

钢混组合连续箱梁桥负弯矩区设计研究

马国纲, 刘彬, 童景盛, 蒲北辰, 庞伟

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州 730030)

摘 要: 为有效改善连续钢混组合箱梁桥负弯矩区受力性能,以临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目为工程案例,提出基于顶升工艺的连续钢混组合箱梁桥负弯矩区设计方法。对桥面板施工工序、支点顶升顺序、桥面板存放龄期等顶升设计参数展开研究,以期桥面板和钢梁达到良好的受力状态,并对结构线型进行了施工全过程监控。研究表明:皮尔格法可有效降低中支点桥面板拉应力,降低幅值达60%;支点顶升顺序会显著影响桥面板预压应力效果,各支点桥面板预压应力均匀是评价顶升顺序的重要技术指标;随着桥面板存放龄期的增长,其裂缝宽度明显减小。临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目的建成是基于顶升工艺的连续钢混组合箱梁桥在市政桥梁工程领域的一次成功尝试,其负弯矩区设计思路、设计参数取值可对国内钢混组合桥梁的大规模建造提供很好的借鉴意义。

关键词: 顶升工艺;连续钢混组合箱梁;负弯矩区设计;顶升设计参数

中图分类号: U448.21+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)09-0030-06

0 引言

相比混凝土梁桥,钢混组合梁桥具有轻质、高强、节能、环保、抗震性能佳与全寿命周期优异等特点^[1],钢混组合箱梁桥因其自重轻、刚度大、抗扭能力强的特点,在钢混组合梁式桥中占有重要的一席之地,尤其是在市政桥梁工程领域应用非常广泛。在钢混组合梁式桥的工程实践中,负弯矩区设计一直是其设计的难点,因为在正弯矩区域,混凝土桥面板受压、钢梁受拉,混凝土、钢材两种材料的材性优势得到充分发挥,而在负弯矩区域则恰恰相反,混凝土桥面板受拉、钢梁受压,混凝土抗拉强度低而导致桥面板开裂的问题非常突出。为有效解决钢混组合梁桥负弯矩区桥面板的抗裂问题,工程师和学者们进行了一些工程设计创新和科学研究。

工程设计方面,钢混组合箱梁桥国外的工程应用案例有:委内瑞拉圭亚那卡罗尼河结合梁桥、德国A94公路Neuötting桥、西班牙圣蒂门特奥高架桥等,其中德国A94公路Neuötting桥跨径布置为95 m+154 m+95 m=344 m,支点、跨中断面梁高分别为6.8 m、3.3 m,主梁采用槽型开口钢梁+现浇混凝土板形式,此桥的设计特点在于中支点钢梁下翼缘设置了混凝土底板,形成了双重组合结构,起到减小桥

面板裂缝的作用。国内钢混组合箱梁桥典型工程案例有上海长江大桥^[2]、港珠澳大桥^[3]、杭州九堡大桥^[4]、银川滨河黄河大桥等,其中上海长江大桥跨径布置为90 m+5×105 m+85 m=700 m,主跨达105 m,梁高为5 m,主梁采用槽型开口钢梁+预制混凝土板形式,在负弯矩区首次采用容许开裂、控制裂缝宽度的设计思路^[5,6],并通过支点升降法对桥面板施加预应力,是对组合梁桥负弯矩区设计方法的大胆尝试。

科学研究方面,Su等进行了2跨连续组合钢箱梁的负弯矩区缩尺模型试验^[7],对负弯矩区采用后结合预应力混凝土桥面板、现浇钢筋混凝土桥面板进行力学性能对比,研究结果表明:负弯矩区采用两种形式桥面板的极限承载力非常接近,但采用后结合预应力混凝土桥面板对提高开裂弯矩作用显著,其开裂弯矩是现浇钢筋混凝土桥面板的3.2倍。Xu等进行了双重组合作用下连续组合钢箱梁负弯矩区试验研究^[8],研究表明:负弯矩区采用双重组合作用后,开裂荷载明显降低、裂缝开展明显延迟,截面抗弯承载力提高达26%。彭元诚等以大宁河特大桥为工程背景^[9],为研究组合梁负弯矩区受力特性进行了焊钉和开孔板两种剪力键类型的1:2大比例模型试验研究,研究结果表明:采用不同连接件的试验梁具有相近的极限荷载,开孔板连接件有助于提高结构刚度,但焊钉连接件的延性更好。刘沐宇以港珠澳大桥组合连续箱梁为研究背景^[10],进行了2跨8.5 m的钢混组合连续

收稿日期:2023-08-08

作者简介:马国纲(1966—),男,本科,甘肃省工程勘察设计师,教授级高级工程师,从事道桥设计与咨询管理工作。

箱梁模型试验研究,试验结果表明:正常运营和150%运营荷载下,集束式剪力钉和混凝土桥面板连接良好,整个结构仍然在弹性工作阶段,表明结构强度储备较高。樊健生等研究了体外预应力对钢混连续组合梁的受力性能的试验研究^[1],研究成果表明:折线布筋的体外预应力组合梁开裂荷载增大,裂缝间距和裂缝宽度明显减小,且相同荷载下的结构刚度增大。

总的来说,以往对钢混组合箱梁桥的工程设计大多基于单箱单室的等截面大箱梁,缺乏对市政桥梁领域单箱多室钢混组合箱梁桥的工程实践,且科学研究也多着眼于采用后结合预应力混凝土桥面板的组合梁桥负弯矩区的受力性能。本文以临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目为工程背景,对单箱多室钢混组合箱梁桥负弯矩区设计展开研究,针对负弯矩区主流设计方法、顶升设计参数、顶升施工线型控制等一系列问题进行阐述,旨在为国内同类钢混组合桥梁负弯矩区设计提供参考,助推组合结构桥梁发展。

1 工程概况

临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目位于山西省临汾市,是临汾市为了保障滨河东西路畅通,最大限度的发挥其交通功能,从而引导临汾市城市建设健康发展的交通立体化改造项目。方案设计时考虑到钢混组合箱梁桥自重轻、结构高度小、抗扭刚度大及全寿命周期优异等优势,该桥上部结构最终确定采用钢混组合箱梁桥方案,桥梁总里程达2 587.5 m,其中滨河西路高架桥双向6车道设计,桥梁宽度24.0 m,第三联变截面连续梁40 m+60 m+40 m=140 m(A型梁)和第四联等截面连续梁5×35 m=175 m(B型梁)为高架桥典型桥跨布置。

三跨变截面连续梁(40 m+60 m+40 m=140 m)支点、跨中梁高分别为3.09 m、1.84 m,高跨比分别为1/19.4、1/32.6,五跨等截面连续梁(5×35 m=175 m)梁高为1.75 m,高跨比为1/20。其中钢梁纵向采用单箱四室开口槽型断面(见图1),钢梁横向采用腹板竖肋+顶底板横肋的横隔板结构形式,钢梁上覆预制混凝土桥面板,桥面板厚度为35 cm(见图2)。

2 组合箱梁桥负弯矩区设计方法

负弯矩区设计一直是连续钢混组合箱梁桥的设计难点,现行的负弯矩区主流设计思路主要分为以

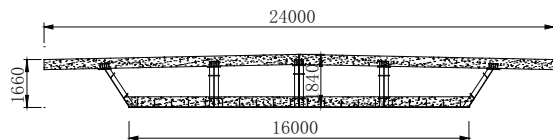
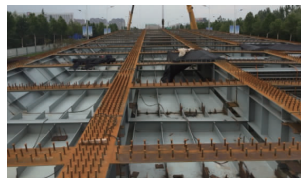


图1 典型横断面布置(单位:mm)



(a) 钢梁

(b) 预制桥面板

图2 现场施工照片

下两种:预应力混凝土A类构件设计—允许桥面板出现一定限值的拉应力,但传统待桥面板和钢梁结合后再通过张拉预应力钢束施加预压应力的方法,会将很大一部分预压应力施加到钢梁上,从而促成了后结合预应力施加方法的出现——即先对桥面板进行预应力张拉,再将其与钢梁进行组合^[12],桥面板预应力导入效率大为提高;普通钢筋混凝土构件设计—容许桥面板开裂,但通过密集配筋控制其裂缝宽度。对于大跨钢混组合箱梁桥负弯矩区桥面板而言,由于负弯矩数值较大,实现预应力混凝土A类构件的设计思路非常困难,构造简单、施工便捷的普通钢筋混凝土构件的设计思路成为必然选择。本次临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目钢混组合梁负弯矩区采用桥面板密集配筋配合支点顶升工艺的设计方法,通过支点顶升向桥面板施加预压应力,成功实现了负弯矩区桥面板普通钢筋混凝土构件的设计思路(见图3)。

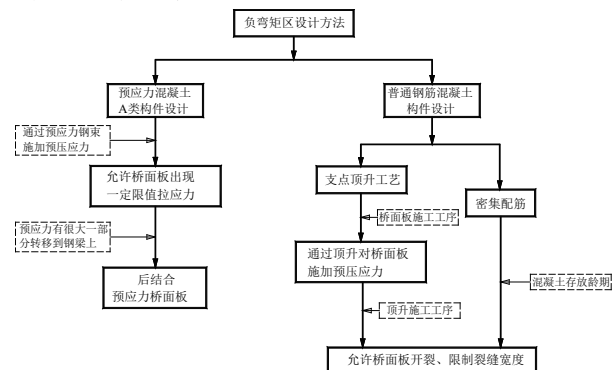


图3 设计方法树状图

3 顶升工艺设计参数研究

桥面板施工工序、支点顶升顺序、桥面板存放龄期是基于顶升工艺组合箱梁桥负弯矩区设计方法的重要设计参数,这些关键参数与结构的施工力学性能、成桥力学性能密切相关。本节以典型桥跨5×35 m=175 m(A型梁)和40 m+60 m+40 m=140 m(B

型梁)为研究对象,研究上述参数对桥面板及钢梁应力分布的影响规律。数值分析采用大型有限元通用软件 MIDAS CIVIL,建立全桥杆系模型,A型梁、B型梁有限元模型见图4、图5。



图4 A型梁有限元模型



图5 B型梁有限元模型

(1)桥面板施工工序

钢混组合结构桥梁在形成组合结构的过程中,不同的桥面板施工工序对结构内力分布、施工效率及工程造价都将产生影响。为对比不同桥面板施工工序对结构整体受力的影响,现选取两种桥面板施工工序来进行讨论。

工序一:先浇筑跨中桥面板,后浇筑支点桥面板,此种方法也被称为皮尔格法。

工序二:先浇筑支点桥面板,后浇筑跨中桥面板。

不同桥面板施工工序影响下成桥阶段钢梁与桥面板的各个位置最不利应力对比见表1。

表1 钢梁及桥面板应力对比

梁型	桥面板 施工 工序	钢梁顶缘 应力 /MPa		钢梁底缘 应力 /MPa		桥面板 应力 /MPa	
		中支点	跨中	中支点	跨中	中支点	跨中
A型梁	工序一	150	-125	-90	66	1	-1
	工序二	64	-111	-91	59	4	-1
	增幅 /%	133	12	-1	11	-68	11
B型梁	工序一	189	-167	-135	98	2	-2
	工序二	108	-132	-131	75	6	-2
	增幅 /%	74	26	3	29	-60	33

对比计算结果可知桥面板施工工序对结构受力影响显著,尤其是钢梁顶缘应力和桥面板应力变化较大。对于A型梁,钢梁顶缘最大拉应力工序一较工序二增幅为133%,桥面板最大拉应力工序一较工序二降幅为68%;对于B型梁钢梁顶缘最大拉应力工序一较工序二增幅为74%,桥面板最大拉应力工序一较工序二降幅为60%。

鉴于以上分析,工序一(皮尔格法)虽然增加了中支点钢梁顶缘拉应力,但此区域桥面板的拉应力得到有效减小,表明为降低钢混组合连续梁中支点负弯矩区混凝土桥面板的受拉范围和拉应力数值,

应尽量使负弯矩区桥面板滞后施工,延缓其与钢梁结合参与结构整体受力的时间。

(2)支点顶升顺序

支点升降法是对负弯矩区桥面板施加预压应力的有效手段之一,该方法在负弯矩区桥面板与钢梁结合前,先顶升支点,待桥面板与钢梁结合硬化后再回落到位,进而向桥面板施加预压应力。为研究不同顶升顺序对结构整体受力的影响,现对A型梁、B型梁各支点顶升先后顺序进行讨论。不同梁型对应顶升顺序见表2。

表2 顶升工序列表

梁型	工序	施工方法
A型梁	工序一	中支点同时顶升 20 cm
	工序一	先顶升中墩 20 cm,再顶升边墩 8 cm
	工序三	先顶升边墩 8 cm,再顶升中墩 20 cm
B型梁	工序一	中支点同时顶升 44 cm
	工序二	先单侧顶升 44 cm,回落后另外一侧顶升 44 cm

表3列出了采用不同顶升工序时,钢梁顶、底缘最大应力及桥面板应力。

表3 钢梁及桥面板应力对比

梁型	顶升 工序	钢梁顶缘 应力 /MPa		钢梁底缘 应力 /MPa		桥面板 应力 /MPa	
		中支点	跨中	中支点	跨中	中支点	跨中
A型梁	工序一	215	-127	-77	83	2	-3
	工序二	221	-126	-69	78	全截面 受压	-3
	工序三	205	-126	-74	75	受压	-4
B型梁	工序一	239	-173	114	152	全截面 受压	-6
	工序二	373	-182	105	224	受压	-11

对比计算结果可知,对于A型梁,采用三种顶升工序对钢梁的应力分布影响较小,对桥面板的应力分布影响较为显著;顶升顺序为工序一时内侧中支点桥面板受拉,外侧中支点桥面板受压,此工序对中支点施加预压应力的效果欠佳;工序二、工序三将中支点桥面板的受力状态优化为全截面受压,工序二对所有中支点桥面板施加的预压应力呈均匀状态,数值在3 MPa左右,而工序三状态下内侧中支点桥面板施加的预压应力要明显高于外侧中支点桥面板。对于B型梁,采用两种顶升工序对钢梁、桥面板的应力分布均影响显著;工序二状态下钢梁应力要明显高于工序一,最不利应力位置出现在中支点顶缘,应力数值已超过钢材屈服强度;工序一状态下桥面板预压应力呈均匀状态,数值在6 MPa左右,而工序二状态下,滞后顶升处的中支点桥面板获得了更

大的预压应力,对桥面板整体受力不利。

鉴于以上分析,顶升工序是影响钢混组合梁内力分布的关键因素,桥面板预压应力施加效果、钢梁应力不超限是评价顶升工序的重要指标,显然 A 型梁最优顶升工序为先中墩、后边墩,B 型梁最优顶升工序为同时顶升。

(3)桥面板存放龄期

容许桥面板开裂、限制裂缝宽度是钢混组合梁桥负弯矩区的主流设计方法,混凝土龄期是影响负弯矩区组合梁桥面板轴向拉力及裂缝宽度的重要因素,本节将对混凝土龄期对成桥状态桥面板轴向拉力(裂缝宽度)及钢梁内力分布的影响展开讨论。

a. 对桥面板轴向拉力及裂缝宽度的影响

分别考虑预制混凝土桥面板存放龄期为 7 天(模拟现浇工艺)、1 个月、2 个月、3 个月、6 个月时,计算比对正常使用极限状态频遇组合下桥面板轴力及其对应的裂缝宽度,计算结果见表 4(A 型梁)、表 5(B 型梁)。

表 4 A 型梁桥面板轴力及裂缝宽度

龄期 /d	轴力 /kN	裂缝宽度 /mm	允许裂缝宽度 /mm	轴力增幅 /%	裂缝增幅 /%
7	33 634	0.125	0.2	25.4	25.4
30	31 300	0.116	0.2	16.7	16.7
60	29 852	0.111	0.2	11.3	11.3
90	28 857	0.107	0.2	7.6	7.6
180	26 824	0.1	0.2	0	0

表 5 B 型梁桥面板轴力及裂缝宽度

龄期 /d	轴力 /kN	裂缝宽度 /mm	允许裂缝宽度 /mm	轴力增幅 /%	裂缝增幅 /%
7	30 397	0.157	0.2	33.3	33.3
30	27 802	0.143	0.2	21.9	21.9
60	26 213	0.135	0.2	15	15
90	25 106	0.13	0.2	10.1	10.1
180	22 802	0.118	0.2	0	0

图 6、图 7 为 A 型梁成桥状态桥面板轴向拉力、裂缝宽度随其存放龄期的关系曲线图,结合表 4 可知:随着预制桥面板存放龄期的增大,桥面板的轴向拉力、裂缝宽度呈逐渐减小趋势。

图 8 为 A 型梁桥面板轴向拉力、裂缝宽度增幅随其存放龄期的关系曲线图(参照样本为龄期 6 个月的桥面板轴向拉力、裂缝宽度),结合表 4 可知:相较存放龄期为 180 d 时,存放龄期为 7 d、30 d、60 d 及 90 d 时桥面板裂缝宽度增幅分别达 25.4%、16.7%、11.3%和 7.6%。

图 9、图 10 为 B 型梁成桥状态桥面板轴向拉力、

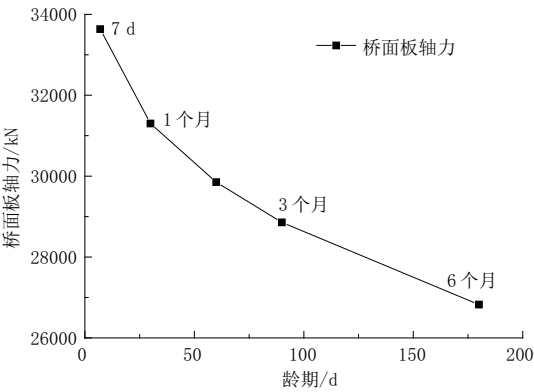


图 6 A 型梁桥面板轴向拉力随龄期增大分布图

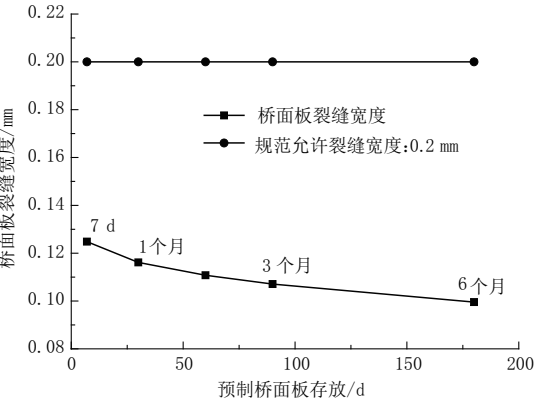


图 7 A 型梁桥面板裂缝宽度随龄期增大分布图

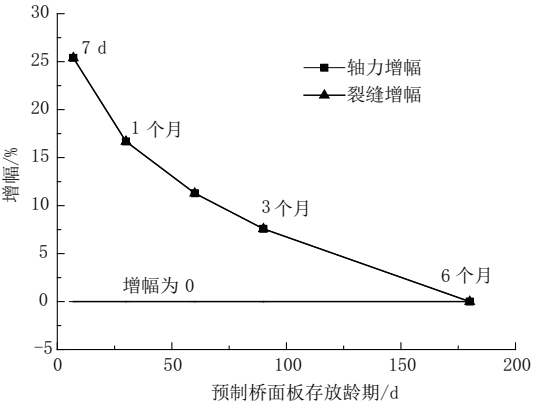


图 8 A 型梁桥面板轴力和裂缝增幅

随其存放龄期的关系曲线图,结合表 5 可知:随着预制桥面板存放龄期的增大,桥面板的轴向拉力、裂缝宽度同样呈逐渐减小趋势。

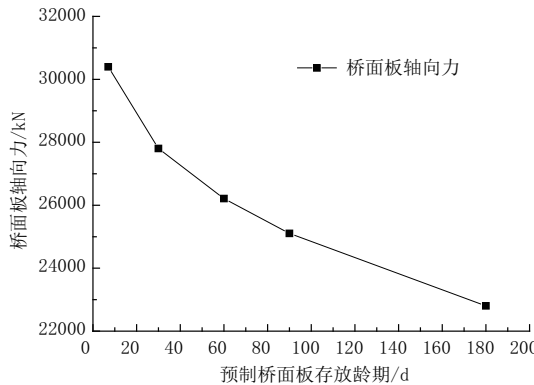


图 9 B 型梁桥面板轴向拉力随龄期增大分布图

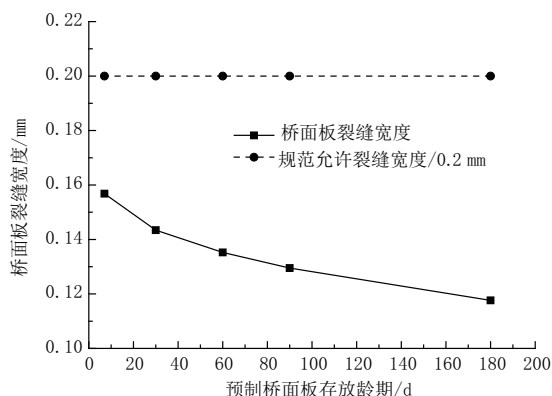


图 10 B 型梁桥面板裂缝宽度随龄期增大分布图

图 11 为 B 型梁桥面板轴向拉力、裂缝宽度增幅随其存放龄期的关系曲线图（参照样本为龄期 6 个月的桥面板轴向拉力、裂缝宽度），结合表 5 可知：相较存放龄期为 180 d 时，存放龄期为 7 d、30 d、60 d 及 90 d 时桥面板裂缝宽度增幅分别达 33.3%、21.9%、15.0%和 10.1%。

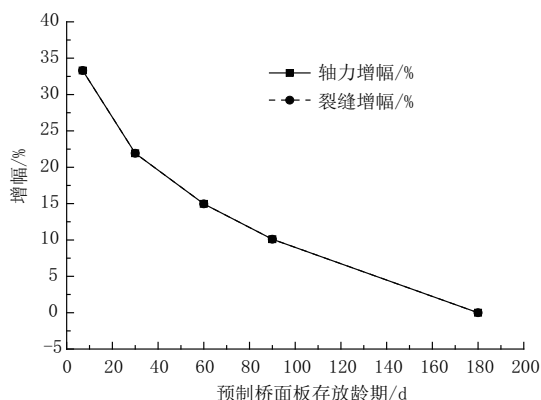


图 11 B 型梁桥面板轴力和裂缝增幅

鉴于以上分析，混凝土收缩、徐变是影响负弯矩区桥面板所受轴向力大小和裂缝宽度的一个重要因素。相比现浇桥面板而言（存放龄期 7 d），预制桥面板延缓了其与钢梁的结合时间，进而减小了收缩、徐变对其产生的拉应力。

b. 对钢梁应力分布的影响

同样考虑预制混凝土桥面板存放龄期为 7 d、1、2、3、6 个月时，计算比对正常使用极限状态频遇组合下钢梁应力分布，计算结果见表 6（A 型梁）、表 7（B 型梁）。

由图 12、图 13 可知：钢梁顶缘应力随存放龄期增长而增大，钢梁底缘应力随存放龄期增大而减小，但影响幅度均较小。

综上所述，皮尔格法、各中支点预压应力均匀的顶升顺序、预制桥面板的综合应用才能降低负弯矩区桥面板拉应力、提高其抗裂性能，从而成功实现通过密集配筋配合顶升工艺的负弯矩区设计思路，连

表 6 A 型梁钢梁顶、底缘应力

龄期 /d	顶缘应力 /MPa	底缘应力 /MPa	允许应力 /MPa
7	183	165	206
30	185	162	206
60	186	160	206
90	187	158	206
180	189	155	206

表 7 B 型梁钢梁顶、底缘应力

龄期 /d	顶缘应力 /MPa	底缘应力 /MPa	允许应力 /MPa
7	134	114	206
30	136	109	206
60	137	106	206
90	138	104	206
180	140	100	206

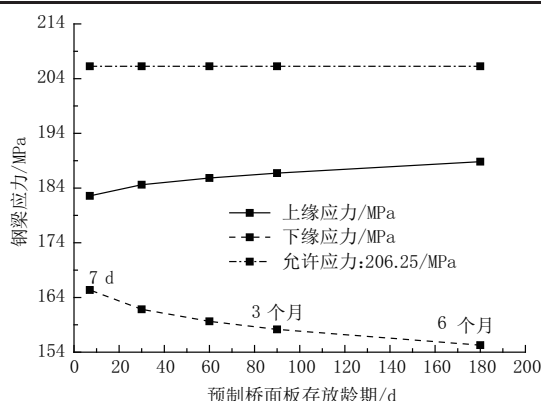


图 12 A 型梁钢梁应力分布图

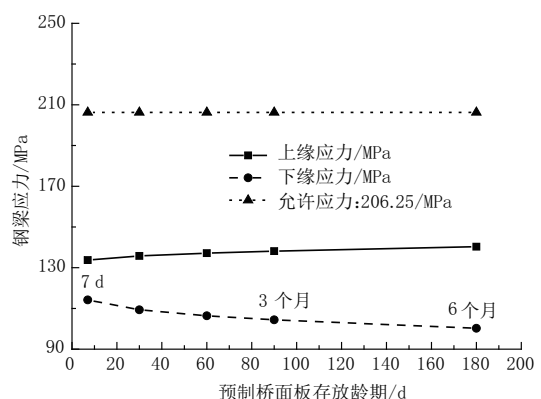


图 13 B 型梁钢梁应力分布图

续钢混组合箱梁桥优化施工工序图见图 14（以 B 型梁为例）。

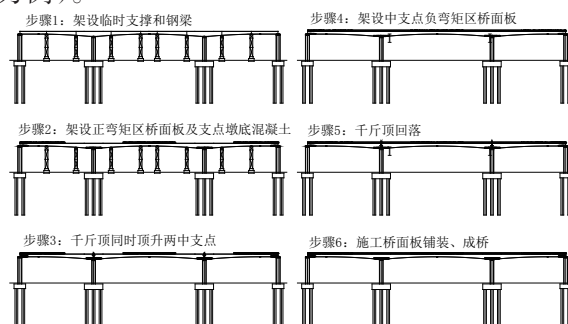


图 14 优化施工工序图（B 型梁）

4 施工全过程线型控制

基于顶升工艺的组合箱梁桥成桥线型控制至关重要,为了实现设计线型与施工线型的吻合,施工全过程对结构线型进行了实时监控。

图 15 列出了变截面连续梁 40 m+60 m+40 m=140 m(B 型梁)的施工全过程设计线型与施工线型关系曲线图(以架设跨中桥面板工况结构线型高程为基准高程),由图 15 可知顶升钢梁工况、钢梁回落工况施工线型与设计线型高程最大误差分别为 13 mm、12 mm,表明关键施工工况顶升钢梁、钢梁回落结构线型控制良好。

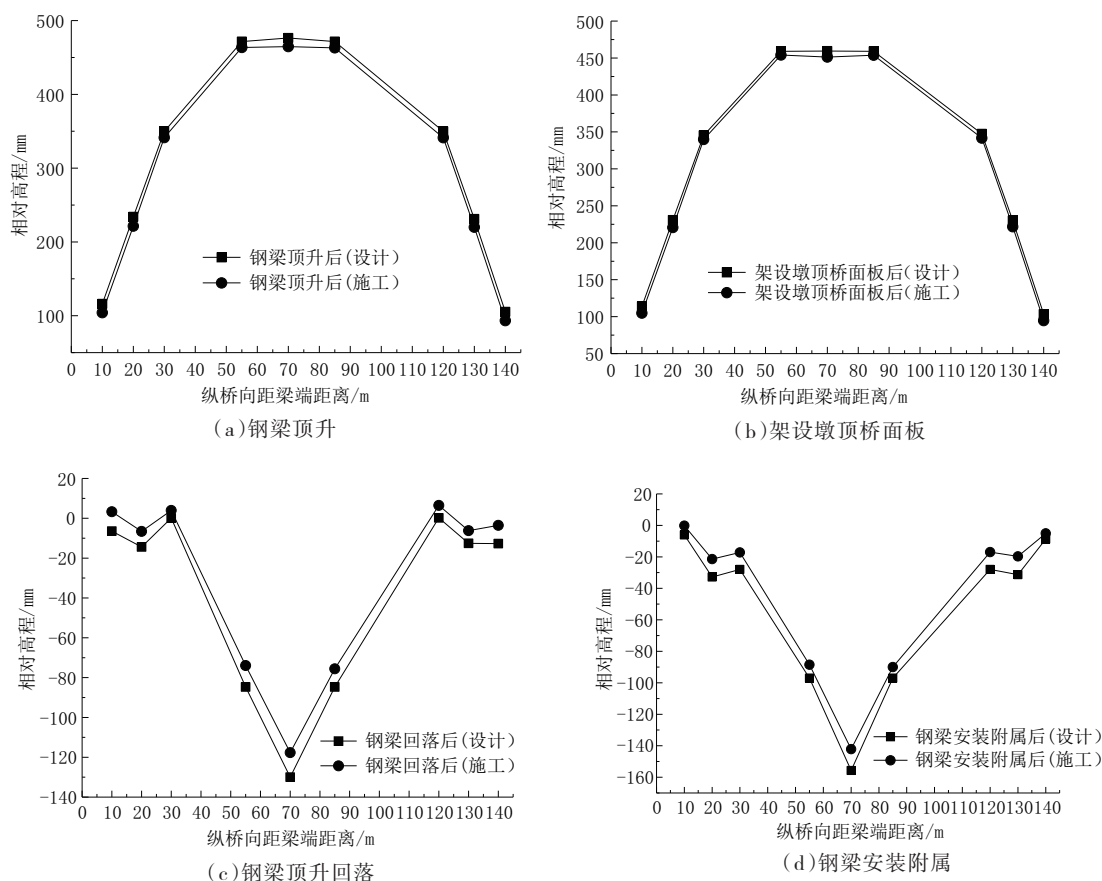


图 15 结构线型监控(B 型梁)



图 16 工程实景照片

型梁)、3 跨变截面组合箱梁桥(B 型梁)的优化顶升顺序分别是先中墩后边墩和两墩同时顶升。

(3)相比现浇桥面板,存放龄期 6 个月的预制桥

5 结 语

本文以临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目为工程背景(见图 16),以解决连续组合箱梁桥负弯矩区桥面板开裂为设计目标,提出了基于顶升工艺的组合箱梁桥负弯矩区设计方法,并对桥面板施工工序、支点顶升顺序及桥面板存放龄期进行了参数化分析,得到如下结论:

(1)皮尔格法为桥面板优化施工工序,降低中支点桥面板拉应力幅度达 60%以上。

(2)各支点桥面板预压应力水平相当是评价支点顶升顺序的重要指标,5 跨等截面组合箱梁桥(A

面板可有效降低桥面板裂缝宽度,降幅达 20%。

因此,临汾市滨河西路与彩虹桥、景观大道立交桥项目是采用基于顶升工艺的组合箱梁桥负弯矩区设计方法的一次成功工程尝试,其设计思路、设计参数可为国内同类钢混组合箱梁设计提供很好的借鉴意义和参考价值,从而推动钢混组合箱梁桥在国内的工程应用。

参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等.钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J].土木工程学报,2012(6):110-122.

(下转第 41 页)

组匝道,一组直行上坡接入中心城区,另外一组旋转三圈下坡接入滨江道路,形成涪陵城区著名的地标(见图 18)。

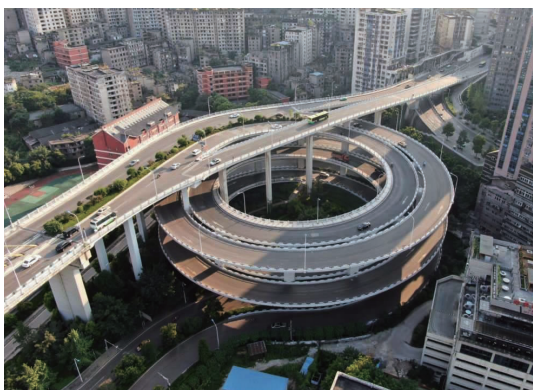


图 18 涪陵乌江二桥西桥头

6 结 语

当今世界,气候变化、环境污染威胁着人类生存。“绿色、低碳、健康”已成为城市的发展目标,而推动城市高质量发展、创造高品质城市生活,构建绿色交通体系是抓手。推进城市有机更新、促进城市交通的可持续发展、倡导健康的生活方式,离不开高质量的步行环境。实践证明,步行空间不仅是步行的通道,还是城市主要的公共生活空间,是城市宜居的重

要评价指标。倡导步行交通,改善步行环境,让人们享受步行的乐趣,有利于人际交往,激活社区生活,增加城市活力,有效提升居民安全感和幸福感。为实现碳达峰碳中和目标任务,充分挖掘过去有效的交通方式,打造今天的绿色交通体系,意义十分重大。尤其是大量住房建在山坡上的重庆老城,50%左右的居民出行仍采用步行方式,为此,重庆市政府持续对步行系统进行迭代升级:一方面对山城步道升级改造,将原来爬坡上坎的劣势,转化成为体验立体城市的优势。另外利用客运电梯,将多座跨江大桥的桥面与滨江路人行通道连接,构建两江四岸滨水空间无障碍的步行系统。同时,结合轨道交通车站公共电梯与扶梯,在老街区中增加机械提升设施,使市民公交加步行出行更舒适方便。目前,对承载着历史记忆的客运缆车、跨江索道的恢复或新建也已经纳入规划。相信在不远的将来,山城重庆特色交通会以更新的面貌呈现,让重庆成为“近者悦,远者来”的美好城市。

参考文献:

- [1] 重庆市交通规划研究院.2021 年重庆市中心城区交通发展年度报告[R].重庆:重庆市规划自然资源局,2022.

(上接第 35 页)

- [2] 邵长宇.主跨 105 m 连续组合箱梁桥的技术特色与创新[J].桥梁建设,2008(3):33-36.
- [3] 罗扣,王东晖,张强.港珠澳大桥浅水区非通航孔桥组合梁设计[J].桥梁建设,2013,43(3):99-102.
- [4] 邵长宇.九堡大桥组合结构桥梁的技术构思与特色[J].桥梁建设,2009(6):42-45.
- [5] 侯文崎,罗如登,叶梅新.钢-高配筋现浇混凝土结合梁裂缝宽度试验研究[J].中国铁道科学,2001,22(5):54-60.
- [6] 侯文崎,叶梅新.连续结合梁桥负弯矩区混凝土板裂缝宽度控制方法研究[J].铁道学报,2003,25(1):109-112.
- [7] Su, Q., G. Yang, M.A. Bradford. Behavior of a Continuous Composite Box Girder with a Prefabricated Prestressed-Concrete Slab in Its Hogging-Moment Region[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 0

(8):B4014004.

- [8] Xu, C., et al. Experimental study on double composite action in the negative flexural region of two-span continuous composite box girder [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(10):1636-1648.
- [9] 彭元诚,刘玉擎.大宁河特大桥钢-混组合连续梁负弯矩区受力特性模型试验研究[J].世界桥梁,2012,40(1):28-31.
- [10] 刘沐宇,毛玉东,邓晓光,等.港珠澳大桥组合连续箱梁模型试验研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(9):90-95.
- [11] 樊健生,聂建国,张彦玲.钢-混凝土组合梁抗裂性能的试验研究[J].土木工程学报,11(2):1-7.
- [12] 郭瑞,苏庆田,李晨翔,等.后结合预应力组合梁负弯矩区混凝土开裂性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(3):352-356.