

某地铁桥梁箱梁下挠及开裂检测评估处治技术

张朦朦^{1,2}, 何祖发^{1,2}

(1.桥梁结构健康与安全国家重点实验室,湖北 武汉 430034; 2.中铁大桥科学研究院有限公司,湖北 武汉 430034)

摘要:某地铁高架桥为65 m+120 m+65 m 预应力混凝土变截面连续梁桥,建成后运营不久发现主梁产生较大的竖向向下挠,并且主梁跨中底板出现较多延伸至腹板的横向裂缝。为了解主梁下挠和裂缝产生的原因以及目前桥梁的技术状况,对该桥梁进行了专项检测,并采用有限元软件进行结构验算。检测及验算结果表明:该桥梁体下挠和开裂的主要原因主要是梁体跨中预应力的损失,特别是底板束预应力损失过大或张拉不足而导致的梁体抗弯承载力不足。根据检测评估结果主要采用了体外预应力钢束进行维修补强。维修处治后的荷载试验表明,桥梁强度、刚度及动力性能均满足规范要求,桥梁加固处治效果良好。

关键词:铁路桥梁;桥梁检测评估;处治技术;梁体下挠;结构验算

中图分类号:U448.21

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)03-0167-04

1 概况

某地铁高架桥上部结构为预应力混凝土连续梁,截面采用变截面形式,跨径布置为65 m+120 m+65 m,全长249.8 m,主桥立面布置见图1。箱梁横截面见图2,中支点截面梁高8.15 m,跨中截面梁高4.55 m。桥面板宽10.6 m,采用球型钢支座。主梁混凝土强度等级为C55,三向预应力体系,采用挂篮悬灌法施工,节段长度为350~450 cm,合龙段长度为200 cm。

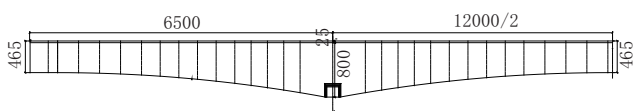


图1 主桥1/2立面布置图(单位:cm)

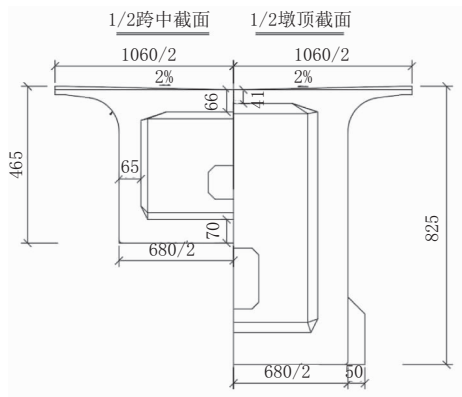


图2 主桥横截面图(单位:cm)

地铁监测方对该桥梁进行长期变形监测时,发现主梁产生较大的竖向向下挠,累计最大值为52.8 mm,而桥墩位置基本无沉降。后续养护方对桥梁进行初步检查,发现主梁跨中底板出现较多横向裂缝,且裂缝延伸至腹板,并伴有渗水痕迹。为了解裂缝产生的原因以及目前桥梁的技术状况,保证地铁运营安全,对该桥梁进行了全面检测评估,并进行了相应的加固维修处治措施。

2 梁体裂缝检查

箱梁外观检查重点为混凝土裂缝^[1-4]。经检查,箱梁主要病害为腹板的竖向及斜向裂缝,底板的横向裂缝。裂缝主要分布于中跨合龙段附近,其中部分为U形贯通裂缝,最大缝宽达到0.91 mm。

经统计,腹板斜向裂缝14条,总长度为30.8 m,其中宽度不小于0.15 mm的裂缝11条,宽度小于0.15 mm的裂缝3条;底板横向裂缝15条,总长度为86.5 m,宽度均不小于0.15 mm;U形裂缝4条,总长度为48.1 m,宽度均不小于0.15 mm;腹板竖向裂缝4条,总长度为6.97 m,宽度均不小于0.15 mm。腹板典型裂缝位置及分布见图3。

从裂缝形态及分布情况进行分析,箱梁裂缝为结构性受力裂缝,裂缝形态与典型的梁体抗弯承载力不足所引起的裂缝形态相符,但是其分布情况集中在合龙段附近,初步判定裂缝产生的原因可能是跨中底板预应力束应力损失过大或张拉力不足,而导致的梁体抗弯承载力不足。

收稿日期:2023-06-10

作者简介:张朦朦(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁检测及健康监测工作。

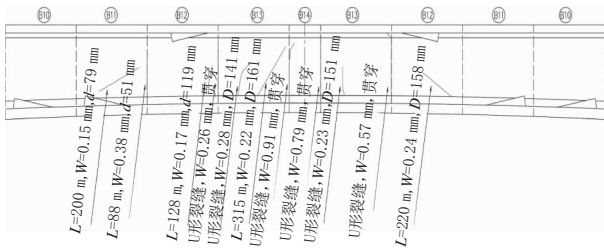


图3 中跨跨中箱内腹板裂缝分布图

3 桥梁专项检测

专项检测包括预应力孔道位置检测、预应力孔道灌浆密实度检测、预应力齿块及锚头专项检测、预应力孔道开窗检测、梁体混凝土永存应力检测及混凝土及钢筋无损检测等^[5,6]。

3.1 预应力孔道位置检测

采用地质雷达检测预应力孔道位置,检测结果显示跨中截面的预应力孔道的埋深为0.37~0.38 m,与设计埋深0.375 m基本一致,未出现孔道上浮的病害。

3.2 预应力孔道灌浆密实度检测

采用冲击回波等效波速法(IEEV),选取底板7条预应力孔道以及腹板2条预应力孔道进行灌浆密实度检测。由检测结果可知,腹板2条预应力管道灌浆密实;底板管道灌浆不密实,不密实总长度占底板预应力管道测试总长度40.86%。

3.3 预应力齿块及锚头专项检测

选择中跨底板预应力钢束32束锚头凿开进行检查,夹片共480个。检测结果表明:

(1)底板预应力夹片露出锚具外的高度超限较多,6 mm以上数量为261个,占比为54.4%。底板预应力夹片错位大于2 mm的有8处。

(2)中跨底板预应力筋外露长度合格数量为381束,合格率为74.7%。

(3)底板预应力钢束有一根钢绞线未穿束或内缩进锚头。

(4)预应力锚头混凝土与封锚混凝土结合面均未凿毛,部分钢绞线使用氧割烧断,部分锚头出浆孔未见水泥浆。

3.4 预应力孔道开窗检测

选取底板2条预应力孔道和腹板1条预应力孔道进行开窗检测,检查孔道压浆及预应力钢束情况。检查结果如下:底板2束预应力钢束较为松弛,且均有轻微锈蚀的状况,预应力孔道压浆不饱满且有水渍;腹板束预应力钢束无锈蚀,注浆饱满。

3.5 混凝土永存应力检测

底板现存应力采用应力释放法测量。由检测结果可知,实测中跨跨中节段底板上表面现存压应力分别为-1.76 MPa、-1.44 MPa,平均压应力值为-1.60 MPa。设计状态下,箱梁底板混凝土压应力为6.7~7.3 MPa,检测结果表明,中跨跨中节段底板现存压应力储备不足。

3.6 混凝土强度检测

采用超声回弹综合法对混凝土强度进行检测,结果显示,所选测区混凝土强度推定值为55.2~58.3 MPa,均大于设计强度等级,满足设计要求。

4 梁体下挠及开裂主要原因分析

引起主梁跨中下挠的主要原因可能有:纵向预应力有效性降低、主梁开裂引起的刚度变化、混凝土收缩及徐变、由施工偏差或车辆超载引起的荷载增加等^[7]。综合本桥专项检测结果,判断梁体下挠和开裂主要原因为主梁正弯矩区底板纵向预应力有效性的降低,在列车、温度等外荷载作用下引起梁体下挠和开裂,梁体开裂导致结构刚度降低,从而下挠进一步加剧;下挠与裂缝互相影响,会加速结构性能的劣化、降低梁桥的耐久性和安全性。

5 结构验算

根据现场检测情况,对主梁预应力损失进行模拟,分析预应力损失对主梁受力影响,并检算损失状态下结构的承载能力。

5.1 有限元模型

C55混凝土容重取26.5 kN/m³,二期恒载取110.4 kN/m。相临两支点不均匀沉降取0.02 m。车辆采用地铁B型车,4辆编组,考虑列车活载动力系数及横向摇摆力。附加力考虑风力、温度荷载及制动力或牵引力。

采用有限元软件MIDAS进行计算,主梁共划分为70个单元,87个节点,有限元模型见图4。

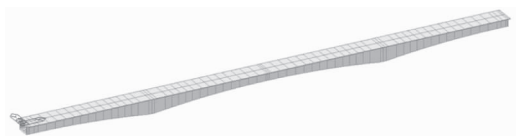


图4 有限元模型

5.2 原设计验算

荷载组合分别以主力、主力+附加力进行组合,检算结果按最不利荷载组合整理^[8]。分别进行运营阶段正截面抗弯强度验算、运营阶段斜截面抗剪强度

验算、运营阶段抗裂验算、运营阶段应力验算、传力锚固阶段钢筋应力验算、传力锚固阶段混凝土法向应力验算以及挠度验算^[9]。

以上各项验算结果均满足规范要求,表明原结构在设计荷载作用下受力满足规范要求。

5.3 考虑损伤的主梁承载能力检算

5.3.1 结构损伤模型确定

(1) 结构损伤模型试算

根据检测,本桥连续梁的裂缝主要分布于主跨跨中附近5个节段内(约20 m),故在模型中设立不同的预应力损失工况,分析在不同预应力损伤工况下跨中开裂范围,并与实际的开裂范围相对比,选择合适的损伤模型,初步建立预应力损伤模型。同时,根据实测的梁体永存应力与模型计算出的应力相比对,最终确定合理、准确的预应力损伤模型。

损伤模型确定时,开裂范围按最不利荷载组合下正截面混凝土受拉区应力超出 $\sigma_{ct} > 0.70 f_{ct} = 0.70 \times 3.3 = 2.31 \text{ MPa}$ 计,底板顶缘应力按恒载作用下的应力计。不同损伤折减的计算结果见表1。

表1 连续梁不同损伤折减的计算结果

损伤模型	跨中裂缝 开裂范围 /m	恒载作用下 底板顶缘应 力/MPa
损伤模型1 中跨跨中全部底板合龙束、顶板合龙束 T17 折减 40%, 悬浇顶板束、腹板束折减 10%	6.0	-3.05 (压应力)
损伤模型2 中跨跨中全部底板束、顶板合龙束 T17 折减 50%, 悬浇顶板束、腹板束折减 10%	15.0	-2.04 (压应力)
损伤模型3 中跨跨中全部底板束、顶板合龙束 T17 折减 54%, 悬浇顶板束、腹板束折减 10%	18.0	-1.63 (压应力)
损伤模型4 中跨跨中全部底板束、顶板合龙束 T17 折减 60%, 悬浇顶板束、腹板束折减 10%	27.0	-1.03 (压应力)
损伤模型5 中跨跨中全部底板束、顶板合龙束 T17 折减 70%, 悬浇顶板束、腹板束折减 10%	38.0	0.01 (拉应力)

(2) 结构损伤模型确定

由现场检测结果可知,本桥连续梁的裂缝开裂范围为跨中处约20 m,底板上表面现存压应力平均值为-1.60 MPa。与以上计算结果对比可知,损伤模型3的计算开裂范围与永存应力与实际情况大致相符,因此,选择损伤模型3作为损伤模型的损伤度来计算本桥的承载力。

5.3.2 考虑结构损伤后主梁承载能力检算结果

荷载组合分别以主力、主力+附加力进行组合,检算结果按最不利荷载组合整理,使用结构损伤模

型,分别进行运营阶段正截面抗弯强度验算、运营阶段斜截面抗剪强度验算、运营阶段抗裂验算、运营阶段应力验算、传力锚固阶段钢筋应力验算、传力锚固阶段混凝土法向应力验算以及挠度验算。验算结果显示,正截面抗裂验算、斜截面抗裂验算及正截面受拉区混凝土拉应力验算均不满足规范要求。

6 检测及验算结论

综合裂缝检测及结构验算结果,本桥连续梁中跨跨中下挠及开裂的主要原因为主梁正弯矩区底板和负弯矩区顶板纵向预应力存在较大损失,特别是底板预应力的损失,造成桥梁的抗裂性不足,引起梁体跨中区域的开裂及下挠。

7 加固处治措施

该桥采取以下处治措施:

(1) 采用体外预应力钢束进行结构补强。

本桥体外预应力束布置在箱梁内部,共12束。6束为中跨束,两端分别锚固在中横梁上;6束为通长束,穿过中横梁后,两端锚固在边跨端部设置的锚固块进行锚固。体外预应力束材料选用填充型环氧涂层钢绞线,钢绞线标准强度均为1860 MPa,弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$,规格为19-1×7- $\phi 15.24 \text{ mm}$ 。预应力钢束均采用两端张拉的方式进行施工,张拉控制应力为 $0.6 f_{pk} = 0.6 \times 1860 = 1116 \text{ MPa}$ 。

体外预应力束布置见图5、图6。

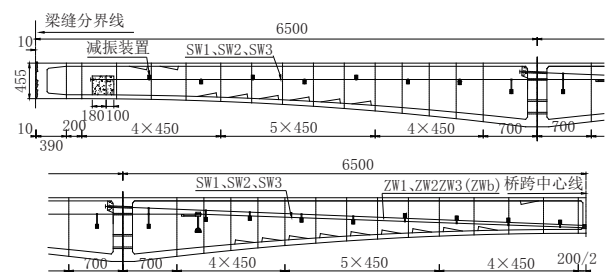


图5 体外预应力布置立面图(单位:cm)

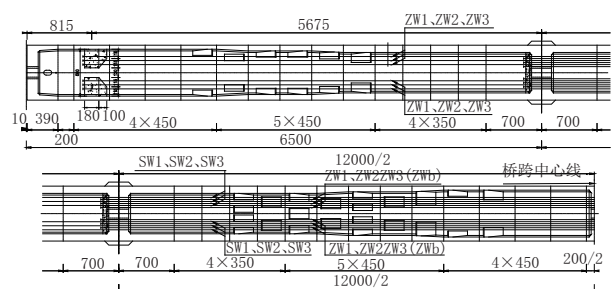


图6 体外预应力布置平面图(单位:cm)

施加体外预应力后,理论受力明显改善,跨中梁底增加2.46 MPa压应力,跨中上拱20.8 mm。

由于本桥连续梁有未使用备用预应力钢束,补强时采用先张拉备用束,后设置体外预应力钢束的方式进行加固,充分利用原桥结构。

(2)对裂缝进行处治

根据裂缝的宽度,按下列原则处理:对宽度小于0.15 mm的裂缝采用表面封闭法进行处理;对宽度不小于0.15 mm的裂缝采用采用注浆密封的方式处理;对干缩网裂、网状裂缝采用柔性封闭剂进行处理。

(3)对其他影响结构耐久性病害进行维修,提高结构的使用寿命。

8 加固效果检验

本桥维修加固后进行了针对性荷载试验,对加固效果及本桥承载能力进行检验。

本桥静载试验采用电客车+内部堆载法进行,采用正常运营的2列地铁电客车,每列4节编组,内部堆放沙袋进行配重,车辆尺寸及轴载分布见图7。试验共分4个工况进行加载,见表2,分别测试相应截面在各个工况荷载作用下的应力及挠度变化。

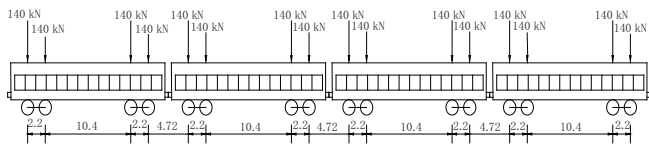


图7 电客车+内部堆载法车辆尺寸及轴载分布图(单位:m)

表2 控制截面在设计荷载及试验加载下的内力和挠度

控制截面	控制项目	加载工况	理论控制值	试验加载值	最大试验效率
边跨跨中截面	最大正弯矩/(kN·m)	1	25 096	21 923	0.87
	最大挠度/mm				
近支点截面	最大负弯矩/(kN·m)	2	-64 252	-53 732	0.84
中跨1/4截面	最大正弯矩/(kN·m)	3	15 865	13 067	0.82
	最大挠度/mm				
中跨跨中截面	最大正弯矩/(kN·m)	4	36 121	30 878	0.85
	最大挠度/mm				

动载试验包括脉动试验和行车试验两部分。行车试验采用静载试验车为试验荷载,分两个工况进行:工况一为1列静载试验车辆以60、80、100、118 km/h的速度行驶过桥,记录各测点的动态信号;工况二为2列静载试验车辆,以60、80、100、118 km/h的速度对向行驶通过桥梁,记录各测点的动态信号。

经过静载试验,结果显示,各工况下主梁应力校验系数范围为0.50~0.90,挠度校验系数范围为0.55~0.77,均满足相关规范要求;试验过程中未发现由于加载而引起的新开展裂缝,原有裂缝在试验荷载作用下,裂缝宽度有所扩展,但未超过规范限值,且卸载后其裂缝闭合宽度不小于扩展宽度的2/3,满足规范要求。

动载试验表明,实测主梁一阶竖向频率为1.50 Hz,大于理论计算值1.44 Hz,实测动力系数范围为0.024~0.069,小于动力系数规范值(0.08),实测跨中最大横向振幅为0.152 mm,小于规范限值L/9 000(13.33 mm),表明桥梁结构动力性能满足规范要求。

试验结果表明,本桥加固处治后,桥梁承载能力和动力性能均满足规范要求,加固处治效果良好。

9 结语

本文针对某地铁高架桥三跨预应力混凝土变截面连续梁跨中开裂情况进行检测评估,综合检测及验算结果可知,裂缝的产生主要原因是主梁跨中预应力,特别是底板束预应力损失过大或张拉不足而导致的梁体抗弯承载力不足。针对检测结果提出处治措施,主要采用体外预应力钢束进行维修补强,维修处治后进行荷载试验,试验结果显示,桥梁强度、刚度及动力性能均满足规范要求,桥梁维修处治效果良好。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 侍刚,李鸥,何祖发,等.软土地基桥梁的墩梁错位病害评估分析及处治[J].桥梁建设,2019(S1):26-32.
 [3] 侍刚,唐细彪.某预应力混凝土连续箱梁桥顶板裂纹成因分析[J].世界桥梁,2009(4):66-68.
 [4] 郑开启,刘钊,张宇峰,等.腹板斜向开裂混凝土梁桥的剪切刚度评估方法[J].桥梁建设,2015(4):46-51.
 [5] 张朦朦,何祖发.某连续刚构桥复工续建前检测评估及处治技术[J].世界桥梁,2019,47(6):85-90.
 [6] 张朦朦,何祖发,李丽娟.某连续箱梁桥底板裂缝检测评估及原因分析[J].城市道桥与防洪,2022(11):85-88.
 [7] 吕宏奎.某重载铁路连续刚构桥底板崩裂加固设计[J].桥梁建设,2019,49(1):71-76.
 [8] 刘华,高宗余,刘其伟,等.某预应力混凝土连续梁桥火损评估与加固[J].桥梁建设,2015,45(4):81-87.
 [9] 伍贤智,董晓兵.某预应力混凝土连续梁桥受损评估与加固[J].世界桥梁,2016,44(1):83-86.