

梁端斜裂缝对重载铁路 32 m 跨度简支 T 梁受力性能影响研究

罗慧刚

(朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司,山西 原平 034100)

摘要:以重载铁路 32 m 跨度简支 T 梁为研究对象,采用数值仿真分析和现场试验相结合的方法,开展梁端斜裂缝对桥梁受力性能影响研究。结果表明:重载运输快速发展引起桥梁结构主梁结构横向、竖向和纵向受力大幅增加,振动和疲劳加剧,简支 T 梁端部位置出现大量 45°斜向裂缝并迅速发展,斜裂缝引起桥跨结构竖向和横向自振频率降低,桥梁整体承载能力下降,危及行车安全,通过采用粘贴钢板等措施能够达到病害处治的目的。

关键词:重载运输;32 m 普通高度预应力梁;斜裂缝;受力性能

中图分类号:U24 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0012-08

0 引言

32 m 普通高度预应力混凝土简支 T 梁为我国重载运输铁路中的一种最主要梁型^[1],在朔黄铁路中,此种梁型就占全线桥梁孔数的 72%。随着重载运输快速发展,列车速度、轴重和运量大幅提高,在 32 m 跨度普通高度预应力混凝土简支 T 梁的端部位置出现大量斜裂缝并迅速发展^[2],对结构运营安全造成巨大不利影响。

针对铁路桥梁斜裂缝问题,刘圆、李保龙、张雪娟、郭洪春、高国良等^[1-5]针对重载铁路不同跨度简支 T 梁开展了梁端斜裂缝病害成因分析、开裂性分析和相关承载能力试验,在斜裂缝成因和现场试验方面取得了一定成果,而针对斜裂缝对桥梁受力性能影响方面的研究则很少。因此,本文以朔黄铁路桥梁为工程背景,以 32 m 跨度预应力混凝土简支 T 梁为研究对象,采用有限元仿真分析与桥梁运营性能试验相结合的方式,对 32 m 普通高度预应力混凝土梁端裂缝对桥梁受力及运营性能影响进行研究,为该类桥梁的梁端斜裂缝病害日常维管和养护加固提供研究基础。

1 工程背景

朔黄铁路某桥梁中心里程 K 129+086.54,双线桥,桥全长 239.62 m,由 7 孔 32 m 普通高度预应力混凝土简支 T 梁组成,主梁图号为专桥 2059。全桥支座采用盆式橡胶支座,活动支座设置于大里程侧。桥墩为单线单圆端型板式柱墩,基础为桩基础。该桥设计荷载为“中-活载”,目前桥梁运营列车最大轴重达到 30 t。日常检查中发现,该桥上行第 4 孔外侧梁小里程梁端存在斜裂缝,斜裂缝开展情况如图 1 所示,存在 3 条平行斜裂缝,斜裂缝最长 1.2 m,宽度最大值为 1.2 mm。

该梁截面图如图 2 所示。



图 1 梁端斜裂缝开展情况图

收稿日期:2017-03-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.03

作者简介:罗慧刚(1975-),男,高级工程师,主要从事铁道运输管理工作。E-mail:15833952282@163.com

罗慧刚.梁端斜裂缝对重载铁路 32m 跨度简支 T 梁受力性能影响研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):12-19.

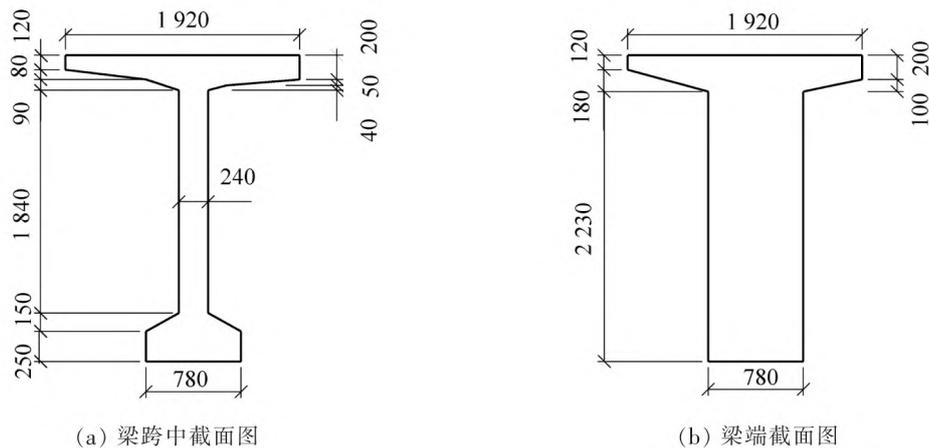


图 2 32 m 普通高度预应力混凝土梁截面图(单位:mm)

2 理论分析

梁端出现斜裂缝不可避免会对结构刚度有所影响,采用力学方法对简支 T 梁斜裂缝出现前后的抗剪刚度进行计算。

2.1 抗剪刚度分析

开裂前混凝土结构的抗剪刚度

$$K_1 = G \cdot A = 0.42E \cdot A \quad (1)$$

式中, G 为混凝土剪切模量; E 为混凝土的压弯弹性模量; A 为梁的横截面面积。

开裂后的梁体的抗剪刚度计算,一般采用平行桁架模型^[6-7],该模型将梁体顶部受压区混凝土模拟为桁架受压上弦杆,下部受拉钢筋模拟为桁架下弦受拉杆,箍筋和弯起钢筋模拟为中间受拉腹杆,腹板混凝土模拟为受压腹杆。按该方法计算得到开裂后的梁体的抗剪刚度 K_2 。

$$K_2 = b_0 Z \frac{\mu E E_s \sin^4 \alpha \sin^4 \theta (\cot \alpha + \cot \theta)^2}{E_s \sin^4 \theta + \mu E \sin^4 \alpha} \quad (2)$$

由于剪切斜裂缝角度一般为 $40^\circ \sim 45^\circ$,且抗箍筋为竖向布置,弯起钢筋为 45° 弯起。经简化后

$$K_{2,90^\circ} = b_0 Z \frac{\mu E E_s}{E_s + 4\mu E} \quad (3)$$

$$K_{2,45^\circ} = b_0 Z \frac{\mu E E_s}{E_s + \mu E} \quad (4)$$

式中, b_0 为梁宽度, T 梁时为腹板厚度; Z 为上下弦间距离; E_s 为钢筋的弹性模量; α 为弯起筋与横截面水平面的夹角; μ 为材料泊松比。

由以上分析可知,梁端存在斜裂缝后结构的抗剪刚度与混凝土腹板厚度,上下弦间距和材料的弹性模量有关,开裂后梁体混凝土不参与工作,抗剪刚度有所降低。

2.2 有限元模型介绍

有限元分析中裂缝的处理是关键问题,有限元分析中裂缝处理方式主要有两种模式:离散裂缝模式(Discrete Cracking Model)和片状裂缝模式(Smeared Cracking Model)^[8]。本文有限元分析过程中对裂缝的模拟采用离散裂缝模式,该模式假定裂缝置于单元之间,将节点分离在裂缝两侧。该模式可在梁中预先确定裂缝位置,并假定梁为线弹性体,裂缝沿相邻单元边界开展。

本文采用有限元计算软件 MIDAS/CIVIL 建立桥梁计算模型,采用三维实体单元对梁体进行模拟,使得计算结果更加精确。为研究斜裂缝对桥梁受力性能的影响,本文建立了带斜裂缝的梁体模型,对比两种模型的桥梁跨中挠度、应力以及桥梁自振频率等振动特性的计算结果。

桥梁计算的有限元模型如图 3 所示。

2.3 计算荷载

为研究运营列车荷载作用下桥梁结构振动参数情况,本文模拟计算 C80 重载列车以 70km/h 速度通过桥梁结构时结构的横向振幅、竖向振幅等,软件中采用节点动荷载模拟车辆移动荷载,在节点上施加竖向节点荷载和横向节点荷载,横向节点荷载的取值为竖向荷载的 1/3^[4],荷载图示如图 4 所示,施加节点动荷载的有限元计算模型如图 5 所示,通过振型叠加计算桥梁结构的振动特性。C80 重载列车轴重 F 为 25 t, F_s 取 8.33 t, l_1 为 1.83 m, l_2 为 6.37 m。

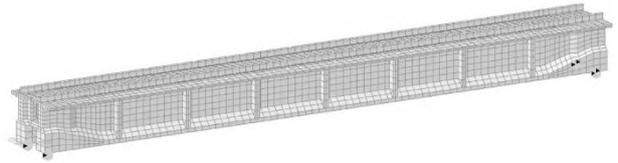


图 3 桥梁完好状态的有限元计算模型

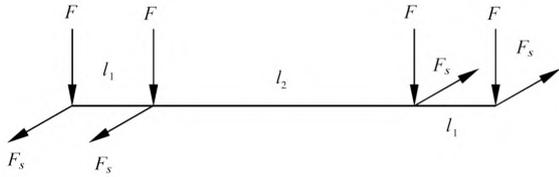


图 4 列车移动节点荷载图

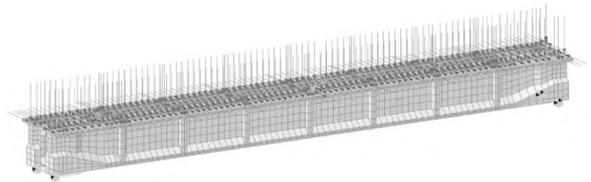
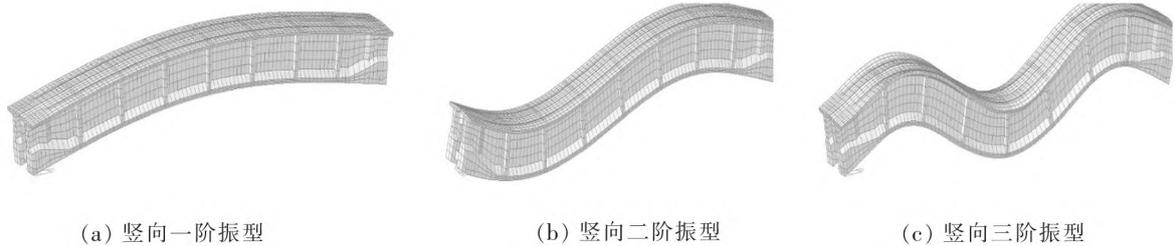


图 5 移动荷载计算模型图

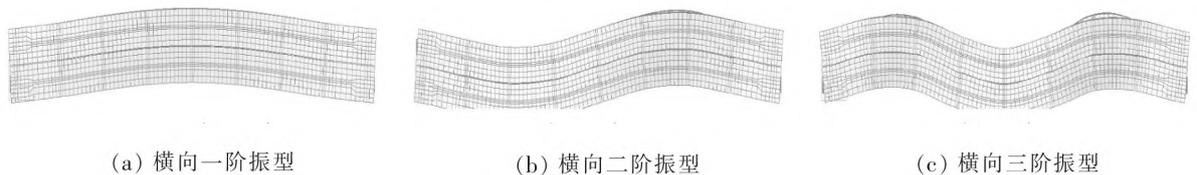
2.4 分析结果

为了研究斜裂缝对梁体振动性能的影响分别计算桥梁在有裂缝情况下和无裂缝情况下,结构的竖向自振频率和横向自振频率,分别计算了桥梁竖向和横向前 3 阶自振频率。计算结果表明,桥梁梁端裂缝对桥梁结构的横向前 3 阶横向振型和竖向振型无影响,对其自振频率有影响,桥梁结构前 3 阶竖向振型图如图 6 所示。桥梁结构横向振型图如图 7 所示。自振频率计算值统计表见表 1 所示。



(a) 竖向一阶振型 (b) 竖向二阶振型 (c) 竖向三阶振型

图 6 桥梁结构竖向振型图



(a) 横向一阶振型 (b) 横向二阶振型 (c) 横向三阶振型

图 7 桥梁结构横向振型图

表 1 梁体自振频率计算值统计分析表

桥梁状态	竖向自振频率/Hz			横向自振频率/Hz		
	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
完好	4.93	16.47	39.78	6.12	14.99	25.68
存在斜裂缝	4.74	14.21	23.06	5.94	13.24	20.78
相差比例/%	3.85	13.72	42.03	2.94	11.67	19.08

由表 1 中数据和振型计算结果可知,梁端斜裂缝对桥梁结构的前 3 阶振型无影响,但对自振频率大小有影响。对比计算数据可知存在斜裂缝梁体竖向和横向自振频率与完好状态梁体相比均有所降低,裂缝对自振频率的影响随着自振频率阶数的增加更加明显,此外对相同阶振型而言,梁端斜裂缝对竖向自振频率的影响与横向自振频率相比较较大。

为模拟重载列车通过桥梁结构时,完好状态桥梁和存在斜裂缝桥梁振动特性的差异,模型中模拟 C80 重载列车,以 70 km/h,通过桥梁结构时,计算结构的横向振幅和竖向振幅,结构振幅计算数据统计见表 2。

表 2 梁体振幅计算数据统计表

桥梁状态	横向振幅/mm	竖向振幅/mm
完好	0.72	0.93
存在斜裂缝	0.77	1.02
振幅差/%	6.94	9.68

由表 2 中数据可知,梁端斜裂缝导致梁体横向和竖向振动加剧,对梁体竖向振动影响与横向相比较大。

既有铁路线路为并置梁结构,两片 T 梁通过横隔板连接整体受力,当其中 1 片梁体存在梁端斜裂缝时,会影响结构整体受力特性,为研究其影响程度,计算分析了 C80 列车荷载作用下,两种状态的两片并置梁跨中挠度、应力和梁端剪力主应力,对两并置梁的数据进行相互对比,并与完好状态下梁体的计算数据进行对比,计算数据统计见表 3。

表 3 梁体挠度、应力计算数据对比表

桥梁状态	跨中挠度/mm	跨中应力/MPa	梁端剪应力/MPa	梁端主应力/MPa	
完好	外侧	16.36	7.37	1.42	1.16
	内侧	16.36	7.37	1.42	1.16
带裂缝梁	外侧带裂缝梁	16.89	7.58	—	—
	内侧无裂缝梁	16.57	7.52	1.54	1.23

由表 3 中数据可知,当并置梁中有 1 片梁存在斜裂缝时,两并置梁相比,无斜裂缝梁体的跨中挠度为 16.57 mm,梁底应力为 7.52 MPa,梁端剪应力为 1.54 MPa、主应力为 1.23 MPa,与全部完好状态两并置梁相比,梁体挠度差和应力均较大。由此可知,当并置梁中 1 片梁出现斜裂缝后会对整体桥梁受力带来影响,使得与之并置梁的受力较大,因此对梁端斜裂缝病害应及时处理,避免对其并置梁体带来不利受力影响。

3 运营性能试验

3.1 试验介绍

对斜裂缝严重的桥梁和无斜裂缝的桥梁开展运营性能对比试验,测试在运营列车荷载作用下桥梁跨中动挠度、动应变、梁体跨中竖向振幅、横向振幅、竖向自振频率、横向自振频率等振动参数,研究斜裂缝对梁体运营性能的影响。测试现场测点布置如图 8 所示。

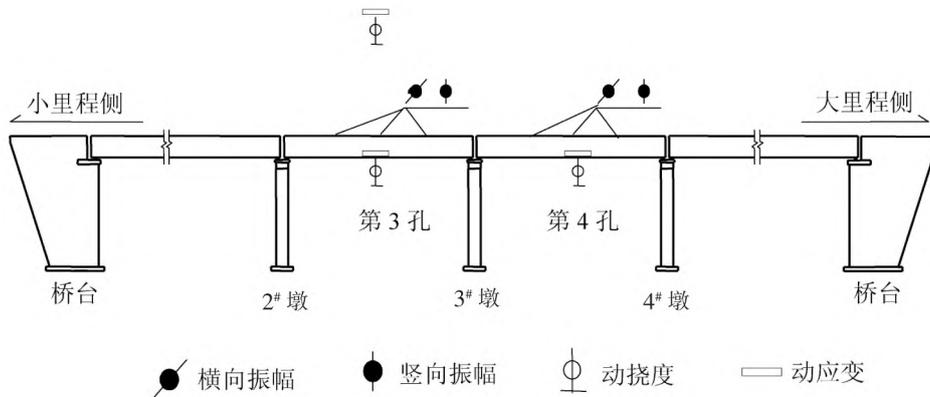


图 8 运营性能试验测点纵向布置

为研究斜裂缝对梁体协同受力的影响,同一孔两片梁梁底布置动挠度和动应变测点,梁体跨中截面测点布置如图 9。

3.2 试验结果分析

运营性能试验测试过路列车包括 C64、C70、C80 重载列车,列车行驶速度在 65~80 km/h 之间,统计

分析动挠度、动应变、横向振幅、竖向振幅、横向自振频率、竖向自振频率等振动参数的实测值,研究斜裂缝对桥梁结构的受力特性的影响。

3.2.1 跨中挠度

测试运营列车荷载作用下梁体跨中位置挠度值,为分析斜裂缝对梁体整体竖向刚度及并置梁协同受力的影响,对比分析两孔梁跨中挠度值和每孔两片梁挠度的差异情况。由于本次试验为运营性能试验,

按测试动挠度数据除以动挠度动力系数得到相应列车荷载下静挠度,根据计算得到不同列车荷载的荷载效率,将挠度值换算至“中-活载”作用下结构挠度值^[9],根据这一方法,换算至“中-活载”下桥梁跨中挠度实测结果统计表见表 4 所示,换算至“中-活载”下跨中挠度实测值对比柱状图如图 10 所示。

表 4 跨中挠度实测值换算至“中-活载”统计表

mm

荷载	第 3 孔		第 4 孔	
	外侧梁	内侧梁	外侧梁	内侧梁
C64	12.73	12.51	13.15	12.89
C70	12.81	12.60	13.49	12.98
C80	12.31	12.00	13.12	12.73

由表 4 和图 10 中数据可知:

换算至“中-活载”下,第 3 孔梁跨中挠度实测最大值为 12.81 mm,挠跨比为 1/2 498;第 4 孔梁跨中挠度实测最大值为 13.49 mm,挠跨比为 1/2 371。第 3 孔内外两片梁挠度差 0.21 mm,外侧梁比内侧梁大 1.67%,第 4 孔内外两片梁挠度差 0.51 mm,外侧梁比内侧梁大 3.93%。

通过挠度数据分析可知,列车作用下存在斜裂缝梁体的跨中挠度实测值与完好状态梁

体相比均较大,最大相差 6.5%,同一孔两片并置梁中有一片梁存在斜裂缝时,内外侧两片梁的跨中挠度实测值相差较大,最大相差 3.93%,表明斜裂缝对梁体整体竖向刚度有影响,导致梁体跨中挠度增大,并会导致两片并置梁受力不均。

3.2.2 跨中应力

列车荷载作用下跨中梁底混凝土应力增量实测值统计如表 5 所示。

表 5 跨中梁底应力增量实测值统计表

MPa

荷载	第 3 孔跨中		第 4 孔跨中	
	内侧梁	外侧梁	内侧梁	外侧梁
C64	3.34	3.28	3.85	3.64
C70	3.45	3.36	4.02	3.81
C80	4.41	4.32	5.18	4.85

由表 5 数据可知,相同列车荷载作用下,C80 列车荷载作用下,第 3 孔跨中梁底混凝土应力增量实测值最大为 4.41 MPa,第 4 孔梁内外侧梁跨中梁底混凝土应力增量实测值最大为 5.18 MPa,比第 3 孔大 25.8%,表明存在斜裂缝梁体的跨中梁底混凝土应力增量增大。第 3 孔内外侧两片梁相比,应力增量最

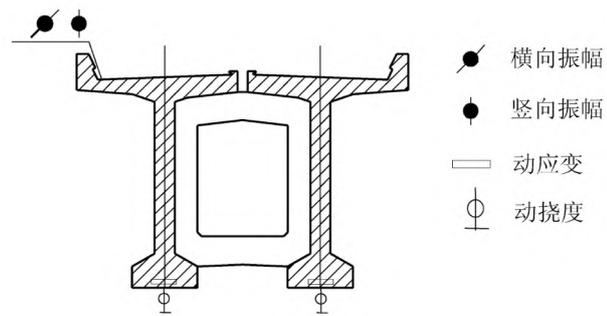


图 9 跨中截面测点横向布置图

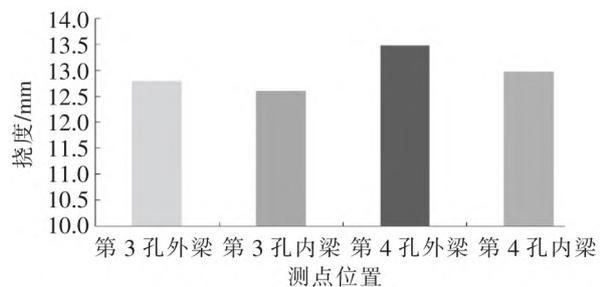


图 10 换算至“中-活载”下跨中挠度实测值对比图

大相差 2.68%，第 4 孔内外侧两片梁相比，应力增量最大相差 6.80%。

3.2.3 振动特性

对列车荷载作用下桥梁结构的跨中横向振幅实测值统计如图 11 所示，跨中竖向振幅实测数值统计如图 12 所示。跨中横向振幅、跨中竖向振幅实测最大值统计表见表 6 所示。

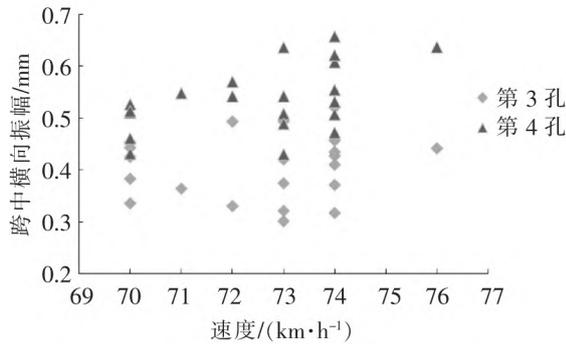


图 11 跨中横向振幅与速度关系图

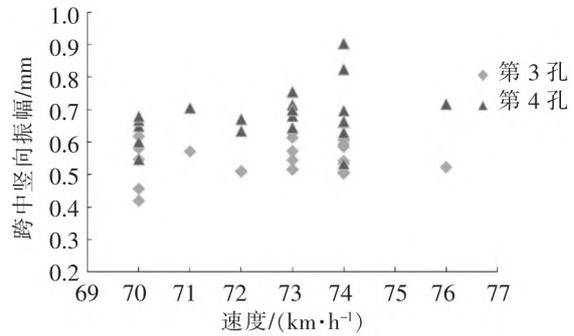


图 12 跨中竖向振幅与速度关系图

表 6 实测跨中振动参数最大值对比统计表

车型	跨中横向振幅/mm		
	第 3 孔	第 4 孔	相对差/%
跨中横振幅	0.52	0.63	26.9
跨中竖向振幅	0.63	0.91	44.4

由图 11、图 12 及表 6 可知：

同一列车荷载作用下第 4 孔(存在梁端斜裂缝)跨中横向振幅比实测第 3 孔(完好状态下)大，实测第 3 孔(完好状态下)跨中横向振幅最大值为 0.52 mm，第 4 孔(存在梁端斜裂缝)跨中横向振幅最大值为 0.66 mm，与完好状态相比大 26.9%。

同一列车荷载作用下第 4 孔(存在梁端斜裂缝)跨中竖向振幅比实测第 3 孔(完好状态下)大，实测第 3 孔(完好状态下)跨中竖向振幅最大值为 0.63 mm，第 4 孔(存在梁端斜裂缝)跨中横向振幅最大值为 0.91 mm，与完好状态相比大 44.4%。实测桥梁结构第 3 孔(完好状态)横向自振频率为 6.12 Hz，第 4 孔横向自振频率为 5.83 Hz。第 3 孔(完好状态)竖向自振频率为 4.98 Hz，第 4 孔横向自振频率为 4.37 Hz。

振动参数测试结果表明，梁端斜裂缝对桥梁结构的整体横向刚度和竖向刚度均有减弱，导致梁体横向振幅和竖向振幅增大，相比较而言，斜裂缝对桥梁结构的竖向刚度影响大于横向刚度影响，竖向振幅增加较大，竖向自振频率下降较快。

4 加固措施

针对桥梁裂缝的处理有多种方法，主要包括注浆法、体外预应力加固法、粘贴钢板法、粘贴碳纤维布和增大截面法等^[10]，各种加固方法及其优缺点统计分析见表 7 所示。

对比各种加固措施，针对 32 m 普通高度预应力混凝土梁端斜裂缝，由于其具有运量大、施工困难等特点，考虑施工便捷和加固效果问题，推荐采用粘贴钢板加固方法，可以有效提高梁体结构的抗剪性能，提高梁体整体刚度，且此方法施工方便，工艺简单，便于在既有铁路线全面开展梁端斜裂缝加固工作。

表 7 裂缝加固方法对比表

序号	加固方法	加固原理	优点	缺点	适用对象
1	注浆法	采用环氧树脂等浆体对裂缝进行注浆封堵	施工简单方便、工序简洁、效果明显	对裂缝只要封堵效果,对结构受力影响较小	非受力性微小裂缝
2	体外预应力	在梁体外通过加设预应力钢筋,使得梁体获得一定的预拱度,从而提高梁体结构的整体刚度,减小梁体挠度并使得裂缝闭合或缩小裂缝宽度。	加固效果明显	施工方法复杂,预应力钢筋外露易锈蚀,锚固块和转向装置不易设置	中小跨径梁体受力性裂缝
3	粘贴钢板	通过在梁体腹板或者底部粘贴钢板增大梁体的抗拉强度,提高了梁体的整体结构性	施工方便、工艺简单、所需工作面小	钢板容易锈蚀、需要选择合适的粘合剂	结构受力性裂缝
4	粘贴碳纤维布	通过在梁体腹板或者底部粘贴碳纤维布,增大梁体的抗拉强度,对裂缝进行了封闭	施工方便、工艺简单、所需工作面小、自重轻、耐腐蚀	延度较差、对结构刚度没有提高	受力性裂缝、非受力性裂缝均可
5	增大截面	在原结构外重新布设主筋浇注混凝土使其与原结构形成整体。	可大幅度提高结构整体刚度,增加结构的稳定性	结构自重增加较大、施工工期长、施工工序繁琐	适用于结构承载力严重不足的桥梁

5 结论

(1)32 m 预应力混凝土桥梁梁端斜裂缝,对桥梁横向和竖向振动特性产生不利影响,对桥梁结构竖向振动特性影响大于对横向振动特性的影响,此外随着振型阶数提高由于斜裂缝对自振频率的降低作用越明显。

(2)在试验荷载作用下存在斜裂缝梁体的跨中挠度和底板混凝土应力增量实测值与完好状态梁体相比均较大,分别最大相差 6.5%和 25.8%;当同一孔两片并置梁中有一片梁存在斜裂缝时,内外侧两片梁的跨中挠度实测值相差较大,最大相差 3.93%,表明斜裂缝使得桥梁结构整体承载能力下降明显。

参 考 文 献

- [1] 刘圆. 重载运输条件下既有铁路混凝土梁抗裂性分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [2] 李保龙. 重载运输条件下 32 m 预应力混凝土简支 T 梁加固方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016, 29(2), 33-37.
- [3] 郭洪春. 重载运输条件下 12 m 低高度混凝土梁承载力研究[J]. 国防交通工程与技术, 2017,15(2):36-39,42.
- [4] 张雪娟. 32 m 重载铁路超低高度梁安全运营性能试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2011.
- [5] 高国良. 重载铁路混凝土梁常见病害分析及处理对策研究[J]. 铁道标准设计,2016, 60(12): 74-79.
- [6] 王栋. 斜裂缝对预应力混凝土箱梁承载力与刚度的影响研究 [D]. 西安:长安大学,2005.
- [7] 左印波. 具有斜裂缝钢筋混凝土梁抗剪承载力的试验研究以及数值分析 [D]. 沈阳:东北大学,2011.
- [8] 郑开启,刘钊,史国钢,等. 带斜裂缝变截面混凝土梁剪切变形试验研究[J]. 土木工程学报, 2015,48:1-7.
- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁运函[2004]120 号,铁路桥梁检定规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [10] 韦荣强. 桥梁加固技术探析[J]. 建筑与工程,2011(17):316.

Influence of Inclined Crack on Loaded Property of 32 m Normal Highly Prestressed Concrete Beam

Luo Huigang

(Shuohuang Railway Development Co. Ltd., Yuanping 034100, China)

Abstract: Taking the 32m simply supported T beam of heavy haul railway as the object of study, combining the Finite Element Simulation Analysis and performance Test, the influence of the diagonal crack of beam end on mechanical properties of the bridge is studied. The conclusion is drawn: Rapid development of heavy haul transportation causes a sharp increase of transverse, vertical and longitudinal stresses of the main beam of the bridge structure, and the vibration and fatigue has sharply intensified, too, causing 45 degree diagonal cracks to appear on the beam-end of simply supported T beam and develop rapidly, which causes decreased vertical and transverse natural frequency of the bridge structure, and the general carrying capacity of the bridge is declined, thus endangering security of the vehicles. Measures such as sticking plates are adopted to treat these diseases.

Key words: heavy-load railway; 32m normal highly prestressed concrete beam; inclined crack; loaded property

(上接第 5 页)

- [3] Bakht B. Simplified analysis of edge stiffened cantilever slabs[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(3): 535-550.
- [4] 杨立坤, 黄思勇. 箱梁翼缘板的半无限板效应分析[J]. 城市道桥与防洪, 2011(6): 238-241.
- [5] 杨立坤, 赵传亮. 箱梁翼缘板的合理设计分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(17): 149-150.
- [6] 张岗, 贺拴海, 王新敏. 混凝土箱梁悬臂板计算方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(6): 58-62.
- [7] 白宝玉. 桥梁工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

Analysis of Load Effective Width of Long Cantilever Concrete Box Girder Flange Plate

Guo Xiaolei¹, Bu Jianqing²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Since the long cantilever concrete box girder increases the length of the flange plate, using the load effective width of flange plate from Chinese code to calculate stress will cause reinforcement not to tally with the actual condition. On the basis of finite element, large finite element software ANSYS is used to establish box girder model without boundary beam and box girder model with boundary beam. With different flange plate length and thickness and with load position at different slope, the load effective widths are calculated to make a comparison and analysis. The conclusion shows that responses of boundary beams of long cantilever flange plate should not be ignored. Based on the principle of least square method, the Matlab software is used to fit the formula of load effective width of flange plate of the box girder model without boundary beam and box girder model with boundary beam, giving help to its reinforcement design.

Key words: long cantilever; flange plate; boundary beam; least square method; load effective width