

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.024

# 某连续箱梁桥底板裂缝检测评估及原因分析

张朦朦<sup>1,2</sup>, 何祖发<sup>1,2</sup>, 李丽娟<sup>1,2</sup>

(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:** 某桥为四跨预应力混凝土连续箱梁桥, 主梁拆模后发现梁底出现大量裂缝。为查明裂缝出现的原因以及对桥梁的影响, 对主梁进行了检测评估, 并采用有限元软件进行了结构检算。检测结果表明: 主要病害为箱室空腔下方底板存在横向及其他走向的裂缝, 综合桥梁检测和检算结果分析可知, 箱梁底板裂缝并非是由预应力损失而导致的梁体开裂, 可能为在施工过程中由于养护措施不当、支架变形等因素引起的裂缝, 对箱梁的结构使用性能影响不大, 但会影响其的耐久性。对裂缝维修处治后, 动静载试验结果表明, 该桥受力状态良好, 校验系数在规范允许范围之内, 试验过程中未发现因加载而引起的新裂缝以及旧裂缝扩展。

**关键词:** 公路桥梁; 裂缝原因分析; 数值计算; 底板裂缝; 检测评估; 有限元分析

中图分类号: U448.21

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0085-04

## 1 概述

某城市桥梁 LD20 联上部结构采用预应力混凝土连续箱梁, 主梁为等高度预应力混凝土斜腹板单箱双室截面, 跨径布置为 25 m+31.6 m+2×29.8 m, 下部结构为柱式花瓶墩, 基础采用钻孔灌注桩。箱梁梁体均采用 C50 混凝土, 混凝土箱梁内设纵、横双向预应力。主桥立面布置见图 1, 主梁横截面见图 2。

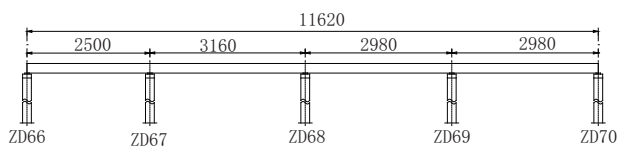


图 1 主桥立面布置图(单位:cm)

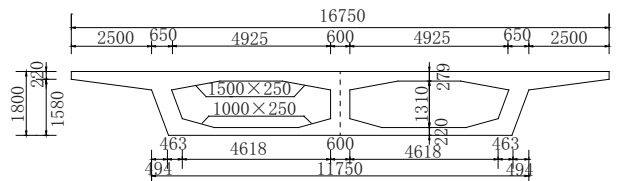


图 2 主梁横截面图(单位:mm)

本桥主梁浇筑完成 25 d 后开始预应力张拉, 4 d 后张拉完成。箱梁拆模后发现主梁底板出现大量裂缝。为查清裂缝出现的原因, 了解桥梁现阶段的技术状况以及病害的严重程度, 需要对该桥进行检测评估, 为后期处置提供科学依据。

## 2 桥梁检测结果

针对该桥进行了外观检测、无损检测以及现存

收稿日期: 2021-12-15

作者简介: 张朦朦(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁检测与加固工作。

应力专项检测<sup>[1-2]</sup>。

### 2.1 外观检测结果

本桥外观检测重点为主梁裂缝的检查<sup>[3-4]</sup>。经过检查, 主要病害为箱梁底板存在较多裂缝, 共计 188 条, 典型裂缝分布见图 3。裂缝宽度区间为 0.05 ~ 0.32 mm, 对宽度大于 0.2 mm 的裂缝进行深度检测, 结果显示裂缝深度在 25 ~ 220 mm 之间, 其中 67 条裂缝为贯穿裂缝, 并伴有渗水痕迹及白色钙化物。

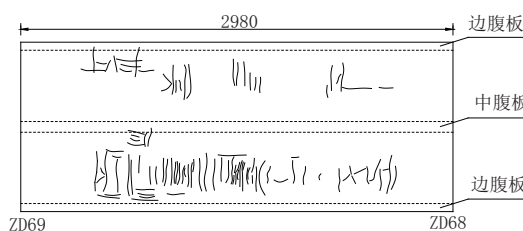


图 3 ZD68~ZD69 跨箱梁底板裂缝分布图(单位:mm)

### 2.2 无损检测结果

#### 2.2.1 混凝土强度检测结果

混凝土强度可作为判断结构材质状况的依据, 直接影响到桥梁结构的实际承载能力<sup>[5]</sup>。对各跨箱梁底板进行强度检测, 结果显示混凝土强度推定值满足设计要求。

#### 2.2.2 钢筋保护层厚度检测结果

钢筋保护层厚度是评价桥梁结构耐久性的重要指标<sup>[6]</sup>, 检测结果显示箱梁底板主筋保护层厚度较薄, 不满足设计要求。

### 2.3 现存应力专项检测结果

为了解桥梁内部的现存应力状况, 选取 ZD67 ~ ZD69 跨 2 跨的跨中底板部位, 采用应力释放法测量

底板现存应力<sup>[7]</sup>。由测试结果可知,ZD67~ZD68跨和ZD68~ZD69跨跨中底板下表面现存压应力分别为-2.67 MPa和-2.92 MPa,与理论计算值偏差分别为6.6%和9.0%。

### 3 结构检算

#### 3.1 有限元模型

根据原桥设计图纸和桥梁实际施工情况,采用结构分析软件MIDAS/Civil 2015进行施工过程的模拟计算<sup>[8]</sup>。

箱梁采用C50混凝土,钢绞线抗拉标准强度 $f_{pk}=1\ 860$  MPa,锚下控制应力为 $\sigma_{con}=0.75f_{pk}=1\ 395$  MPa。管道偏差系数 $k$ 取0.0015,管道摩擦系数 $\mu$ 取0.15。钢筋采用热轧HPB300、热轧HRB400两种。

一期恒载箱梁结构按实际截面计取,容重取 $26\text{ kN/m}^3$ ,横隔板按照永久集中荷载记入<sup>[5]</sup>。荷载等级按城-A考虑,并考虑偏载效应。

有限元模型见图4,共60个梁单元。其中68#墩为纵向固定支座,其余墩号的支座纵向可动。

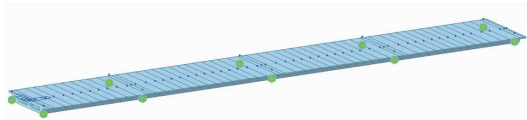


图4 有限元模型

#### 3.2 检算内容

##### (1)原设计状态检算复核

根据原桥设计图纸和荷载情况,对设计状态进行检算。建立后续病害分析的基础状态。

##### (2)结构损伤分析

根据桥梁实际产生的裂缝情况及现场检测的结果,以第(1)步原设计完好状态为基础,分别计算满堂支架沉降、预应力损失对结构受力的影响,对主梁进行损伤模拟分析,确定较为符合检测结果的损伤模型。

#### 3.3 原设计状态验算结果

根据设计图纸,本桥主梁按A类混凝土构件设计。按原设计完好状态对主梁进行验算。

检算结果显示:持久状况承载能力极限状态检算、持久状况正常使用极限状态抗裂性检算、持久状况构件应力检算以及短暂状况构件应力检算结果均满足《公预规》相关要求<sup>[9]</sup>。

#### 3.4 结构损伤分析

##### 3.4.1 损伤因素分析

以原设计状态为基础,考虑满堂支架沉降、预应

力损失对结构受力的影响,对主梁进行损伤模拟分析,确定较为符合检测结果的损伤模型。

##### (1)满堂支架沉降的影响

桥梁施工过程中,支架没有进行预压或预压荷载不够、支架刚度不够、基础不稳定等因素,都可能会引起支架变形,造成混凝土梁的不均匀沉降,使连续梁产生附加应力,对结构受力造成不利影响。通过调整满堂支架支撑刚度进行支架下沉模拟分析,计算时箱梁混凝土龄期取10d,满堂支架沉降发生在预应力张拉之前。

主梁跨中挠度和底板应力计算结果显示,在主梁混凝土浇筑完成养护期间,若主梁跨中满堂支架沉降约5mm左右时,箱梁底板纵向最大拉应力约为1.5 MPa左右,当支架继续变形,箱梁底板将达到混凝土的抗拉强度设计值1.83 MPa,混凝土将开裂。

##### (2)纵向预应力损失的影响

根据现有检测结果,主梁正弯矩区梁底出现大量的横向裂缝,腹板束和底板束预应力对主梁跨中正弯矩区域抗裂影响较为敏感。因此,本次的预应力损失模拟分析主要针对底板束和腹板束。

以不同的预应力损失值作为有限元分析荷载工况,对比在底板束和腹板束损失10%、20%、30%、40%、50%时,箱梁底板纵向应力状态变化。

计算结果显示,当全联底板束和腹板束损失约30%时,箱梁底板开始出现拉应力,见图5,随着预应力继续损失则拉应力不断增大,混凝土将开裂。

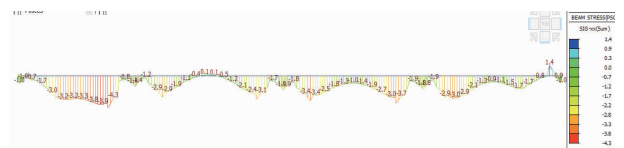


图5 预应力损失30%时箱梁底板纵向应力图(单位:MPa)

根据箱梁底板现存应力检测结果,底板开裂后,ZD67#~ZD68#跨和ZD68#~ZD69#跨跨中底板下表面仍有压应力储备,现存压应力分别为2.67 MPa和2.92 MPa,故单纯由预应力损失引起结构压应力储备不足导致的梁体开裂的可能性较小。

##### 3.4.2 损伤模型确定

根据前文主梁开裂损伤因素分析,结合现场检测结果,以主梁跨中底板实测的现存应力为目标,通过不断调整底板束与腹板束预应力损失量,确定损伤模型,结果见表1。

由表1可知,工况四作用下,中跨底板纵向应力比较接近实际现存应力,因此,本次损伤模型承载能

表 1 损伤模型确定表

工况	跨中底板底面纵向应力 /MPa	
	31.6 m(67#~68#墩)跨	29.8 m(68#~69#墩)跨
现场实测现存应力	-2.67	-2.92
工况一 底板束 B1 损失 20%、B4 损失 30%	-2.74	-3.11
工况二 底板束 B1 损失 20%、B3 损失 5%、B4 损失 40%	-2.70	-3.04
工况三 底板束 B1 损失 20%、B3 损失 10%、B4 损失 40%	-2.63	-3.05
工况四 全联腹板束 F1~F3 损失 5%、底板束 B1 损失 20%、B4 损失 40%	-2.61	-2.88

力检算将以表 1 中工况四的预应力损失组合为准。

3.4.3 考虑损伤后主梁承载能力检算结果

(1)持久状况承载能力极限状态检算结果

a. 正截面抗弯强度检算结果

主梁各截面抗弯承载能力极限状态验算结果及内力包络图见图 6。经验算,考虑损伤后截面抗弯强度满足规范要求。

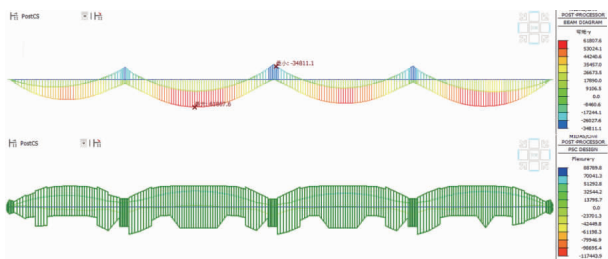


图 6 考虑损伤后承载能力极限状态弯矩内力效应包络图及剪力包络图(单位:kN·m)

b. 斜截面抗剪强度检算结果

考虑损伤后斜截面抗剪承载能力极限状态验算包络图见图 7。经验算,主梁各截面的斜截面抗剪强度验算均满足要求。

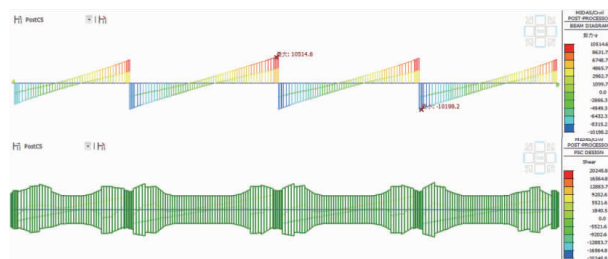


图 7 考虑损伤后承载能力极限状态主梁剪力效应包络图及斜截面抗剪包络图(单位:kN·m)

(2)持久状况正常使用极限状态抗裂性检算结果

a. 正截面抗裂性检算结果

在短期效应荷载组合和长期效应荷载组合作用下,上下缘的抗裂验算的应力包络图见图 8、图 9。

由图 8、图 9 可知,短期荷载组合作用下,除梁端上缘局部失真区域出现拉应力外,截面上缘最小应力为  $0.5 \text{ MPa} \leq 0.7 f_{tk} = 1.855 \text{ MPa}$ ,下缘最大拉应力为  $0 \text{ MPa} \leq 0.7 f_{tk} = 1.855 \text{ MPa}$ ,均满足规范要求。长期荷载组合作用下,除梁端上缘局部失真区域出现拉应力外,墩顶负弯矩区域上缘最小压应力为 0,下缘最小应力为 0,满足规范要求<sup>[9]</sup>。

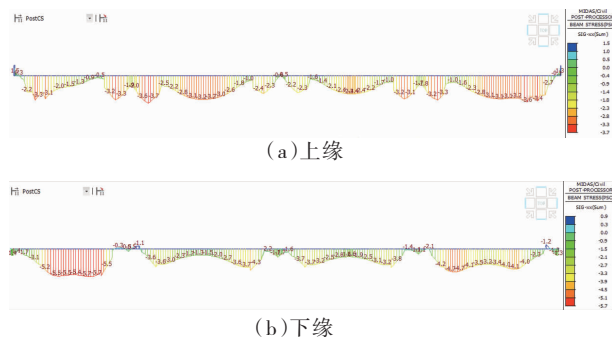


图 8 考虑损伤后短期效应荷载组合主梁正截面的最大应力包络图(单位:MPa)

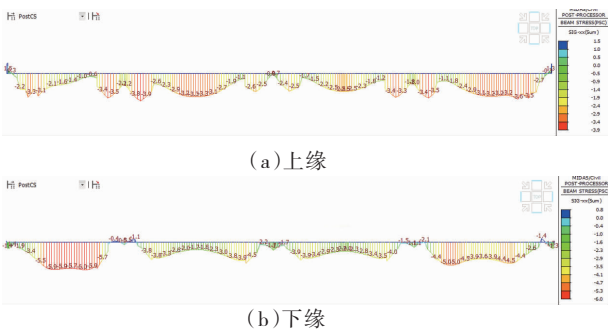


图 9 考虑损伤后长期效应荷载组合主梁正截面的最大应力包络图(单位:MPa)

b. 斜截面抗裂性检算结果

短期效应组合下主梁的主拉应力包络图见图 10。除去梁端横隔板范围失真区域外,短期效应荷载组合下,主梁墩顶负弯矩区域为最大主拉应力处,为  $\sigma_{tp} = 1.31 \text{ MPa} < 0.5 f_{tk} = 1.325 \text{ MPa}$ ,满足规范要求<sup>[9]</sup>。

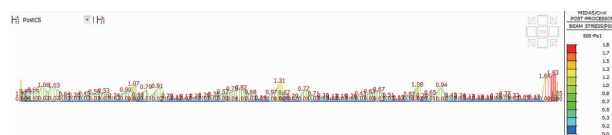


图 10 考虑损伤后短期效应荷载组合主梁斜截面主拉应力包络图(单位:MPa)

(3)持久状况构件应力检算结果

a. 正截面混凝土最大压应力检算结果

根据检算结果,主梁的使用阶段正截面混凝土的最大压应力为 12.8 MPa,符合《公预规》要求  $\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5 f_{ck} = 16.2 \text{ MPa}$  的规定<sup>[9]</sup>。

b. 混凝土主应力检算结果

根据检算结果,使用阶段主梁的混凝土最大主压应力为 12.8 MPa,符合《公预规》要求  $\sigma_{ep} \leq 0.6 f_{ck} =$

19.44 MPa 的规定<sup>[9]</sup>。

#### 4 裂缝成因分析

根据裂缝形态分析,本桥横向裂缝虽然较多,但主要集中在两个箱室空腔下方,并未形成底板横向通长裂缝或延伸到腹板上,与典型受力裂缝有区别;结合现场箱梁跨中底板现存应力检测结果和桥梁损伤模型计算结果分析,此裂缝不可能为单纯由预应力损失引起压应力储备不足而导致的梁体开裂。综合分析,认为桥梁裂缝成因主要有以下几种:

(1)梁体混凝土浇筑后没有及时充分养护。本桥施工时天气炎热,浇筑的混凝土没有相对潮湿的环境,干缩变形较大。支架上现浇混凝土箱梁,可以看作与模板紧密接触且支承在底模板上的混凝土长梁,现浇混凝土后,混凝土长梁产生由于温度或其他原因的收缩变形,底模板会阻止混凝土收缩而引起箱梁底板纵向拉应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时,会产生垂直于拉应力方向的横向裂缝。

(2)满堂支架法施工过程中,支架没有进行预压或预压荷载不够、支架刚度不够、基础不稳定等因素,都可能会引起支架变形,造成混凝土梁的不均匀沉降,使混凝土在浇筑过程中产生裂缝。

(3)对于底板产生纵向裂缝的原因,在纵向预应力作用下,由于泊松比效应,底板将出现横向拉应力,如果拉应力超过混凝土容许抗拉强度,会引起混凝土纵向开裂;此外,施工过程中如预应力管道偏离设计位置,可能出现较大的局部拉应力,也会引起底板纵向开裂。

综合分析认为:箱梁底板裂缝主要是在施工过程中由于养护措施不当、支架变形等引起的裂缝,裂缝宽度一般较大且会随着大气温度变化而变化,这种裂缝对箱梁的结构使用性能影响不大,但会影响结构的耐久性。

#### 5 病害处治措施及效果

经过分析,本桥箱梁底板产生的裂缝为非结构

性受力裂缝,因此仅需对主梁裂缝进行处理,以恢复结构的整体性和耐久性。对宽度小于 0.15 mm 的裂缝,采用环氧胶泥进行封闭;对宽度不小于 0.15 mm 的裂缝,采用“壁可法”(灌压环氧浆)进行处理,并加强后期监测。

对裂缝进行维修后,对本桥进行了动静载试验,试验结果证明,本桥受力状态良好,校验系数在规范允许范围之内,试验过程中未发现因加载而引起的新裂缝以及旧裂缝扩展。验证了本桥底板裂缝非受力或预应力损失导致的裂缝的结论。

#### 6 结 语

本文针对某四跨预应力混凝土连续梁底板出现大量裂缝进行检测以及裂缝原因分析,检测结果表明本桥混凝土强度满足要求;该桥主要病害为箱室空腔下方底板出现横向及其他走向的裂缝,经过分析,裂缝的产生主要是在施工过程中由于施工措施不当引起的混凝土收缩裂缝,并非是由预应力损失引起压应力储备不足而导致的梁体开裂,对箱梁的结构使用性能影响不大,但会影响箱梁的耐久性。

#### 参考文献:

- [1] 王丽丽.城市桥梁检测评定的常用方法及示例[J].城市道桥与防洪, 2020(12):144-148.
- [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] 税银平,苏龙,张世冀.仁赤高速公路冷水沟大桥主桥桥梁检测分析[J].城市道桥与防洪,2014(10):160-162.
- [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] 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.
- [7] 吴迅,邢云,李毅.间接作用引起的墩身裂缝有限元分析[J].桥梁建设,2007(4):35-37.
- [8] 舒春生.混凝土桥梁检测与加固技术的应用[J].城市道桥与防洪,2019(8):120-122.
- [9] JTG D62—2004.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].