

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.05.027

# 大跨连续钢—混组合箱梁桥支座顶部区域 抗裂方法研究\*

杨相展<sup>1</sup>, 易壮鹏<sup>2</sup>, 陈洪伟<sup>1</sup>

(1.创辉达设计股份有限公司, 湖南 长沙 410004; 2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 钢—混组合截面连续梁中支座顶部混凝土桥面板受拉, 混凝土很易开裂退出工作。文中在综合已有钢—混连续梁支座顶部区域抗裂方法的基础上, 以某 70 m+120 m+70 m 连续钢—混组合箱梁桥为背景, 对支座顶升+负弯矩区张拉预应力、抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉预应力 2 种负弯矩区抗裂方案的优劣进行对比分析。结果表明, 采用抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉预应力方案, 成桥阶段混凝土桥面板有较大压应力储备, 可提高支座顶部区域混凝土板的抗裂性能。

**关键词:** 桥梁; 钢—混组合连续箱梁; 支座顶部区域; 抗裂方法

**中图分类号:** U445.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)05-0108-03

钢—混组合结构桥梁能充分发挥钢材与混凝土材料的各自优势, 具有节省材料、施工方便、梁体较轻等优点, 特别是跨越既有高速公路和城市干道, 能极大减少对通行车辆的干扰, 且施工周期短。与简支组合梁桥不同, 连续钢—混组合梁桥支点附近的负弯矩区由于顶部混凝土桥面板受拉、下缘钢梁承压, 受力不利, 是钢—混组合箱梁桥向大跨径发展需解决的一个关键技术问题。目前这类桥梁最大经济适用跨径为 120 m, 现行规范也只用于单跨跨径不大于 120 m 的梁式钢—混组合梁桥设计。鉴于此, 该文对某 70 m+120 m+70 m 变截面连续钢—混组合箱梁桥支座顶部区域抗裂方法进行研究, 在综合已有方法的基础上, 结合工程实际对支座顶升+负弯矩区张拉预应力、抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉预应力 2 种负弯矩区抗裂方案的优劣进行对比分析, 为同类桥梁负弯矩区抗裂处理及该类桥梁适用跨径的进一步增大提供参考。

## 1 负弯矩区抗裂方法

(1) 预加荷载法。钢梁施工完成后, 在正弯矩区浇筑混凝土、施加一定临时荷载, 使支点附近钢梁负弯矩区产生足够的预应力。该方法对中小跨径组合连续梁桥较有效, 对于大跨径组合连续梁桥, 由于所需施加的配重太大, 不方便施工。根据张先蓉等

的研究, 6×90 m 钢—混组合连续箱梁采用该方法, 运营阶段支点负弯矩区桥面仍存在 5~6 MPa 拉应力。因此, 该方法不适用于大跨结构。

(2) 支座预顶升法。在浇筑混凝土前, 将跨内支座顶升至一定高度, 使支座区域钢梁承受一定负弯矩, 然后浇筑桥面板, 待混凝土达到一定强度后, 下降中间支座至设计高度, 使支座顶部区域桥面板受压, 从而使该区域混凝土产生预压力。

(3) 负弯矩区张拉预应力法。通过在连续组合梁负弯矩区张拉纵向预应力, 对受拉区混凝土桥面板施加预压应力, 保证受拉区混凝土桥面板的抗裂性能。

(4) 抗拔不抗剪连接技术。在负弯矩区布置新型抗拔不抗剪连接件, 这种连接件纵向抗剪刚度很弱, 可使混凝土板与钢梁上翼缘钢板之间沿纵向自由滑动, 从而有效释放混凝土板中的拉应力。

实际工程中, 以上方法往往同时采用。该文对支座顶升+负弯矩区张拉预应力、抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉预应力 2 种综合运用方案进行对比分析。

## 2 工程概况及结构模型

### 2.1 工程概况

某跨径组合为 70 m+120 m+70 m 钢—混组

\* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ2436); 湖南省教育厅科学研究项目(19A004)

合箱梁桥,桥宽 12.75 m。支点梁高 5.70 m,跨中梁高 2.90 m。横桥向为 2 个单室钢—混组合箱梁结构,钢箱采用开口截面形式,箱梁间距 3.5 m,两侧悬挑 1.125 m。钢箱梁根部梁高 5.38 m,跨中梁高 2.58 m,采用二次抛物线形式变化。开口截面钢箱梁每个腹板对应的上翼缘宽 1 000 mm,跨中区域厚 22 mm,支座区域厚 36 mm;箱梁底板厚度在距中支点 20 m 范围内为 40 mm,其他为 32 mm;钢箱梁腹板跨中区域厚 22 mm,支座区域厚 28 mm,腹板高度随梁高变化。主桥横断面见图 1、图 2。

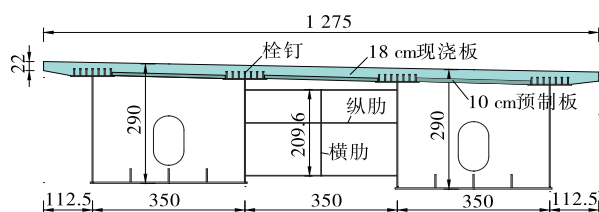


图 1 主桥跨中截面布置(单位:cm)

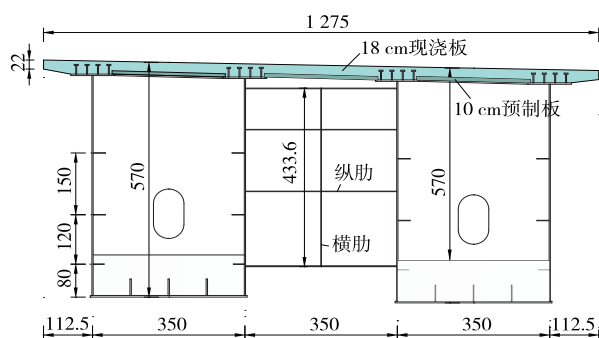


图 2 桥梁支点截面布置(单位:cm)

为提高梁端钢箱梁钢板的稳定性,在边支座 1 m 范围内灌注 400 mm 高 C50 混凝土,在中支座 4~12 m 范围内灌注 500 mm 高 C50 混凝土,中支点附近 4 m 范围内灌注 800~1 000 mm 高 C50 混凝土。

该桥共划分为 7 个施工阶段,分别为:1) 浇筑桥墩,搭设临时支撑,架设 A、B、C、D 节段和合龙段。2) 浇筑 B、C、D 节段和合龙段桥面板。3) 在 A 节段和 B、C 节段之间设置湿接缝,浇筑 A 节段桥面板。4) 待 A 节段混凝土达到设计强度后,张拉墩顶负弯矩束。5) 浇筑 A 节段和 B、C 节段之间湿接缝。6) 拆除临时支撑。7) 施工桥面系、伸缩缝等(见图 3)。

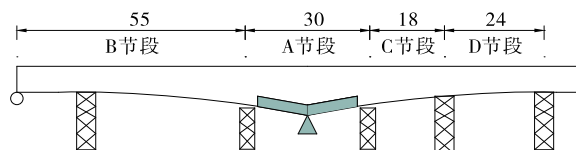


图 3 桥梁左半跨节段划分(单位:cm)

## 2.2 有限元模型

根据桥梁跨径及主梁横断面刚度计算横向分布系数,简化为单梁模型进行计算,采用 MIDAS/Civil 程序建立图 4 所示全桥有限元模型,模型共划分为 318 个单元、326 节点。



图 4 桥梁有限元模型

混凝土容重取  $26 \text{ kN/m}^3$ ,钢材容重取  $78.5 \text{ kN/m}^3$ ,桥面铺装+护栏取  $30 \text{ kN/m}$ 。汽车荷载采用公路—I 级,车道荷载横向分布调整系数取 1.38。

温度荷载包括整体温度升降和梯度温度升降。整体温度升降工况中,取最高温度  $39^\circ\text{C}$ 、最低温度  $-15^\circ\text{C}$ 、成桥温度  $15^\circ\text{C}$ 。主梁截面温差取 10 cm 厚沥青铺装,计算得  $T_1=14^\circ\text{C}$ 、 $T_2=5.5^\circ\text{C}$ ,负温差为  $T_1=-7^\circ\text{C}$ 、 $T_2=-2.75^\circ\text{C}$  ( $T_1$  为桥面板表面温度,  $T_2$  为桥面板以下 100 mm 处温度)。

## 3 负弯矩区抗裂方法对比分析

根据 GB 50917—2013《钢—混凝土组合桥梁设计规范》,承载能力极限状态下,钢箱梁和混凝土的应力按设计值控制。正常使用极限状态应力验算采用标准组合,持久状况下混凝土构件的最大压应力按  $0.5f_{ck}$  控制,钢箱梁的最大应力按  $0.75f_d$  控制 ( $f_{ck}$  为混凝土轴心抗压强度标准值,  $f_d$  为混凝土设计强度等级);短暂状况下混凝土构件的最大压应力按  $0.7f_{ck}$  控制,钢箱梁的最大应力按  $0.8f_d$  控制。同时在正常使用极限状态下混凝土桥面板的裂缝应满足 JTG/T D64—01—2015《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》的要求。

### 3.1 支座顶部区域无抗裂措施时计算结果分析

按施工工序成桥,对支座顶部区域不采取任何处理措施,成桥后关键位置应力计算结果见表 1。由表 1 可知:支座顶部区域无抗裂措施时,成桥后支

表 1 支座顶部区域无抗裂措施时

截面位置	成桥应力计算结果 MPa			
	钢箱梁应力		混凝土桥面板应力	
	上缘	下缘	上缘	下缘
中支点	102.0	-119.7	14.8	13.5
中跨跨中	-111.3	103.5	-4.9	-3.6

注:负值为压应力,正值为拉应力。下同。

座顶部区域混凝土桥面板的拉应力远大于混凝土抗拉强度设计值,必须采取方法降低混凝土拉应力。

### 3.2 负弯矩区张拉预应力时计算结果分析

按施工工序成桥,在墩顶张拉预应力,共设置15根15—11钢束,成桥后关键位置应力计算结果见表2。由表2可知:张拉负弯矩区预应力后,墩顶桥面板的拉应力大幅降低,但仍超出混凝土抗拉强度设计值。主要原因是在支点位置组合截面钢箱梁的刚度为混凝土桥面板刚度的2.8倍,大部分预应力施加在了钢箱梁上。可见,对于大跨结构,应采取综合处理措施。

表2 张拉负弯矩区预应力后成桥应力计算结果 MPa

截面位置	钢箱梁应力		混凝土桥面板应力	
	上缘	下缘	上缘	下缘
中支点	13.8	-108.9	7.9	7.5
中跨跨中	-93.3	77.2	-3.1	-2.2

### 3.3 支座顶升+负弯矩区张拉预应力方案分析

为给支座顶部区域混凝土桥面板提供一定预压力,提高混凝土板的抗裂性能,在原施工工序3浇筑A节段桥面板之前增加顶升施工工序,将中支点和中跨4个临时支撑同时顶升0.5 m,在浇筑完A节段负弯矩区混凝土桥面板后再予以回落,然后张拉负弯矩区钢束。该方案下关键位置应力计算结果见表3。

表3 支座顶升+负弯矩区张拉预应力方案下

关键位置应力 MPa

阶段	截面位置	钢箱梁应力		混凝土桥面板应力	
		上缘	下缘	上缘	下缘
成桥	中支点	79.5	-120.4	1.5	1.4
阶段	中跨跨中	-19.0	-21.5	3.5	3.3
运营	中支点	122.8	-164.4	10.3	8.5
阶段	中跨跨中	-29.9	-1.5	8.3	6.9

注:运营阶段荷载组合为标准组合。下同。

对比表3和表2,采用支座顶升+负弯矩区张拉预应力方案,支点负弯矩区的最大拉应力在成桥阶段从7.9 MPa降到1.5 MPa,支座顶升为支点桥面板提供了6 MPa预压应力,效果明显。该方案在中小跨径桥梁中比较实用。由于大跨结构使用阶段汽车荷载、温度荷载、不均匀沉降等在支点负弯矩区产生的拉应力较大,采用该方案不能满足正常使用极限状态下混凝土抗裂要求,在大跨结构中只能作为辅助方案。

### 3.4 抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉预应力方案分析

为释放支座顶部区域混凝土板的拉应力,在负弯矩区设置抗拔不抗剪锚钉。采用MIDAS/Civil程序对该方案进行模拟,正弯矩区混凝土板及钢主梁单元采用节点刚性连接形式,不考虑滑移效应;负弯矩区通过弹簧来模拟栓钉,并设置弹簧沿梁纵向的刚度为零来释放纵向约束。该方案下关键位置应力计算结果见表4。

表4 抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉

预应力方案下关键位置应力 MPa

阶段	截面位置	钢箱梁应力		混凝土桥面板应力	
		上缘	下缘	上缘	下缘
成桥	中支点	140.8	-127.1	-4.8	-5.2
阶段	中跨跨中	-120.3	105.9	-4.6	-3.1
运营	中支点	200.2	-175.4	3.5	3.1
阶段	中跨跨中	-150.7	168.5	-15.6	-9.8

由表4可知:采用抗拔不抗剪连接技术+负弯矩区张拉预应力方案,成桥阶段混凝土桥面板有较大压应力储备,正常使用极限状态下混凝土板的拉应力为3.5 MPa,可通过配置普通钢筋将裂缝控制在规范允许范围内。

正常使用极限状态下频遇组合混凝土桥面板的最大拉力为3 927 kN。负弯矩区桥面板上部配置间距100 mm的 $\phi 22$ 普通钢筋,下部配置间距100 mm的 $\phi 22$ 普通钢筋。此时,作用频遇组合引起的开裂截面纵向受拉钢筋应力 $\sigma_{ss}$ 为:

$$\sigma_{ss} = 3\,927\,000 / 47\,880 = 82 \text{ MPa} \quad (1)$$

最大裂缝宽度 $w$ 为:

$$w = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \frac{30 + d}{0.28 + 10\rho} = 0.067 \text{ mm} \leq 0.2 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 分别为钢筋表面形状系数、长期效应影响系数和与构件受力性质相关的系数; $E_s$ 为弹性模量; $d$ 为纵向受拉钢筋直径; $\rho$ 为有效配筋率。

计算结果满足JTG/T D64—01—2015《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》的要求。

## 4 结论

(1) 钢—混组合箱梁截面混凝土桥面板和钢箱梁的刚度比小,在支座顶部区域张拉预应力,桥面板所得预压力较小,对抗裂作用有限。

(下转第125页)