

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.019

不调整临时墩顶标高的双向纵坡竖曲线梁 顶推方案研究及实施

张宏武¹,柯红军²,陈卓异²,杨武¹

(1.中交(长沙)建设有限公司,湖南长沙 410200;2.长沙理工大学 土木工程学院,湖南长沙 410114)

摘要:针对设计成桥线形为直线+圆曲线+直线的双向纵坡竖曲线变曲率钢梁顶推,分析实时或多次调整临时墩标高
等现有方案的缺陷,提出充分利用钢梁抗弯刚度小、自适应变形能力强且材料强度高优点而不调整临时墩标高的
顶推方案。并针对背景工程进行该方案的全过程有限元仿真分析,计算结果表明安全可行。实桥顶推采用了该方案,
整个顶推过程中临时墩及钢梁均安全稳定,顶推完成后线形平顺。增大两侧纵坡及减小中间圆曲线半径的参数分析
表明:在切线长保持不变的前提下,即使两侧纵坡坡度达到规范规定的最大值且中间圆曲线半径小于规范规定的最小
值,不调整垫块厚度的顶推方案仍能满足安全性要求,拓宽了该文提出方案的适用范围。

关键词:钢梁;顶推;双向纵坡;竖曲线;变曲率;垫块;调整

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

0 引言

为便于桥面排水及增大桥下净空,公路及市政桥梁通常以主跨跨中为变坡点设置双向向下的纵坡。但为了保证行车安全、舒适以及视距的需要,须在变坡处设置竖曲线^[1],以缓和纵向变坡处行车动量变化而产生的冲击作用,并确保道路纵向行车视距。因此,桥梁纵断面常设计为直线+圆曲线+直线的双向纵坡竖曲线形式。

自锚式悬索桥^[2]、拱梁组合体系桥^[3]等特殊类型的大跨度桥梁通常需要采用先架设主梁,然后安装主梁承重结构,再进行吊索张拉以完成体系转换的总体施工方案。由于这类桥的主梁跨度一般较大,且因桥下通航或行车需要,较少采用大型吊车直接架设主梁的方案,大部分采用顶推法^[4-6]架设主梁,有些大跨度等截面连续梁桥亦因这些原因而采用顶推法架设。

对于制造线形为直线或单一半径圆曲线的主梁,只需将各临时墩顶标高设置为主梁制造线形对

应的梁底标高,则顶推过程中任何时刻已顶推的主梁拼装线形与其下的临时墩顶拟合曲线的半径相吻合,从而避免出现某些临时墩脱空的同时另外一些临时墩反力过大的现象,除非临时墩跨径设置极不合理。而对于本文所述的直线+圆曲线+直线的双向纵坡竖曲线形式的变曲率主梁,整体线形既不是直线,亦不是单一圆曲线,相当于变曲率的竖曲线。这类主梁的顶推,如果将各临时墩顶的标高分别设置为主梁制造线形对应的梁底标高且在顶推全过程中不调整,则仅在第一个直线段顶推过程中及最终全部主梁顶推到位时刻,梁底拼装线形与其下的临时墩顶吻合,其余各项推阶段均不吻合。

对于变曲率竖曲线梁的顶推,不少学者或工程技术人员认为会出现某些临时墩顶与梁底脱空的同时另外一些临时墩反力过大的现象,需要在顶推过程中调整临时墩顶垫块标高^[7-9]。针对该问题,目前一般有两种处理方式:第一种是将这种直线+圆曲线+直线的双向纵坡变曲率竖曲线拟合为单一半径圆曲线,按该曲线确定各临时墩顶标高(不包括垫块厚度),并在顶推全过程中实时调整各临时墩顶的垫

收稿日期:2023-05-31(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51708047)

作者简介:张宏武,男,大学本科,高级工程师.E-mail:497163269@qq.com

块厚度,使主梁制造线形在各临时墩处对应的梁底标高减去其下的垫块厚度后得到的各垫块底部连线拟合得到的圆曲线半径与临时墩顶所在的圆曲线半径任何时刻都吻合^[10-11]。这种方法相当于单一圆曲线顶推,各阶段可根据这两条半径相同且竖直方向平行的圆曲线较容易地计算出垫块厚度;第二种方法是按主梁制造线形确定临时墩顶标高,然后在顶推过程中的任一阶段调整已顶推出拼装平台的梁体下各临时墩顶的垫块厚度,使垫块顶部与按照刚体转动考虑得到的梁底标高吻合。这种方法在各阶段均需根据梁体刚体转动确定各临时墩处垫块厚度之和最小值^[12-13]。

上述两种处理方式都需实时调整各临时墩处的垫块厚度,既耗费大量钢材,又耗费大量工时。产生该现象的本质原因是两种处理方式都是将顶推梁体看作刚体,认为不能因临时墩顶标高设置这一因素而使梁体顶推过程中产生相对于直线顶推或单一圆曲线顶推的梁体附加应力或临时墩顶附加反力。实际上,按照这两种方式,顶推过程中不可能做到任何时刻都调整垫块厚度,否则耗费的工时无从想象,最多隔几个行程或一两个节段后才调整一次,在一定程度上利用了梁体的变形特性和结构的安全储备。因此双向纵坡竖曲线梁体顶推能否全过程不调整临时墩顶垫块标高,又能保证结构的安全值得进一步研究。本文以湖南益阳青龙洲大桥为工程实例,进行可行性研究,并探讨无需调整临时墩顶垫块厚度的双向纵坡竖曲线梁顶推方

法的适用范围。

1 工程概况及特点

湖南省益阳市青龙洲大桥^[14-15]是益阳市西环线建设项目在益阳市青龙洲上游400 m处跨越资江的控制性工程。主桥设计为双塔五跨组合梁自锚式悬索桥,主梁跨径布置为(60+110+260+110+60) m,桥型布置见图1。索塔采用双柱式门式框架结构,由基础、塔座、塔柱和横梁(上横梁、中横梁)组成。主缆的跨径布置为(110+260+110) m,成桥状态下中跨主缆跨中垂度为52.0 m,矢跨比为1:5。全桥设置39对吊索,吊索标准间距为10.5 m,塔侧端吊索距塔中心的距离为14.5 m,单个索夹节点处设2根平行吊索。

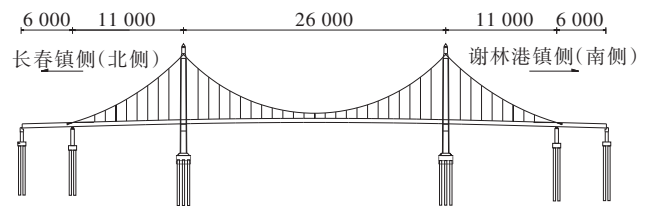


图1 青龙洲大桥主桥桥型布置(单位:cm)

主梁为钢-超高性能混凝土组合梁结构,由主纵梁、中横梁、箱形横梁、小纵梁、超高性能混凝土桥面板组成双主梁梁格体系。横梁处及非横梁处主梁标准断面见图2、3,全宽36.5 m,横向中心外轮廓梁高为3.632 m,桥面设2%的双向横坡。

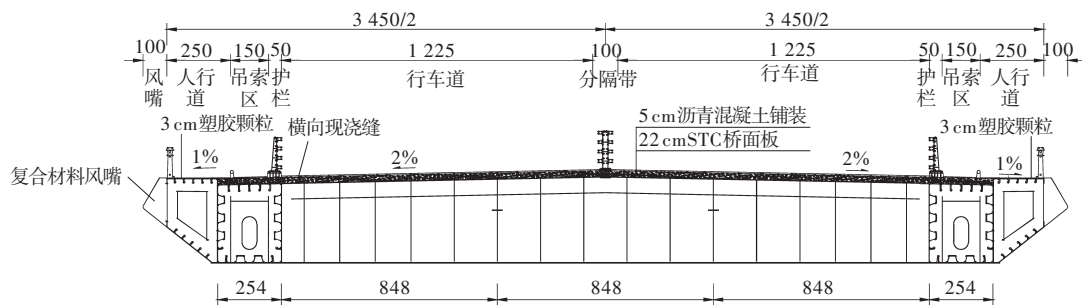


图2 横梁处主梁标准断面(单位:cm)

全桥共设置两片主纵梁,每片主纵梁为等高度单箱单室截面,主纵梁分为A~H类9种形式,共59个节段。D梁段为标准段,节段长度10.5 m,顶板厚30 mm,底板厚32 mm,腹板厚20 mm,其余梁段顶底板和腹板根据构造和受力的需求选择不同的板厚,

加劲梁顶底板和腹板外轮廓线对齐。

UHPC桥面板分为预制板、纵向湿接缝、横向湿接缝三部分制作。单个梁段横向分为3块预制板,每个横梁之间布置一块预制板,预制板放在横梁上翼缘板上,每道横梁上翼缘板为横向湿接缝,纵向湿接

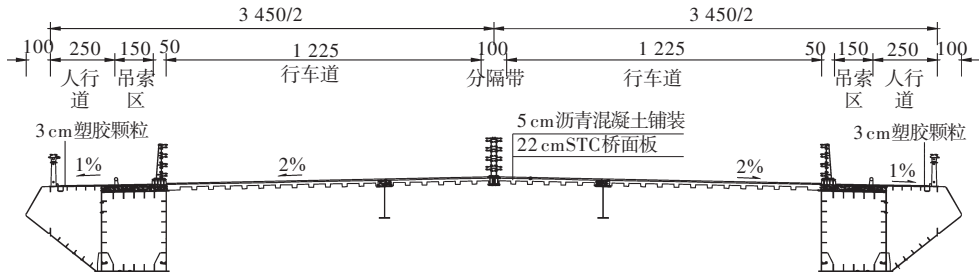


图3 非横梁处主梁标准断面(单位:cm)

缝布置在两侧主纵梁顶板和小纵梁上翼缘板上。预制板制作完成后吊装搁置于先期架设到位的钢梁上,通过工地现场浇筑的纵向和横向湿接缝连接成整体。

由于本桥为自锚式悬索桥,主缆最终锚固于主梁上,所以为节约成本,本桥按照常规的施工方法,主梁先于主缆架设,且采用常规的顶推法架设。而本桥主梁纵断面设计成桥线形为双向纵坡竖曲线,即以主跨跨中为纵桥向对称中心,向两侧设置均为2.4%的下坡,但为了行车安全、舒适以及视距的需要,以变坡点为中心,设置凸形圆曲线过渡,圆曲线半径 $R=7\ 000\text{ m}$,切线长 $T=168\text{ m}$,外距 $E=2.016\text{ m}$ (如图4所示,为突出表现本桥变曲率竖曲线的特点,未严格按照实际坡度及半径绘图)。由此可知,本桥主梁纵断面设计成桥线形既不是直线,亦不是

同一半径圆曲线,而是直线+圆曲线+直线的组合,相当于变曲率的竖曲线。因此,其顶推施工的安全性和经济性需引起重视。

综合考虑通航要求、已有导梁长度、主梁及导梁受力安全等因素,确定顶推拼装平台总长71.5 m,共设置11个临时墩,各临时墩纵桥向中心之间跨径布置为(42+45+50+60+60+70+70+60+65+56) m,见图5,并将各临时墩顶标高设置为在梁底设计成桥标高的基础上抬高50 mm,以免梁体由于自重下挠后在永久墩处与支座冲突。

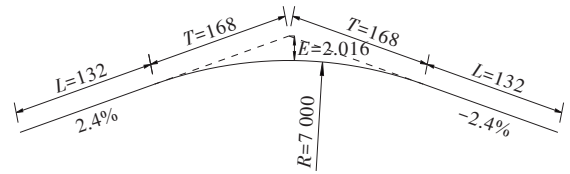


图4 青龙洲大桥主梁设计成桥线形示意图(单位:m)

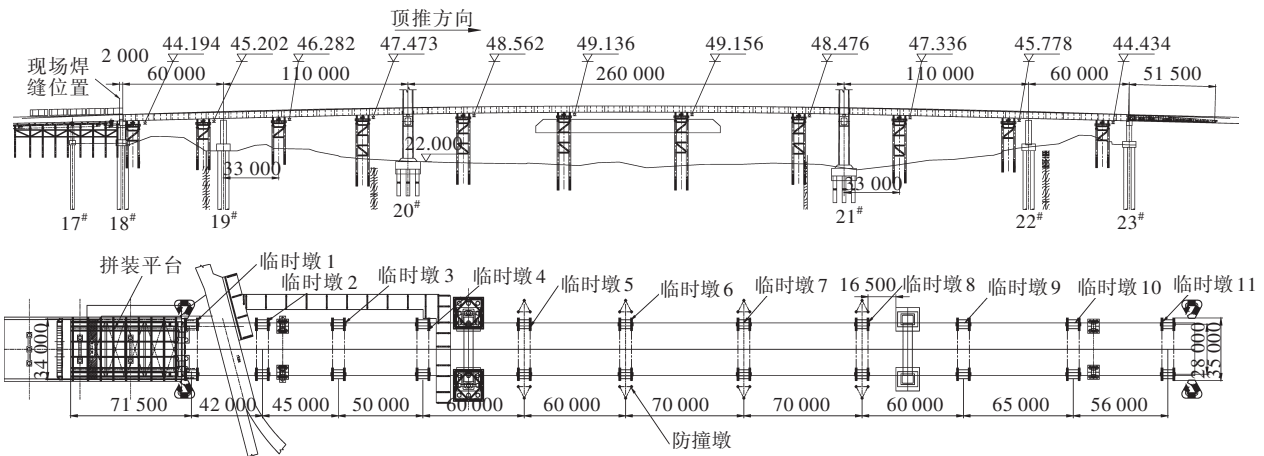


图5 青龙洲大桥主梁顶推拼装平台、临时墩及导梁布置(除标高为m外,其余单位:mm)

2 多次调整垫块厚度的原顶推方案

针对该变曲率竖曲线梁的顶推,设计及施工单位在顶推方案设计及计算分析时,首先将主梁看作完全刚性,采用多次调整垫块标高的方法来保证主

梁的安全。确定垫块厚度调整时机及调整量的方法为:在Auto CAD软件中将各项推阶段已拼装完成且顶推出去的钢梁进行刚体转动,使梁底与其下的各临时墩顶间的高差之和最小。然而,在顶推过程中实时调整各临时墩顶的垫块厚度不实现,将耗费巨大的工作量,因此设计施工单位考虑了一定的变形

特性,只在其中8个工况后进行垫块厚度调整,本文将该方案称之为多次调整垫块厚度的原顶推方案。

笔者对该方案进行复核计算后,得到各工况所需垫块厚度及这8次调整后的垫块厚度,见表1。

表1 多次调整垫块厚度的原顶推方案各工况所需垫块厚度

工况号	工作内容	各临时墩的垫块厚度/mm											垫块厚度之和	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
GK1	安装2节段	101	95											
GK2	安装4节段	101	99											
GK3	安装6节段	101	102											
GK4	安装8节段	101	102	104										
GK5	安装10节段	101	102	102										
GK6	安装12节段	106	102	101	106									
GK7	安装14节段	104	101	98	106									
GK8	安装16节段	105	106	101	106									
	垫板厚度调整1	535	550	470	250	190								1 995
GK9	安装18节段	582	472	298	114	238								
GK10	安装20节段	575	535	345	141	239								
GK11	安装22节段	568	609	409	150	183								
GK12	安装24节段	581	690	528	201	148	618							
GK13	安装26节段	539	712	618	248	107	486							
GK14	安装28节段	536	746	692	311	61	328							
	垫板厚度调整2	450	550	470	305	50	120	650						2 595
GK15	安装30节段	749	950	886	484	49	122	858						
GK16	安装32节段	654	899	882	533	70	79	738						
	垫板厚度调整3	400	535	510	445	220	60	130						
GK17	安装34节段	601	895	931	639	174	75	602						
GK18	安装36节段	512	851	934	696	279	66	458						
GK19	安装38节段	616	957	1 042	806	393	56	241	1 177					
	垫板厚度调整4	270	525	500	455	300	120	75	340					2 585
GK20	安装40节段	456	832	956	762	399	48	84	817					
GK21	安装42节段	386	777	959	807	494	184	76	655					
GK22	安装44节段	467	885	1 052	908	604	303	67	464	1 367				
	垫板厚度调整5	270	525	500	455	300	160	55	80	650				2 995
GK23	安装46节段	448	876	1 055	924	636	351	60	317	1 100				
GK24	安装48节段	433	868	1 055	930	651	374	50	107	716				
	垫板厚度调整6	250	525	500	455	300	290	210	80	340	860			3 810
GK25	安装50节段	401	850	1 057	958	708	461	169	73	531	1 355			
GK26	安装52节段	426	834	1 058	978	750	526	260	64	364	1 016			
GK27	安装54节段	515	824	1 059	995	788	584	342	106	247	724			
	垫板厚度调整7	230	385	455	445	310	290	210	150	150	210	300		3 135
GK28	安装56节段	506	704	902	877	717	560	372	181	177	481	747		
GK29	安装58节段	496	595	701	703	582	465	324	179	106	258	392		
	垫板厚度调整8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		1 100
GK30	安装59节段	206	286	371	404	345	289	219	147	105	226	286		
GK31	顶推到位落梁	61	61	61	60	61	64	64	61	61	61	61		
	各次垫块厚度调整中最大厚度	535	550	510	455	310	290	650	340	650	860	300		3 810

由表1可知:即使仅进行8次垫块厚度调整,最大垫块厚度仍达到了860 mm,这给顶推安全稳定性埋下了隐患,且各临时墩顶垫块厚度之和仍达到了3 810 mm。按每块垫板的面积为 0.5 m^2 计算,所需垫块质量为4(每个编号的临时墩横桥向单侧前、后、左、右共4个支点) \times 2(横桥向2片主纵梁) \times 3.81(垫块厚度之和) \times 0.5(单个垫块面积) \times 7.85(钢材密度,单位: 7.85 t/m^3) $=119.6 \text{ t}$ 。可见,按照上述多次调整垫块厚度的方案进行本桥主梁顶推,既不安全,亦不经济。

按照该方案,顶推全过程中钢主梁(采用Q345钢材)最大应力为136.4 MPa,导梁(采用Q235钢材)最大应力为92.1 MPa,均不到所用材料屈服强度的一半,有较大的富余度。且本方案并非全过程实时调整垫块厚度,仅调整了8次,也就是说大部分工况中利用了钢主梁和导梁的变形特性。

3 不调整垫块厚度的顶推方案研究

本桥钢主梁刚度较小,其单侧主纵梁横截面积仅 1.049 m^2 ,抗弯惯性矩仅为 1.586 m^4 ,顶推过程中具

备较强的自适应弯曲变形能力。此外,本桥主梁采用钢材,其抗拉和抗压强度相同且较高,而前文所述的多次调整垫块厚度的方案所得的钢主梁和导梁应力富余度较大,那本桥顶推全过程中能否不调整垫块厚度,亦能保证临时墩、钢主梁及导梁的安全性呢?

为此,笔者进行了考虑本桥主梁的设计成桥竖曲线为变曲率的特点,但顶推全过程不调整垫块厚度(各临时墩顶仅设置6 cm厚的垫块,用来避免主梁在永久墩处由于弯曲而与永久支座冲突)方案的仿真计算。同时,为了便于对比分析各方案关键计算结果的优劣,又进行了不考虑主梁竖曲线的变曲率特点,将其看作直线或同一半径圆曲线的方案的仿真计算(之所以进行该方案计算,是因为当主梁线形为本文工程背景所述的直线+圆曲线+直线时,若全过程将主梁看作刚体,实时调整垫块厚度,所得的最优计算结果也是趋近于直线或单一圆曲线顶推的计算结果)。

上述3种顶推方案(直线顶推方案、多次调整垫块厚度方案及不调整垫块厚度方案)全过程仿真分析结果得到的各临时墩最大反力、主梁最大应力、导梁最大应力汇总于表2。

表2 3种顶推方案所得的临时墩最大反力、钢箱梁及钢导梁应力对比

方案	各临时墩最大反力/(10 kN)											主梁应力/MPa	导梁应力/MPa
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
直线顶推方案	278.5	382.2	381.7	468.0	500.6	553.9	589.7	523.1	513.7	530.1	315.9	109.7	83.8
多次调整垫块厚度方案	412.3	411.1	416.4	500.8	535.2	586.0	627.7	560.7	547.0	529.9	315.6	136.4	92.1
不调整垫块厚度方案	420.2	479.8	427.4	620.7	608.5	650.9	670.2	608.8	552.8	530.3	315.8	149.7	80.7

由表2可知:即使顶推全过程不进行垫块厚度调整,其主梁应力、临时墩反力相对于直线顶推方案或多次调整垫块厚度方案增量均较小,安全性满足要求,且导梁应力有所减小。

不调整垫块厚度方案全过程中临时墩反力见图6,除反力一直不大的临时墩1外,其余临时墩并未出现脱空的情形,可见本桥主梁抗弯刚度较小,自适应变形能力较大。所以,本桥主梁顶推全过程中可以不调整临时墩顶标高(或垫块厚度)。最终,本桥按该方案进行了主梁顶推,过程中未出现安全事故,钢主梁及导梁未发生屈曲变形及强度破坏,顶推完成后主梁线形顺畅、美观。

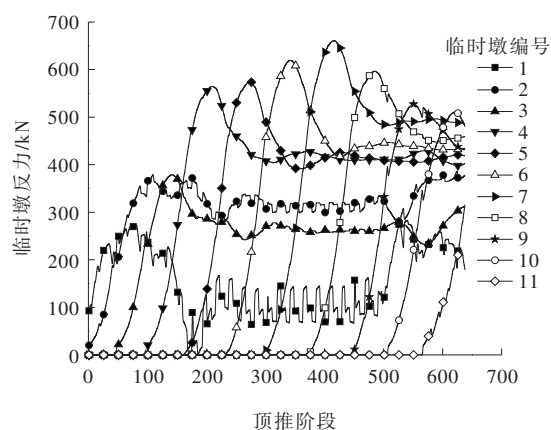


图6 不调整垫块厚度方案全过程中各临时墩反力变化历程

4 参数分析

由前文分析结果可知:对于本桥的竖曲线设计,钢箱梁及钢导梁的应力安全系数均大于2,仍有一定的富余量,这种不调整垫块厚度方案的适用范围能否进一步扩大?对此,笔者进行了调整两侧纵坡坡度及中间圆曲线半径的参数分析,得到当纵坡为4%,切线长保持为168 m,对应的圆曲线半径为

4 203.36 m这种极限设计时,顶推全过程中各临时墩反力、钢主梁最大应力、钢导梁最大应力值与原设计对比见表3。由表3可见,即使按这种极限设计,不调整垫块厚度进行顶推时,全过程中临时墩最大反力增量也仅为394 kN,钢主梁最大整体应力也不足200 MPa,仍然满足施工安全要求。因此,对于一般的双向纵坡竖曲线公路钢桥或钢混叠合梁桥,只要两侧纵坡及中间圆曲线半径不超过规范要求,则其钢主梁顶推全过程中可不进行垫块厚度调整。

表3 原设计曲线与极限设计曲线对应的不调整垫块厚度顶推全过程中临时墩反力、钢箱梁及钢导梁应力最大值对比

方案	各临时墩反力/(10 kN)											主梁应力/MPa	导梁应力/MPa
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
原设计	420.2	479.8	427.4	620.7	608.5	650.9	670.2	608.8	552.8	530.3	315.8	149.7	80.7
极限设计	451.9	531.5	358.4	620.9	617.2	663.6	709.6	639.6	567.7	507.2	308.0	199.2	80.7

5 结论

(1) 现有的将主梁看作刚体并实时或多次调整垫块厚度的方案费工、费材,且安全性难以得到保证。

(2) 本文提出的充分利用梁体抗弯刚度小、自适应变形能力强的不调整垫块厚度的方案经顶推全过程仿真模拟得到了临时墩、钢主梁及导梁安全性的验证,背景工程的成功应用证明了方案的优越性。

(3) 对两侧纵坡坡度及中间圆曲线半径的参数分析表明,若双向纵坡竖曲线桥的纵坡达到规范要求的极限,中间圆曲线半径小于规范规定的极限,即使顶推全过程中不调整垫块厚度,临时墩、钢主梁及导梁的安全性仍能满足施工安全要求。

参考文献:

[1] 田华,冯坚,沈光辉.提高高速公路限制速度方案研究[J].中外公路,2022,42(4):244-252.
 [2] 代百华,朱金柱.三塔空间缆自锚式悬索桥体系转换研究[J].中外公路,2021,41(4):204-209.
 [3] 黄景新.大跨度无推力拱桥钢箱主梁顶推施工关键技术[J].安徽建筑,2022,29(12):161-163.
 [4] 左雁,彭云涌,万小龙.场地受限条件简支钢箱梁不等跨顶推对策及受力分析[J].中外公路,2021,41(6):137-140.

[5] 朱小金,鲜亮,王博,等.虎门二桥小半径平曲线钢箱梁安装施工技术[J].中外公路,2021,41(5):137-141.
 [6] 陈军刚,王学勇,周洲,等.大跨钢-混凝土组合箱梁无支架顶推技术与控制计算[J].中外公路,2020,40(4):137-141.
 [7] 唐霁,李松林.滑道高程偏差对PC顶推箱梁梁体受力行为影响研究[J].中外公路,2020,40(4):97-100.
 [8] 田顺.超近既有桥梁的大跨度竖曲线钢箱梁桥顶推施工监测技术[J].建筑技术开发,2021,48(22):111-113.
 [9] 宋敏,朱江,皮淑萍,等.大跨度钢桥梁顶推过程中的竖曲线线形控制技术[J].建筑施工,2020,42(11):2119-2121.
 [10] 杨文爽,阙水杰,严和仲,等.双向纵坡竖曲线桥梁顶推梁体转动自适应控制方法:CN111877183B[P].2021-09-07.
 [11] 杨文爽,阙水杰,楚民红.复杂竖曲线桥梁主梁顶推转动自适应控制法[J].桥梁建设,2022,52(2):53-59.
 [12] 董创文,李传习,张玉平,等.变曲率竖曲线梁顶推过程支点标高调整方案确定的单步模数搜索合成法[J].土木工程学报,2015,48(1):101-111.
 [13] 王俊,李传习.变曲率竖曲线钢箱梁顶推施工临时墩标高调整方案确定[J].中外公路,2011,31(3):177-182.
 [14] 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司.湖南省益阳市青龙洲大桥钢箱梁顶推设计计算书[R],2018.
 [15] 王衍.超高性能混凝土轻型桥面板结构抗弯性能研究[D].长沙:湖南大学,2021.