

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.02.010

# 钢-混组合梁负弯矩区受力分析与设计方法

刘少华

(北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京市 100055)

**摘要:** 通过整理分析了影响组合梁负弯矩区受力性能的因素,改进拉应力的技术措施及负弯矩的设计方法;并结合工程实例,验证钢混组合梁负弯矩区以状态 2 为原则的设计方法。并在设计、施工构造方面提出了措施和建议。

**关键词:** 钢混组合梁;负弯矩;桥面板;裂缝

**中图分类号:** U448.21\*6

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)02-0037-04

## 0 引言

钢-混组合梁由于能按照各组成部件所处的受力位置和特点,较大幅度地充分发挥出钢和混凝土各自材料的特性的优点<sup>[1]</sup>,现已广泛应用于简支梁桥、连续梁桥、斜拉桥等各种桥型。

然而,对连续结构的钢-混凝土组合梁中支点截面将承受负弯矩,钢筋混凝土桥面板受拉,钢梁的下翼缘板受压。从理论上讲,这样的布局,并没有很好的利用混凝土和钢材的力学特征<sup>[2,3]</sup>。截面上缘受拉区混凝土开裂将影响结构的耐久性与使用性能;下缘受压钢结构面临局部屈曲的危险,对于大跨度桥梁下缘受压区往往需要使用很厚的钢板,将引起现场焊接困难,残余应力等难题。

## 1 中支座负弯矩区受力性能分析<sup>[4]</sup>

连续组合梁中墩承受负弯矩作用,混凝土桥面板受拉,随着受拉混凝土的开裂,桥梁的刚度、裂缝宽度以及内力重分布均将有所变化。负弯矩区截面的承载力性能实际上是遵循非线性行为关系,截面实际的中性轴位置一般介于假定混凝土开裂和不开裂计算的中性轴之间。通常负弯矩截面的弯矩-曲率关系可以描述如下两个状态:

状态 1:桥面板混凝土开裂之前,可以认为是钢梁、钢筋、混凝土共同作用的线性模型;

状态 2:桥面板混凝土开裂后不计混凝土作用的线性模型。

实际上桥梁截面真实的受力行为是介于状态 1

和状态 2 之间的并随着受力情况的变化而改变的某一状态。

组合梁截面承受负弯矩时其截面内力  $M$ 、 $N$  的分配比例是随混凝土桥面板裂缝的变化而变化的,见图 1。组合梁承受的弯矩  $M$  主要是由混凝土桥面板轴力  $N_c$ 、钢梁的轴力  $N_g$  组成的力偶和钢梁的弯矩  $M_g$  承担。钢梁的弯曲刚度及钢筋混凝土桥面板和钢梁的延伸刚度决定钢梁的弯矩  $M_g$  和  $N_c \cdot y_0$  的比例分配。当荷载的增加,桥面板混凝土的应力超过其抗拉强度,混凝土板就会产生裂缝,裂缝发生的程度与钢筋混凝土桥面板的延伸刚度相关,随着裂缝的产生,混凝土桥面板的延伸刚度逐渐降低,力偶的弯矩  $N_c \cdot y_0$  减小,钢梁的弯矩  $M_g$  增加。

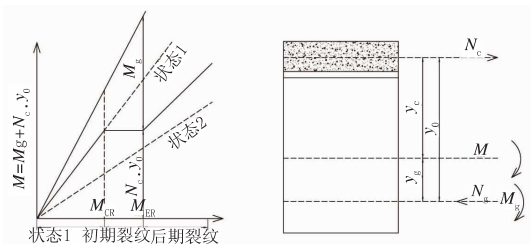


图 1 组合梁截面内力与裂缝关系

### 1.1 混凝土桥面板的拉应力

连续组合梁混凝土桥面板中的拉应力的产生于桥梁结构承受的直接荷载和间接荷载。直接荷载作用包含结构及桥面板自重、桥面板混凝土的浇筑顺序、成桥使用时的活载等;间接荷载作用包含混凝土的水化热作用、温度作用、混凝土收缩徐变等。对于桥梁结构自重、使用活载、温度作用荷载施加清晰明确,下面分析水化热作用、桥面板混凝土的浇筑顺序、收缩作用对桥面板拉应力的影响。

#### 1.1.1 水化热、收缩作用的影响

根据相关资料研究表明,见图 2。混凝土的水化

收稿日期: 2020-08-06

作者简介: 刘少华(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

反应在最初的 12~25 h 之内,混凝土的温度上升约 15℃~30℃,然后 150~180 h 是混凝土的冷却期;另外,混凝土力学性能如弹性模量,在升温 and 降温过程中是随时间变化的。当混凝土浇筑后,随着时间的发展,混凝土温度先上升后下降,混凝土弹性模量则是随着养护时间在逐步增加,当时间处在温度下降段时,混凝土桥面板和钢梁开始共同工作,混凝土的变形受到钢梁的约束作用,在混凝土桥面板中产生次内力,即降温过程中产生拉应力。同样,组合梁现浇混凝土桥面板时,混凝土的收缩受到钢筋和钢梁的约束作用而产生拉应力。

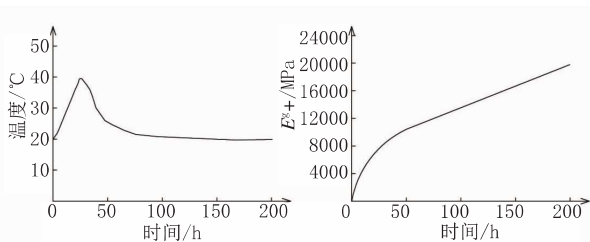


图2 水化作用时温度和弹模曲线

### 1.1.2 混凝土桥面板浇筑顺序的影响

连续钢混组合梁桥面板混凝土的浇筑顺序的不同,将很大程度上影响着中支座负弯矩区桥面板混凝土的拉应力,从施工角度来说连续顺序的浇筑混凝土是比较简便常见的施工方法。桥面板连续浇筑的施工方法虽然方便了施工,但是在浇筑中段混凝土时,会对已经浇筑过混凝土的中支座区域混凝土桥面板产生拉应力,因而增加了负弯矩去开裂的可能性。

### 1.2 改进拉应力的技术措施

针对混凝土桥面板拉应力产生的机理,减小中支座混凝土桥面板中的拉应力,目前主要的技术措施可以采用以下几种:采用低热水泥、冷却养护;调整混凝土浇注顺序;支座位移法和配置桥面板预应力钢束等。支座位移法、调整桥面板混凝土浇筑顺序方法对桥面板施加的压应力首先比较有限,其次由于混凝土收缩徐变的影响,施加的压应力效果很小;配置桥面板预应力钢束法,由于钢梁的约束作用,预应力钢束需求量大,混凝土的收缩徐变、预应力松弛的影响,需要考虑预应力损失,另外,配置预应力钢束方法预应力钢束的需求较多,紧密排列时,削弱了桥面板截面,而且产生了较大锚固集中力。

为此笔者结合工程对某 35 m+2×40 m+35 m 钢混组合梁桥进行了对比计算分析,其分析结果分别见表 1。

由表 1 的应力计算结果对比分析可见,配置预

表 1 钢混组合梁应力计算结果比较 单位:MPa

| 预应力筋型号 | 混凝土板-频遇组合 |       | 钢梁-基本组合 |      |      |
|--------|-----------|-------|---------|------|------|
|        | 支点上缘      | 跨中上缘  | 支点上缘    | 支点下缘 |      |
| 15-13  | 100%      | 0.91  | -6.11   | 165  | -247 |
|        | 25%损失     | 1.35  | -5.44   | 167  | -236 |
| 15-17  | 100%      | -0.13 | -7.61   | 160  | -273 |
|        | 25%损失     | 0.44  | -6.75   | 163  | -258 |
| 15-21  | 100%      | -1.16 | -9.08   | 156  | -299 |
|        | 25%损失     | -0.45 | -8.02   | 159  | -281 |

注:表中应力数值正号表示为拉应力,负号表示压应力。

应力钢束对钢混组合梁中支座负弯矩区混凝土桥面板产生压应力时,预应力钢束需求大;不考虑钢束预应力损失时,钢梁底板需进行加强设计,如增加底板厚度或浇筑混凝土形成双层组合截面;考虑钢束预应力损失时,需加大预应力钢束型号方能使桥面板满足 A 类或全预应力构件设计要求。

## 2 中支座负弯矩设计方法

连续钢-混凝土组合梁的负弯矩区受力特点看,中支座负弯矩区的设计将是连续组合梁桥设计的关键技术。

### 2.1 受拉区混凝土桥面板的设计

钢混组合梁中支座负弯矩区的主要问题是混凝土桥面板的设计,对于钢-混组合梁中混凝土的开裂问题,总体来说存在两种设计原则,一是预防混凝土开裂;另一种则是允许桥面板混凝土出现裂缝,但要限制其宽度<sup>[4]</sup>。早期的连续组合梁桥,预防桥面板开裂通常采用的设计是中支座顶升、调整桥面板混凝土浇筑顺序及配置预应力钢束等方法,以使混凝土桥面板在成桥使用荷载作用下不出现拉应力(接近状态 1)或出现有限的拉应力(接近状态 2)。

改进负弯矩区拉应力,往往是以上多种方法综合运用,近些年来随着对混凝土桥面板损伤、破坏机理等认识水平的提高以及混凝土开裂对桥梁力学性能与耐久性影响等方面研究的深入,逐渐采取取消支点负弯矩区混凝土桥面板纵向预应力,增加普通钢筋控制裂缝宽度的做法。设计方法由早期的不允许出现拉应力或限制拉应力不允许开裂,转变为允许开裂,限制裂缝的设计方法。

### 2.2 受压区钢梁的设计

中支座负弯矩受压区钢梁承受压力,通过不断的设计实践,利用混凝土良好的承压性能,在负弯矩区下缘加设一层钢筋混凝土板,形成双层组合截面,

从而改善结构的力学性能,减少钢材用量并能有效控制造价,这一设计方法已成为大跨度连续组合梁常用方法。

### 3 工程实例

前面主要介绍了钢混组合梁负弯矩区的受力性能及负弯矩区的设计方法。下面结合古城南街匝道桥进行有限元分析,总结钢混组合梁负弯矩区以状态2为设计原则的受力性能,验证其设计方法的方便性、可行性、有效性。

#### 3.1 项目概况

古城南街匝道桥上部结构为42.5 m+76 m+48.5 m钢-混凝土组合连续梁。单幅桥梁断面横向由2室钢箱梁组成,桥面宽10 m。组合梁截面为多箱单室截面,主梁为变截面,支点梁高为3.8 m,跨中梁高为2.2 m。钢箱梁底板钢板厚20~30 mm,腹板钢板厚18 mm,上翼缘板25~40 mm,钢材均采用Q345qD钢,顶部混凝土桥面板厚35 cm,采用C50补偿收缩混凝土现浇,桥面板纵筋的配置为 $\phi 20@150$  mm,负弯矩开裂范围采用 $\phi 20@150$  mm两根并置。横断面见图3。

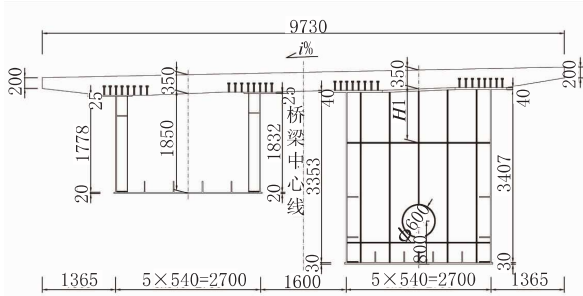


图3 组合梁横断面(单位:mm)

#### 3.2 有限元计算

##### 3.2.1 设计计算方法

根据前文所述,组合梁的作用效应按线性弹性方法进行计算,考虑施工方法、施工顺序、收缩徐变等因素的影响。本钢-混组合梁负弯矩采用桥面板混凝土开裂后不计混凝土作用的状态2简化线形模型进行计算分析,计算参数按《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01-2015)取用,负弯矩区采用开裂分析方法,中支座两侧各0.15L(L为梁的跨度)范围内组合梁截面刚度取开裂截面刚度 $EI_{cr}$ ,其余区段组合梁截面刚度取未开裂截面刚度 $EI_{un}$ [5]。

##### 3.2.2 计算模型

采用专用桥梁设计分析程序桥梁博士V4.1对进行结构计算分析,采用程序支持的负弯矩区开裂范围的指定,开裂范围内截面特性自动计入有效宽

度内纵筋作用,不考虑受拉区混凝土对刚度影响的功能实现状态2设计计算分析。计算模型见图4。

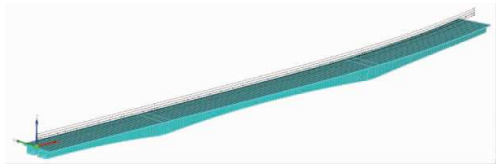


图4 有限元计算模型

##### 3.2.3 计算步骤

本桥按施工步骤进行模拟分析:(1)吊装钢箱梁制作段,并在临时墩拼接;(2)浇注跨中正弯矩区桥面板混凝土;(3)正弯矩区形成组合截面1;(4)拆除临时墩支架,浇筑中支座负弯矩区桥面板混凝土;(5)负弯矩区形成组合截面2;(6)桥面二期恒载施工;(7)成桥使用。

#### 3.3 计算结果与分析

##### 3.3.1 组合梁承载力分析

钢混组合梁在基本组合作用下,钢筋混凝土桥面板、钢箱梁承受最不利荷载。其抗弯承载力见表2。

表2 钢混组合梁承载力 单位:MPa

| 类型  | 位置   | 混凝土桥面板 | 钢箱梁   |        |
|-----|------|--------|-------|--------|
|     |      |        | 跨中    | 支座抗弯   |
| 承载力 | 上缘应力 | 14.22  | 157.4 | -202.7 |
|     | 下缘应力 | 5.87   | -196  | 214.03 |

由表2可知,在基本组合作用下混凝土桥面板上缘最大压应力 $14.22 \text{ MPa} < f_{cd} = 22.4 \text{ MPa}$ ,满足要求。基本组合作用下钢箱梁上下缘应力均满足规范要求。

受弯钢混组合梁竖向抗剪承载力按偏保守的计算方法全部由钢梁的腹板承受,钢混组合梁在基本组合作用下,钢混组合梁最大竖向剪力设计力为13 086 kN,最大竖向抗剪承载力37 654 kN,承载力满足要求。

基本组合作用下,钢混组合梁承受弯矩、剪力共同作用腹板的折算应力见图5,腹板最大折算应力 $234 \text{ MPa} < 1.1f_d = 297 \text{ MPa}$ 。



图5 钢梁腹板折算应力(单位:MPa)

##### 3.3.2 混凝土桥面板裂缝分析

相关资料表明,连续组合梁负弯矩区混凝土桥面板工作性能接近于混凝土轴心受拉构件,负弯矩

开裂区域,采用开裂截面惯性矩计算得到组合梁混凝土板纵向钢筋平均应力,按钢筋混凝土轴心受拉构件计算负弯矩区组合梁桥面板的最大裂缝宽度。图6为钢混组合梁桥面板在频遇组合作用下裂缝最大宽度0.175 mm,满足要求。

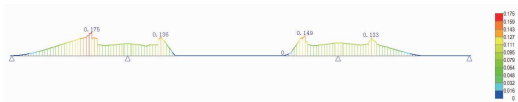


图6 混凝土桥面板裂缝(单位:mm)

### 3.3.3 结构刚度分析

连续钢混组合梁采用开裂分析方法时,负弯矩区混凝土板开裂后退出工作,中支座0.15L范围内截面刚度取开裂截面刚度。图7为组合梁在正常使用极限状态下的挠度 $f=45.3$  mm,满足要求。

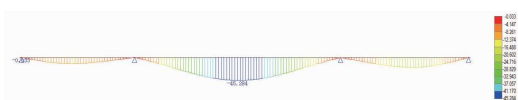


图7 汽车活载作用挠度(单位:mm)

## 4 结语

连续组合梁负弯矩区的设计,从过去预防混凝土桥面板开裂的设计方法,发展了允许混凝土桥面板开裂、限制其裂缝宽度在可接受范围的设计方法,并逐步成为组合梁桥应用较多的方法。本文整理分析了影响组合梁负弯矩区受力性能的因素,改进拉

应力的技术措施及负弯矩的设计方法;并结合工程实例,验证钢混组合梁负弯矩区以状态2为原则的设计方法。归纳总结得出以下主要结论和建议:

(1)负弯矩以状态2为设计原则,取消预应力允许桥面板开裂,限制其裂缝宽度的设计方法简化了构造,方便了施工,设计方法有效、经济、可行。

(2)负弯矩区桥面板拉应力受水化热、收缩徐变、桥面板混凝土浇筑顺序的影响很大,工程设计时应充分考虑。

(3)连续组合梁负弯矩区桥面板裂缝的控制,可以通过提高支点区域桥面板纵向钢筋的配筋率、握裹面积比等构造措施、合理的施工顺序进行有效控制,同时加强负弯矩区桥面板的防水设计;钢梁上翼缘根据计算分析结果在满足宽厚比的前提下增加其厚度和宽度,钢梁下缘视跨径与计算结果设置双层组合截面。

### 参考文献:

- [1] 刘少华.钢-混凝土组合梁桥预应力设计分析[J].市政技术,2010,28(5):45-47.
- [2] 黄侨.桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [4] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [5] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)