

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.023

引用格式:杜高明,杨超群,尚进.混凝土组合箱梁桥增设钢横隔板加固方式研究[J].公路与汽运,2024,40(6):119-123.

Citation:DU Gaoming, YANG Chaoqun, SHANG Jin, Research on reinforcement method of steel transverse partition for concrete composite box girder bridge[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 119-123.

# 混凝土组合箱梁桥增设钢横隔板加固方式研究

杜高明<sup>1,2</sup>, 杨超群<sup>1,2</sup>, 尚进<sup>1,2</sup>

(1.华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210001; 2.江苏华通工程技术有限公司, 江苏南京 210001)

**摘要:** 由于早期建设的装配式预应力混凝土箱形连续梁桥横向联系不足, 腹板竖向裂缝及底板横向裂缝较多, 采取跨中增设钢桁架横隔梁及钢板横隔梁两种方式对其进行加固, 以提高桥梁横向刚度, 并选取两联 $5\times 30$  m组合箱梁桥进行实桥加固验证。有限元模型计算结果及实桥加固效果跟踪监测结果表明, 两种方案均能提高桥梁横向刚度, 改善跨中横向分布系数, 增强梁体之间变形协调性, 使边梁及中梁应力增量趋于接近; 综合考虑加固效果、经济指标及对原有结构的影响等因素, 钢桁架横隔梁加固方案优于钢板横隔梁加固方案。

**关键词:** 桥梁; 装配式预应力混凝土箱形连续梁桥; 钢桁架横隔梁加固; 钢板横隔梁加固

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)06-0119-05

装配式预应力混凝土箱形连续梁桥(以下简称混凝土组合箱梁桥)是采用预制单片预应力混凝土小箱梁, 现场拼装、现场浇筑预制小箱梁翼缘间的湿接缝, 与翼缘形成一体的装配式桥梁结构。一般在梁端处现浇横隔梁, 少数较大跨径桥梁在跨中加设内横梁。

混凝土组合箱梁桥因其抗扭刚度和承载能力较好、施工速度快、建筑高度低、综合造价低、对场地和施工机具设备要求低等优点, 在中国桥梁建设中得到广泛应用, 取得了良好的社会、经济效益。但随着桥梁服役年限的增长, 一些早期建设的混凝土组合箱梁桥出现不同程度的病害, 尤其是30 m及以下跨径未设跨中横隔梁的组合箱梁桥, 存在横向联系弱、结构整体性较差的缺点。这些病害突出表现为梁体不同部位开裂: 1) 腹板竖向裂缝与底板横向裂缝。这类裂缝属于组合箱梁桥主要结构性裂缝病害, 一般出现在跨中至 $1/4$ 跨径处。腹板竖向裂缝由下向上延伸, 少数腹板竖向裂缝与底板横向裂缝贯通形成U形裂缝<sup>[1]</sup>。2) 腹板斜裂缝。这类裂缝一般出现在梁端至 $1/4$ 跨径处, 裂缝多与腹板成 $45^\circ$ 左右或斜向延伸至底板, 在腹板和底板交接处裂缝沿纵向开展或向上延伸至顶板, 在腹板与顶板交接处裂缝沿纵向开展。3) 顶板纵向裂缝。一般出现在顶板与腹板交接处或箱梁翼缘间湿接缝处, 呈间断或不间断分

布<sup>[2]</sup>。4) 湿接缝裂缝。这类裂缝发生在两片预制梁间现场浇筑桥面板范围内, 主要表现为横向、纵向裂缝, 其中横向裂缝较多。5) 腹板、底板纵向裂缝。该病害在组合箱梁桥中较常见, 一般出现在 $1/4\sim 3/4$ 跨径处, 主要沿预应力钢束方向对应的表面发生, 多呈断续或连续式, 偶有平行式纵向裂缝。

组合箱梁在承受车辆荷载时, 由于缺少跨中横梁对箱梁变形的有效约束, 梁体在受力过程中易出现相对位移和扭转, 导致各梁的受力和变形缺乏有效协调, 各梁之间受力变形形态差异较大, 单梁结构计算采用的横向分布系数小于实际承担的荷载效应, 车轮作用的主梁实际承担的荷载效应较大。因此, 这类桥梁已难以适应日趋增长的交通量及重载车辆通行的需要, 亟须进行加固。本文以某混凝土组合箱梁桥为例研究其横向加固方案, 提出跨中增设钢桁架横隔梁、钢板横隔梁的加固方案, 并对两种加固方案进行对比分析。

## 1 实桥概况

某高速公路桥梁的跨径组成为 $10\times(5\times 30)$  m, 上部结构采用混凝土组合箱梁, 下部结构采用柱式墩、肋板式桥台、钻孔灌注桩基础, 支座采用板式橡胶支座。桥梁设计荷载为汽车-超20级、挂车-120。联与联之间设 $D160$  mm伸缩缝, 桥台处设 $D80$  mm伸缩缝。单幅桥宽度为17.5 m, 由5片

箱梁构成。

该桥腹板竖向裂缝及底板横向裂缝较多,大部分裂缝宽度为 0.10~0.20 mm,最大裂缝宽度达 0.25 mm。

## 2 横向加固方案

该桥为 30 m 跨径混凝土组合箱梁桥,未设中横隔梁,横向联系不足,腹板竖向裂缝及底板横向裂缝较多,经病害原因分析,拟采取增设横向联系的加固方式,提高桥梁横向刚度和整体性<sup>[1-4]</sup>。方案设计阶段提出以下 3 种加固方案:方案一为跨中增设钢桁架横隔梁,方案二为跨中增设钢板横隔梁,方

案三为跨中增设钢筋混凝土横隔梁。考虑到增设钢筋混凝土横隔梁需在原箱梁腹板及翼缘板上开凿,植筋数量多,自质量增加大,对原桥扰动、破坏大,且施工工期较长,后浇混凝土在通车情况下养护条件差,不予采用,主要对方案一和方案二进行对比分析。

为有效评价两种方案的实际加固效果,对左幅第 8 联采用增设钢桁架横隔梁方式进行加固,考虑到钢桁架刚度较弱,每孔跨中设置 2 榀钢桁架,间距为 3 m(见图 1);对左幅第 9 联采用跨中增设钢板横隔梁进行加固,每孔跨中增设 1 道横隔板(见图 2)。两种方案的加固效果见图 3、图 4。

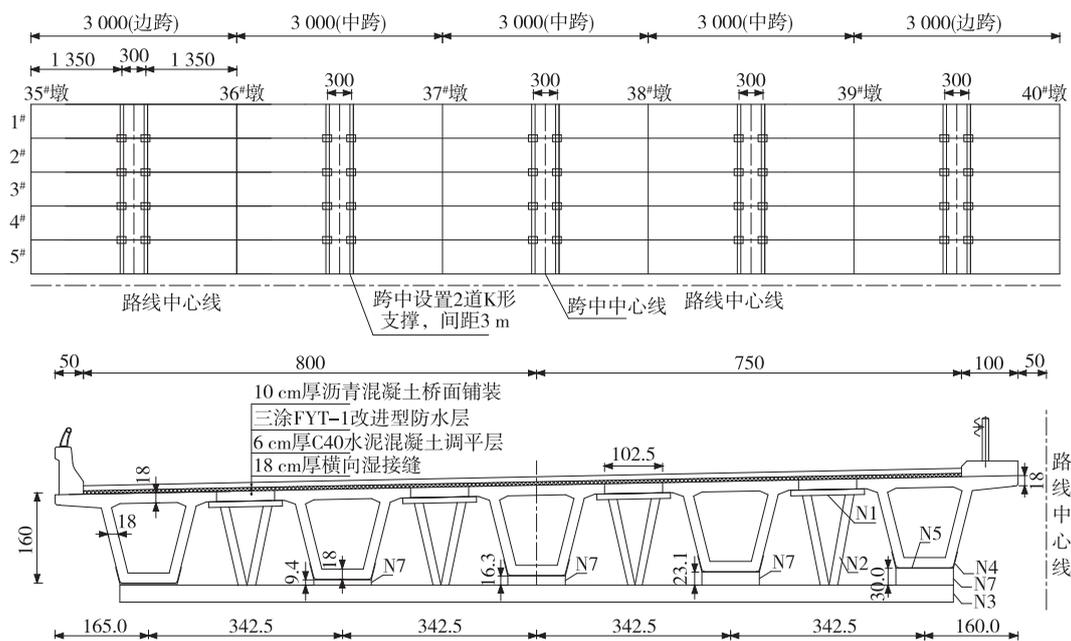


图 1 钢桁架横隔梁加固示意图(单位:cm)

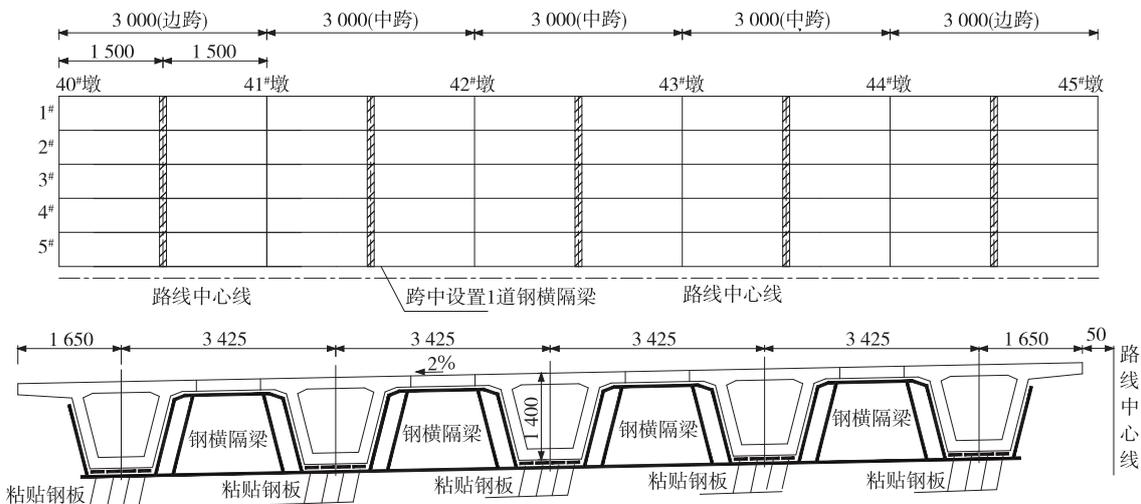


图 2 钢板横隔梁加固示意图(单位:cm)



图 3 钢桁架横隔梁加固效果



图 4 钢板横隔梁加固效果

### 3 理论计算分析

采用有限元软件 ABAQUS 建立两种加固方案空间有限元模型(见图 5、图 6),分别计算加固前、增设钢桁架横隔梁及钢板横隔梁后各片箱梁的横向分布系数、位移、应力<sup>[5-7]</sup>。为方便分析,从外向内取各片箱梁跨中梁底板中心点的值进行分析,依次编号为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>。



图 5 钢桁架横隔梁有限元模型

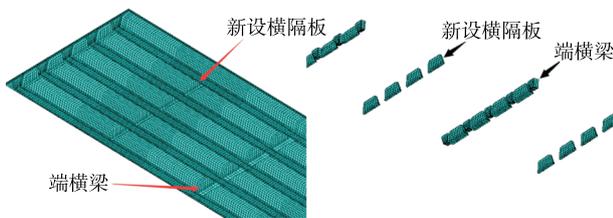


图 6 钢板横隔梁有限元模型

#### 3.1 横向分布系数

参考文献[8-11]计算加固前后各梁跨中横向分布系数,结果见表 1、图 7。

由表 1、图 7 可知:加固后各主梁横向分布系数均有所减小,各箱梁之间变形更协调。采用方案一加固后边梁横向分布系数降低 3.1%,中梁降低 7.6%;采用方案二加固后边梁横向分布系数降低

表 1 加固前后跨中横向分布系数

主梁编号	跨中横向分布系数		
	加固前	方案一加固后	方案二加固后
1	0.748	0.725	0.715
2	0.649	0.619	0.599
3	0.605	0.559	0.531
4	0.649	0.619	0.599
5	0.748	0.725	0.715

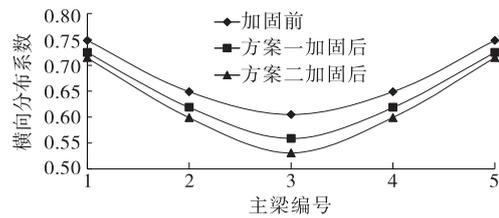


图 7 加固前后跨中横向分布系数的变化

4.4%,中梁降低 12.2%。

#### 3.2 位移

加固前后各梁跨中位移见表 2、图 8。

表 2 加固前后跨中位移

主梁编号	跨中位移/mm		
	加固前	方案一加固后	方案二加固后
1	1.03	1.57	1.67
2	2.63	2.57	2.60
3	4.79	3.80	3.30
4	2.63	2.57	2.60
5	1.02	1.57	1.65

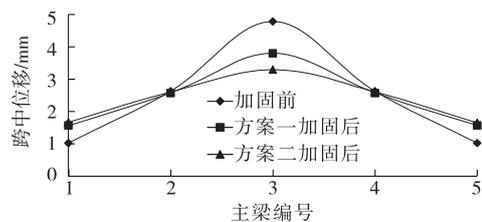


图 8 加固前后跨中位移的变化

由表 2、图 8 可知:加固后中梁 2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>梁体跨中位移减小,边梁位移增大。采用方案一加固后跨中位移最大减小 20.67%,采用方案二加固后跨中位移最大减小 31.11%。横向加固梁体增加了桥梁的横向刚度,改善了箱梁的横向受力,各箱梁之间变形更协调,边梁与中梁位移趋于接近。

### 3.3 应力

加固前后箱梁跨中截面下缘正应力见表 3、图 9。

表 3 加固前后主跨跨中截面下缘应力

主梁编号	跨中截面下缘应力/MPa		
	加固前	方案一加固后	方案二加固后
1	0.41	0.84	0.91
2	1.10	1.41	1.17
3	1.80	1.54	1.35
4	1.10	1.41	1.17
5	0.41	0.84	0.91

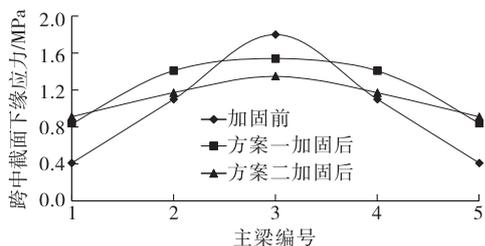


图 9 加固前后主跨跨中截面下缘应力的变化

由表 2、图 9 可知：加固后中梁 3<sup>#</sup> 梁体跨中截面下缘拉应力减小，1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 梁体跨中截面下缘拉应力有所增加。总体来看，加固后箱梁的横向受力有一定程度改善，各箱梁之间应力变化更均匀，边梁与中梁应力更接近。

### 3.4 局部应力计算

利用有限元模型计算箱梁加固后各新增杆件及箱梁的受力情况。图 10、图 11 分别为采用方案一加固后钢桁架和箱梁底板的应力云图，图 12、图 13 分别为采用方案二加固后钢横梁和组合箱梁的应力云图。

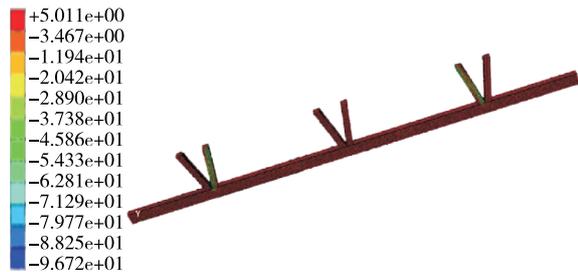


图 10 钢桁架横隔梁加固后钢桁架应力云图(单位:MPa)

由图 10、图 11 可知：增设钢桁架横隔梁加固后，应力集中、最不利位置为钢桁架与垫板交接处，最大应力为 81.7 MPa，斜撑应力在 5.0 MPa 以下，横梁底部区域应力为 25.0~30.0 MPa，通长横梁与箱梁底板四处锚固处最大应力为 2.3 MPa；箱梁底

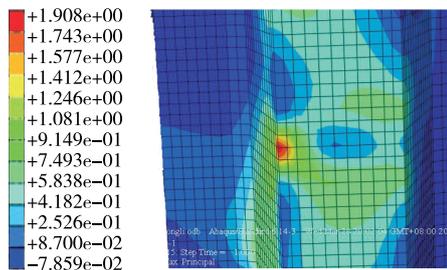


图 11 钢桁架横隔梁加固后箱梁底板应力云图(单位:MPa)

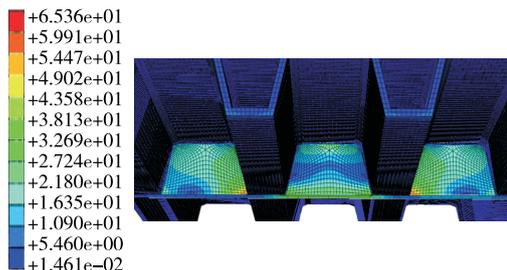


图 12 钢板横隔梁加固后钢横梁应力云图(单位:MPa)

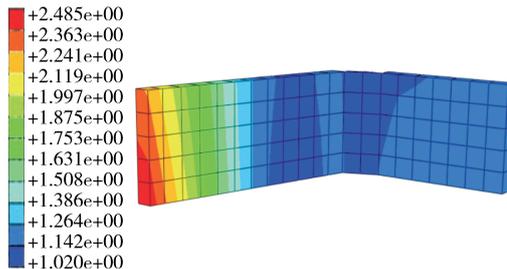


图 13 钢板横隔梁加固后组合箱梁应力云图(单位:MPa)

板应力较均匀，在 1.0 MPa 以内，倒角处局部集中应力为 1.9 MPa，满足规范要求。

由图 12、图 13 可知：增设钢板横隔梁加固后，横隔板整体应力为 3.0~29.0 MPa，局部与内腹板、通长横梁交接处应力集中，为 55.0 MPa，满足规范要求；主梁与横隔梁接触位置混凝土应力大部分为 0.9~2.0 MPa，应力集中处为 2.5 MPa，与加固后钢板附近梁体开裂现象基本吻合。

## 4 方案比选及加固效果评价

两种加固方案的比较见表 4。经过综合比较，方案一在施工难度、对原结构的影响、施工工期和经济性方面优于方案二，方案二在加固效果方面略优于方案一。

为验证加固效果，在跨中截面布置混凝土应变、钢应变及动位移等传感器，测试梁体混凝土动应力、加固钢桁架及钢板动应力、梁体动位移，对加固效果进行跟踪监测。监测结果如下：

(1) 主梁动位移。加固后跨中动位移均有所减小，各箱梁动位移校验系数较小，为 0.4~0.7，表明

表 4 两种加固方案的比较

方案编号	加固效果	施工难度	对原结构的影响	施工工期	建安费比值
方案一	增加了桥梁横向刚度,改善了整体受力,效果较好	加固施工要求较高,难度较大	以焊接为主,植入螺栓数量较少,钢桁架自质量较小,对原结构的影响较小	较短	1.00
方案二	增加了桥梁横向刚度,改善了整体受力,效果好	加固施工要求高,难度大	植入螺栓数量较多,钢板横隔梁自质量较大,对原结构的影响较大	较长	1.48

桥梁运行状况良好,体现了两种加固措施对桥梁横向刚度的改善作用。采用方案二加固后钢板横隔梁的校验系数比方案一的略小,与理论计算结果相符。

(2) 主梁应变。加固后混凝土应变值比加固前均有所减小,且混凝土和钢板应变值变化规律相同、数值相近,说明箱梁与加固钢板黏结较好,变形协调,共同工作。

(3) 采用方案二加固的左幅第 9 联部分钢板附近出现腹板裂缝,缝宽约 0.08 mm。主要原因是原箱梁未设置横隔梁,抗扭刚度较差,增设的钢板横隔梁抗扭刚度较大,加上钢板横隔梁植入螺栓较多,对原箱梁腹板扰动较大,导致梁体开裂,与局部应力理论计算结果基本吻合<sup>[12]</sup>。因此,采用增设钢板横隔板加固时,需对箱梁底板和腹板同时进行结构补强,尤其是对于原结构腹板较薄的桥梁。

## 5 结论

(1) 早期未设置中横隔梁的混凝土组合箱梁桥,由于横向联系不足,腹板竖向裂缝及底板横向裂缝较多,可采取增设横向联系的加固方式提高桥梁横向刚度和整体性能。

(2) 跨中增设钢桁架及钢板横隔梁均能提高桥梁的横向刚度,改善跨中横向分布系数,增强梁体之间变形协调性,使各梁体之间位移更均匀,边梁与中梁应力更接近。

(3) 采用两种方案加固后跨中动位移均有所减小,各箱梁动位移校验系数较小,为 0.4~0.7。箱梁混凝土应变值比加固前有所减小,与理论计算结果一致,且混凝土和钢板应变值变化规律相同、数值接近,说明箱梁与加固钢板之间黏结性能较好,变形协调,共同工作。

(4) 采用钢板横隔梁加固后钢板横隔梁附近出现腹板次生裂缝,在进行增设钢板横隔梁加固时,需对箱梁底板和腹板同时进行结构补强,尤其是对于原结构腹板较薄的桥梁。

(5) 跨中增设钢桁架方案在施工难度、对原结构的影响、施工工期、经济性方面优于增设钢板横隔梁方案,增设钢板横隔梁方案在加固效果方面略优于增设钢桁架横隔梁方案。综合考虑,增设钢桁架横隔梁方案优于增设钢板横隔梁方案。

## 参考文献:

- [1] 安群慧,王夷.包神铁路混凝土桥梁横向刚度加固设计方案[J].桥梁建设,2009,39(增刊2):106-109.
- [2] 杨相展,易壮鹏,陈洪伟.大跨连续钢-混组合箱梁桥支座顶部区域抗裂方法研究[J].公路与汽运,2022(5):108-110+125.
- [3] 马林.铁路常用跨度混凝土简支 T 梁横向加固方法的研究[J].铁道标准设计,2008,52(1):43-47.
- [4] 段继祖.增设横梁法加固钢筋混凝土连续箱梁方案研究[J].山西交通科技,2015(2):62-63+66.
- [5] 杨圣超,夏兴佳.基于梁格法的预制箱梁横向刚度模拟研究[J].世界桥梁,2016,44(2):73-76.
- [6] 聂建国,朱力,樊健生,等.钢-混凝土组合箱梁桥杆系模型的理论及计算[J].中国公路学报,2014,27(7):32-44.
- [7] 金花,王海良,王新敏.板梁桥横向加固的数值分析[J].国防交通工程与技术,2008,6(6):31-35.
- [8] 杨永清,严猛,李晓斌,等.聚合物改性混凝土加固空心板桥荷载横向分布理论及试验研究[J].桥梁建设,2014,44(6):63-68.
- [9] 钱寅泉,周正茂,王素娟,等.装配式小箱梁桥荷载横向分布数值分析与试验[J].公路交通科技,2012,29(1):86-90.
- [10] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [11] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路桥梁加固设计规范:JTG/T J22—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [12] 孙同非,杨则英.基于 SMA 筋加固的 RC 梁最优预应力水平研究[J].公路与汽运,2023(3):111-117.