,为减小简支梁桥墩纵向水平刚度,可设置小阻力扣件。通过计算可知,当简支梁桥墩纵向水平刚度为 1 400 kN/cm,简支钢桁梁上全桥设置小阻力扣件,此时不同轨温变化幅度下钢轨强度如表 3 所示。

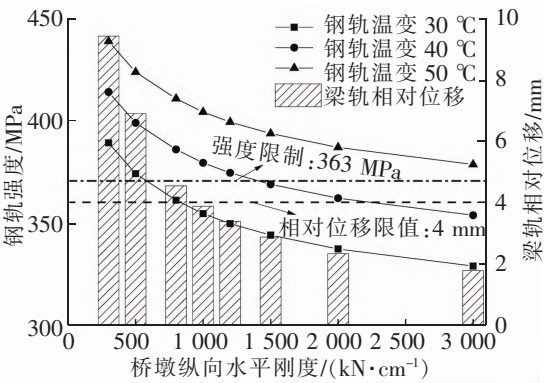


图 9 钢轨强度及梁轨相对位移

表 3 铺设小阻力扣件方案钢轨强度检算

轨温变化 幅度/℃	温度 应力/MPa	动弯 应力/MPa	伸缩 应力/MPa	制动 应力/MPa	$\sum \sigma / \text{MPa}$	钢轨强度 限值/MPa	结论
30	74.4	120.81	47.1	56.46	298.77	363	通过
40	99.2	120.81	47.1	56.46	323.57	363	通过
50	124.0	120.81	47.1	56.46	348.37	363	通过

从表 3 可知,当简支钢桁梁上铺设小阻力扣件,简支钢桁梁刚度为 1 400 kN/cm 时,钢轨强度满足规范要求,同时对断缝值及梁轨相对位移进行检算,两指标也满足规范要求。考虑桥上无缝线路的安全性以及桥梁工程的经济性,建议 100 m 简支钢桁梁上全桥铺设小阻力扣件,桥墩纵向水平刚度可降低至 1 400 kN/cm。

5 结论

以 100 m 简支钢桁梁上无缝线路为研究对象,分析了不同桥墩纵向水平刚度对简支钢桁梁桥上无缝线路受力特性的影响规律,得到如下结论:

(1)钢轨伸缩力随简支钢桁梁的桥墩纵向水平刚度的增大而增大,增加速率逐渐减缓,桥墩纵向水平刚度从 300 kN/cm 增大至 3 000 kN/cm 时,钢轨伸缩压力增大 8.63%。

(2)钢轨制动力和梁轨相对位移随桥墩纵向水平刚度的增大而降低,桥墩纵向水平刚度从 300 kN/cm 增大至 3 000 kN/cm 时,钢轨制动力和梁轨相对位移分别减小 62.21%和 80.91%。

(3)对于 100 m 简支钢桁梁,桥墩纵向水平刚度取值的控制指标主要是钢轨强度,不受梁轨相对位移和钢轨断缝值的影响。

(4)100 m 简支钢桁梁的桥墩纵向水平刚度取值受钢轨温度变化幅值影响较大,综合考虑钢轨附加力和桥梁工程经济性,可通过全桥铺设小阻力扣件来降低桥墩纵向水平刚度限值。

参 考 文 献

[1]Song M K, Noh H C, Choi C K. A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions[J]. Engineering Structures, 2003, 25(13):1611-1626.

[2]Ruge P, Birk C. Longitudinal forces in continuously welded rails on bridge decks due to nonlinear track-bridge interaction[J]. Computers & Structures, 2007, 85(7/8):458-475.

[3]广钟岩. 铁路无缝线路[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001.

[4]王平, 肖杰灵, 陈嵘, 等. 高速铁路桥上无缝线路技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2015.

[5]徐庆元, 王平, 屈晓辉. 高速铁路桥上无缝线路纵向附加力三维有限元建模[J]. 铁道标准设计, 2006(10): 1-4.

[6]Wang Ping, Zhao Weihua, Chen Rong, et al. Bridge-rail interaction for continuous welded rail on cable-stayed bridge due to temperature change[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(8):1347-1354.

[7]Dai Gonglian, Yan Bin. Longitudinal forces of continuously welded rail on high-speed railway cable-stayed bridge considering impact of adjacent bridges[J]. Journal of Central South University, 2012(19):2348-2353.

[8]蔡小培, 苗倩, 李大成, 等. 斜拉桥上无缝线路力学分析与调节器布置研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(1):36-41.

[9]沙嵩. 大跨度简支钢桁梁桥梁轨相互作用及影响因素研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.

[10]林孔斌. 大跨铁路简支钢桁梁桥空间受力及梁轨相互作用研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.

[11]于向东, 沙嵩, 闫斌. 客货共线大跨度简支钢桁梁桥梁轨相互作用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 106-111.

[12]江万红, 姚力, 庞玲. 明桥面钢桁梁桥上无缝线路空间有限元分析方法[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(6):5-9.

[13]曲村, 高亮, 蔡小培, 等. 钢桁梁桥上无缝线路空间耦合模型研究[J]. 铁道建筑, 2012(10):124-127.

[14]孙立, 李秋义, 王玉泽, 等. TB 10015—2012 铁路无缝线路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2013.

[15]杨艳丽. 铺设无缝线路的桥梁墩台纵向线刚度设计研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.

[16]戴公连, 闫斌, 魏标. 门式墩纵向刚度及其对无缝线路纵向力的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40

- (11):33-36.
- [17]刘刚,张明俭.客货共线铁路连续梁桥墩顶纵向线刚度限值研究[J].路基工程,2011(3):120-121,125.
- [18]乔建东,李志辉,杨晴.无缝线路大跨简支梁桥桥墩线刚度优化[J].西南交通大学学报,2013,48(2):278-282.
- [19]徐浩,林红松,颜华.桥墩纵向水平刚度对简支梁桥上无缝线路的影响分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(5):871-875.
- [20]蔡小培,谭茜元,刘万里,等.无砟轨道简支梁桥墩纵向刚度限值研究[J].铁道工程学报,2019,36(11):38-44.
- [21]徐浩,林红松,代丰,等.孟加拉帕德玛大桥无砟轨道结构型式适应性分析[J].高速铁路技术,2018,9(4):30-34.
- [22]仇超,杨耕,谢铠泽.专用铁路简支梁桥上铺设 50 m 长钢轨预留轨缝研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(3):97-102.
- [23]何永昶.混合梁斜拉桥钢轨扣件和伸缩调节器合理布置[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2016,29(2):12-16,38.

Research on Pier Longitudinal Rigidity Limit Value of 100 m Simply Supported Steel Truss Bridge

Xu Hao¹, Li Zeyu², Xiang Fen¹, Xie Kaize², Cai Wenfeng¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China;

2. School of Safety Engineering and Emergency Management,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the pier longitudinal rigidity limit value of 100 m simply supported steel truss bridge on passenger and freight railway, a track-bridge-piers spatial finite element model was established, the influence of pier longitudinal rigidity on the mechanical characteristics of the continuous welded rail was studied. The pier longitudinal rigidity value of 100 m simply supported steel truss bridge was proposed by taking the rail strength, the relative displacement between rail and bridge, and the rail broke seam value as the control index. The results show that with the increase of pier longitudinal rigidity of simply supported steel truss bridge, additional expansion and contraction force increases, and the additional rail braking force and relative displacement between rail and bridge decrease. For the 100 m simply supported steel truss bridge, the control index for pier longitudinal rigidity is rail strength and greatly affected by the amplitude of the rail temperature variation. Considering the additional force of rail and the bridge engineering economy, the pier longitudinal rigidity might be greatly reduced by laying a small resistance fastener system on the whole bridge, and the pier longitudinal rigidity limit value is recommended to be 1 400 kN/cm per line. This research result might provide reference for the pier design of 100 m simply supported steel truss bridge.

Key words: mixed passenger and freight railway; pier longitudinal rigidity; numerical calculation; simply supported steel truss bridge; continuous welded rails (CWR)