

# 预应力混凝土连续箱梁桥裂缝病害的加固方法分析

高杰

(福建船政交通职业学院,福州 350007)

**摘要:**以某高速公路上三跨预应力混凝土变截面连续箱梁桥为背景工程,针对该桥墩顶和跨中出现的大量裂缝进行机理研究,根据裂缝产生机理选择体外布置预应力束的加固方法;应用空间杆系有限元精细化分析程序 Wisepius 建立实桥的有限元模型,并且对体外布置预应力束进行模拟,有限元分析中荷载考虑了正应力标准组合,组合值包括恒载、车辆活载、混凝土的徐变、整体温度场、梯度温度场以及基础沉降产生的附加内力。通过有限元计算分析,对比了加固前和加固后的梁体的各项应力指标,分析表明,加固方法能够较显著的提高该桥墩顶和跨中的压应力储备,对于针对性的病害具有良好的处理效果。

**关键词:**预应力变截面连续箱梁;裂缝;有限元模型;体外预应力;加固分析

**中图分类号:**TU311.3

**文献标志码:**A

## 引言

连续梁桥针对不同的病害<sup>[1]</sup>,常用的加固方法有:施加体外预应力<sup>[2-5]</sup>、增大截面<sup>[6]</sup>、粘贴钢板<sup>[7]</sup>、粘贴纤维复合材料<sup>[8]</sup>或增设竖向预应力<sup>[9]</sup>等方法,其中体外预应力加固技术是一种主动加固方法<sup>[10-12]</sup>,能够推迟裂缝出现和限制裂缝发展,提高结构刚度和承载力,从而恢复桥梁的正常运营能力<sup>[13-15]</sup>。本文以某高速公路上三跨预应力混凝土变截面连续箱梁桥为背景工程,通过桥梁检测,该桥墩顶和跨中位置出现的大量裂缝,采用体外束布置对梁体进行加固,通过建立桥梁模型的空间有限元模型,对比分析了加固模型在加固前和加固后的应力情况,对大桥的加固维修效果进行评估。

## 1 背景工程

### 1.1 工程概况

背景工程为某高速公路上的跨线桥工程。主桥采用

跨径为45 m + 80 m + 45 m的三跨预应力混凝土变截面连续箱梁,采用对称悬臂施工方法。桥型布置如图1所示,主桥上部结构为变截面预应力混凝土连续梁,按双幅设置。箱梁梁高:跨中2.2 m,墩顶处4.6 m,边墩梁端高2.2 m。箱梁采用单箱单室截面形式,桥梁横断面如图2所示。就单幅桥而言,单幅桥箱梁悬臂长度为2.8 m,箱室底宽为7.0 m。箱梁顶板厚度0.28 m,底板厚度由主桥中墩顶的0.65 m渐变至跨中的0.25 m。腹板厚度在中横梁两侧各18.0 m范围内为0.8 m,向中跨及边跨各12.0 m范围内由0.8 m渐变至0.45 m,跨中段腹板厚0.45 m;端横梁处腹板厚度由0.8 m渐变至0.45 m,变化段长度为2.72 m;箱梁顶面设置1.5%的单向横坡,通过腹板高度变化实现。梁底下缘及底板上缘均按二次抛物线变化。

全桥设置4道横梁,主墩处中横梁厚度为2.0 m,边墩处端横梁厚1.2 m,ss15.20的钢绞线( $f_{pk} = 1860$  MPa)。桥面板横向预应力采用扁锚,竖向预应力

收稿日期:2016-11-02

基金项目:福建省教育厅科技项目(JA15664)

作者简介:高杰(1966-),男,福建平潭人,副教授、高级工程师,主要从事桥梁施工及检测方面的研究,(E-mail)gj1966@163.com

采用精轧螺纹钢筋。箱梁采用 C50 混凝土。

考虑到箱梁采用挂篮悬臂浇筑的施工方法,主梁节段划分主要根据挂篮的最大承载力确定,节段长度 3.5 m~4 m,共 9 段悬臂浇筑节段,每节段重量不超过 140 t。0#块长 12 m,边跨支架现浇长 3.92 m,边、中跨均设置 2 m 的合龙段。

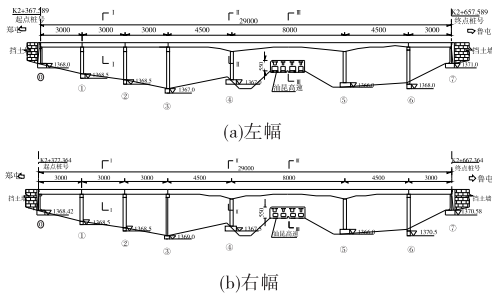


图 1 桥型布置图(单位:cm)

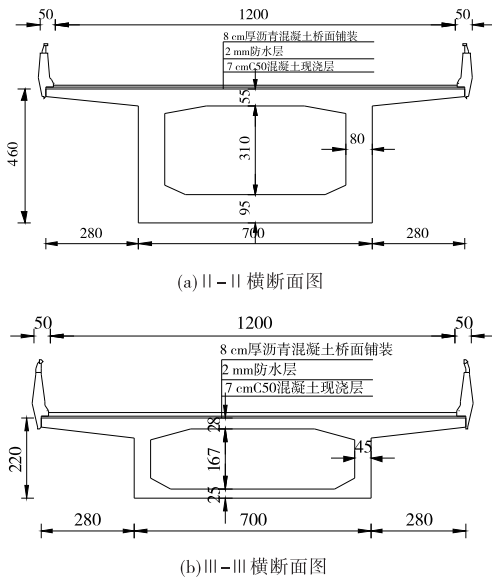


图 2 桥左、右幅横断面图(单位:cm)

### 1.2 主要病害原因及其现状

根据该桥荷载试验检测报告可知,本桥结构性开裂病害主要集中在左幅桥箱梁的墩顶和跨中位置:

(1)4#墩、5#墩顶处发现大量的横向、竖向、斜向裂缝:4#墩距第3跨 12.55 m 至 4#墩距第五跨 5.8 m 之间左侧腹板有 48 条横向、斜向、竖向裂缝,横向裂缝长度均贯通翼板,有 8 条裂缝延伸至腹板,裂缝最大缝宽为 0.22 mm;4#墩距第3跨 12.5 m 至 4#墩距第5跨 8.5 m 之间右侧腹板有 36 条横向、斜向、竖向裂缝,横向裂缝长度均贯通翼板,有 18 条裂缝延伸至腹板,裂缝最大缝宽为 0.26 mm。

(2)5#墩距第4跨 10.6 m 至 5#墩距第6跨 11.5 m 之间左侧腹板有 38 条横向、斜向、竖向裂缝,横向裂缝长度均贯通翼板,有 10 条裂缝延伸至腹板,裂缝最大缝宽为 0.25 mm;5#墩距第4跨 4.3 m 至 5#墩距第6跨 8.0 m 之间右侧腹板有 38 条横向、斜向、竖向裂缝,横向裂缝长度均贯通翼板,有 15 条裂缝延伸至腹板,裂缝最大缝宽为 0.25 mm。

箱梁主要开裂病害总体展开图如图 3 所示。

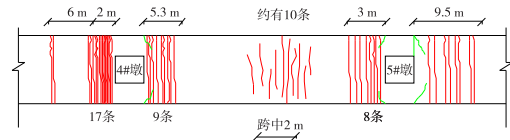


图 3 桥梁主要病害总体展开图(单位:cm)

根据检测报告提供的检测数据分析可知:墩顶处截面翼缘板贯穿横向裂缝是由于墩顶负弯矩处预应力不足导致,腹板裂缝是由于翼缘板裂缝延伸所致。本加固方案设计主要针对墩顶贯穿横向裂缝和跨中横向裂缝,目标为增加墩顶和跨中处截面的压应力储备,弥补预应力的不足,提高桥梁的刚度及耐久性。

## 2 加固方法的有限元分析

### 2.1 计算模型

采用空间杆系有限元精细化分析程序 Wisepus 对该桥进行加固分析,对该桥建立“梁+板”表达的空间网格模型,全桥共建立 1994 个节点和 3610 个单元,共划分了 14 道纵梁,如图 4 所示。体外束通过刚臂与临近纵梁连接施加预应力。

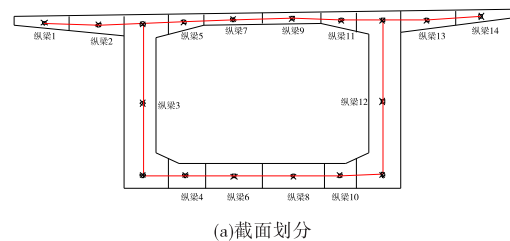


图 4 截面划分及其有限元模型示意图

加固用体外束布置形式为:中墩距墩顶 5 m、6.75 m、8.5 m、23 m、27 m 和 31 m 范围内于箱梁顶板上

方3 cm处各依次布置3-3-3-2-2-2根3- $\varphi$ s15.2预应力钢绞线,张拉控制应力为1116 MPa;通长体外束在箱梁两侧各布置2根12- $\varphi$ s15.2预应力钢绞线,张拉控制应力为1116 MPa。

## 2.2 计算参数

支座边界条件:按实际支座约束模拟。收缩徐变:混凝土徐变时间考虑3年,加载龄期取7天,湿度取80%。整体温度:因温度变化引起的附加内力按降温15℃、升温10℃计算。梯度温度:按JTGD60-2015规范定义温度场,取沥青混凝土铺装层厚8 cm。基础变位:桥墩沉降对上部结构产生的附加内力按边墩0.5 cm、中墩1 cm计算。活载:城市-A级,不计人群,三车道加载,冲击系数取0.05,按影响面加载。

## 2.3 加固标准

根据检查发现的各种病害和桥跨结构特点,进行维修加固设计,主要目的和基本思路为:

- (1) 弥补原结构体内钢绞线的预应力不足或损失。
- (2) 增加主梁纵桥向的正应力储备。
- (3) 避免对原结构造成新的损伤。

通过桥梁的精细化计算分析,综合考虑桥梁各项应力指标后,确定加固后(考虑墩顶弯束的损失)墩顶压应力储备较原设计增加约1 MPa,跨中压应力储备增加2~3 MPa。

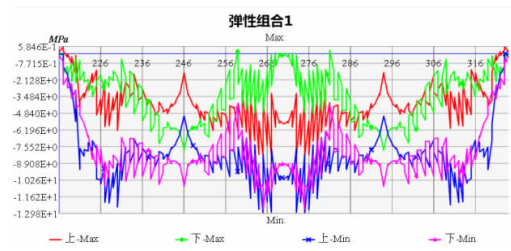
## 2.4 计算结果分析

取底板5,顶板7,腹板3加固前和加固后计算结果对比如图5所示,图5中结果为考虑恒载+活载+徐变+整体温度+梯度温度+基础沉降的正应力标准组合值。图5中,弹性组合1为考虑车道荷载的标准组合,用于腹板和底板计算;弹性组合2为考虑车辆荷载的标准组合,用于顶板计算。

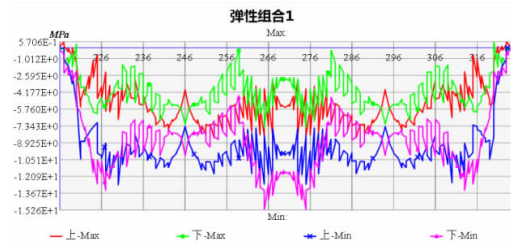
由图5可知,纵梁7为墩顶束连接纵梁,加固前应力在-16.5 MPa~4.15 MPa之间,加固后除体外束张拉端应力集中区域外纵梁大部分区域应力在-22.87 MPa~3.894 MPa之间;纵梁3为通长体外束连接纵梁,加固后各区域压应力储备增加2~3 MPa;其他各纵梁加固后应力均有一定程度的改善。

## 3 加固效果综合分析

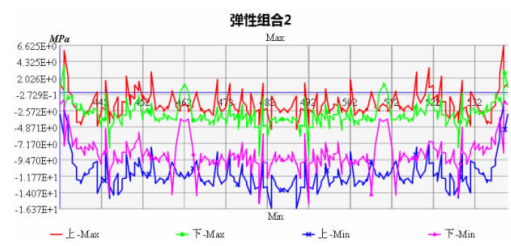
根据空间网格模型的精细化分析结果,可得出各模型下标准组合应力,见表1。



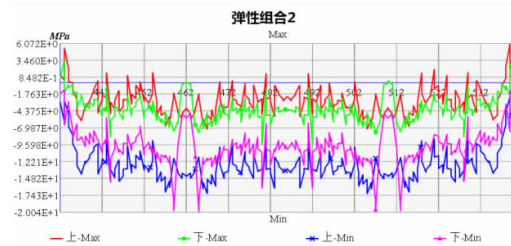
(a) 纵梁3加固前



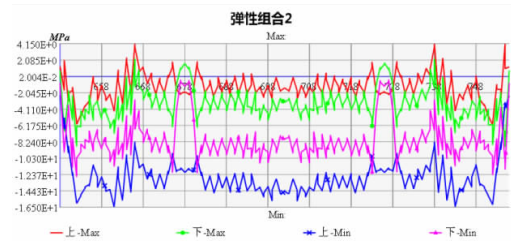
(b) 纵梁3加固后



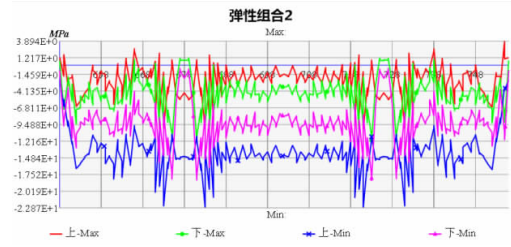
(c) 纵梁5加固前



(d) 纵梁5加固后



(e) 纵梁7加固前



(f) 纵梁7加固后

图5 标准组合正应力

表1 各模型标准组合应力值

	纵梁 1		纵梁 2	
	墩顶	跨中	墩顶	跨中
原设计(1)	0.716	-2.845	-1.768	-3.623
考虑墩顶预应力损失 30% (2)	2.291	-3.120	0.364	-3.772
加固后(未考虑墩顶弯束的损失)(3)	-1.792	-3.154	-4.171	-4.128
加固后(考虑墩顶弯束的损失)(4)	-0.207	-3.438	-2.013	-4.347
(5) = (2) - (1)	1.575	-0.275	2.132	-0.149
(6) = (3) - (1)	-2.508	-0.309	-2.403	-0.505
(7) = (4) - (1)	-0.923	-0.593	-0.245	-0.724
	纵梁 3		纵梁 4	
	墩顶	跨中	墩顶	跨中
原设计(1)	-1.650	-0.049	-1.339	-0.409
考虑墩顶预应力损失 30% (2)	0.227	0.564	-0.777	0.149
加固后(未考虑墩顶弯束的损失)(3)	-4.037	-2.887	-1.661	-3.259
加固后(考虑墩顶弯束的损失)(4)	-2.117	-2.255	-1.09	-2.671
(5) = (2) - (1)	1.877	0.614	0.562	0.558
(6) = (3) - (1)	-2.387	-2.838	-0.322	-2.850
(7) = (4) - (1)	-0.467	-2.206	0.249	-2.262
	纵梁 5		纵梁 6	
	墩顶	跨中	墩顶	跨中
原设计(1)	-0.558	-1.768	0.132	-0.558
考虑墩顶预应力损失 30% (2)	1.779	-2.039	0.467	1.779
加固后(未考虑墩顶弯束的损失)(3)	-2.876	-2.063	-0.121	-2.876
加固后(考虑墩顶弯束的损失)(4)	-0.4937	-2.343	0.2182	-0.4937
(5) = (2) - (1)	2.337	-0.271	0.335	2.337
(6) = (3) - (1)	-2.318	-0.295	-0.252	-2.318
(7) = (4) - (1)	0.064	-0.575	0.087	0.064

由表1分析数据可知,采用本文提出的体外预应力加固方案后,得到加固效果及建议如下:

(1)考虑原墩顶预应力不足,墩顶压应力储备减小 1.575 MPa ~ 2.337 MPa,跨中压应力储备基本不变。

(2)加固后,较原设计墩顶压应力储备增加 2.318 MPa ~ 2.508 MPa,跨中压应力储备增加 2.838 MPa ~ 2.855 MPa。

(3)若考虑原墩顶预应力张拉不到位而减小的压应力储备,在原设计应力水平下,体外束加固后墩顶压应力储备增加 0.127 MPa ~ 0.923 MPa,跨中压应力储备增加 2.262 MPa ~ 2.276 MPa。

(4)施工要严格按照加固设计图纸进行,否则难以达到优良的加固效果。

(5)桥梁运营要严格限制超载,以防裂缝的再次发生。

#### 参考文献:

[1] JTG/T J22-2008,公路桥梁加固设计规范[s].  
 [2] 郝明磊.预应力混凝土箱梁桥体外预应力加固技术研究[D].青岛:青岛理工大学,2012.

[3] 梁曾奇.混凝土薄壁箱梁体外预应力加固关键技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.

[4] 陈小英,卓静,李唐宁,等.多点锚固体外无粘结 CFRP 预应力加固 RC 梁的抗弯性能[J].重庆大学学报,2016,39(4):41-49.

[5] 王书涛,刘利军.预应力混凝土连续箱梁体外束无损张拉施工技术[J].公路,2016(5):93-96.

[6] 徐平,魏建东,蔡迎春,等.原桥与加固桥的承载能力现场试验研究[J].建筑结构学报,2016(s1):321-327.

[7] 励东东.粘贴加固预应力砼连续箱梁桥的受力特性分析[D].西安:长安大学,2013.

[8] 严景明.粘贴预应力纤维增强复合材料在加固混凝土 T 梁中的作用[J].现代经济信息,2012(13):223-223.

[9] 燕同凯,袁新华,刘曙光.变截面预应力混凝土箱梁底板纵向开裂机理与加固方法[J].结构工程师,2013,29(4):179-182.

[10] 负宝锋.宽翼缘预应力混凝土箱梁裂缝成因分析及加固方法研究[D].西安:长安大学,2014.

[11] 吴有松,张铭.组合式预应力混凝土 T 梁加固设计[J].

- 中外公路,2015,35(4):154-156.
- [12] 袁锋.预应力混凝土连续箱梁桥裂缝成因解析与维修加固[J].城市建筑,2015(11):329-329.
- [13] 李华.云南现役大跨度连续刚构桥跨中下挠分析及工程应用措施研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [14] MOON D Y,SIM J,OH H.Practical crack control during the construction of precast segmental box girder bridges[J].Computers & Structures,2005,83(31-32):2584-2593.
- [15] HUANG D,HU B.Cracking Analysis of a Precast Concrete Segmental Box Girder Bridge[C]//Transportation Research Board 92nd Annual Meeting,2013.

## The Reinforcement Method Analysis of Cracks of the Prestressed Concrete Continuous Box Girder Bridge

GAO Jie

(Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Taking three span prestressed concrete continuous box girder bridge with variable cross section in a highway as the background, the mechanism of cracks in the bridge pier top and cross was explored, and the strengthening method of the external strand was adopted according to fracture mechanism. The real bridge model was established by the fine finite element program Wiseplus, and the external strand was simulated by the finite element analysis. The combination of normal stresses was considered in the finite element analysis, including the dead load, the live load of the vehicle, the creep of concrete, the temperature field of the whole, the additional internal force generated by the gradient temperature field and the foundation settlement. The beam stress index analysis showed that the reinforcement method can significantly improve the compressive stress of the pier top and the cross. The analysis shows that the reinforcement method can significantly improve the compression stress of the bridge pier top and the cross, and has good treatment effect to the disease.

**Key words:** prestressed continuous box girder with variable cross section; crack; finite element model; external prestressing; reinforcement analysis