

# 重载运输条件下 32 m 预应力混凝土 简支 T 梁横向加固方法研究

李保龙

(朔黄铁路发展有限责任公司,河北 肃宁 062350)

**摘要:**随着我国重载运输的持续发展,列车编组增加,车辆轴重增大,运营密度增大,现役桥梁出现横向振动过大危及行车安全的现象。本文以朔黄铁路中比重较大的 32 m 预应力混凝土简支 T 梁+双线分离式桥墩+扩大基础的结构形式为研究对象,采用有限元分析结合现场实测的方法,对增加 T 梁横向联接刚度和桥墩横向刚度的加固效果进行了研究。结果表明:仅增加 T 梁横向连接刚度,使桥跨结构横向振动得到抑制,仅增加桥墩横向刚度,使桥跨和桥墩横向振动均得到有效抑制,且对桥跨横向振动抑制效果优于增加 T 梁横向连接刚度,采取同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度的方法对桥跨横向振动抑制效果最优,对桥墩横向振动抑制效果略优于仅增加桥墩横向刚度。

**关键词:**重载运输;横向振动;桥梁加固方法;运营性能试验

**中图分类号:**U443 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)02-0033-06

## 0 引言

重载运输由于运能大、效率高等优点,已经受到世界各国铁路运输部门的青睐,并将成为未来铁路货运发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。朔黄铁路作为我国西煤东运的标准化数字化重载铁路,年运量已经突破 3 亿 t,随着 2 万 t 扩能改造完成及 30 t 轴重列车开行,对全线桥梁结构安全提出了更高的要求。调研发现现役桥梁除“专桥(01)2051、专桥(01)2011、朔黄桥通-18”3 个图号的梁型横向连接含预应力外,其余图号梁型存在并置梁横向连接不足,梁体受力不均等现象,下部分离式桥墩横向刚度不足,随着运能增加、轴重增大,运营过程中部分桥梁梁跨结构、墩顶的横向振幅明显偏大,超过《铁路桥梁检定规范》中的通常值,对线路运输能力造成很大影响。为此本文以朔黄铁路跨京九铁路特大桥(150<sup>#</sup>桥)为研究对象,提出了仅增加 T 梁横向连接刚度、仅增加桥墩横向刚度、以及同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度的 3 种加固措施。通过有限元模拟分析,对比 3 种加固方法对结构横向振动的抑制情况,对 3 种加固方法进行优选,并结合加固前后对桥梁结构动力性能试验数据,对加固方法进行再次论证分析,为今后类似桥梁病害分析及加固处理提供参考。

## 1 工程背景

### 1.1 桥梁简介

朔黄铁路跨京广铁路特大桥(150<sup>#</sup>桥),中心里程 K322+965,全桥长 1 300.92 m,设计为双线上下行分离式,孔跨样式:(1×20 m+1×24 m+38×32 m)预应力混凝土 T 梁,运营过程中上行线部分孔跨出现跨中及墩顶横向振幅过大,超过《桥梁检定规范》限值的现象,为降低跨中及墩顶横向幅,增加桥梁的横向刚度,采取同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度的方法对桥梁进行加固。为验证加固效果,选取该桥第 20 孔,19<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>墩为测试对象,进行动力性能测试,分别测试其加固前后的结构动力特性。第 20

收稿日期:2015-07-07 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2016.02.07

作者简介:李保龙(1979-),男,工程师,研究方向为铁道工程。E-mail:443732905@qq.com

李保龙.重载运输条件下 32 m 预应力混凝土简支 T 梁横向加固方法研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):33-38.

孔上部结构为 32 m 普通高度预应力混凝土 T 梁,19<sup>#</sup>、20<sup>#</sup> 墩均为分离式矩形板式墩,基础为扩大基础。

### 1.2 增加 T 梁横向连接刚度措施

为保证梁体横向连接刚度,采用预应力板对横隔板进行加固,具体加固措施为:梁端 1<sup>#</sup> 横隔板处上下各加一块钢筋混凝土板,板宽 1.2 m,厚 0.35 m。距梁端 3 m 处加含 4 束横向预应力钢筋的水平板,板宽 1.1 m,板厚 0.31 m;2<sup>#</sup> 横隔板加宽 0.38 m,并在上下变截面处各加 1 束横向预应力钢筋;3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 横隔板梗肋处各加含 4 束预应力钢筋的水平板,板宽 1.4 m,厚 0.31 m;5<sup>#</sup> 横隔板梗肋处加含 2 束横向预应力钢筋水平板,板宽 1.0 m,厚 0.31 m。加固前横隔板布置如图 1(a)所示,加固后横隔板布置图如图 1(b)所示。

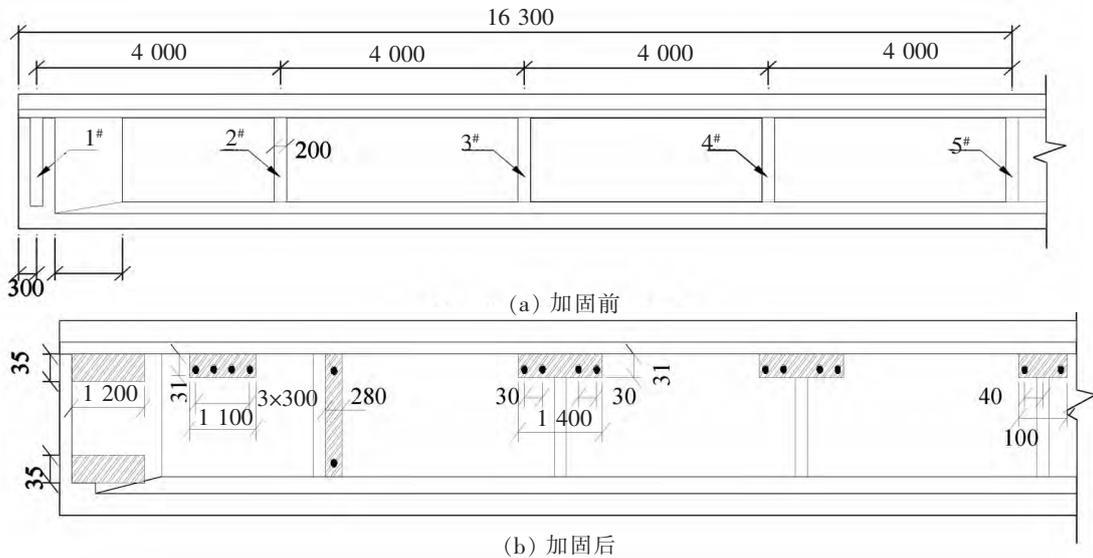


图 1 32 m 预应力混凝土 T 梁横隔板布置图(单位:mm)

### 1.3 桥墩加固措施

加固前桥墩为分离式矩形板式墩,如图 2(a)所示,墩身横向宽度为 3.0 m,为增加桥墩横向刚度,采用将上下行单线矩形板式墩通过钢筋混凝土连接为双线矩形板式墩,加固后桥墩如图 2(b)所示。加固前先将原桥墩内侧混凝土凿除并植入钢筋,将加固部位钢筋笼与植入原桥墩钢筋进行焊接连接,采用 C30 混凝土进行浇筑。

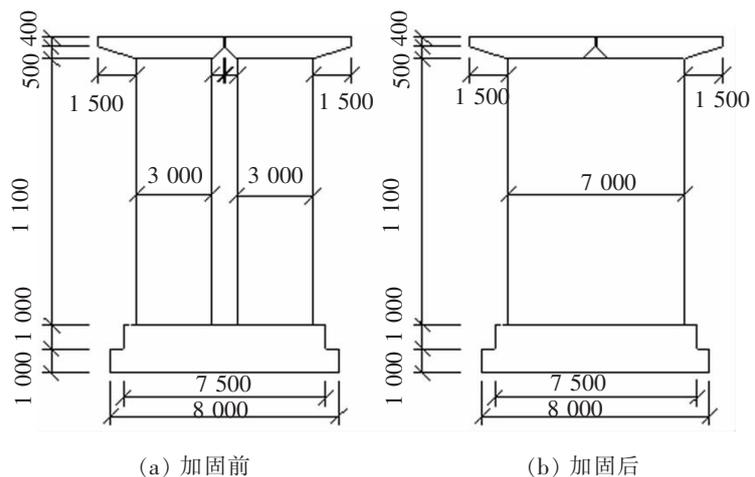


图 2 加固前后桥墩正立面图(单位:mm)

## 2 有限元分析

桥梁结构的横向振动特性除受结构自身刚度和质量影响外还与外界激励荷载有关<sup>[2-3]</sup>,对重载铁路而言,外界激励荷载主要为重载列车的蛇形运动,当重载列车的蛇形运动频率接近或等于结构横向自振频率时,会引起共振,此时桥梁结构横向振幅最大,对行车安全最不利<sup>[4]</sup>。车辆的蛇形运动频率与列车行驶速度和蛇形运动半波长有关,其计算公式为

$$f_s = \frac{v}{l_s} \quad (1)$$

式中, $v$  为列车行驶速度; $l_s$  为列车蛇形运动半波长。

### 2.1 有限元模型介绍

本文利用 MIDAS/Civil 有限元软件分别建立了桥梁结构加固前、仅增加 T 梁横向连接刚度、仅增加桥墩横向刚度、及同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度等 4 种结构状态的有限元计算模型,模拟计算 C80 重载列车以不同速度通过桥梁结构时结构的横向振动特性,统计对比计算数据,对各方法加固效果进行分析。加固前结构有限元计算模型如图 3 所示,同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度后结构有限元计算模型如图 4 所示。

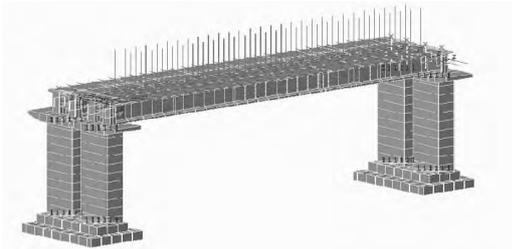


图 3 桥梁加固前有限元计算模型图

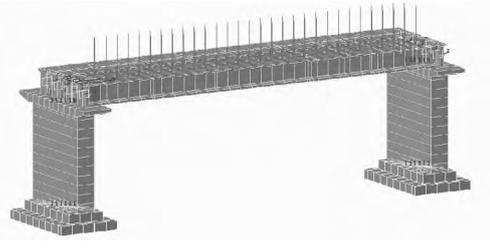


图 4 墩梁均加固后有限元计算模型图

有限元计算模型中采用梁单元模拟桥墩和梁,模型中采用弹性连接模拟支座,在桥梁固定端采用约束  $SD_x$ 、 $SD_y$ 、 $SD_z$  3 个方向的弹性连接,在活动端采用约束  $SD_x$ 、 $SD_z$  两个方向的弹性连接,弹性连接刚度按盆式橡胶支座的实际特性选取。采用实体单元模拟扩大基础,采用面弹性支撑约束基础底面  $SD_x$ 、 $SD_y$ 、 $SD_z$  方向的平动自由度,在横隔板加固位置添加过预应力,模拟横隔板预应力加固,预应力钢筋的张拉控制应力为 1 350 MPa。

### 2.2 模型计算荷载

重载列车通过桥梁结构时对桥梁结构的作用主要包括竖向荷载和横向摇摆力。列车轮对横向压力由车辆车体、转向架、轮对的侧向水平惯性力引起,这些惯性力同时引起轮对对钢轨的侧倾力(竖向作用)<sup>[5]</sup>。铁路桥梁动力学中通过测量得出直线桥梁上的车轮水平横向力在 10~30 kN 范围内,均值为 24 kN。就车轮横向力对竖向力的依赖关系进行了统计分析,表明这种依赖关系是很大的,结果也确证水平横向力  $F_s$  大约为竖向轮力  $F$  的  $1/3$ <sup>[6]</sup>。

朔黄铁路设计时速为 80 km/h,目前朔黄铁路重载列车运营速度大部分在 55~75 km/h,为了分析加固前后列车行驶速度对桥梁结构横向振动的影响,有限元分析过程中,通过定义不同的时程函数模拟了 C80 重载列车分别以 55 km/h、60 km/h、65 km/h、70 km/h、75 km/h、80 km/h 通过桥梁结构。动力分析时 C80 列车简化荷载如图 5 所示。

### 2.3 有限元分析结果

C80 重载列车以不同速度通过桥梁结构时,桥梁加固前、仅增加 T 梁横向连接刚度、仅增加桥墩横向刚度以及同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩刚度四种状态,跨中横向振幅计算值统计如表 1 所示,跨中横向振幅计算值与列车行驶速度关系如图 6 所示。

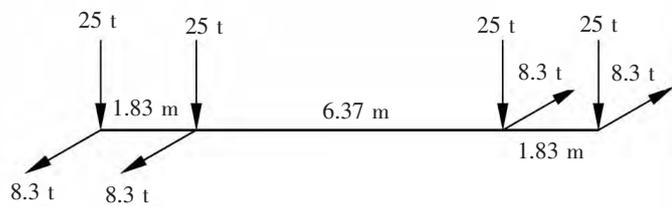


图 5 动力分析时 C80 列车简化荷载图

表 1 加固前后桥跨跨中横向振幅计算值统计表

结构状态	速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )						mm
	55	60	65	70	75	80	横向振幅降低比例/%
未加固	2.31	2.67	2.81	2.61	2.46	2.23	—
梁加固	2.06	2.25	2.48	2.37	2.21	2.06	11.7
墩加固	1.53	1.68	1.92	2.15	2.02	1.79	23.5
墩梁均加固	1.28	1.44	1.51	1.75	1.92	1.62	31.7

从表 1 和图 6 中数据可以看出:桥梁加固前跨中 C80 列车通过桥梁结构时跨中最大横向振幅计算值为 2.81 mm, 超过《桥梁检定规范》中安全限值(2.54 mm)的要求, 仅增加 T 梁横向连接刚度后, 跨中横向最大振幅值计算值为 2.48 mm, 与加固前相比降低 11.7%; 仅增加桥墩横向刚度后跨中横向振幅为 2.15 mm, 与加固前相比降低 23.5%; 采取同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度后跨中横向振幅为 1.92 mm, 与加固前相比降低 31.7%。与同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度相比, 仅增加 T 梁横向连接刚度可以达到 37%的加固效果, 仅增加桥墩横向刚度可以达到 74%的加固效果。

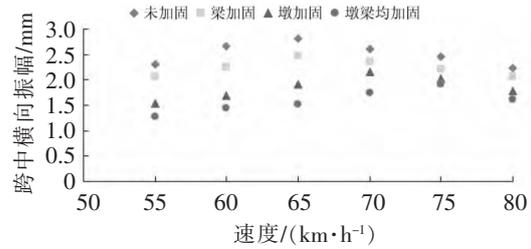


图 6 跨中横向振幅计算值与列车行驶速度关系图

C80 重载列车以不同速度通过桥梁结构时, 4 种结构状态下, 墩顶横向振幅计算值统计如表 2 所示, 墩顶横向振幅计算值与列车行驶速度关系如图 7 所示。

表 2 加固前后墩顶横向振幅计算值统计表

结构状态	速度/(km·h <sup>-1</sup> )						横向振幅降低比例/%
	55	60	65	70	75	80	
未加固	0.81	0.96	1.08	1.01	0.92	0.86	—
梁加固	0.76	0.88	1.02	0.97	0.86	0.78	5.6
墩加固	0.45	0.58	0.65	0.74	0.67	0.59	31.5
墩梁均加固	0.38	0.43	0.45	0.52	0.6	0.54	44.5

从表 2 和图 7 中数据可以看出:桥梁加固前 C80 列车通过桥梁结构时墩顶最大横向振幅计算值为 1.08 mm, 超过《桥梁检定规范》中安全限值(0.81 mm)的要求, 仅增加 T 梁横向连接刚度后, 墩顶横向振幅最大计算值为 1.02 mm, 与加固前相比降低 5.6%; 仅增加桥墩横向刚度后, 墩顶横向振幅为 0.74 mm, 与加固前相比降低 31.5%; 采取同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度后, 墩顶横向振幅为 0.60 mm, 与加固前相比降低

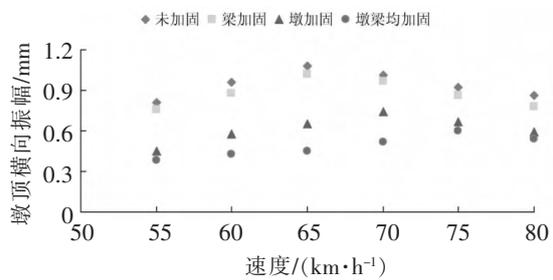


图 7 墩顶横向振幅与结构状态关系图

44.5%。与同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度相比, 仅增加 T 梁横向连接刚度可以达到 12.5%的加固效果, 仅增加桥墩横向刚度可以达到 70.8%的加固效果。

### 3 运营性能试验分析

结构的横向振幅直接反映结构横向振动特性,《铁路桥梁检定规范》中对桥梁结构的跨中横向振幅通常值,安全限值,墩顶横向振幅通常值均有规定。

试验中采用 SS4+55C64 列车作为试验编组列车, 分别以速度 60 km/h、65 km/h、70 km/h、75 km/h 和 80 km/h 通过桥梁结构, 测试中在跨中及墩顶位置布置动态测点采集列车通过时跨中及墩顶横向振动参数, 将加固前与同时增加 T 梁横向连接刚度后测试数据进行对比分析, 并与《铁路桥梁检定规范》中有限值进行对比, 分析加固效果。加固前后 20 孔跨中横向振幅实测值统计见表 3 所示。

表 3 加固前后 20 孔跨中横向振幅统计表

参数	速度/(km·h <sup>-1</sup> )				
	60	65	70	75	80
加固前	2.16	2.37	2.96	2.51	2.34
加固后	1.15	1.29	1.52	1.69	1.47

由表 3 中数据可知,编组列车荷载作用下加固前 20 孔跨中横向振幅最大值为 2.96 mm,对应列车行驶速度为 70 km/h,超过《铁路桥梁检定规范》规定通常值(2.54 mm)的要求,加固后 20 孔跨中最大横向振幅为 1.69 mm,对应列车行驶速度为 75 km/h,与加固前相比,跨中横向振幅减小 43.1%,共振速度提高了 5 km/h。加固前后 19# 墩、20# 墩墩顶横向振幅实测值统计见表 4 所示。

表 4 加固前后墩顶横向振幅统计表

mm

结构状态	桥墩	速度/(km·h <sup>-1</sup> )					安全限值
		60	65	70	75	80	
加固前	19# 墩	0.52	0.93	1.21	1.12	0.95	0.82
	20# 墩	0.42	0.86	1.15	1.11	0.89	0.77
加固后	19# 墩	0.45	0.51	0.63	0.79	0.57	0.82
	20# 墩	0.41	0.49	0.58	0.73	0.53	0.77

由表 4 中数据可知,编组列车荷载作用下加固前,19# 墩墩顶横向振幅最大实测值为 1.21,对应列车行驶速度为 70 km/h,超过《铁路桥梁检定规范》规定安全限值(0.82 mm)的要求,加固后墩顶横向振幅最大实测值为 0.79 mm,满足规范要求,对应列车行驶速度为 75 km/h,加固后 19# 墩墩顶横向振幅降低 34.7%。20# 墩墩顶横向振幅最大实测值为 1.15,对应列车行驶速度为 70 km/h,超过《铁路桥梁检定规范》规定安全限值(0.77 mm)的要求,加固后墩顶横向振幅最大实测值为 0.73 mm,满足规范要求,对应列车行驶速度为 75 km/h,加固后 20# 墩墩顶横向振幅降低 36.5%。

## 4 结论

随着重载运输的不断发展,既有重载铁路桥梁出现桥跨及桥墩横向刚度不足而导致桥跨横向晃动过大,影响行车安全,本文以朔黄铁路 32 m 预应力混凝土 T 梁和分离式矩形板式墩为研究对象,提出仅增加 T 梁横向连接刚度、仅增加桥墩横向刚度、同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度的 3 种加固方法,通过有限元模拟分析 3 种加固方法加固效果并结合现场运营性能试验数据,可得如下结论:

(1)就降低跨中横向振幅而言,3 种加固方法中,同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度加固效果最佳,增加桥墩横向刚度的加固方法优于采取仅增加 T 梁横向连接刚度的加固方法。

(2)就控制墩顶横向振幅而言,3 种加固方法中,同时增加 T 梁横向连接刚度和桥墩横向刚度加固效果略优于增加桥墩横向刚度的加固效果,仅增加 T 梁横向连接刚度的加固方法对墩顶横向振幅抑制效果不明显。

## 参 考 文 献

- [1]钱立新.世界铁路重载运输技术的最新进展[J].世界轨道交通,2007(12):20-23.
- [2]兰晓峰,刘鹏辉,尹京,等.大准铁路 32m 预应力混凝土梁桥横向振动性能试验研究[J].铁道建筑,2010(9):16-19.
- [3]夏禾,陈英俊.车-梁-墩体系动力相互作用分析[J].土木工程学报,1992,25(2):3-12.
- [4]李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1991:269-310.
- [5]陈淮,曾庆元.桥上列车横向摇摆力的随机分析[J].桥梁建设,2002(2):1-4.
- [6]曾庆元,郭向荣.列车桥梁时变系统振动分析理论与应用[M].北京:中国铁道出版社,1999:201-209.

## Analysis of Reinforcement Method for 32 m Prestressed Concrete T-beams Under Heavy-load Transportation

Li Baolong

(Development Co. Ltd. of Shuo-Huang Railway, Suning 062350, China)

**Abstract:** With the sustainable development of overload transportation in our country, the increases of train formation, the increases of vehicle axle load, the increases of operating density, bridges present-

ly in service are subject to excessive transverse vibration, which will endanger the safety of train operation. Taking the 32 m prestressed concrete T-beams plus double separated bridge pier and enlarged foundation, which is a main structure form in Shuohuang-railroad, as the research object, with the method of finite element simulation analysis and field measurement, this article studies the reinforcement effect of T-beam cross connection and pier transverse rigidity. The results show that, only increasing the stiffness of transverse connection of T beams reduces the transverse vibration of the span structure, while only reinforcing the transverse stiffness of bridge pier has a significant effect on controlling the lateral vibration of both bridge span and bridge piers, and the effect of this measure on the lateral vibration of bridge span is better than the measure to increase the lateral connection stiffness of T-beam. Compared with the previous measures, increasing T-beam transverse connection and the transverse stiffness reinforcement of bridge pier in the meantime makes the effect best, with a better effect on transverse vibration of the pier than only increasing the transverse stiffness of the pier.

**Key words:** heavy railway; lateral amplitude; bridge reinforcement method; operation performance experiment

(上接第 16 页)

## Reasonable Arrangement of Rail Fastener and Telescopic Adjustment on Hybrid Girder Cable-stayed Bridge

He Yongchang

(Xuzhou Railway Hub Project Construction Headquarters of Shanghai Railway Administration, Xuzhou 221003, China)

**Abstract:** Based on the construction of large-span freight railway box hybrid girder cable-stayed bridge, the spatial analysis model of the interaction between continuous welded rail and bridge structure is established. The effect of rail fastener type and telescopic adjustment arrangement on longitudinal interaction of the rail-bridge system is analysed systematically. The reasonable layout program of fastening and telescopic adjustment is put forward. The results of the study indicates that the magnitude of the rail braking force can be slightly reduced, rail stretching force be significantly decreased, and rail flexural force be cut down when small resistance fasteners is layed on the bridge. The longitudinal interactions of track-bridge system is lowered furthest when rail telescopic adjuster is set at both ends of the main bridge.

**Key words:** CWR; box girder; hybrid girder cable-stayed bridge; track-bridge interaction; rail fastener; rail telescopic adjuster