网络出版时间：2014-06-16 16:25
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2014.02.02.html
第27卷 第2期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 27 No. 2
2014年6月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Jun. 2014

重载运输下大跨度钢桁梁桥病害分析及试验研究

张二田

(朔黄铁路发展有限责任公司,河北 肃宁 062350)

摘要:随着重载运输的不断发展,铁路钢桥病害日益凸显。以朔黄铁路64 m下承式钢桁梁为对象,对其出现的典型支座病害的成因、处理方法和病害对桥梁运营的影响进行了系统的分析研究。研究结果表明:由于4个支座之间存在高低不平,且支座表面存在一定程度的不平整,支座部位构件产生了一定程度的初始应力,在重载列车的反复作用下,导致支座联接构件出现疲劳断裂破坏,进而引起桥跨结构跨中横向加速度、竖向振幅的急剧增大和主桁杆件受力的显著变化,危及行车安全。通过更换结构部件和改变支座高程的方法能够消除支座病害影响,整治效果显著。

关键词:重载铁路;钢桁梁桥;病害分析;性能试验

中图分类号:U443 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2014)02-0006-07

0 引言

重载铁路运输因其运能大、效率高、社会和经济效益明显已经受到世界各国铁路运输部门青睐[1],作为继大秦铁路之后我国第二条重载运输铁路,朔黄铁路部分列车轴重已经提高到25 t,并且已开行1万t重载列车,正在试运行2万t重载列车,2013年运量已达2.41亿t,2014年运量目标超过3亿t。

重载运输条件下,列车轴重大、运营密度高的特点易导致钢桥疲劳损伤或加剧既有损伤的发展[2]。重载运输作用下钢桁梁桥可能出现的病害主要表现在以下几个方面:

(1)运营荷载对桥梁结构的冲击加大,引起桥梁结构动力系数的增加和应力幅的增大,疲劳加剧,导致结构构件产生疲劳断裂,对钢桁梁桥的疲劳承载力产生不利影响。

(2)对于钢桁梁的各个杆件而言,年运量和车辆轴重不断增加会导致其应力幅和循环次数逐年提高,容易造成杆件切口处出现张开型裂纹或连接部件出现撕开型裂纹。

(3)导致钢桁梁桥出现杆件锈蚀、油漆剥落、螺栓松动、断裂等现象,进而导致截面损失、应力集中等现象出现,降低结构的承载能力。

(4)导致支座受力、冲击增大,进而产生支座倾斜、联接板开裂、螺栓断裂、支座锈蚀等病害,严重情况下产生“三条腿”不均衡受力现象,影响运营安全。

2013年5月,在对朔黄铁路桥梁进行日常检查过程中,发现243#桥第30孔下承式钢桁梁桥支座位置处出现了病害,支座垫板与横梁联接节点板之间的联接角钢发生了断裂情况。本文主要采用理论分析计算、钢桁梁桥线形测量、支座高程测量和现场性能试验等手段,对支座病害的成因、处理方法和病害对桥梁运营的影响进行了系统的分析研究。

1 桥梁病害情况

朔黄铁路南运河特大桥上行线(中心里程K499+979.3)第30孔为64 m栓焊下承式钢桁梁,桥面系

DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2014.02.02
收稿日期:2013-10-21
作者简介:张二田 男 1970年出生 高级工程师
基金项目:铁道部科技研究开发计划(2012G011-A)

全长 65.24 m,主桁上、下弦杆截面采用焊接 H 形截面,桥面系采用纵横梁结构,上、下平纵联均为焊接工字形截面,钢支座、固定支座设于黄骅港方向。桥墩为圆端形板式桥墩,墩身采用 C25 混凝土浇筑。基础采用钻孔桩基础。桥梁正立面图如图 1 所示。

2013 年 5 月,在对该桥进行日常检查过程中,发现固定支座发生了病害,发生病害的支座是黄骅方向固定支座处(上行线位置,重车,见图 1 所示病害支座位置)。病害具体情况为:病害发生在支座垫板与横梁联接节点板之间的联接角钢上,联接角钢发生了纵向断裂破坏,裂缝长度纵向贯通,角钢断裂情况如图 2 所示。图 2 中显示的是桥上没有列车通过时的情况,此时联接角钢与支座上方垫板之间存在空隙,高度大约为 2.0 mm。当桥梁有列车通过时,联接角钢向下压死,与支座垫板之间没有空隙,紧密贴合。

图 1　桥梁正立面图

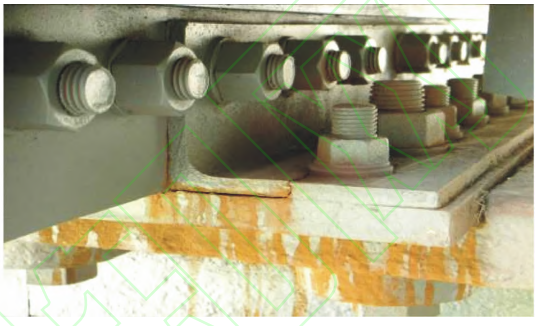


图 2　联接角钢断裂

2　病害成因分析

2.1　大轴重运输对结构影响分析

目前朔黄铁路运营重载列车包括 C64、C70、C80 三种类型,轴重分别为 21 t、23 t、25 t,随着扩能运输发展,远期计划轴重提高到 27 t 或 30 t。重载运输列车轴重提高必然导致桥梁结构荷载作用效应增加,本文采用有限元计算软件 MIDAS/Civil 建立了 64 m 单线铁路钢桁梁桥计算模型,计算分析了 C64、C70、C80 及中-活载共 4 种荷载作用下桥梁结构的反应,计算结果及荷载效率统计见表 1 所示。

表 1　64 m 单线钢桁梁桥杆件内力及荷载效率统计表

作用效应	列车荷载				荷载效率			
	C64	C70	C80	中-活载	C64	C70	C80	中-活载
主梁弯矩/(kN·m)	15 318.2	16 714.7	18 176.4	23 084.2	0.66	0.72	0.79	1.00
主梁跨中挠度/mm	29.38	32.22	34.98	45.19	0.65	0.71	0.77	1.00
支座反力/kN	1 049	1 156.3	1 271.8	1 638.5	0.64	0.71	0.78	1.00
桥门架斜杆轴力/kN	1 065.6	1 171.3	1 277.2	1 699.1	0.63	0.69	0.75	1.00
上弦杆轴力/kN	1 321.9	1 450.3	1 575.0	2 031.7	0.65	0.71	0.78	1.00
下弦杆轴力/kN	1 070.2	1 172.8	1 271.0	1 660.2	0.64	0.71	0.77	1.00
竖杆轴力/kN	291.9	328.2	374.0	496.2	0.59	0.66	0.75	1.00
纵梁弯矩/(kN·m)	342.5	399.2	507.2	572.7	0.60	0.70	0.89	1.00
横梁弯矩/(kN·m)	585.3	660.7	759.7	997.6	0.59	0.66	0.76	1.00

由表 1 可知,随着轴重的增加,主梁弯矩、主梁跨中挠度、支座反力、纵横梁弯矩和各杆件应力增大趋势明显,其中主梁及纵横梁弯矩、主梁挠度和支座受力增幅明显,轴重从 21 t 提高到 25 t,相应增量一般均在 19% 以上。轴重由 21 t 提高到 25 t,荷载效率明显增大。荷载效率增大意味着结构安全储备降低[3],较低的安全储备会影响桥梁结构的运营安全,同时也加剧了桥梁结构病害的出现几率。

轴重和运量的增加导致支座受到的冲击和受力明显增大,轴重从 21 t 提高到 25 t,支座反力增大 21%,结构构件受到了更大的荷载作用,可能会导致支座倾斜、联接板开裂等病害的出现,而运量的急剧增加则会导致支座位置处联接构件应力幅和循环次数大幅提高,疲劳加剧,严重时可引起结构构件的疲劳断裂。

2.2　钢桁梁线形测量

由于施工误差、墩台沉降、荷载长期作用等因素共同作用,既有钢桁梁桥线形与设计存在不同程度的

差异。在桥梁支座出现病害以后首要考虑对其线形进行准确测量,分析桥梁是否存在扭转变形而引起结构的附加应力。钢桁梁既有线形测点布置及编号如图 3 所示,测点布置在横梁上。钢桁梁桥既有线形测量数据见表 2 所示。

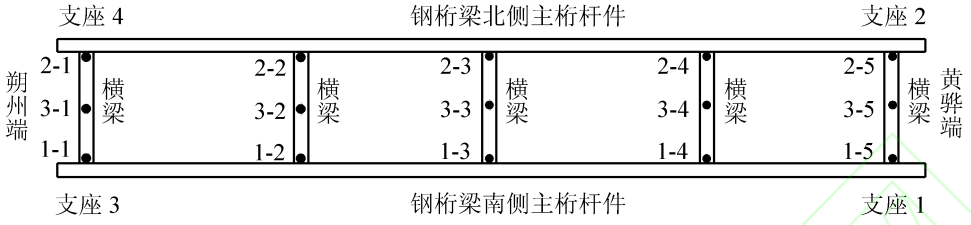


图 3 钢桁梁既有线形测点布置图

表 2 钢桁梁桥既有线形测量结果(相对高程)

测点位置	测点编号	内侧测点(1-*)/mm	中间测点(3-*)/mm	外侧测点(2-*)/mm
朔州端端部横梁(西)	*-1	26	23	20
1/4 跨横梁	*-2	53	50	46
1/2 跨横梁	*-3	57	52	43
3/4 跨横梁	*-4	46	40	34
黄骅端端部横梁(东)	*-5	10	5	0

说明:约定所有测点中最低点高程为 0,测量出其它各点相对于最低点的高程。

钢桁梁既有线形测量结果表明:钢桁梁桥纵向整体上表现为西高东低,西端支座处比东端支座处高约 20 mm,钢桁梁桥横向整体上表现为内侧高,外侧低,西端内侧比外侧高 6 mm,东端内侧比外侧高 10 mm,跨中位置处内侧比外侧高 13 mm,南北两侧最大高差相差 7 mm,存在一定程度的扭曲变形。

钢桁梁桥线形测量结果表明:固定支座 2 处高程最低,列车通过时,支座 2 处产生的冲击效应最大,容易引起支座倾斜、联接板断裂等病害出现。

2.3 支座高程测量

选择每个支座垫板平面的 4 个角点进行相对高程测量,分析支座本身是否存在不平整。同时测量 4 支座之间的相对高程,观察 4 个支座之间高程是否存在差别。图 4 为支座高程测点布置图。4 个支座中最低点为支座 2 将其高程设为 0,其余 3 个支座相对高程分别为:支座 1 为 10.6 mm、支座 3 为 27.3 mm、支座 4 为 22.7 mm。固定支座 2 在桥上过车时,断裂角钢与支座垫板间隙闭合,此时支座 2 上方与主桁斜杆联接的垫板上表面 2 个角点(垫 2-2,垫 2-3)相对高程与桥上无车时不同,两个角点中垫 2-2 最低,将其高程设为 0,桥上有车时垫 2-3 相对高程为 2.2 mm,桥上无车时垫 2-3 相对高程为 0.4 mm。

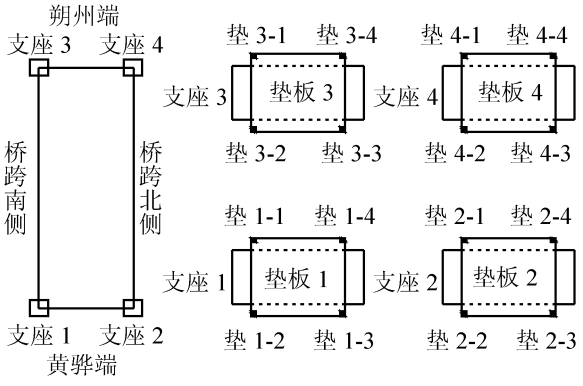


图 4 支座水准测点布置图

支座相对高程测量结果表明:全桥 4 个支座之间存在较大的相对高差,相对高程最大相差 27.3 mm,其中支座 2 最低,支座 3 最高,固定端支座 1、2 间高差较大,二者相差 10.6 mm,活动端支座 3、4 间高差较小,二者相差 4.6 mm,支座高程整体表现为活动支座高、固定支座低。

支座 2 角点之间的相对高程测量结果表明:列车通过时,支座垫板与横梁联接节点板之间联接角钢

向下与支座垫板紧密贴合,支座 2 上方垫板 2 个角点间的最大相对高差值为 2.2 mm,远大于《铁路桥隧建筑物修理规则》[4] 中第 3.4.2 条规定的要求(≤ +0.2 mm)中规定。当桥上无车时,支座垫板与横梁联接节点板之间联接角钢向上翘起,此时支座 2 上方垫板 2 个角点间的最大相对高差值为 0.4 mm。

支座高程测量结果表明:全桥支座和支座 2 上方垫板均存在一定程度的高低不平,使得支座部位联接构件产生了较大的初始应力,在大轴重、大运量荷载作用下极易产生疲劳破坏。

2.4　病害成因分析与整治措施

根据理论分析结果、钢桁梁线形测量结果和支座高程测量结果,经过分析研究,认为固定支座出现病害的原因主要是:由于 4 个支座间存在较大的高低不平,梁体结构存在一定的扭转变形现象,而支座 2 上方垫板 4 个角点之间也存在一定程度的不平整,导致在此处支座位置处的联接构件存在较大的初始应力,列车轴重和运量的增加导致支座受力和冲击效应明显增大,引起支座处联接构件的应力幅和循环次数大幅提高,在重载列车的不断冲击及反复作用下,支座上方联接角钢发生了疲劳断裂破坏。

根据分析得到的病害成因,经过多方论证,制定了病害整治措施。具体的病害整治措施是:

(1)更换病害处支座垫板与节点板联接角钢,加大角钢尺寸。

(2)更换桥门架斜杆下方与支座联接位置缀板。

(3)在支座垫板与节点板联接角钢下垫 2 mm 钢板,保证支座水平。

(4)将角钢与支座垫板和节点板联接螺栓、缀板与横向联接节点板联接螺栓全部更换。

为了保证施工安全和桥梁结构运营安全,采用在工厂内预先将结构构件加工好,再在钢桁梁桥现场突击更换的施工方法,具体施工在工务维修的天窗点内完成,2013 年 6 月下旬完成了朔黄铁路 243#桥的支座病害整治工作。

3　现场性能试验

支座病害必然引起桥梁结构受力发生改变,因此,为了研究支座病害对桥梁结构的影响,验证整治效果,在支座病害发生后和整治完成后分两次进行了现场性能试验,主要完成了运营性能试验和主桁杆件动应变测试。

3.1　运营性能试验

在支座病害整治前后分别对桥梁结构进行运营性能试验,主要测试内容包括桥梁运营列车荷载作用下结构的动力系数、梁跨跨中振幅、梁跨跨中竖向振幅、横向加速度和梁跨自振频率等运营性能指标,对比病害整治前后及历史测试数据(2008 年静动载试验和 2012 年运营性能试验数据),分析病害对桥梁结构安全运营的影响程度,验证病害整治效果。

2008 年、2012 年及 2013 年支座病害整治前后共进行了 4 次运营性能试验,试验数据表明:运营列车以现行速度通过测试桥跨时,支座病害整治前后,实测桥跨结构跨中最大横向加速度和竖向振幅测试数据变化较为明显,其它测试参数(桥跨跨中横向振幅、墩顶横向振幅、桥跨结构横向自振频率等)基本上满足规范要求。图 5 为跨中横向振动加速度散点图,图 6 为不同类型车型作用下跨中横向加速度平均值对比图,图 7 为跨中竖向振幅散点图。

从图 5 中可知,速度范围为 65 ~ 75 km/h 的运营列车通过测试桥跨时,4 次测试中运营列车作用下试验桥跨实测跨中最大横向加速度变化较明显。病害整治前,实测最大横向加速度为 1.57 m/s^2(C64),不能满足《铁路桥梁检定规范》[5] 所规定的≤1.4 m/s^2 的要求。病害整治前实测跨中横向加速度最大值较 2008 年测试数据和 2012 年测试数据增幅明显,且有多次测次数据超出《铁路桥梁检定规范》所规定的限值。病害整治后实测横向加速度与前 3 次测试数据相比明显减小,能够满足《铁路桥梁检定规范》所规定的限值要求,整治效果显著。

从图 6 中可知,2008—2012 年,随着时间推移,实测桥跨跨中横向加速度平均值逐渐增大,在支座病害发生后达到最大,支座病害整治完成后明显减小。对比不同类型列车作用情况,C64 列车作用下桥梁结构横向加速度最小,C80 列车作用下最大。

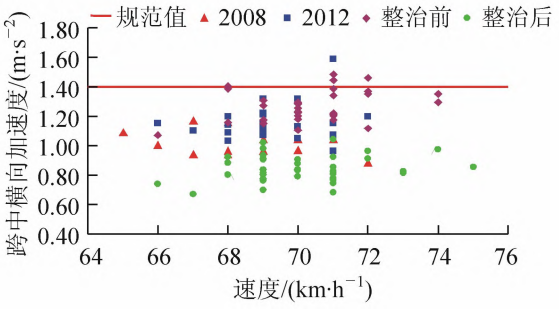


图 5 跨中横向加速度(最大值)散点分布图

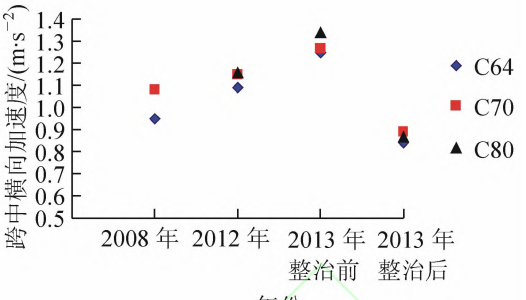


图 6 跨中横向加速度平均值对比图

从图 7 中可知,支座病害发生后,桥跨跨中竖向振幅数值较大,有部分测次数据已经超过 2.00 mm,病害整治后,跨中竖向振幅明显减小,降幅在 20% 以上,所有测次数据均小于 2.00 mm,整治效果明显。

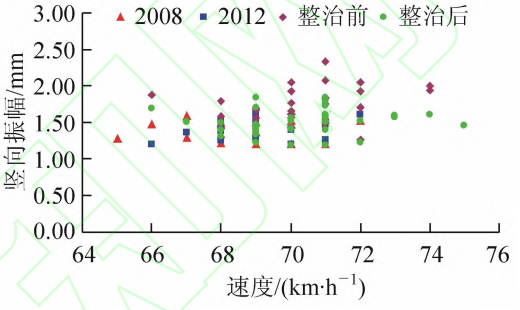


图 7 跨中竖向振幅(最大值)散点分布图

根据 2008—2012 年共 4 次运营性能试验数据可以判断出,支座病害的发生是一个损伤累积变化的过程,随着运量和轴重的不断增加,支座受到的反力和冲击不断增大,在荷载的反复作用下,引起了结构发生疲劳断裂破坏。而支座病害对桥梁结构有很大的不利影响,能够引起桥跨跨中横向加速度和竖向振幅的急剧增大,影响运营安全,因此,必须对钢桁梁桥的运营性能指标进行定期观测,及时发现问题,保证大桥始终处于良好的工作状态。

3.2 杆件动应变测试

支座病害会对其临近的杆件受力产生影响,同样,杆件受力变化也会影响或者加剧支座病害变化。因此,在支座病害发生后和支座病害整治后分两次对支座附近主桁杆件进行了动应变测试,主要测试正常运营列车通过时病害支座上方桥门架斜杆和横向对称位置未发生病害支座上方斜杆动应变增量,测试中每根斜杆布置 6 个测点(测点布置及编号如图 8 所示),通过对比分析桥门架斜杆动应变增量测试数据,分析病害产生原因及对结构受力和运营安全的影响程度。

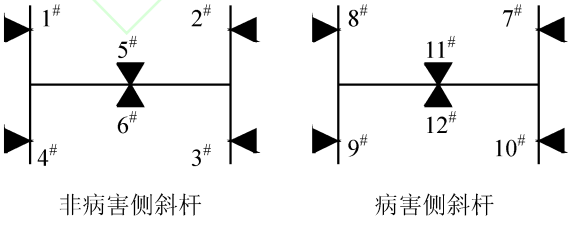
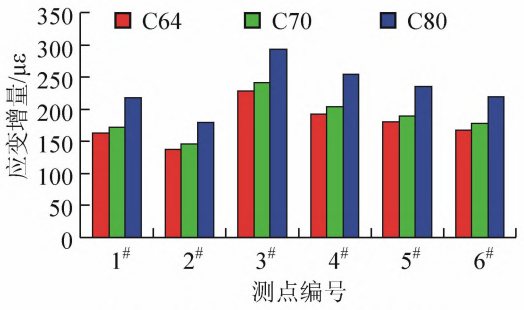


图 8 动应变测点布置图

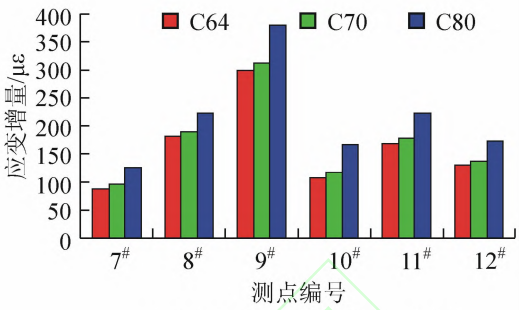
病害整治前各测点所有测次动应变增量最大值的平均值分布图如图 9 所示,病害整治后各测点所有测次动应变增量最大值的平均值分布图如图 10 所示。

从图 9 中可知,支座病害产生后,列车通过时杆件应变随着列车轴重增加均呈增大趋势,C80 作用下杆件应变明显大于 C64、C70 作用下数值。非病害处斜杆应变分布较为均匀,C80 作用下 6 个测点之间数值分布在 180 ~ 294 με 之间,最大相差 114 με,而病害处斜杆应变分布不均,C80 作用下 6 个测点之间数值分布在 126 ~ 381 με 之间,最大相差 255 με,远大于非病害处斜杆应变差值。病害处杆件 H 型截面开裂侧(8、9 测点处)应力较大,未开裂侧(7、10 测点处)应力较小。

从图 10 中可知,支座病害整治完成后,列车通过时杆件应变随着列车轴重增加均呈增大趋势,C80 作用下杆件应变明显大于 C64、C70 作用下数值。病害处斜杆和非病害处斜杆应变分布均比较均匀,且病害整治完成后杆件应变略小于病害整治前数值。C80 作用下非病害处斜杆 6 个测点之间数值分布在 179 ~

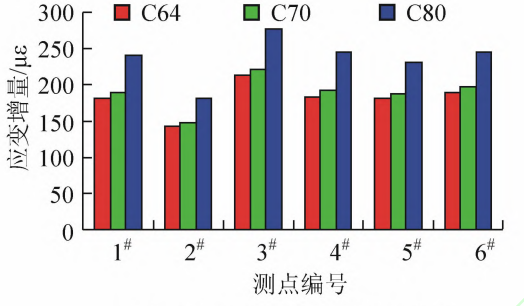


(a)非病害处斜杆应变增量分布图

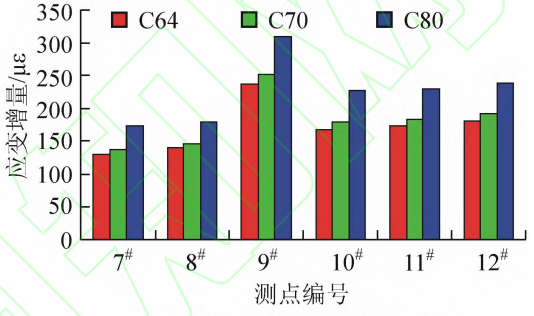


(b)病害处斜杆应变增量分布图

图 9　病害整治前各测点所有测次动应变增量最大值的平均值分布图



(a)非病害处斜杆应变增量分布图



(b)病害处斜杆应变增量分布图

图 10　病害整治后各测点所有测次动应变增量最大值的平均值分布图

271 με 之间,最大相差 92 με,而病害处斜杆 6 个测点之间数值分布在 173 ~ 309 με 之间,最大相差 136 με,远小于支座病害处理前斜杆应变差值(255 με)。

根据测试结果可以判断:支座病害发生后对局部杆件受力产生不利影响,支座病害整治完成后,杆件受力趋于均匀,整治效果明显。

4　结语

通过对钢桁梁桥进行系统的理论分析计算、线形高程测量和现场性能试验,查明了支座病害的产生原因,主要是由于支座之间和支座垫板表面存在较大的高低不平,导致结构存在较大的装配应力,在重载运输列车的反复作用下,支座构件发生了疲劳断裂破坏。为了保障列车运营安全,针对具体的支座病害采取了相应的整治措施,在病害整治前后完成了现场性能试验,整治效果显著。

支座病害的出现是近年来朔黄铁路轴重、运量不断增加而导致的结果,支座病害会对桥梁结构的运营性能和结构受力都会产生很大的不利影响,影响安全运营。随着重载运输列车轴重增大,速度提高,运能增加,钢桥承受竖向振动和横向振动加剧,疲劳应力幅和疲劳荷载作用次数增加,使得钢桥既有损伤发展更为迅速。钢桥病害早期不宜发现,一旦发现多为脆性断裂,对桥梁结构安全运营危害巨大。因此,在桥梁日常管理养护工作中应将钢桥作为重中之重,密切观察,同时建立起集检查、状态评定、维修加固于一体的科学养护管理制度,确保钢桥的安全运营。

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]刘德品,黄新民. 铁路钢桥常见病害[J]. 建材世界,2009,30(5):111-114.

[3]张劲全,王文涛. 桥梁检测与加固手册[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[4]中华人民共和国铁道部. 铁运[2010]38 号 铁路桥隧建筑物修理规则[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.

[5]中华人民共和国铁道部. 铁运函[2004]120 铁路桥梁检定规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2004.

(下转第 18 页)

2-8.
[15]Chen G M,Teng J G,Chen J F. Process of debonding in RC beams shear-strengthened with FRP U-strips or side strips[J]. International Journal of Solids and Structures,2012,49:1266-1282.

Research on Shear Performance of Damaged Concrete Beams Strengthened with BFRP Sheet

Qin Lihui, Wang Zonglin

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to acquire the parameters of shear performance of RC beam strengthened with BFRP and provide theoretical gists for design and construction, shear capacity of RC beam strengthened with BFRP sheet is analyzed for different shear span ratio, number of BFRP sheet layer and pre-loading program within experimental works. Revised formula is presented for calculating shear bearing capacity of RC beam strengthened with BFRP. Experimental results shows that BFRP can improve shear bearing capacity of beam, and shear bearing capacity is affected by anchoring method, initial load and shear span ratio.

Key words: BFRP; damaged concrete beams; shear bearing capacity; deflection; load

(责任编辑 车轩玉)

(上接第 11 页)

Analysis of Disease and Experimental Research of Long Span Steel Truss Bridge Under Heavy Haul Transport Conditions

Zhang Ertian

(Shuohuang Railway Development Co. Ltd., Suning 062350, China)

Abstract: With the development of heavy haul transportation, the disease of railway steel bridge is increasing prominently. Taking the 64 m through steel truss bridge of Shuohuang Railway as the research background, this paper makes a systematic analysis on the three aspects associated with the diseases of the bridge support, including the causes of the disease, the treatment method and the disease's impact on bridge operation. The results of the study show that because of the unevenness between the four bearing supports, and a certain degree of roughness of the support's surface, a certain degree of initial stress is produced in bearing components. The repeated effect of heavy haul train would lead to the fatigue fracture of the support connection components, hence a sharp increase of transverse acceleration and vertical amplitude at the middle of the span, and significant changes of primary truss stress, which would endanger the safety of train operation. The ill effect can be eliminated by replacing structural parts and changing elevation of the supports, and the treatment effect is remarkable.

Key words: heavy load railway; steel truss bridge; disease analysis; operation performance test

(责任编辑 刘宪福)