

# 某桥主梁开裂后荷载试验评估与维修

马国兴,朱清亮,何文格,韦衍韬

(中交长大桥隧技术有限公司,江西 南昌 330032)

**摘要:** 根据实桥荷载试验检测数据,基于刚度退化有限元模型,研究不同损伤程度对先简支后连续预应力小箱梁开裂对刚度的影响。借助刚度退化模型分析病害跨主梁开裂和承载力下降主要原因,对承载力进行评估。针对性提出主动压重、水泥基渗透结晶材料修复裂缝及预应力管道注浆重黏结等综合技术维修措施。主梁加固后长期通行设计荷载,多年定期监测观察无裂缝发展和其他异常,主梁耐久性和承载力恢复,维修处理方法对类似工程维修处置有参考意义。

**关键词:** 桥梁;试验诊断;刚度退化;承载力;开裂维修

**中图分类号:** U446.3;U445.7+2

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2024)08-0174-04

## 0 引言

混凝土桥梁上部结构在建设及服役过程中,均会出现开裂现象,小于规范允许的开裂,只是轻微损伤结构耐久性,而超过规范允许的严重开裂情况,则会造成结构刚度损伤,引起桥梁耐久性降低。主梁混凝土开裂研究,国家 863 计划针对大跨径预应力混凝土连续箱梁专门开展研究,部分学者开展了大量理论模拟和试验研究工作<sup>[1-9]</sup>,取得裂缝特征基础上主梁承载力评估、刚度折减平面杆系模型方法、箱梁开裂后刚度损伤评估等系列研究成果。但这些研究成果都是建立在理论模型或者缩尺模型试验基础上,缺少必要的开裂实桥试验验证,病害预应力箱梁桥理论分析及进一步研究成果缺少实践检验。本文基于开裂的实桥加载试验,验证了梁体刚度折算评估方法,提出主动压重下恢复开裂主梁混凝土耐久性维修方法。

## 1 开裂实桥刚度与承载力评估试验

### 1.1 工程概况

某桥上部结构为先简支后连续预应力小箱梁。下部结构桥墩采用桩基础柱式墩。横断面布置 4 片小箱梁,箱梁梁高 160 cm,跨中顶底板及腹板厚 18 cm,梁端顶底板及腹板厚 25 cm,梁底宽 100 cm,

中梁顶板宽 240 cm,边梁顶板宽 285 cm,边梁与中梁间湿接缝宽 72 cm,中梁间湿接缝宽 71 cm;主梁采用 C50 混凝土,桥面铺装采用 10 cm 厚沥青混凝土 + 8 cm C40 防水混凝土调平层;桥面宽 12.65 m。

通车一年,检测发现第 4 孔 3# 主梁外观开裂,腹板最大裂缝宽度超过 0.4 mm(见图 1)。

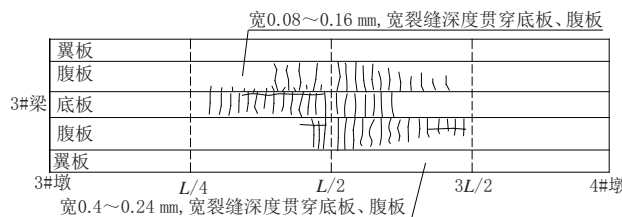


图 1 3# 梁外观开裂展开图

在  $L/4 \sim 3L/4$  区段,裂缝均匀出现,平均间距约 40 cm,箱梁底面开裂,双侧腹板开裂,裂缝近跨中 3 m 范围开裂至翼板底部,腹板裂缝均成垂直角度。外观无其他病害缺陷。混凝土超声回弹检测未见强度异常。查询原始施工记录,未见预应力施工有异常记录。

对 3# 主梁进一步检查,底板、腹板钻孔取芯测试实际混凝土强度,最低值满足 C50 强度等级,测量取芯部位底板、腹板厚度,与设计最大偏差小于 5 mm。超声测试顶板混凝土厚度,与设计偏差在 5~10 mm。

### 1.2 试验方案

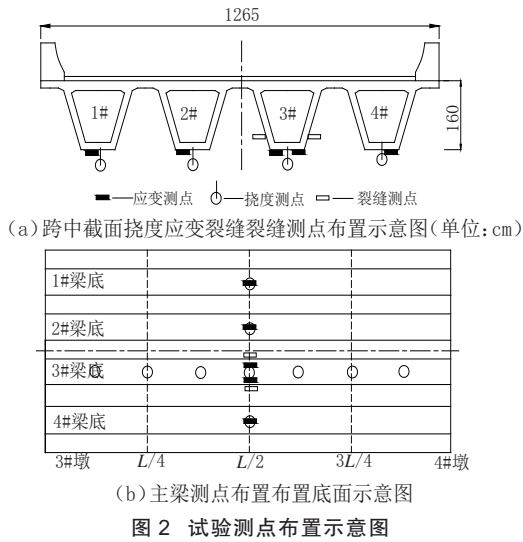
#### 1.2.1 测点布置

为评估 3# 梁现状刚度,确定合理维修措施,对 3# 梁进行针对性“静载试验”评估。测点布置见图 2,跨中布置挠度及应变测点(见图 3),沿 3# 梁纵向八分点布置挠度测点以便进行刚度模拟。

收稿日期: 2023-07-27

作者简介: 马国兴(1981—),男,本科,高级工程师,从事工程检测工作。

通信作者: 朱清亮(1988—),男,硕士,高级工程师,从事工程检测工作。电子信箱: 664775405@qq.com



### 1.2.2 试验加载

按照设计荷载标准,采用设计3#梁受力最不利受力满载加载评估承载能力,顺桥向移动进行加载分级。试验横向布载距离4#梁侧路缘0.5m,布置三列共六辆总重31.8t的三轴试验重车,后轴间距5.0m。试验前对加载车严格称重,轴重精确到20kg。

### 1.3 试验理论分析

分别采用梁格法与实体单元建模进行结构分析。梁格法通过改变主梁单元截面刚度模拟损伤,根据裂缝范围、深度、宽度对截面损伤程度模拟计算。实体有限元模型对出现病害的主梁进行分区,通过对开裂混凝土弹性模量参数化赋值,近似模拟刚度损伤。预应力钢绞线按设计材料性能取值,模拟开裂忽略混凝土材料非线性影响和黏结滑移,不考虑该因素对刚度模拟的影响。计算参数混凝土、预应力钢材的力学性能取用设计取值。

实体有限元模型分析加载效应适当考虑边梁防撞墙对主梁受力影响(因防撞墙高度较大,实际设置有变形缝和因温度、收缩等产生的裂缝,受力影响不明确,建模中仅考虑了防撞墙基底10cm高度参加结构受力),中间梁考虑混凝土桥面铺装的实际厚度对使用阶段的影响。

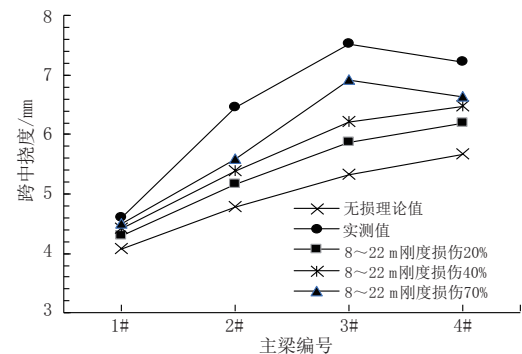
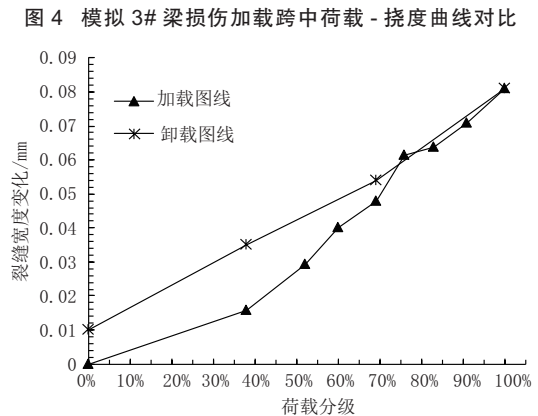
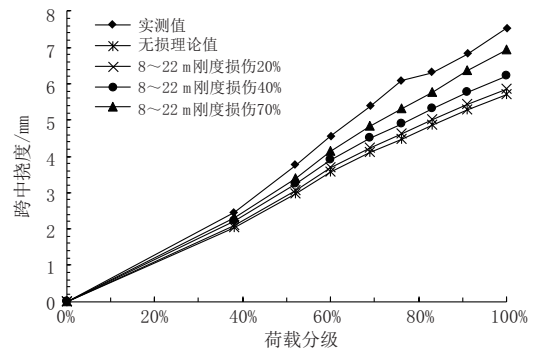
## 2 试验结果与数据分析

### 2.1 试验结果

对结构横向受力进行分析,加载效率计算结果见表1。荷载试验分级加载试验结果见图4至图6。模拟3#梁8~22m范围全截面不同程度损伤与未损状态进行对照见图4、图6。计算模拟按照检测实际,1#、2#、4#梁按照无损伤计算。

表1 试验跨中截面各主梁实际加载效率分析对比

主梁编号	设计 $S_1$ / (kN·m)	无损伤 $S_1^0$ / (kN·m)	70%损伤 $S_2^0$ / (kN·m)	加载效率	
				$S_1^0/S_1$	$S_2^0/S_1$
1#梁	1964	1305	1521	0.66	0.77
2#梁	1635	1560	1872	0.95	1.14
3#梁	1635	1746	832	1.07	0.51
4#梁	1964	1836	2218	0.93	1.13



由图4可知,主梁挠度实测值在加载75%以上出现突变。图5在75%加载等级的裂缝宽度增加0.012 mm,表明该荷载等级主梁刚度有突然性变化。继续加载,荷载-挠度基本成线性变化,监测裂缝宽度变化稳定。在加载到80%以上时,裂缝宽度变化与荷载-挠度关系均呈线性变化。在0~75%加载区间,裂缝开裂宽度的变化呈非线性变化,增速随着荷载增大缝宽变化呈增快趋势。

从图4、图6可知,模拟3#梁8~22 m范围开裂病害损伤全截面刚度70%,计算的挠度模拟值仍小于实测值,四片主梁挠度效应系数均大于1.0,横向变形曲线形状与实测值曲线形似,较为接近横向传力的实际状况。从表1可知,模拟3#梁损伤70%时,实际主梁承担试验荷载仅为设计值的51%,邻近的2#与4#主梁因桥面变形增加,分担3号主梁受力,加载效率较无损状态提高了约20%。

## 2.2 试验跨承载力与刚度评估<sup>[5-10]</sup>

对比无损理论值,实验加载各分级的实测值均超过理论值,说明实际3#梁主梁刚度低于理论预期结果。

按实际腹板裂缝病害分布在 $L/4 \sim 3L/4$ 区间(8~22 m)范围,模拟刚度损伤不同程度下荷载-挠度变化,理论计算按设计采用铰接梁法分析横向受力,考虑桥面铺装厚度对刚度的贡献,忽略防撞墙对主梁刚度的影响。图6模拟主梁刚度损伤70%,最大试验荷载下四片主梁跨中挠度计算结果,小于四片主梁实测挠度,说明试验跨四片主梁实际刚度本身均比原设计预值小。

主梁截面尺寸与设计偏差微小,主梁混凝土强度检查结果满足设计要求,1#、2#、4#主梁无表面开裂病害,综合损伤模拟计算分析,可以说明主梁截面刚度不足的原因主要是“试验荷载下截面下缘混凝土出现拉应力或预应力钢绞线未充分黏结(部分黏结),或者3#主梁实际预应力水平远低于原设计造成截面本身属于开裂截面工作状态”。

进一步分析图5实测裂缝宽度卸载后基本恢复到加载前水平,说明试验结构弹性恢复能力较好。

最大试验荷载下,主梁实测挠度值最大不到8 mm,远小于设计规范最大挠度允许值 $[L/600]=50$  mm的限制值。

根据图4及图6,3#梁实际刚度过低,参考国内外对部分粘结预应力梁受力性能研究的成果<sup>[11-14]</sup>,可以判断3#主梁主筋存在粘结不良或预应力不足,其

极限承载力较设计降低明显。

## 3 维修加固

主梁进行维修,必须恢复其极限承载力及耐久性能,需继续探明主梁是否是因为黏结不足截面开裂的问题。

沿预应力管道抽检探查检测结果证实了预应力孔道大范围注浆不饱满,遂采用恢复预应力钢束黏结及裂缝封闭重凝结综合技术方案,具体如下。

(1)封闭桥梁,清理现场,对病害跨正弯区段施加1.1倍设计使用荷载压载,使裂缝充分开展暴露,在裂缝维修期间一直持荷。

(2)对开裂的主梁裂缝区域进行表面清理,宽度大于0.08 mm的裂缝表面开深5~10 mm V形槽,高压风吹洗,然后对宽度大于0.2 mm裂缝采取高压环氧树脂注浆。对宽度不大于0.2 mm的裂缝区,充分湿润后,用浓缩型水泥基渗透结晶材料修复裂缝。

(3)对照设计图图纸,在主梁 $L/4 \sim 3L/4$ (8~22 m)范围,沿每束预应力筋的位置间隔0.8 m钻注浆洞(钻孔钻破波纹管且不可伤损钢绞线),对钻破波纹管后明显孔洞不密实的预应力束进行标记。

(4)满足15 d龄期后卸除压载,对钻孔的预应力波纹管从跨中向两侧依次进行高压风吹洗,然后高压环氧树脂注浆。

(5)全部注浆完成后,对主梁表面进行清洁,使用水泥基渗透结晶材料做表面防水处理。

(6)恢复通车试运营,并进行较长时间外观监测。

实际维修主梁的预应力束完成注浆恢复黏结后,按照设计荷载运营十余年,每年对结构进行检查,结构表面未见新的开裂病害出现,表明维修总体方案达到了预期目的。

## 4 结语

主梁开裂刚度损伤要根据裂缝特征进行刚度退化模拟。对腹板裂缝超宽且高度延伸到近顶板的预应力小箱梁,若裂缝呈密集均匀分布,混凝土与主筋之间黏结损伤因素对主梁刚度损伤影响较大。由于主筋与混凝土之间黏结不良滑移或开裂引起滑移,实际主筋应变由较长范围主筋均化,应力增量较小,对截面刚度贡献小,模拟滑移后的主筋受力按照开裂范围考虑部分黏结才更符合实际。

对混凝土与主筋之间有黏结破坏或黏结不良的开裂主梁进行维修加固,恢复主梁耐久性措施之外,

必须要设计有效技术措施增加有效受拉主筋的面积。对预应力孔道不密实的主梁采用黏结性良好的高强度材料注浆解决黏结问题,可以有效提高病害主梁承载力和截面刚度,并维持城市桥梁外观原貌,保持美观性。对开裂引起混凝土与主筋黏结滑移的病害梁,注浆效果不佳,应考虑在主梁底部增设补强受拉材料,才能恢复主梁承载力。

相较常见主梁恒载下开裂维修,主动压重下维修裂缝是主梁刚度允许、结构安全情况下,使裂缝充分暴露,从而消除耐久性隐患。该方法会引起裂缝病害一定程度的范围扩大,但维修较为彻底、经济,效果可靠,更适合承载力满足的钢筋混凝土结构维修。传统不压重维修开裂裂缝,维修后的裂缝常二次开裂并发展,需要辅助贴钢板、使用体外预应力等加固措施,较适合承载力不足的结构。因此,建议决策维修措施根据结构实际,科学论证。

参考文献:

[1] 阮大伟,陈蛟,谢开仲,等.PC连续箱梁施工阶段裂缝检测及成因分析[J].公路,2020,65(3):132-136.  
 [2] 刘响.预应力混凝土箱梁桥腹板开裂参数影响分析[J].中外公路,2021,41(5):116-119.

[3] 陈平燕.大悬臂薄腹板连续箱梁桥腹板开裂病害原因分析及加固方法研究[J].公路,2019,64(3):115-119.  
 [4] 孙金更.铁路箱梁静载试验开裂原因分析及控制措施[J].铁道标准设计,2015,59(7):84-88.  
 [5] 徐向锋,张峰,韦成龙.预应力混凝土箱梁开裂后的刚度损伤评估[J].工程力学,2015,32(7):95-102.  
 [6] 徐向锋,张峰.带裂缝工作箱梁的刚度损伤评估[J].中外公路,2014,34(4):97-101.  
 [7] 徐栋,孙远,吴佳璞.箱梁薄壁效应及腹板开裂成因分析[J].桥梁建设,2009(4):76-79.  
 [8] 周勇,张峰,李术才,等.开裂后预应力混凝土连续箱梁计算模型[J].长安大学学报(自然科学版),2008(3):53-58.  
 [9] 叶见曙,张峰.预应力混凝土连续箱梁开裂后的刚度退化模型[J].中国公路学报,2007(6):67-72.  
 [10] 龙佩恒,陈惟珍,何雄君.PC箱梁桥受力开裂成因的数值分析[J].桥梁建设,2006(2):77-80.  
 [11] 李彦伟,樊文林.无粘结预应力连续梁中钢绞线的应力[J].国外桥梁,2000(1):65-71.  
 [12] 杜进生,赖国麟.无粘结部分预应力混凝土受弯构件正截面抗弯强度计算方法的研究[J].桥梁建设,1997(3):15-19.  
 [13] 孙艺嘉,吴涛,刘喜.无粘结预应力CFRP筋钢纤维轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J].工程力学,2022,39(3):64-74.  
 [14] 赵煜,贺淮海,李春风,等.在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(9):1271-1275.

(上接第173页)

谷生态大走廊内山、水、文化区等特色区域,实现大走廊全域旅游节点资源的统筹开发运营,将产生了明显的经济和社会效益。



图 27 桥梁实景图

6 结 语

本文对光谷空轨项目跨绕城高速“飘带拱”桥的

顶推施工流程及关键技术进行了介绍,提出了一种适合悬挂式轨道梁拱桥的顶推施工方案,实践证明方案的实际效果较好,在满足安装质量的前提下,兼顾了经济性和安全性,达到了预期效果,为今后类似工程的施工提供了参考。同时,由于大跨度轨道梁桥的造型日新月异,还需要我们不断摸索总结悬挂式轨道梁桥的施工技术经验。

参考文献:

[1] 杨翠屏,张津,邢扬.悬挂式单轨轨道梁制造工艺研究[J].城市轨道交通研究,2019(4):48-51.  
 [2] 封晓平.桥梁顶推法施工的现状与发展趋势[J].交通世界,2018(27):122-123.