

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.019

# 连续刚构桥损伤计算模型分析与加固方案研究

李华<sup>1,2</sup>, 刘海宽<sup>1,2\*</sup>, 程坤<sup>1,2</sup>, 于品德<sup>1,2</sup>

(1.河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450015; 2.公路桥梁安全检测与加固技术交通运输行业研发中心)

**摘要:** 为了确定连续刚构桥损伤有限元计算模型和有针对性地采取加固对策, 保证达到桥梁加固设计目标, 消除桥梁现有病害, 通过建立考虑不同损失的有限元模型进行计算, 并将计算结果与桥梁现状病害情况进行匹配, 确定了桥梁损伤有限元模型。根据桥梁病害和损伤模型, 制订了相应的加固目标, 并对加固设计方案进行了研究, 最后通过对比分析对加固效果进行了评价。

**关键词:** 连续刚构桥; 有限元; 加固; 模型; 计算分析

预应力混凝土连续刚构桥具有整体性好、刚度大, 抗震性能好、行车舒适性佳、桥面伸缩缝少等优点。目前在中国, 连续刚构桥的施工技术已相对成熟, 能够有效控制施工的质量和工期, 在成桥运营之后所需的日常养护工作也较少。中国在1997年所建成的虎门大桥副航道桥主跨达270 m, 将连续刚构桥的跨越能力体现到了极致。但在通车运营以后, 受混凝土收缩徐变、预应力损失、重载交通、温度作用等多种因素影响以及早期设计理念的局限, 大跨连续刚构桥较普遍地出现跨中持续下挠, 箱梁1/4跨~跨中附近腹板斜向开裂, 跨中底板横向开裂, 顶、底板纵向开裂, 齿板开裂等典型病害。这些病害的存在不仅影响桥梁的整体性和耐久性, 持续发展甚至会对结构的安全造成危害, 不得不面临限载、加固维修, 甚至退出使用的尴尬境地。因此, 对连续刚构桥持续监测, 及时判别结构病害损伤

状态, 并采取加固对策, 对桥梁的安全运营意义重大。该文以郑(州)一卢(氏)高速公路水磨湾大桥为例, 对桥梁损伤模型进行匹配分析, 并进行桥梁加固对策研究。

## 1 工程背景

郑卢高速公路水磨湾大桥为分离式双幅桥, 对称布置, 主桥设计为跨径(65+110+65)m 预应力混凝土连续刚构桥, 上部结构为单箱单室断面, 顶板宽度12.75 m, 底板宽度6.5 m, 箱梁根部梁高6.0 m, 跨中及边跨合龙段梁高2.3 m, 箱梁底板下缘按二次抛物线变化。桥梁设计荷载等级为汽车一超20级, 挂车-120, 桥梁立面布置如图1所示。

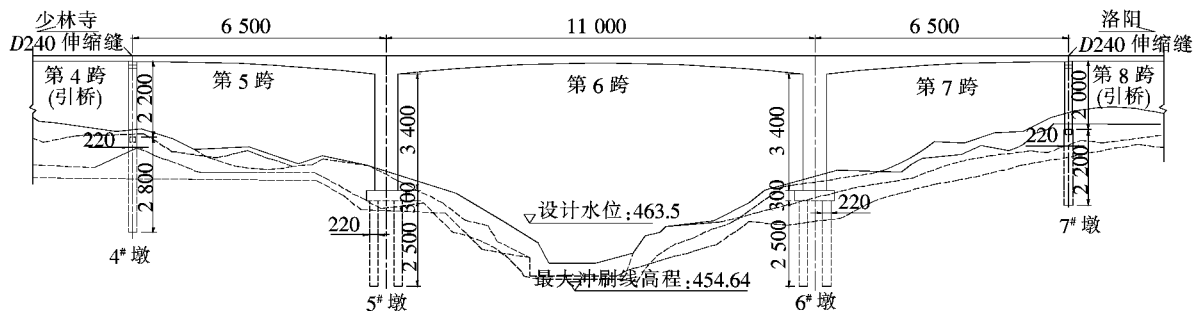


图1 水磨湾大桥立面布置图(除标高单位为m外,其余单位为cm)

收稿日期:2018-09-17

基金项目:河南省交通运输厅科技项目(编号:2015Y04);河南省重大科技专项(编号:151100310900);河南省科技攻关计划项目(编号:162102310356)

作者简介:李华,女,硕士,E-mail:571389303@qq.com

\*通信作者:刘海宽,男,硕士,工程师,E-mail:lhkuan@foxmail.com

水磨湾大桥自 2005 年建成通车以来,主桥箱梁顶、底、腹板及预应力齿板产生不连续的纵向裂缝,跨中底板产生横向裂缝等主要病害。在 2013 年和 2014 年检测对比发现桥梁病害发展迅速,亟需采取加固措施。主梁线形监测显示,左右幅主跨跨中均出现明显下挠,最大值约 60 mm。

## 2 有限元计算与模型匹配

### 2.1 有限元计算模型

桥梁加固前应对结构进行计算分析,确定损伤后的桥梁计算模型,全面掌握既有结构的受力状况,制定

针对性的加固方案。由于桥梁损伤状况无法精准确定,计算分析时采用包络计算法建立水磨湾大桥有限元模型,将重载交通、预应力损失、截面折减等因素考虑在内,采用 6 种模型计算分析。除按规范计算混凝土收缩徐变外,其余 5 种模型的计算条件见表 1。

### 2.2 计算结果与模型匹配分析

水磨湾大桥 6 种有限元模型计算结果如下:

(1) 模型 D 在采用 1.2 倍设计荷载,考虑竖向预应力损失 20%,纵向预应力附加损失 20% 时,计算箱梁 1/4 跨~跨中附近主拉应力较大,跨中主拉应力达到 2.78 MPa,超过混凝土抗拉强度标准值,与底板横向裂缝位置、形态基本吻合。

表 1 5 种有限元计算模型

模型	模型计算条件		
	计算荷载	预应力损失	截面折减
模型 A	原设计	不考虑	不考虑
模型 B	原设计 1.2 倍	竖向预应力损失 20%;纵向不考虑损失	中跨跨中底板截面折减 5%
模型 C	原设计 1.2 倍	竖向预应力损失 20%,纵向预应力损失 10%	中跨跨中底板截面折减 5%
模型 D	原设计 1.2 倍	竖向预应力损失 20%,纵向预应力损失 20%	中跨跨中底板截面折减 5%
模型 E	原设计 1.2 倍	竖向预应力损失 20%,纵向预应力损失 30%	中跨跨中底板截面折减 5%
模型 F	原设计	竖向预应力损失 20%,纵向预应力损失 20%	顶、底板截面折减 5%

(2) 模型 D 在荷载组合作用下主梁的主拉应力都已超过混凝土抗拉强度标准值,必然导致结构开裂,结合应力结果和检测中的裂缝分布图来看,箱梁 1/4 跨~跨中附近主拉应力较大的区域与检测发现腹板斜向裂缝密集区域吻合。

(3) 箱梁开裂导致有效截面减小、主梁抗弯刚度降低、预应力损失、重载交通的持续作用等,导致了箱梁跨中下挠不断增加。

通过分析,桥梁病害与模型 D 计算条件下的理论分析结果基本吻合,将模型 D 确定为损伤后的桥梁计算模型,加固验算和设计将以此为依据。

## 3 加固对策与方案

### 3.1 加固设计目标

针对桥梁病害和损伤状态,制定加固目标为:① 封闭主梁裂缝,消除表观病害,提高结构耐久性;② 增加主梁应力储备,适当改善主桥的桥面线形,抑制主梁跨中下挠,提高结构耐久性;③ 增强结构抗弯、抗剪承载能力,抑制腹板裂缝的发展。

### 3.2 跨中下挠控制措施

通过增设箱梁纵向体外预应力束,可增加主梁应力储备,增强主梁整体刚度,提高结构耐久性,抑制主梁下挠。体外预应力束利用跨中及其附近横隔板设置转向块,并在箱梁内植筋重新浇筑锚固块,实现预应力的锚固和转向。对水磨湾大桥每幅桥梁边、中跨共设置 6 束标准抗拉强度  $f_{pk}=1\ 860$  MPa,无黏结环氧低松弛钢绞线 TW15-12 成品索,每个腹板对应 3 束,通过 3 个转向块分 3 批进行下弯,设计锚下控制应力为 1 209 MPa。体外预应力索体系布置如图 2 所示。

### 3.3 裂缝的抑制与防控

对于箱梁顶底板、腹板、齿块裂缝,按照 JTG/TJ 22-2008《公路桥梁加固设计规范》第 16.3 条进行处理,对于宽度  $\geq 0.15$  mm 的裂缝采用压浆法进行修补,对于宽度  $< 0.15$  mm 的裂缝采用封闭法进行修补。裂缝封闭所采用胶体材料,应满足现行相关规范的技术要求。箱梁裂缝封闭处理完成后,为防控裂缝的进一步发展,需根据裂缝产生原因采取加固措施进行抑制和防控。通过在主桥中跨 1/4 跨~跨中附近粘贴斜向钢板,以提高主梁的抗剪能力,抑制腹板斜裂缝发展,钢板粘贴完成后,在钢板表面喷涂 2 cm 厚环氧砂浆。

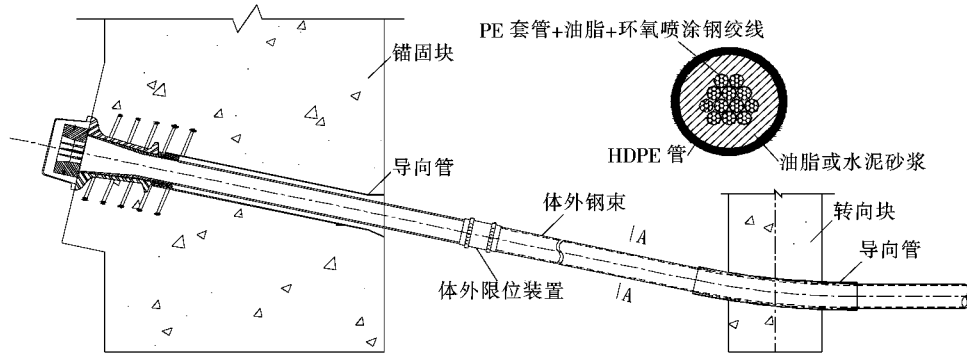


图2 体外预应力索体系布置图

另外,通过重做桥面铺装及在顶板横向粘贴钢板,增加箱梁顶板刚度及横向承载力,延缓顶板纵向裂缝发展,提高结构耐久性能;对于箱梁齿板裂缝,裂缝封闭完成后,采用粘贴钢板补强,防控裂缝开展。

#### 4 加固效果计算分析

##### 4.1 加固前后承载力对比

对水磨湾大桥加固前后跨中及墩顶关键截面的抗

弯承载力进行了验算对比,结果见表2。

由表2可以看出:桥梁加固后跨中及墩顶承载力均有明显的提高,其中边跨和中跨跨中承载力提高了25.5%和27.8%,墩顶负弯矩提高了25.8%、25.8%,抗弯承载力安全系数明显提高。

对桥梁加固前后跨中及墩顶关键截面的抗剪承载力进行了验算对比,结果见表3。

由表3可以看出:加固后各断面承载力均有不同程度的提高,其中边跨和中墩墩顶抗剪承载力提高了8.5%和14.3%,抗剪承载力安全系数明显提高。

表2 加固前后抗弯承载力验算结果

位置	加固前			加固后		
	内力/ (kN·m)	截面抗力/ (kN·m)	安全系数	内力/ (kN·m)	截面抗力/ (kN·m)	安全系数
第5跨跨中	34 830	70 967	2.04	37 259	89 075	2.39
5#墩墩顶	-640 112	-652 941	1.02	-669 363	-821 367	1.23
第6跨跨中	62 258	115 805	1.86	65 073	147 998	2.27
6#墩墩顶	-640 112	-652 941	1.02	-669 363	-821 367	1.23
第7跨跨中	34 830	70 967	2.04	37 259	89 075	2.39

表3 加固前后抗剪承载力验算结果

位置	加固前			加固后		
	内力/ kN	截面抗力/ kN	安全系数	内力/ kN	截面抗力/ kN	安全系数
4#墩墩顶	5 764	13 092	2.27	6 115	14 208	2.32
第5跨跨中	9 741	17 854	1.83	9 675	20 023	2.07
5#墩墩顶	25 789	37 549	1.46	27 658	42 919	1.55
第6跨跨中	10 166	17 445	1.72	10 148	19 415	1.91
6#墩墩顶	25 789	37 549	1.46	27 658	42 919	1.55
第7跨跨中	9 741	17 854	1.83	9 675	20 023	2.07
7#墩墩顶	5 764	13 092	2.27	6 115	14 208	2.32

#### 4.2 加固前后应力状态对比

采用体外预应力加固后,由于附加预应力的施加,

各截面应力储备会有不同程度的增加,验算结果如表 4 所示。

表 4 加固前后应力验算结果

项目	最大正应	最小正应	中跨跨中底板附近	中跨 $L/4 \sim L/2$ 最大
	力/MPa	力/MPa	最小正应力/MPa	主拉应力/MPa
加固前	15.22	-2.78	-2.78	-2.87
加固后	13.86	-0.94	-0.94	-2.36
加固后-加固前	-1.36	1.84	1.84	0.51

由表 4 可以看出:加固后中跨跨中截面下缘的应力储备提高了约 1.84 MPa,中跨  $L/4 \sim L/2$  主梁的最大主拉应力降低约 0.51 MPa,抗裂性能进一步提升。

#### 4.3 加固前后主梁挠度对比

加固前后主梁挠度验算结果如表 5 所示。

表 5 加固前后挠度验算结果

位置	最大下挠/mm		加固后-加固前/ mm
	加固前	加固后	
第 5 跨跨中	-64.7	-44.4	20.3
第 6 跨跨中	-136.0	-93.0	43.0
第 7 跨跨中	-64.7	-44.4	20.3

由表 5 可以看出:张拉后边跨跨中上挠 20.3 mm,中跨跨中上挠 43.0 mm,抵消了原结构的部分下挠,并且由于体外预应力的施加,有利于箱梁横向裂缝的闭合,并可在一定程度上减缓桥梁进一步下挠的速率。

## 5 结论

大跨连续刚构桥跨中持续下挠,箱梁开裂等典型病害,不仅影响桥梁的整体性和耐久性,持续发展甚至对结构的安全造成威胁,需要及时采取加固措施。桥梁加固前应确定桥梁的损伤情况,并进行理论计算分析,然后采取针对性的加固方案。通过粘贴钢板被动加固和体外预应力主动加固,可有效提高结构的承载能力,提高结构刚度,改善结构的应力状态,有效抑制梁体裂缝的发展;体外预应力施加引起的主梁跨中位移,可在一定程度上抵消跨中下挠,并可减缓跨中进一步下挠的速率。水磨湾大桥计算分析显示,加固后支点截面及跨中截面的极限承载能力明显提高;跨中截

面下缘的应力储备提高了约 1.84 MPa;主梁的主拉应力降低约 0.51 MPa;主梁跨中将向上产生约 43.0 mm 的位移,有利于主梁跨中底板横向裂缝的闭合,提高结构耐久性。桥梁加固完成后对桥梁进行了检测,加固后消除了现有病害,实现了加固目标。

#### 参考文献:

- [1] 杨虎城.预应力混凝土连续刚构桥裂缝分析及加固研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.
- [2] 程修龙.预应力混凝土连续刚构桥加固方法及加固效果分析[D].武汉理工大学硕士学位论文,2009.
- [3] 项贻强,唐国斌.混凝土箱梁桥开裂机理及控制[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [4] 许威.连续刚构桥体外预应力加固关键技术研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.
- [5] 方亮.体外预应力加固连续刚构桥研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2013.
- [6] JTG/T J22-2008 公路桥梁加固设计规范[S].
- [7] JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [8] JTJ 023-85 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [9] 丁鑫,刘海宽.基于三维坐标观测的大跨连续刚构桥主梁挠度监测与评估[J].公路与汽运,2017(6).
- [10] 李俊,李小珍,卫星,等.连续刚构桥底板纵向裂纹原因分析[J].公路,2005(9).
- [11] 曹伟,宋文峰.体外预应力在大跨连续刚构桥加固工程中的应用[J].公路工程,2011(5).
- [12] 杨西福.混凝土徐变对大跨连续刚构桥长期下挠的影响分析[J].中外公路,2010(5).
- [13] 胡云耀,常柱刚,胡汉渝.关于增设矮肋法防治大跨径连续刚构桥箱梁底板纵向裂缝问题的探讨[J].中外公路,2009(2).