

文章编号: 1674—8247(2020)05—0073—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.014

桥墩刚度、跨度及小阻力扣件对钢轨强度的影响

苏乾坤 邓希 卢野 江万红

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:文章基于有限元法和梁轨相互作用理论,以(90+180+90)m长大连续梁为例,建立桥上无缝线路计算模型,分析了长大连续梁桥墩刚度、桥跨和小阻力扣件设置对无缝线路钢轨强度的影响。结果表明:(1)连续梁大温跨一侧边跨墩刚度或主跨固定支座墩刚度的增加,引起钢轨最大附加伸缩应力增加,当桥墩刚度增加至一定水平时,钢轨总应力逐渐趋于收敛;(2)减小温跨长度可有效降低钢轨总应力,温跨相同时,温跨中部活动支座的设置位置对最大伸缩附加应力和最大制动应力影响很小;(3)当钢轨总应力超限时,建议将小阻力扣件布设在钢轨伸缩附加力最大处(通常位于连续梁与简支梁相接处)的相邻两跨简支梁和连续梁边跨。

关键词:连续梁桥;桥墩刚度;桥跨度;小阻力扣件;钢轨强度

中图分类号:U213.9⁺12

文献标志码:A

The Influence of Pier Stiffness, Spans and Small-resistance Fasteners on the Rail Strength

SU Qiankun DENG Xi LU Ye JIANG Wanhong

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

Abstract: Based on the finite element method and the theory of girder-rail interaction, this paper takes (90+180+90)m long continuous girder bridge as an example, establishes a calculation model for the continuously welded rail track on the bridge, and analyzes the influence of pier stiffness, spans and small-resistance fasteners of continuous girder bridge on the continuously welded rail strength. The results show that: (1) The increase in the stiffness of the side span pier of the large temperature span of the continuous girder bridge or the stiffness of the fixed bearing pier of the main span causes the increase of the maximum additional expansion stress of the rail. When the stiffness of the bridge pier increases to a certain level, the total stress of the rail gradually tends to converge. (2) The decrease in the length of the temperature span can effectively reduce the total stress of the rail. When the temperature span is the same, the setting position of the movable bearing in the middle of the temperature span has little effect on the maximum additional expansion stress and the maximum braking stress. (3) If the total stress of the rail exceeds the limit, it is recommended to arrange the small-resistance fasteners on the side spans of the two adjacent simply-supported girder and continuous girder where the additional expansion stress of the rail is the greatest (usually at the junction of the continuous girder and the simply-supported girder).

Key words: continuous girder bridge; pier stiffness; bridge span; small-resistance fasteners; rail strength

为消除铁路线路钢轨接头带来的不良影响,可将多根长钢轨焊接起来,将轨条尽量延长,形成跨区间无

收稿日期:2020-02-04

作者简介:苏乾坤(1992-),男,工程师。

引文格式:苏乾坤,邓希,卢野,等.桥墩刚度、跨度及小阻力扣件对钢轨强度的影响[J].高速铁路技术,2020,11(5):73-77.

SU Qiankun, DENG Xi, LU Ye, et al. The Influence of Pier Stiffness, Spans and Small-resistance Fasteners on the Rail Strength[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):73-77.

缝线路。跨区间无缝线路具有行车平稳性好,轨道几何状态易保持,钢轨使用寿命长,车辆和轨道维修费用低,建设投资附加费用低等优势,是铁路现代化的一项重大技术进步,也是当今高速铁路设计采取的必要技术措施。

路基上铺设无缝线路时,主要检算温度变化引起的钢轨温度应力、列车通过时冲击钢轨形成的钢轨动弯应力和列车制动时钢轨内的制动应力。桥上铺设无缝线路时,除进行上述应力检算外,还需考虑桥梁在升降温荷载作用下梁体的伸缩变形和列车荷载通过时梁体的挠曲变形。桥上无砟轨道通常通过桥面预埋连接件与梁体紧密结合在一起,无砟轨道跟随梁体变形发生随动变形,因其上部受无缝线路长轨条的约束,不能

完全释放梁体变形带来的钢轨附加力,从而在钢轨内部形成沿桥梁走向变化的应力。

迄今为止,关于无缝线路设计和检算的研究成果较为丰富^[1-4]。但考虑桥墩刚度及支座设置对无缝线路检算结果综合性影响的研究较少。本文基于有限元法和梁轨相互作用理论^[5-6],以山区某高速铁路长大桥梁设计参数为例,分析连续梁桥及相邻简支梁桥墩刚度、支座设置对无缝线路检算结果的影响。

1 计算模型及参数

基于有限元软件,建立简化的线-桥-墩一体化计算模型^[5],如图1所示。

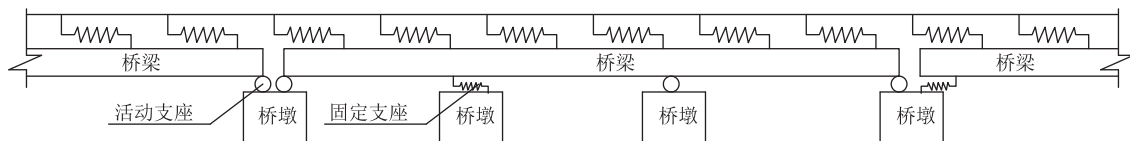


图1 计算模型示意图

检算桥梁为(5×32) m简支梁+(90+180+90) m连续梁+(5×32) m简支梁,主桥位于曲线上,曲线半

径8 000 m,桥跨布置如图2所示,0~13号桥墩刚度如表1所示。取全部桥跨进行计算。

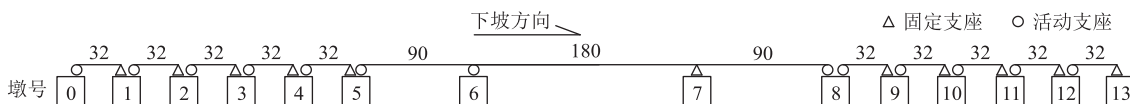


图2 桥跨布置简图(m)

表1 墩刚度表

墩号	墩刚度/(kN/cm)	墩号	墩刚度/(kN/cm)
0	831	7	17 086
1	832	8	5 364
2	540	9	893
3	546	10	664
4	564	11	646
5	2 744	12	746
6	17 086	13	832

采用高速动车,轴重17 t,2轴,轴距2.5 m。当地最高轨温为64.4℃,最低轨温为-2.1℃,锁定轨温为(31±5)℃,升温时最大温差可达38.4℃,降温时最大温差可达38.1℃。本桥最大温度跨度(钢轨两个位移零点间的距离)约为270 m。钢轨采用无螺栓孔U71MnG热轧新轨,屈服强度 σ_s 为456.3 MPa,考虑1.3倍的安全系数,则容许应力 $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{1.3} = 351$ MPa。

本桥铺设无砟轨道,设计速度350 km/h,未被平衡的超高值取40 mm,扣件采用WJ-8型扣件,轨枕铺设密度为1 600对/km,钢轨支点刚度为25 kN/mm。

根据相关规范^[9-10]计算得到轨底边缘最大动弯应力 $\sigma_{\text{底d}}$ 为123.19 MPa,最大温度拉应力 σ_t 为94.5 MPa。钢轨破坏主要是受拉断裂,其抗压强度远大于抗拉强度,故本文只针对钢轨的受拉强度进行检算。桥上无缝线路作用在钢轨下的应力满足:

$$\sigma = \sigma_{\text{底d}} + \sigma_t + \sigma_f + \sigma_z \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中: σ_f ——桥梁伸缩引起的钢轨附加力(因桥梁挠曲带来的钢轨附加力较小,此处忽略不计);

σ_z ——列车制动时引起的钢轨附加力。

2 连续梁桥墩刚度的影响

6号与7号桥墩为连续梁主跨桥墩,5号桥墩为连续梁边跨桥墩且位于连续梁温跨较大的一侧。6号桥墩上设置有活动支座,连续梁伸缩时形成的抗力较小,对钢轨的附加力影响较小,7号桥墩上设置有固定支座,故仅考虑5号、7号桥墩刚度变化对钢轨应力的影响。5号桥墩刚度变化工况和引起的钢轨应力计算结果如表2所示,制动力变化趋势如图3所示。

表 2 5 号桥墩刚度变化引起的钢轨应力计算结果表

工况	墩刚度 K / (kN/cm)	最大动弯应力 $\sigma_{\text{底d}}/\text{MPa}$	最大温度应力 σ_t/MPa	最大伸缩附加应力 $\sigma_{\text{f}}/\text{MPa}$	最大制动应力 σ_z/MPa		合计 σ /MPa
					左入桥	右入桥	
5 号-1	-2 000	123.19	94.5	151.98	26.62	12.90	396.28
5 号-2	-1 500			158.92	23.42	14.73	400.03
5 号-3	-1 000			163.04	21.07	16.07	401.80
5 号-4	-500			165.80	19.27	17.10	402.76
5 号-5	0(2 744)			167.71	17.85	17.90	403.31
5 号-6	500			168.86	16.98	18.56	405.11
5 号-7	1 000			169.67	17.43	19.10	406.45
5 号-8	1 500			170.08	17.80	19.55	407.32
5 号-9	2 000			170.31	18.12	19.93	407.93
5 号-10	4 000			170.01	19.04	21.03	408.73
5 号-11	6 000			169.94	19.61	21.72	409.35
5 号-12	10 000			169.93	20.30	22.54	410.16
5 号-13	20 000			169.93	21.04	23.43	411.05

注:1. 桥墩刚度变化是相对于原桥墩刚度 2 744 kN/cm(工况 5 号-5)所发生的加减变化;
2. 最大制动力分别考虑了列车从左入桥和右入桥时,在最大伸缩力处紧急制动所产生的制动力,且仅将左入桥和右入桥中较大的制动力纳入应力合计中。

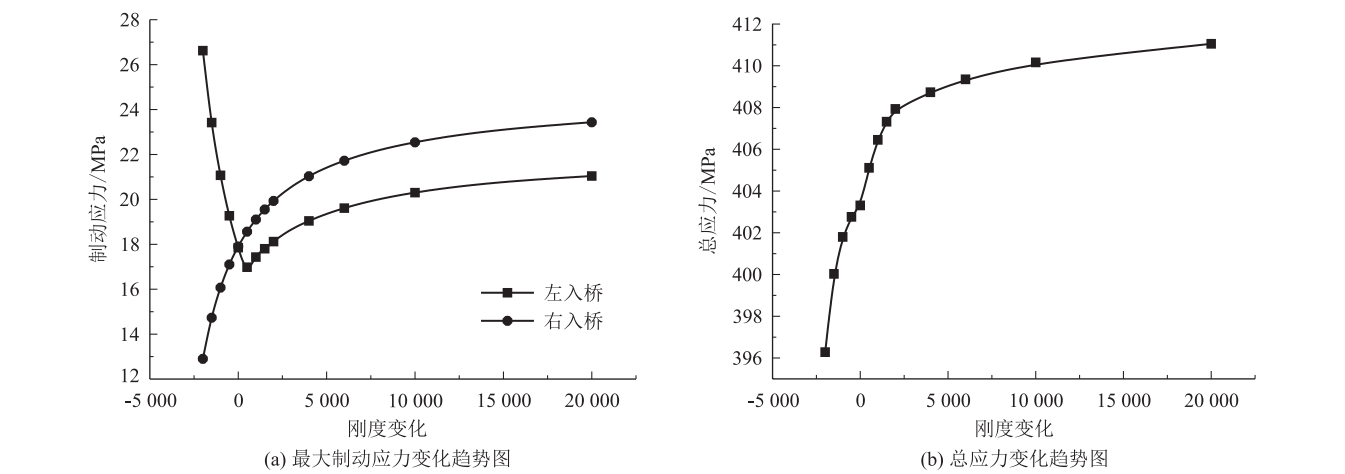


图 3 5 号墩刚度变化引起的最大制动力变化趋势图

由表 2 和图 3 中钢轨应力的计算结果可知,连续梁大温跨一侧边跨墩刚度(5 号墩)增加,引起钢轨最大附加伸缩应力增加,左入桥的钢轨制动力应力先减小后增加(存在一个最小值),右入桥的钢轨制动力应力增加。随着边跨墩刚度的增加,各项应力值变化幅度均逐渐减小,当墩刚度增加至 1 500 kN/cm(工况

5 号-8)时,总应力增加值小于 1 MPa,变化幅度不再明显,钢轨总应力也逐渐趋于收敛。因此,当连续梁大温跨一侧边跨桥墩上为固定支座时,减小桥墩刚度,可降低钢轨总应力。

7 号桥墩刚度变化工况和引起的钢轨应力计算结果如表 3 所示,制动力变化趋势如图 4 所示。

表 3 7 号墩刚度变化引起的钢轨应力计算结果表

工况	墩刚度 K / (kN/cm)	最大动弯应力 $\sigma_{\text{底d}}/\text{MPa}$	最大温度应力 σ_t/MPa	最大伸缩附加应力 $\sigma_{\text{f}}/\text{MPa}$	最大制动应力 σ_z/MPa		合计 σ /MPa
					左入桥	右入桥	
7 号-1	-16 000	123.19	94.5	149.06	15.15	87.66	454.41
7 号-2	-12 000			162.94	16.03	42.79	423.42
7 号-3	-8 000			165.72	17.06	28.48	411.89
7 号-4	-6 000			166.47	17.35	24.61	408.77
7 号-5	-4 000			167.00	17.56	21.77	406.46
7 号-6	-2 000			167.40	17.72	19.61	404.70
7 号-7	0(17 086)			167.71	17.85	17.90	403.31
7 号-8	2 000			167.96	17.95	16.52	403.61
7 号-9	4 000			168.17	18.04	15.38	403.90
7 号-10	6 000			168.34	18.11	14.43	404.14
7 号-11	8 000			168.49	18.17	13.61	404.35

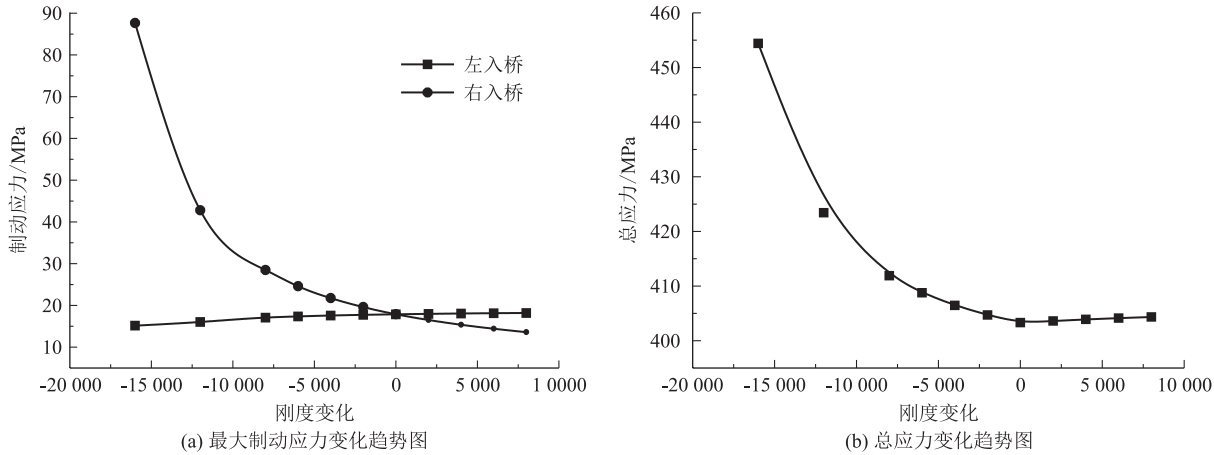


图 4 7 号墩刚度变化引起的最大制动力变化趋势图

由表 3 和图 4 可知,连续梁主跨固定支座桥墩刚度(7 号桥墩)增加,引起钢轨最大附加伸缩应力增加,左入桥的钢轨制动力应力增加,右入桥的钢轨制动应力显著减小。随着主跨墩刚度的增加,各项应力值变化幅度逐渐减小,钢轨总应力也逐渐趋于收敛。因此,增加连续梁固定支座墩刚度,可降低钢轨总应力,但效果并不显著。

3 桥跨的影响

本文所述连续梁为 3 跨,为使连续梁承载分布均匀,连续梁的两边跨(5~6 号桥墩、7~8 号墩)通常相同。本文通过改变连续梁主跨(6~7 号桥墩)和边跨的长度来改变温跨,并分析其对无缝线路钢轨检算结果的影响,连续梁桥跨工况和计算结果如表 4 所示。

表 4 连续梁桥跨工况和计算结果表

工况	边跨 /m	主跨 /m	温跨 /m	最大动弯应力 $\sigma_{\text{底d}}/\text{MPa}$	最大温度应力 σ_t/MPa	最大伸缩附加应力 σ_f/MPa	最大制动应力 σ_z/MPa		合计 σ/MPa
							左入桥	右入桥	
1	90	200	290	123.19	94.5	176.45	17.85	18.37	412.51
2	90	180	270			167.71		17.90	403.31
3	90	160	250			158.38		17.34	393.92
4	90	140	230			148.74		16.70	384.28
5	90	120	210			138.57		16.02	374.11
6	90	100	190			128.20		15.31	363.73
7	70	180	250			158.04		16.70	393.57
8	50	180	230			148.00		15.31	383.54

由表 4 可知,从工况 1 至工况 6,连续梁主跨逐渐减小,温跨随之减小,引起钢轨最大伸缩附加应力显著减小,右入桥的钢轨制动力减小,钢轨总应力显著减小。因为列车从左入桥时,桥跨变化对在伸缩附加力处(5 号墩)进行紧急制动并无影响,故左入桥的最大制动力不发生变化,为 17.85 MPa。温跨减少 20 m,钢轨总应力降低约 10 MPa,即随着温跨的减小,钢轨总应力以约 0.5 MPa/m 的速率降低。对比工况 3 和工况 7、工况 4 和工况 8 可知,温跨相同时,温跨中部活动支座(6 号墩支座)的设置位置对最大伸缩附加应力和最大制动应力影响较小。

4 小阻力扣件设置的影响

最大伸缩附加应力位于 5 号墩处,故将小阻力扣

件布设在 5 号墩两侧,以减小钢轨最大伸缩附加应力。简支梁长 32 m,为便于小阻力扣件布置,以 16 m 的整数倍设置不同工况,工况设置和计算结果如表 5 所示。

对比工况 X-0~X-4,随着小阻力扣件铺设范围的增加,钢轨总应力减小,但当小阻力扣件在 5 号墩两侧的铺设长度达到 64 m 时(工况 X-4),钢轨总应力的减小幅度已趋于平缓。对比工况 X-5~X-8 和 X-9~X-11,随着连续梁侧小阻力扣件铺设范围的增加,钢轨总应力减小,但当铺设长度超过 96 m 时,钢轨总应力的减小幅度已不明显。本桥连续梁边跨长 90 m,相邻简支梁桥跨长 32 m,将小阻力扣件布设在 5 号桥墩(伸缩附加力最大处)左侧两跨简支梁和右侧连续梁边跨时,钢轨总应力可显著减小,有利于无缝线路长钢轨的受力。

表5 连续梁小阻力扣件设置工况和计算结果表

工况	小阻力扣件布置位置 (5号墩)		最大动弯应力 $\sigma_{\text{底d}}/\text{MPa}$	最大温度应力 σ_t/MPa	最大伸缩附加应力 σ_l/MPa	最大制动应力 σ_z/MPa		合计 σ /MPa
	左侧	右侧				左入桥	右入桥	
X-0	0	0	123.19	94.5	167.71	17.85	17.90	403.31
X-1	16	16			138.33	17.00	17.02	373.04
X-2	32	32			112.28	17.02	17.01	346.99
X-3	48	48			99.61	17.02	17.02	334.33
X-4	64	64			92.26	17.02	17.02	326.98
X-5	32	48			103.69	17.02	17.01	338.40
X-6	32	64			96.78	17.02	17.01	331.50
X-7	32	96			87.04	17.02	17.01	321.76
X-8	32	128			81.24	17.02	17.01	315.96
X-9	64	96			83.31	17.02	17.01	318.02
X-10	64	128			78.47	17.02	17.01	313.19
X-11	64	160			78.27	17.02	17.01	312.99

5 结论及建议

本文以(90+180+90)m长大连续梁为例,研究长大连续梁桥桥墩刚度、桥跨布置和小阻力扣件设置对无缝线路钢轨强度的影响,得出主要结论如下:

(1)连续梁大温跨一侧边跨桥墩刚度或主跨固定支座桥墩刚度增加,引起钢轨最大附加伸缩应力增加。当桥墩刚度增加至一定水平时(不同桥梁桥墩刚度和跨度增加的幅度不同),各项应力值变化不再明显,钢轨总应力也逐渐趋于收敛。当大温跨一侧边跨墩上为固定支座时,降低其墩刚度可适当降低钢轨总应力,降低主跨固定支座墩刚度对钢轨总应力影响较小。

(2)减小温跨长度可有效降低钢轨总应力。温跨相同时,温跨中部活动支座的设置位置对最大伸缩附加应力和最大制动应力影响较小。

(3)将小阻力扣件布置在连续梁钢轨伸缩力附加力最大处(通常位于连续梁与简支梁相接处)的相邻两跨简支梁和连续梁边跨(大于96m)时,钢轨总应力可显著减小。

本文的研究成果可用于指导长大连续桥梁设计,合理设置桥墩刚度、桥跨长度和小阻力扣件铺设范围,可减小无缝线路钢轨总应力,降低断轨风险。

参考文献:

[1] 李君玉. 连续梁桥上无缝线路纵向附加力研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
LI Junyu. Study on Additional Longitudinal Force of CWR on Continuous Beam [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.

[2] 陈鹏, 高亮, 冯雅薇, 等. 连续梁桥上无缝线路纵向附加力的变化规律[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(1): 85-88.
CHEN Peng, GAO Liang, FENG Yawei, et al. Variety Rules of Additional Longitudinal Force of Continuously Welded Rails on Bridge with Continuous Beam[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(1): 85-88.

[3] 蔡小培, 田春香, 王铁霖, 等. 长联大跨桥梁无缝线路力学特性与结构设计[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 73-79.
CAI Xiaopei, TIAN Chunxiang, WANG Tielin, et al. Mechanical Characteristics and Structural Design of Continuous Welded Rail on Long-unit Bridge with Long Span [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 73-79.

[4] 杜峰. 高速铁路桥上无缝线路制动附加力研究[J]. 地下工程与隧道, 2011(2): 18-20.
DU Feng. Study on Additional Brake Force of Continuously Welded Rail on High-speed Railway Bridge [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(2): 18-20.

[5] 曲村. 高速铁路长大桥梁无砟轨道无缝线路设计理论及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
QU Cun. Study on the Design Theory and Method of Ballastless Continuous Welded Rail on Long-span Bridge in High-speed Railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[6] 余江. 高速铁路桥上无缝线路纵向附加力分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
YU Jiang. Anslysis of Addition Longitudinal Force for CWR on High-speed Railway Bridge [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[7] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].
TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Welded Rail [S].

[8] TB 10082-2017 铁路轨道设计规范[S].
TB 10082-2017 Code for Design of Railway Track [S].