

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.02.016

# 小半径曲线箱梁非对称增大截面加固分析与试验研究

肖金军<sup>1</sup>, 李传习<sup>2</sup>

(1.佛山路桥建设有限公司, 广东 佛山 528002; 2.长沙理工大学 省部共建桥梁工程安全控制教育部重点实验室)

**摘要:** 曲线箱梁桥最主要的受力特点是弯扭耦合作用,其病害特征和加固方法存在显著的特殊性。该文基于曲线梁桥的3个基本方程,对其力学性能和受力特征进行理论分析,采用有限元软件对某曲线箱梁桥进行计算,分析导致该箱梁腹板开裂、内侧支座脱空、外侧支座偏压严重等病害产生的成因,并对加固后的曲梁桥进行试验测试。结果表明:采用非对称增大截面加固方法,增加两侧腹板厚度等加固措施,能显著提高结构的抗剪扭承载能力,结构受力趋于合理。由于加固箱梁新旧混凝土间存在应力叠加和界面滑移,导致增大截面应变小于原箱梁应变,应力有所滞后。桥梁荷载试验表明该加固措施效果良好。

**关键词:** 曲线箱梁; 弯扭耦合; 加固; 荷载试验; 有限元分析

预应力混凝土连续箱梁桥是现代交通中常见的桥型,由于其线形优美,平顺流畅,能够很好地适应路线平面线形,已成为立交匝道桥的主要桥型。但连续曲线箱梁桥属于空间结构受力体系,其显著特点是弯扭耦合,箱形截面受扭转、弯曲、畸变、剪力滞效应等因素的影响,受力相当复杂。曲线箱梁桥的受力情况会随着主梁圆心角、弯扭刚度比、桥宽与曲率半径之比、支承条件和荷载形式的不同而变化。因此,曲梁桥与直梁的病害也有很大程度的区别。

近年来曲梁桥的典型病害有:主梁侧向移动、内侧支座脱空、主梁侧倾失稳、外侧支座剪切变形、中墩附

近箱梁竖向开裂等。曲梁桥的病害加固近年来成为研究热点之一,其主要方法有:① 优化结构受力法。主要通过设置多个转向块,采用体外预应力改变曲线梁的内力情况,提高其抗弯承载能力,抑制裂缝的发展和梁的变形;② 钢板/碳纤维加固法。采用碳纤维复合材料或钢板对曲梁的抗弯、抗剪承载力进行粘贴加固,提高结构的承载力和刚度;③ 增大截面加固法。采用钢筋混凝土增大截面加固梁的抗弯、抗剪承载力,改变纵梁的应力水平;第③种方法施工工艺简单,造价较低,但是加固后结构的自重增加较大,且未能考虑新老混凝土界面对抗剪加固效果的影响。

\*\*\*\*\*

[8] 刘荣,刘玉擎.混合梁结合部连接件受力分析[C].中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十一次学术会议暨钢-混凝土组合结构的新进展交流会,2007.

[9] 周阳,蒲黔辉,施洲,刘振标.混合梁斜拉桥钢-混结合段剪力连接件群力学性能研究[J].铁道学报,2017(10).

[10] 赵建,郑舟军.大跨度钢-混组合桥梁剪力群钉受力分析研究[J].桥梁建设,2013(3).

[11] 赵晨,刘玉擎.开孔板连接件抗剪承载力试验研究[J].工程力学,2012(12).

[12] 朱伟庆,崔越,刘永健,等.开孔板连接件受剪承载力研究[J].建筑结构学报,2017(7).

[13] 沈强南,邵吉林,徐锦,等.三跨钢-混混合连续梁桥结合段传力性能研究[J].桥梁建设,2012(3).

[14] 何伟兵,刘玉擎,汪蕊蕊.九江长江公路大桥混合梁结合段构造分析[J].桥梁建设,2012(1).

[15] 邹韵,黄侨,汪炳.PBL连接件静力和疲劳性能研究综述[J].中外公路,2016(4).

[16] 童智洋,郑舟军,彭旭民.推出试件中剪力钉剪切刚度实测与计算方法[J].钢结构,2011(1).

[17] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2005.

[18] JTG/T D64-01-2015 公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].

收稿日期:2018-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51308070,51708047);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2015CB057701,2015CB057702)

作者简介:肖金军,男,高级工程师.E-mail:3537097264@qq.com

该文针对小半径曲线箱梁,研究采用钢筋混凝土进行非对称增大截面加固的方法,以合理优化曲线梁的受力性能,提高结构的抗剪、扭承载力;并开展荷载试验进行验证分析。

## 1 曲线箱梁桥的力学特性

### 1.1 基本方程

曲线梁常采用沿曲线向心方向为  $x$  轴,垂直曲线平面向下为  $y$  轴,剪切中心轴的切线方向为  $z$  轴组成的三维直角坐标系。

为研究曲线梁的一般特性,在曲线梁上截取微段进行分析。曲线梁沿坐标轴方向的分布荷载  $q_x$ 、 $q_y$ 、 $q_z$  与绕坐标轴作用的分布力矩  $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m_z$  共 6 种作用荷载。截面上存在轴力、剪力、弯矩及扭矩等截面内力,如图 1 所示。

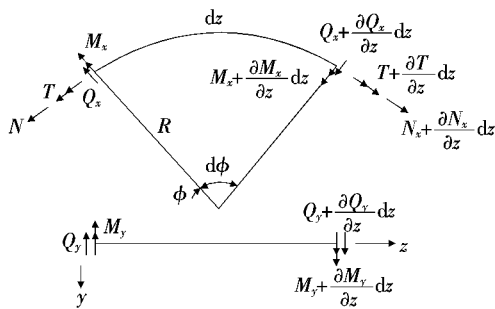


图 1 弯梁桥截面内力图

利用曲线梁桥的平衡条件,推导出 6 个曲线梁的静力平衡方程,将上述平衡方程消除轴向力和剪力项后,联立弹性材料的基本方程与曲线梁的几何方程并简化,可得到描述外荷载、位移与扭转角关系的方程:

$$EI_y(u^{(5)} + \frac{2}{R^2}u''' + \frac{1}{R^4}u') = \frac{\partial q_x}{\partial z} - \frac{q_x}{R} - \frac{\partial^2 m_y}{\partial z^2} - \frac{m_y}{R^2} \quad (1)$$

$$EI_w v^{(4)} - \frac{EI_x + GI_d}{R} v'' + EI_w \varphi^{(4)} - GI_d \varphi'' + \frac{EI_x}{R^2} \cdot \varphi = m_z \quad (2)$$

$$(EI_x + \frac{EI_w}{R^2})v^{(4)} - \frac{GI_d}{R^2}v'' + \frac{EI_w}{R}\varphi^{(4)} - \frac{EI_x + GI_d}{R} \cdot \varphi'' = q_y + \frac{\partial m_x}{\partial z} \quad (3)$$

从上述方程及其相关的几何方程与平衡方程可以看出:曲线梁桥垂直于曲线梁平面的内力( $Q_y$ 、 $M_x$ 、 $T$ )、变形( $v$ 、 $\varphi$ )、荷载( $q_y$ 、 $m_x$ 、 $m_z$ )与平面内的内力( $N$ 、 $Q_x$ 、 $M_y$ )、变形( $u$ 、 $w$ )、荷载( $q_x$ 、 $q_z$ 、 $m_y$ )、相关性

为 0,因此一般可将荷载分成两大类,即平面内荷载与垂直于水平面的荷载,分别分析计算。

### 1.2 曲线梁桥特性

式(2)和式(3)两个方程非独立,均为  $v(z)$ 、 $\varphi(z)$  两个位移量与外荷载的关系,必须联立求解,充分反映曲线梁中弯扭耦合的受力效应:① 曲线梁桥主要的受力特点是弯—扭耦合作用;② 曲线梁桥扭转使外侧梁超载,内侧梁卸载。支点反力通常为外侧大,内侧小,内侧甚至产生负反力。应防止外侧梁支座超载;③ 曲线梁桥受力特性的影响因素有弯扭刚度比、主梁圆心角、曲率半径之比与桥宽等。曲线梁桥在满足抗弯刚度要求的前提下,为使弯扭刚度比减小应尽量增大抗扭刚度。

## 2 工程概况

### 2.1 桥梁原设计

某匝道桥原设计跨径为  $7 \times (2 \times 20 \text{ m})$  预应力混凝土连续箱梁,桥面净宽 8.25 m。上部结构采用单箱单室箱形截面,箱梁高 1.4 m,中间段箱室宽 4.0 m,两侧悬挑翼缘板宽各为 2.0 m,悬臂端部厚 15 cm,根部厚 45 cm;箱梁顶板厚 20 cm,底板厚 20 cm,直腹板厚 40 cm,箱梁采用 C50 混凝土。下部结构采用独柱式桥墩,墩柱直径 120 cm,桥台采用桩柱式桥台,中间墩墩梁固结,非连续墩设两个双向滑动支座,支座间距仅为 1 m。桩基采用钻孔灌注桩基础,均为嵌岩桩,桩径均为 150 cm。该匝道桥曲线半径很小,仅为 60 m,具体如图 2 所示。

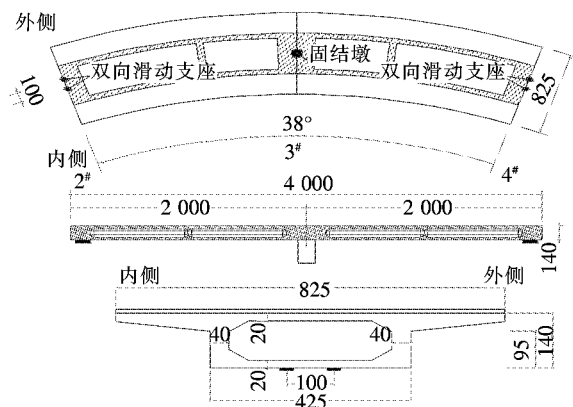


图 2 匝道曲线箱梁构造(单位:cm)

### 2.2 桥梁病害情况

该曲线箱梁桥上部结构在完成混凝土浇筑、预应力张拉后,出现如下病害:

(1) 固结墩北侧均存在较严重的水平环形裂缝,最严重的水平环形裂缝达12条,长为 $(0.4\sim 0.5)\pi R$ ,平均间距高差24~36 cm,部分裂缝宽达0.28 mm。

(2) 在预应力钢束张拉完成后,箱梁发生两端水平偏移和扭转,偏移35~55 mm,北侧支座脱空变形18~21 mm,支座偏压严重。

(3) 箱梁腹板南北两侧存在细微的竖向裂缝,缝长为一半腹板高度,缝宽约0.06 mm,顺桥向裂缝水平距离4~6 m。

### 2.3 病害成因分析

根据以上病害情况并结合理论计算分析,总结出该桥原有结构存在以下主要问题:

(1) 结构抗扭、剪承载力不足。腹板抗扭、剪配筋偏少,且箱梁支点附近腹板厚度仅为40 cm。

(2) 连续墩采用单点支撑,联端支座横向间距为1 m,尺寸偏小。导致联端内侧支座脱空,外侧支座偏压。

(3) 中间固结墩高度较小,刚度较大,承担了较大的抵抗扭矩,导致固结墩内侧开裂。

(4) 箱梁预应力索在几何上都设置竖弯和平弯的双曲率索,索两端施加预应力后,对箱梁产生两个分力即径向力和竖向力。径向分力相对于扭转中心产生非均匀分布的扭矩,竖向分力相对于桥梁中轴线产生局部扭矩,导致该结构两端水平外移,内侧支座脱空。

## 3 加固设计分析

### 3.1 加固计算参数和设计要点

采用实体模型和梁格法对该匝道桥进行建模分析,计算模型如图3所示。计算荷载包括结构自重、预应力、混凝土收缩徐变、支座位移、汽车荷载等,荷载组合按JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》规定进行组合。

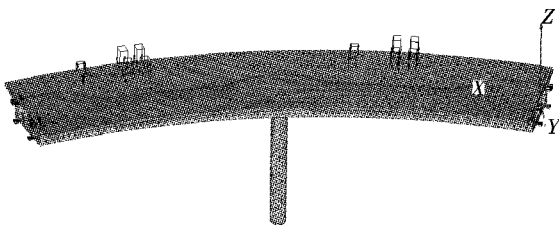


图3 桥梁计算分析模型

针对该匝道桥的病害成因分析,箱梁结构加固采用对箱梁腹板增加厚度,即箱梁内外弧侧腹板分别增厚25、15 cm。增大联端支座横向间距至3 m,连续处桥墩仍采用固结墩形式,具体如图4所示。

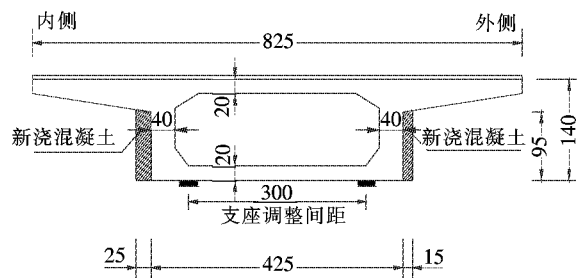


图4 桥梁加固设计示意(单位:cm)

### 3.2 加固验算

#### 3.2.1 抗弯承载力验算

箱梁主要控制截面抗弯承载能力验算情况如表1所示,通过增加箱梁两侧腹板厚度,箱梁抗弯承载能力得到了提高,并有较大的富余,可见箱梁的弯曲变形并非导致该结构开裂、支座脱空的主要原因。

表1 加固前后箱梁抗弯承载能力验算

腹板位置	截面	组合效应/ (kN·m)		加固后抗 弯承载力/ (kN·m)	加固后抗 弯比值 $M_{da}/M_{ja}$
		加固前	加固后		
外侧	跨中	5 930	6 200	10 008	1.61
	中支点	-6 760	-7 110	-10 147	1.43
内侧	跨中	6 130	6 430	10 008	1.56
	中支点	-6 450	-6 760	-10 147	1.50

#### 3.2.2 抗剪扭承载力验算

采用实体模型和梁格法分别计算箱梁主要控制截面内、外侧的剪力以及相应截面的扭矩。箱梁控制截面的剪力与扭矩及抗剪扭承载力验算情况见表2。

由表2可知:

(1) 加固前箱梁两端支点的抗剪承载力不满足设计要求。其中,边支点和中支点截面外侧的剪力分别为4 010 kN和4 500 kN,大于抗剪承载力3 298 kN。抗剪比值分别仅为0.82和0.73。另外,内侧的剪力分别为1 539 kN和2 846 kN,小于抗剪承载力,且远小于外侧的剪力值。说明箱梁内、外侧腹板配置同样抗剪钢筋和腹板厚度不利于适应曲线梁桥的受力特点。

(2) 加固前,外侧抗剪承载力不足,内侧则满足抗剪承载力验算要求。现场检测箱梁裂缝分布在曲线梁桥外侧的腹板位置,裂缝的形状和位置与分析结果相符。

(3) 由于曲线梁的偏心荷载作用,加固前中支点的扭矩大于抗扭承载力,抗扭比值为0.92。说明抗扭承载力不足,增加了扭转剪应力导致混凝土开裂的概率。

表 2 加固前后箱梁抗剪扭承载力验算

位置	加固前						加固后						
	扭矩 $T_b$ / (kN · m)	剪力 $V_b$ / kN	抗扭承 载力 $T_{db}$ / (kN · m)	抗剪承 载力 $V_{db}$ / kN	抗扭比 值 $T_{db}$ / $T_b$	抗剪比 值 $V_{da}$ / $V_a$	扭矩 $T_a$ / (kN · m)	剪力 $V_a$ / kN	抗扭承 载力 $T_{da}$ / (kN · m)	抗剪承 载力 $V_{da}$ / kN	抗扭比 值 $T_{da}$ / $T_a$	抗剪比 值 $V_{da}$ / $V_a$	
边支点	外侧	2 320	4 010	3 083	3 298	1.33	0.82	3 190	3 800	4 090	5 341	1.28	1.41
	内侧	2 320	1 539	3 083	3 298	1.33	2.14	3 190	2 648	4 090	4 168	1.28	1.57
中支点	外侧	3 340	4 500	3 083	3 298	0.92	0.73	3 610	4 680	4 090	5 341	1.13	1.14
	内侧	3 340	2 846	3 083	3 298	0.92	1.16	3 610	3 216	4 090	4 168	1.13	1.30

(4) 通过增加箱梁两侧腹板厚度和增大支座间距,箱梁的抗剪、扭承载力得到了提高并满足设计要求,可见箱梁的剪切、扭转变形是导致该结构开裂、支座脱空的主要原因。

(5) 通过非对称增大截面的加固方式,合理地优化了曲线箱梁桥的抗剪和抗扭承载力,尽量避免过多增加结构的自重。使结构受力趋于合理,自重分配符合曲梁桥的力学特点。

3.2.3 支座反力验算

箱梁加固前后支座反力情况如表 3 所示。

表 3 加固前后支座反力对比

工况	反力/kN	
	加固前	加固后
外侧支座	3 741	1 725
内侧支座	-1 905	1 331
固结墩	4 972	4 913

由表 3 可知:加固前箱梁端部外侧支座偏压严重,内侧支座出现负反力,这与内侧支座脱空实际情况相符。通过增大两端支座间距,箱梁内外侧支座的反力趋于平衡,且均为正反力,说明该加固措施能很好地调整支座反力,有效控制箱梁内侧支座脱空和倾覆。

4 荷载试验

4.1 试验现场布置

为了检验该匝道桥加固后是否满足正常使用要求,对该匝道桥进行了桥梁荷载试验。具体检测控制截面为边跨 0.4L 处最大正弯矩截面,加载方式采用弯矩等效原则,选用 4 台约 380 kN 加载车辆,分 4 级进行偏载方式加载,最大级荷载效率为 0.966,具体如图 5 所示。

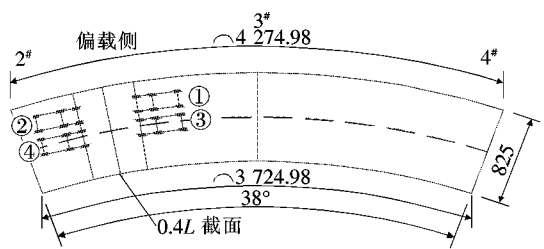


图 5 荷载试验加载图示(长度单位:cm)

应变测点布置在边跨 0.4L 处,沿箱梁两侧腹板高度、底板和新旧混凝土交接处分别布置 15 个应变计;挠度测点沿桥长方向,分别在箱梁顶板内、外两侧布置 18 个水准测点,具体如图 6 所示。

4.2 实测应变分析

实测应变与理论应变对比见图 7。

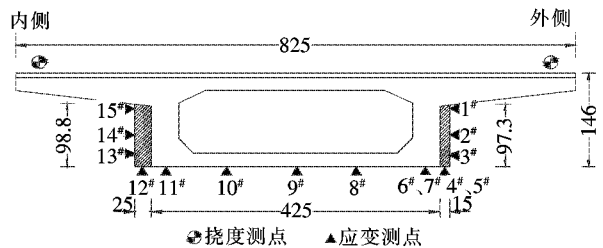


图 6 应变、挠度测点布置图(长度单位:cm)

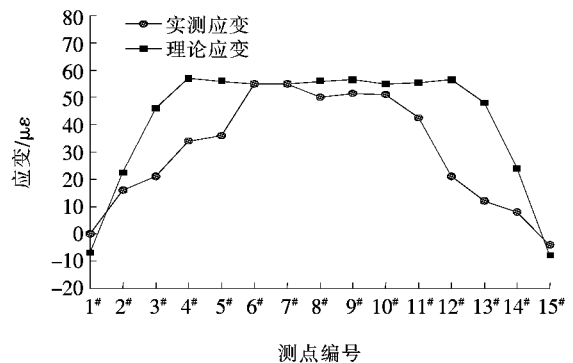


图 7 实测应变与理论应变对比图

由图7可以看出:①原箱梁底板实测应变(6#~11#测点)与理论计算应变曲线的变化趋势基本一致,实测应变小于理论值,且截面应变分布较为平缓,满足JTG/TJ 21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》要求;②由于箱梁采用加厚腹板的方式进行加固处理,新旧混凝土之间存在一定的界面,该界面两侧的应变(4#~7#、11#~12#测点)存在一定的差异,即新加固结构应变小于原箱梁结构应变,应力有所滞后。新老混凝土对结构腹板应力的最大影响达到33.6%。但通过应变的变化趋势和卸载的残余变形情况分析,该新旧混凝土结合情况较好,箱梁处于良好的弹性工作状态。

### 4.3 实测挠度分析

实测挠度与理论挠度对比如图8所示。

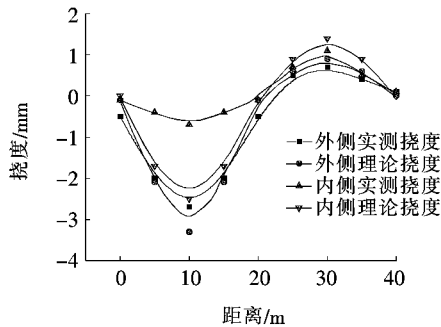


图8 实测挠度与理论挠度对比图

由图8可以看出:在外侧偏载最不利的情况下,箱梁内外两侧实测挠度均小于理论计算值,且实测值的曲线的变化趋势与理论计算值一致,结构刚度满足规范要求。加载桥跨向下挠度(下翘)外侧大于内侧,非加载桥跨向上挠度(上翘)内侧大于外侧,说明该箱梁发生了扭转变形。在最不利受力状况下,该箱梁内侧支座未见脱空、外侧支座压缩变形正常,支点附近应力未见明显异常,说明加固后的箱梁结构能够满足抗剪扭和抗倾覆要求。

## 5 结论

(1)曲线箱梁桥最主要的受力特点是弯-扭耦合作用,当曲率半径变小,桥宽度增大时,这一趋势更明显。弯扭耦合作用的存在,使得曲线箱梁产生剪扭破

坏,内侧支座脱空,外侧支座偏压严重等病害。

(2)曲线箱梁桥受力特性的主要影响因素有弯扭刚度比、主梁圆心角、曲率半径之比与桥宽等。在满足抗弯刚度要求的前提下,为使弯扭刚度比减小,应尽量增大抗扭刚度。

(3)通过非对称增加曲线箱梁两侧腹板厚度和增大支座间距,结构的抗剪扭和抗倾覆承载能力能够得到很好的提高。结构受力趋于合理,自重分配符合曲线梁桥的力学特点。

(4)由于加固箱梁新旧混凝土间存在一定的界面,导致新加固结构应变小于原箱梁结构应变,应力有所滞后。考虑此滞后影响的加固曲线梁具有良好的力学性能。

### 参考文献:

- [1] 李华,武兰河.单根曲线梁法计算连续曲线梁桥影响线[J].工程力学,2005(S1).
- [2] 邢世玲,叶见曙,余波.曲线梁桥振型主方向判定方法研究[J].公路交通科技,2010(2).
- [3] 王福敏.钢筋混凝土曲线梁结构配筋设计方法研究[J].中国公路学报,1997(2).
- [4] 王浩之,谭威,夏桂云.考虑剪切变形影响的单跨曲线梁受力分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2016(2).
- [5] 徐文平,钟金周.某独柱支承连续曲梁桥侧向滑移事故处理[J].公路交通科技,2005(3).
- [6] 王彤,王天阔,顾威.体外预应力加固曲线梁试验[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2016(6).
- [7] 高岩,柯在田.泥岗立交桥病害原因分析、加固及效果评定[J].中国铁道科学,2003(6).
- [8] 关天发,袁鸿.CFRP加固钢筋混凝土曲梁的抗弯性能试验研究[J].中山大学学报:自然科学版,2008(S2).
- [9] 黄志坚,曹传林.某预应力混凝土曲线箱梁桥的病害及加固[J].桥梁建设,2006(S1).
- [10] 沈华.增大截面加固梁的正截面抗弯性能试验[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013(12).
- [11] 杨党旗.华强立交A匝道独柱曲线梁桥病害分析及加固[J].桥梁建设,2003(2).
- [12] 刘三会.基于温度效应的小半径曲线箱梁支座布置[J].中外公路,2017(4).
- [13] 陈勇.增大截面加固简支T梁的简化配筋方法[J].中外公路,2017(4).