

## 变曲率竖曲线钢箱梁顶推过程受力分析\*

李传习<sup>1</sup>, 陈卓<sup>1</sup>, 董创文<sup>1</sup>, 李涛<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.四川路桥建设集团股份有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**以泸州沱江四桥变曲率竖曲线钢箱梁顶推施工为背景,基于单步模数搜索合成法确定的标高调整方案,采用通用有限元软件 ANSYS 建立钢箱梁顶推全过程杆系模型,对顶推过程中梁体与支墩的受力状态及其对标高调整量误差的敏感性进行分析,研究大跨度变曲率竖曲线钢箱梁顶推过程受力特性。结果表明,钢箱梁顶推过程中,结构的各项受力指标未超过限值,滑道标高调整方案可行,顶推全过程结构受力安全;支点反力对标高调整量很敏感,滑道标高的调整精度宜控制在 5 mm 以内;当调整工况中出现多个位置同时调整时,各支点调整应分级同步进行。

**关键词:**桥梁;变曲率竖曲线钢箱梁;步履式顶推;受力分析;标高误差

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)01-0116-05

步履式顶推法因其机械化程度高、适应性强、安全性高的特点,近年来已成为钢梁架设的常用方法之一。采用该方法顶推变曲率竖曲线钢箱梁过程中,各临时墩顶对应钢箱梁无应力线形标高不断变化,各临时墩顶的滑道顶面标高必须随顶推进展适时调整,否则主梁可能因强迫位移过大而破坏,临时墩因支反力过大影响顶推安全。因此,变曲率竖曲线钢箱梁顶推过程中,合适的标高调整方案和各结构受力分析十分重要。

支点标高调整方案的确定方法有传统的穷举法、试算法和近年来提出的两步穷举法、单步模数搜索合成法。相比于传统方法,单步模数搜索合成法是确定变曲率竖曲线梁体顶推支点标高调整方案的较佳方法,且已在部分工程实例中得到检验。该文以泸州沱江四桥变曲率竖曲线钢箱梁顶推施工为背景,建立顶推过程杆系有限元模型,采用单步模数搜索合成法得出标高调整方案,分析顶推全过程结构的受力性能,并对典型工况下结构受力性能对标高调整量误差的敏感性进行分析,明确顶推过程中结构的受力状态,提出针对标高调整量误差控制的安全阈值,用于指导设计与施工。

## 1 工程概况

泸州沱江四桥主桥采用独塔双索面斜拉桥结构形式,主梁采用钢-砼混合梁,钢箱梁位于 0.5% 单

向纵坡段,总长 247.75 m、宽 49 m,采用带悬臂的流线型扁平双边钢箱梁,顶面设 2% 双向横坡;单箱水平底板宽 7.4 m,斜底板宽 8.2 m。钢箱梁横断面见图 1。全桥共有 10 种梁段类型(见表 1),为满足成桥线形,钢箱梁加工制作时设计预拱度为变曲率竖曲线(见图 2)。

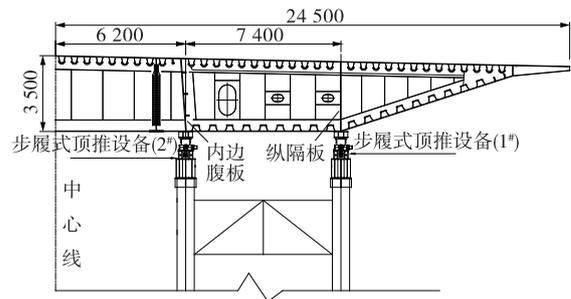


图 1 滑道处钢箱梁 1/2 横断面示意图(单位:cm)

表 1 梁段分类

梁段编号	节段类型	梁段编号	节段类型
BS5	J	S15	E
BS4~BS3	I	S14~S7	D
BS2	H	S6~S3	C
BS1	G	S2	B
S16	F	S1	A

因河水的山区季节性特点,采用多点步履式顶推架设方式,钢箱梁顶推跨径为 32 m+40 m+29 m+2×45 m+55 m+2×65.8 m+48.9 m,全桥 10

\* 基金项目:科技部 973 项目(2015CB057701);国家自然科学基金项目(51778069;51378080);广东省交通运输厅科技项目(201602010);湖南省开放基金项目(15K010)

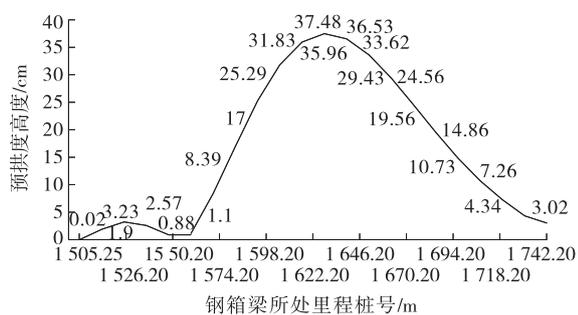


图 2 钢箱梁无应力线形预拱度

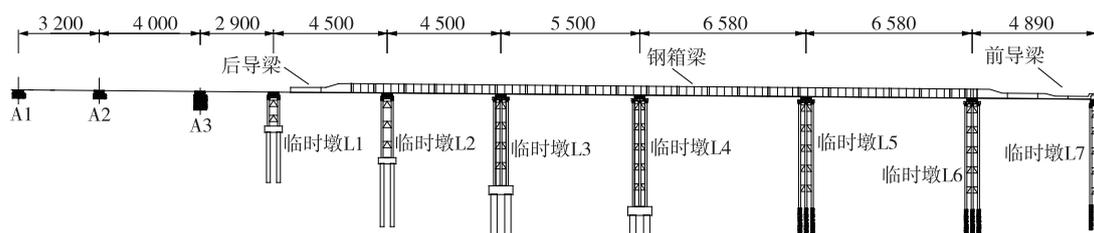


图 3 顶推立面布置(单位:cm)

点强迫位移,确保受力安全。宽幅和变曲率竖曲线的特点加剧了滑道处钢箱梁局部结构的受力复杂度。

## 2 顶推过程整体有限元模型

### 2.1 计算工况

采用通用有限元软件 ANSYS10.0,按一次落架法的思路,通过平面杆系有限元模拟顶推施工过程,结合步履式千斤顶顶推标准步长为 1 m 的特点,确定计算工况顶推增量标准值为 1 m,再通过改变支点的位置和给支撑单元下端节点施加强迫位移(无应力钢箱梁梁底与临时墩滑道顶面标高的差值),分别模拟顶推过程和滑道顶面标高的调整。全桥顶推共划分为 501 个工况,最后一个顶推工况(前导梁已拆除、后导梁未拆除)的模型见图 4。

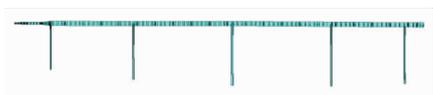


图 4 最后一个顶推工况的模型

### 2.2 计算模型

(1) 单元选取与划分。计算模型参与结构包括钢箱梁、前导梁、后导梁和支承体系。钢箱梁、前导梁、后导梁采用 beam3 平面梁单元,支承体系(包括 A 类扩大基础及临时墩)采用只受压的 link10 单元。钢箱梁材料为 Q345qD,钢导梁材料为 Q235B;钢箱梁、钢导梁的密度均为 7 850 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量

处顶推支点分为扩大基础(编号依次为 A1 ~ A3)和临时墩(编号依次为 L1 ~ L7)两类,顶推立面布置见图 3。根据钢箱梁宽幅、双边箱的构造特点,梁底横向设置四处滑道,内侧滑道中心线对准内腹板,外侧滑道中心线对准纵隔板,全宽 49 m 一起顶推。

该桥钢箱梁顶推最大跨度 65.8 m,为目前变曲率竖曲线钢箱梁(不含钢槽梁)顶推的最大跨度,顶推距离长,立面最多同时有 8 个支点支撑,需在合适的时机使用钢垫块调整某些支点的标高,以减少支

$E$  取 206 GPa,泊松比  $\mu$  取 0.3。全箱梁共划分为 324 个单元,其中单元 1~46 对应后导梁,单元 47~258 对应钢箱梁,单元 259~324 对应前导梁。

(2) 计算荷载。钢箱梁自重通过等效密度+横隔板处的集中荷载的形式施加;导梁自重通过等效密度+接头、横撑处的集中荷载的形式施加;支承体系不考虑自重,密度取零;重力加速度取  $-10 \text{ m/s}^2$ 。

### 2.3 滑道顶面标高调整控制值

根据设计和施工文件,预先设置滑道顶面标高调整相关控制参数,各支点支承反力控制值、钢箱梁和导梁的应力控制值、尾端支点(A1)的强迫位移值见表 2。

表 2 滑道顶面标高调整控制值

项目	位置	取值
支承反力控制值 (全截面)/t	A 类扩大基础(A1、A2、A3)	1 600
	第 1 类临时墩(L1、L2、L7)	1 500
	第 2 类临时墩(L3、L4)	1 700
应力控制值/MPa	第 3 类临时墩(L5、L6)	1 900
	钢箱梁整体应力(Q345qD)	160
	导梁(Q235B)	182
强迫位移/cm	各支点	10

### 2.4 滑道顶面标高调整方案

根据试算法和单步模数搜索合成法,支点标高模数取 1 cm,单步模数搜索策略以反力限值和强迫位移限值进行控制(单步模数调整方案确定后,以钢

箱梁、导梁应力进行校核),确定顶推过程中各处滑道顶面标高调整方案,包括调整时机(对应的计算工

况)及调整量(见表3)。由于顶推到位后需进行落梁,最终目标各支点强迫位移值未置零。

表3 滑道顶面标高调整方案

方案编号	工况号	滑道标高调整量/cm								
		A1	A2	A3	L1	L2	L3	L4	L5	L6
	初始预抬值	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	34	10								
2	64	8	7							
3	91	10	8							
4	105	4	5	7						
5	132		10	7						
6	146			4	8					
7	174	-7		8	8					
8	189	-8		2						
9	203	-8	-2	4	5	5				
10	217	-5	-9		4					
11	231		-8		6	7				
12	246		-7	-4		6				
13	260		-4	-5	4	4	2			
14	273		2	-5		5	3			
15	284		2	-2			2			
16	293		2	-4	-5	3	5			
17	304			-1	-2	1	1			
18	308			-1	-4	2	2			
19	314				-2	2	4			
20	318				-4	2	5	1		
21	324				-4	2	4	3		
22	332				-4	-4	4	4		
23	342					-4	4	2		
24	352					-6	4	3		
25	361					-4	2	2		
26	368				1	-2	1	1		
27	379				1	-3	-2	3		
28	386				-1	-2	-4	4		
29	394				-1	-3	-7	6	3	
30	402						-6	5	3	
31	411						-8	4	4	
32	434					-1	-6	-3	9	
33	448							-5	6	
34	458							-8	8	2
35	472							-6	6	4
36	485							-6	4	4

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 各支墩支反力分析

各支墩的支反力不仅是步履式顶推顶升力和顶

推力的重要控制指标,还是顶推施工中影响结构安全的关键控制因素,影响支墩和钢箱梁的应力与稳定。因此,将各支墩的支反力作为顶推施工的重要控制参数。

如图5所示,钢箱梁处于扩大平台位置时,各平台支点受力较小;而当主梁顶推处于各临时墩上时,各支墩反力较大。因钢箱梁按变曲率竖曲线无应力线形拼装后再进行顶推,支反力变化较频繁,且每次支点标高调整均会导致该支点和相邻支点的支反力突变。顶推过程中,除临时墩L4支反力稍微超出限值外(控制值1700 t,计算值1706 t),其他支点的支反力均在限值范围内,支墩受力安全。

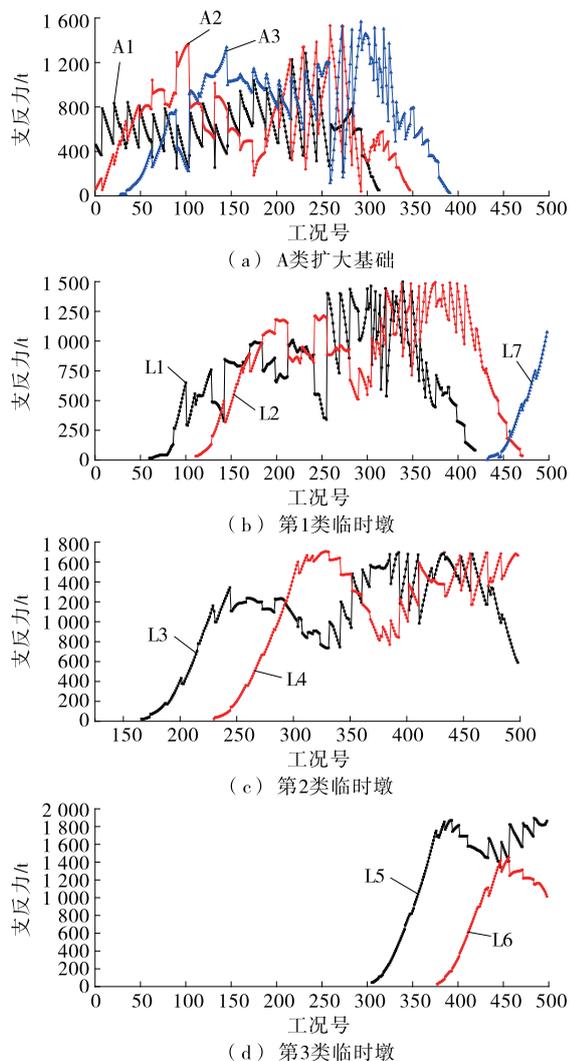


图5 各支点支反力变化趋势

### 3.2 梁体整体应力分析

随着顶推的推进,顶推结构的受力体系不断变化,导致主梁内力与应力变化。钢箱梁顶推计算中,忽略轴力、剪力及剪力滞对整体应力的影响,近似将弯矩引起的正应力作为整体应力。顶推过程中钢箱梁、前导梁和后导梁弯曲正应力变化趋势见图6~8。由图6~8可知,钢箱梁的应力处在较安全的范围内,导梁只有在与墩接触时应力水平较高但在限

值(182 MPa)以内,其余工况下其应力水平均较低。钢箱梁、前导梁、后导梁的应力极值分别为82.8、168.9、131.9 MPa,梁体弯曲应力均未超出限值,顶推过程中梁体整体受力安全。

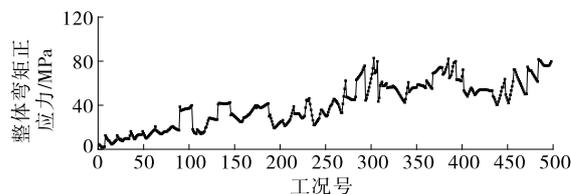


图6 钢箱梁弯曲正应力极值变化趋势

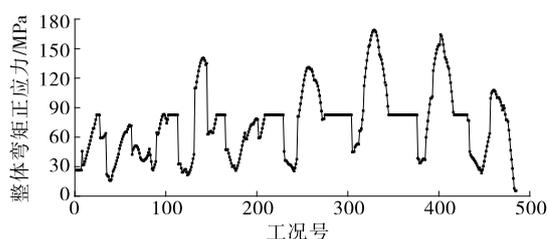


图7 前导梁弯曲正应力极值变化趋势

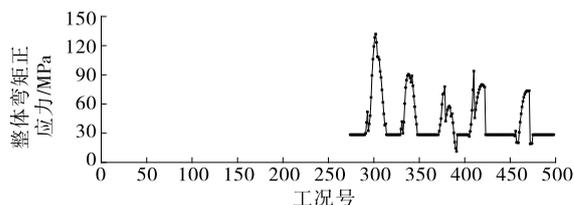


图8 后导梁弯曲正应力极值变化趋势

## 4 滑道标高调整量误差影响分析

在变曲率竖曲线钢箱梁步履式顶推过程中,滑道顶面标高在标高调整、落梁过程中均会有一定偏差,这种高差类似于支座的不均匀沉降,会使梁体产生变形,引起梁体应力发生变化。此外,标高误差还会引起支点反力重新分配,影响顶推结构的受力安全。因此,选择合适的支点顶面标高调整精度对顶推安全至关重要。

考虑到L5、L6处于顶推最大跨径,且L5、L6为最高支墩(49.26 m),选取钢箱梁与L5、L6墩接触时且标高调整量呈一定梯度的3个典型标高调整工况(见表4,为方便描述,分别将305、361、411工况命名为DXGK1、DXGK2、DXGK3),分析各支点反力、梁体整体应力对标高调整量的敏感性,得出标高调整和顶升过程中各支墩顶面滑道标高调整精度的安全阈值。

表4 典型标高调整工况

方案编号	工况号	工况描述	滑道标高调整量/cm				
			L1	L2	L3	L4	L5
26	368	前导梁距 L6 墩 8 m	1	-2	1	1	
25	361	前导梁距 L6 墩 15 m		-4	2	2	
31	411	前导梁上 L6 后 31 m			-8	4	4

4.1 对梁体整体应力极值的影响分析

3种典型工况下滑道标高调整前后梁体整体应力极值变化见表5。由表5可知:前导梁、后导梁未与支墩接触时,其应力极值对标高调整量不敏感(如DXGK1、DXGK2);而当前导梁、后导梁与支墩接触时,后导梁的应力极值对支点标高的调整量较敏感,但前导梁应力极值变化较小(如DXGK3)。DXGK3中,L3支墩滑道顶面标高减小8cm,处于L1支墩上的后导梁应力极值减小48MPa,下降51.2%,此时前导梁与L6接触位置距根部17m,但最大应力仍处于根部,且变化较小;钢箱梁极值应力对标高调整量较敏感,在某些工况下,钢箱梁应力极值所处位置会随着标高调整而变化,但应力极值波动不大,如DXGK1,L3支点顶面标高增加1cm,钢箱梁最大应力增加14MPa,增大25%。综上,梁体整体应力处于安全范围,钢箱梁应力对标高调整量较敏感,顶推时应严格控制同步。

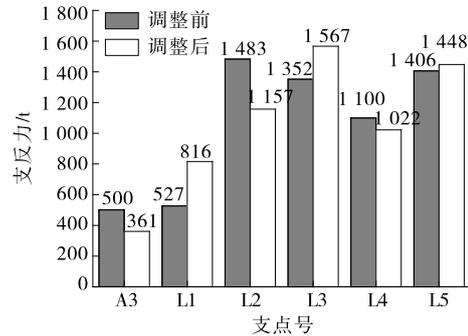
表5 典型标高调整工况下梁体应力极值

工况	调整前	应力极值/MPa		
		前导梁	钢箱梁	后导梁
DXGK1	调整前	82.6	55.1	28.5
	调整后	82.6	69.4	28.5
DXGK2	调整前	82.6	58.4	28.5
	调整后	82.6	58.8	28.5
DXGK3	调整前	131.9	55.7	93.8
	调整后	129.8	54.1	45.8

4.2 对支墩支反力的影响分析

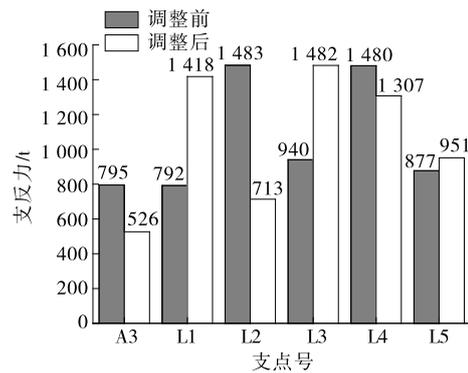
图9~11为3种典型工况下滑道标高调整前后各受力支墩支反力的变化情况。由图9~11可知:DXGK1中,对L1、L3墩上调1cm,而相邻L2墩下调2cm,导致L2反力减小326t、L1墩支反力增加289t(增大54.8%)、L3墩支反力增加215t(增大20%);DXGK2中,对L2墩下调4cm,导致L2墩反力减小770t、L1墩支反力增加626t(增大85.8%);DXGK3中,对L3墩下调8cm,导致L3墩支反力减小689t、相邻L2墩支反力增加487t(增

大50%)。



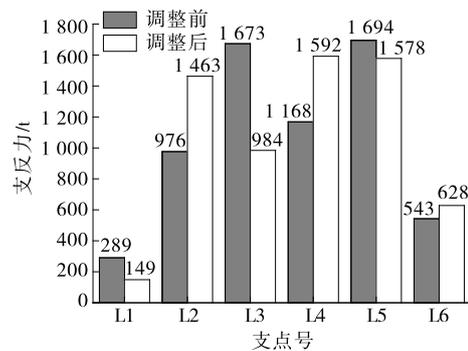
L1、L3、L4墩标高中调1cm;L2墩标高下调2cm。

图9 DXGK1标高调整前后支反力变化



L2墩标高下调4cm,L3、L4墩标高中调2cm。

图10 DXGK2标高调整前后支反力变化



L3墩标高下调8cm;L4、L5墩标高中调4cm。

图11 DXGK3标高调整前后支反力变化

综上,各支墩顶面标高调整对相邻支墩支反力的影响较大,而对相隔较远支墩支反力的影响较小;支反力对标高调整量很敏感,标高调整精度宜控制在5mm以内;考虑到各支点反力对标高调整量的敏感性,调整工况出现多个位置同时调整或顶推到位的落梁过程中,各支点调整应分级(如1~2cm为一级)同步进行。

(下转第125页)

时,与 240 °C 时相比,3 种沥青的滞后角分别下降约 4.8%、2.8% 和 3.4%。

拌和温度升高对沥青混合料的影响主要是促进沥青老化,对沥青组分进行转移,使沥青质增加,轻质组分、改性剂等进一步挥发。对于 GA 沥青混合料,较高的拌和温度直接促进沥青老化,影响 SBS 改性剂对沥青性能的改善作用,表现为疲劳性能降低。因此,施工过程中在考虑 GA 沥青混合料拌和工作性、流动性的同时应降低或严格控制温度,避免温度过高劣化其疲劳特性。

### 3 结论

(1) 沥青用量对 GA 沥青混合料的劲度模量、疲劳加载次数及滞后角等指标存在显著影响,随沥青用量增加,劲度模量下降,破坏时的疲劳加载次数和滞后角增加。在最佳油石比范围内,采用沥青用量的上限有助于延长 GA 沥青混合料的疲劳寿命,否则会劣化其抗疲劳特性。

(2) 应变水平对 GA 沥青混合料的劲度模量和加载疲劳次数存在显著劣化作用,随应变水平增加,劲度模量和加载次数下降,劣化了其疲劳寿命。其中 AH70<sup>#</sup> + TLA + SBS 沥青受应变水平的影响最大,AH30<sup>#</sup> + TLA + SBS 沥青次之,PMB25 最小。

(3) 随拌和温度增加,GA 沥青混合料的劲度

模量逐渐增加,滞后角下降,提高了劲度模量受加载次数影响的敏感性,降低了混合料的疲劳寿命。180 ~ 240 °C 时温度变化对滞后角的影响更显著,240 ~ 260 °C 时滞后角变化较平缓。建议施工过程中考虑拌和料工作性、流动性的同时降低拌和温度,避免温度过高劣化 GA 沥青混合料的使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 张文,蒋福山,刘新平,等.浇筑式混凝土高性能高粘沥青材料的试验研究[J].中外公路,2013,33(3).
- [2] 薛听,王民,张华.浇筑式沥青混凝土在钢桥面铺装中的应用现状[J].公路交通技术,2011(5).
- [3] 万涛涛,邹桂莲.国外浇筑式钢桥面铺装方案在中国的应用探究[J].公路与汽运,2012(5).
- [4] 向源,赵新美,闫东波.浇筑式沥青混凝土高温稳定性影响因素分析[J].中外公路,2009,29(5).
- [5] 聂文,张肖宁,吴志勇.不同工艺对浇筑式沥青混合料疲劳性能的影响[J].交通科学与工程,2013,29(4).
- [6] JTG E20-2011.公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S].
- [7] 郝增恒.微观尺度下浇筑式沥青混合料超热老化机理[J].建筑材料学报,2013,16(3).
- [8] 王民.橡胶粉复合改性沥青浇筑式沥青混凝土性能研究[J].交通科学与工程,2012,28(1).

收稿日期:2018-08-06

\*\*\*\*\*  
(上接第 120 页)

### 5 结论

(1) 单步模数搜索合成法确定的支点标高调整方案可满足泸州沱江四桥变曲率竖曲线钢箱梁步履式顶推的要求,除临时墩 L4 支反力稍微超出限值(控制值 1 700 t,计算值 1 706 t)外,其他支反力均在限值以内;顶推梁弯曲应力均未超出限值,滑道初始标高及滑道标高调整方案可行。

(2) 支点反力对标高调整量很敏感,标高调整中滑道标高的调整精度宜控制在 5 mm 以内。

(3) 考虑到支点反力对标高调整量的敏感性,当调整工况中出现多个位置同时调整时,各支点调整应分级(如 1~2 cm 为一级)同步进行。

### 参考文献:

- [1] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学报,2016,29(2).
- [2] 胡志坚,孔祥韶,吴卫国.九堡大桥顶推施工模型试验

- [J].公路交通科技,2012,29(1).
- [3] 谢祺.步履式顶推施工工艺对钢箱梁局部受力的分析研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [4] 李传习,王俊,董创文,等.联合 ANSYS 与 MATLAB 进行钢箱梁顶推施工仿真优化[J].交通与计算机,2008,26(6).
- [5] 王娣,梅秀道.顶推施工算法及临时墩支座标高调整优化[J].世界桥梁,2010(3).
- [6] 崔清强.复杂预制线形钢箱梁顶推计算分析[J].桥梁建设,2009(6).
- [7] 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).
- [8] 张玉平,董创文.江东大桥双塔单跨空间主缆自锚式悬索桥的施工控制[J].公路交通科技,2010,27(7).
- [9] 董创文.钢箱梁顶推关键问题研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [10] 张晔芝,谢晓慧.铁路特大桥钢箱梁顶推过程受力分析及改善方法[J].中国铁道科学,2009,30(3).

收稿日期:2018-03-16