

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202203022024061998

文章编号:1674-599X(2024)03-0056-09

引用格式:冯浩轩,裴必达,李传习.钢箱拱桥斜拉扣挂施工法拆索工序研究[J].交通科学与工程,2024,40(3):56-64.

Citation: FENG Haoxuan, PEI Bida, LI Chuanxi. Research on the cable removal procedure of the cable-stayed fastening construction method of the steel box arch bridge[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 56-64.

钢箱拱桥斜拉扣挂施工法拆索工序研究

冯浩轩,裴必达,李传习

(长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘 要:斜拉扣挂体系钢箱拱桥拱肋合龙后需进行拆索工作,拆索时桥梁各构件均会产生应力变化从而影响结构安全性。为探究钢箱拱桥合理的拆索顺序及拆索时可能出现的极限不对称状态,以车田江大桥为实际工程背景,建立有限元模型,分别模拟四种拆索方案对拱肋应力及位移的影响。发现当从拱顶向拱脚依次拆索时,扣索索力的增幅最小;相反,若从拱脚向拱顶依次拆索,则会导致拱肋的竖向位移和应力极值达到最大。因此,从拱顶向拱脚依次拆索的方案最符合实际需求。采用Midas/Civil软件对几种极限不对称拆索状态进行模拟,结果表明:扣索、背索的拆除应尽量同步进行,以确保结构稳定。同时,两岸的拆索进度差异以及左右两幅的拆索进度差异都应控制在1束索以内,以减小对桥梁结构的不利影响。

关键词:斜拉扣挂工艺;钢箱提篮拱桥;扣索;背索;拆除顺序;不对称拆索;有限元模型

中图分类号:U443.32

文献标志码:A

Research on the cable removal procedure of the cable-stayed fastening construction method of the steel box arch bridge

FENG Haoxuan, PEI Bida, LI Chuanxi

(Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The cable of the cable-stayed buckle-and-hang system needs to be removed after the arch rib is closed. Various changes will occur to the bridge components during cable removal, affecting structural safety. To explore the optimal cable removal sequence for a steel box arch bridge and the possible extreme asymmetric states during cable removal, this study used the Chetianjiang Bridge as a case study. A finite element model was established to calculate the effects of four different cable removal schemes on the arch rib. The results indicate that removing cables sequentially from the vault to the arch foot minimizes the increase in cable force. Conversely, removing cables from the arch foot to the vault results in the maximum vertical displacement and stress extreme values in the arch rib. Therefore, the most suitable sequence for meeting construction requirements is to remove the cables from the top of the vault to the foot of the arch. Using Midas/Civil software, several extreme asymmetric cable removal states are simulated and analyzed. The findings suggest that the removal of the backstay cables should be synchronized as much as possible to ensure structural stability. Additionally, the removal progress of the cables on both sides and the difference in removal progress between the left and right spans should be controlled within one cable bundle to minimize adverse impacts on the bridge structure.

Key words: cable-stayed buckle-and-hang technique; steel box basket-handle arch bridge; backstay cable removal sequence; asymmetric cable removal; finite element model

收稿日期:2022-03-02

通信作者:冯浩轩(1998—),男,硕士研究生,主要从事桥梁监控方面的研究工作。E-mail:1156589829@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

在现代桥梁建筑领域中,钢拱桥因其刚度较大的特性而备受青睐^[1-2]。钢拱桥的施工方法多种多样,基于拱肋施工方式的不同,可以细分为支架法、劲性骨架法、悬臂施工法、转体法以及缆索吊装法五大类^[3-4]。对于那些采用缆索吊装结合斜拉扣挂施工工艺的拱桥,一旦主拱完成合龙,紧接着就需要进行扣索的拆除工作。这一过程对于确保桥梁的稳定和安全至关重要。

张依濛^[5]使用ANSYS软件分析对比了4种拆索顺序对扣索索力、拱圈弯矩及竖向变形的影响。结果表明:从拱脚至拱顶依次拆索的施工方式产生的弯矩值与一次成拱的施工方式产生的弯矩值差异最小,但对索力增幅的影响最大,因此拆索时应关注扣索索力值增大可能导致的安全储备问题。任运豪等^[6]与刘宇飞等^[7]分别分析了来宾市马滩红水河特大桥几种拆索方案,指出不同拆索顺序仅对扣索拆除过程中的拱肋受力及线形产生影响。杨金龙等^[8]结合扣挂技术和支架节段现浇技术,对扣索拆除的施工方案进行了分析论证,结果表明:从上至下拆除扣索时线形变化较小,能有效降低施工时桥梁线形控制的难度。曹宇^[9]指出主拱圈合龙完成且拱脚固结后,扣索及背索拆除顺序对拱肋最终成拱线形及内力状态无影响。在扣索拆除过程中,扣索索力、主拱圈截面内力以及结构变形均会随之发生动态变化。采用合理的拆索顺序,可以确保拆索过程中拱圈的内力变化更为平稳,从而保障施工安全。然而,在实际施工中,由于现场条件的限制,桥梁有时可能面临不对称拆索的情况,这会导致拱肋受力也呈现不对称状态。因此,深入探究不同拆索顺序对钢箱拱桥斜拉扣挂体系的影响,以及不对称拆索条件下的应力极限状态,对于此类桥梁的施工控制具有重要的意义。本文以车田江大桥为工程背景,研究扣索拆除顺序对钢箱拱桥主拱内力、位移及扣索索力的影响,并由此分析出最合理的拆索顺序。同时,初步探讨斜拉扣挂体系不对称拆索的应力极限状态,为同类型桥梁施工提供参考。

1 工程背景

车田江大桥位于湖南省新化县,其主桥为中承式钢箱提篮拱桥,主跨跨径为280.00 m,铅垂面投影矢高为64.00 m,矢跨比为1:4.375,拱肋向内侧的倾斜角度为10°;拱轴线线形为二次抛物线,拱轴线两

侧拱顶处横桥向距离为13.83 m,拱脚处横桥向距离为36.40 m;拱肋采用矩形变截面,材料选用Q420qD钢材;顶、底板宽度均为2.56 m,拱箱横向宽度为2.50 m;拱脚处拱肋高度为5.00 m,拱顶处拱肋高度为2.50 m,拱肋高度呈线性变化。考虑到制造和运输条件,拱肋在工厂完成预制,共分为78个节段(单侧39个)。各拱肋节段从拱顶向拱底依次编号为GLA、GLB(GLB')、GLC(GLC'),以此类推至GLT(GLT'),如图1所示。安装拱肋时,较重的GLR(GLR')、GLS(GLS')、GLT(GLT')节段单独吊装,其余相邻两个节段均拼装成一个吊装段进行吊装,最后再吊装合龙段。

缆索吊主要由主承重索(后文简称为主缆)、起重索、牵引索、支索器、跑车、塔顶索鞍、锚固系统等组成。根据桥梁的具体特点,在主跨两侧搭设吊扣塔(扣塔、吊塔合二为一),吊扣塔上安装索鞍。缆索吊跨径为(100+400+100) m,支点分别设置在两岸的锚碇和扣塔上,左、右两幅区域各配备了两组工作索。在左、右两幅区域中,各自布置了一组主缆。每一组主缆均由10根 $\varnothing 54$ mm的钢丝绳组成(规格为6*36WS+IWR-1960),确保了系统的稳固性和承载力。扣塔总高为94.25 m,横桥向宽度为37.40 m,扣塔立柱、平联均采用外径为630 mm、壁厚为8 mm的钢管(Q345材质);该桥两岸均设置9对扣索及背索,从下至上依次编号为1#~9#扣索及背索,扣索及背索均由 $\varnothing 15.24$ mm低松弛高强度钢绞线束组成,在锚固端,采用了群锚夹片工作锚和P型挤压锚进行固定。扣索的张拉端被设置在扣塔上,而拱肋和地锚处则设置了锚固端。张拉端由锚梁、锚座、工作锚具以及张拉机具等部件构成。扣索的拆除工作在张拉端完成,通过张拉机具,可以实现扣索及背索的同步卸载,直至索力完全归零。总体布置如图2所示。

2 拆索顺序划分及有限元模型

2.1 拆索顺序划分

考虑到实际拆索时的便捷性和经济性,应尽量减少跨越多根索进行拆索的操作,以避免施工人员在拆索时需要在多个拆索点之间往返施工。基于此,本文选取了四种既便捷又符合工程需求的拆索方案进行比较。具体方案如表1所示。此外,将一次拆索完成的方案设置为对照组以便进行对比。



图1 拱肋节段划分图
Fig. 1 Arch rib segment division diagram

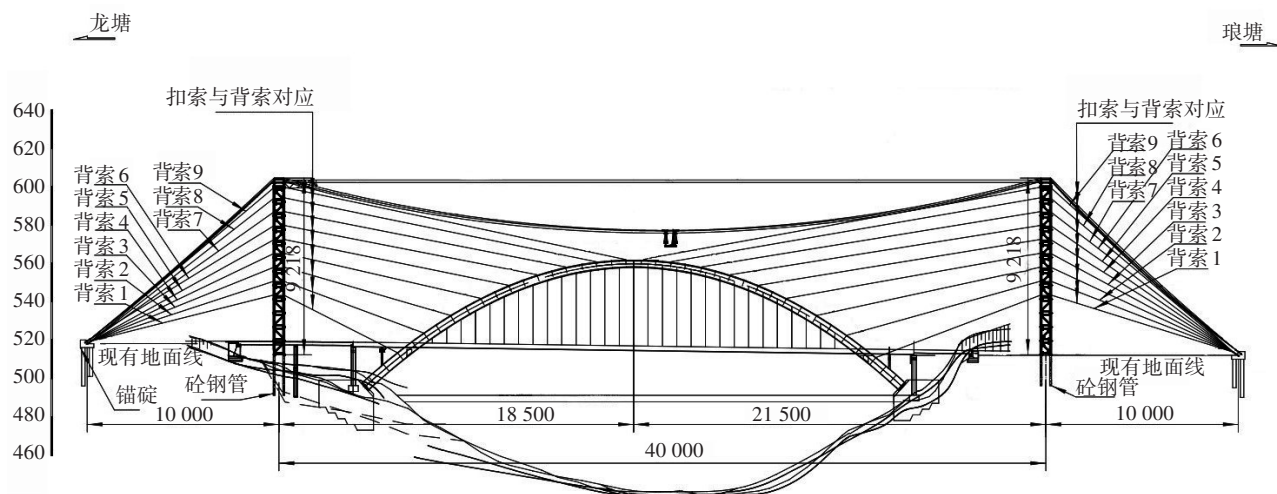


图2 桥梁总体布置图(单位: cm)
Fig. 2 Bridge overall layout (unit: cm)

表1 拆索方案

Table 1 Cable removal scheme

拆索顺序	
方案一	1#索、2#索、3#索、4#索、5#索、6#索、7#索、8#索、9#索
方案二	9#索、8#索、7#索、6#索、5#索、4#索、3#索、2#索、1#索
方案三	1#索、3#索、5#索、7#索、9#索、2#索、4#索、6#索、8#索
方案四	9#索、7#索、5#索、3#索、1#索、8#索、6#索、4#索、2#索
对照组	一次拆索完成

2.2 有限元模型

根据该桥设计图纸,采用Midas/Civil软件建立全桥杆系有限元模型,对施工步骤进行详细划分,有限元模型如图3所示。该模型共包含1 270个节点和1 956个单元,其中有1 574个梁单元,324个板单元,58个桁架单元。主索采用梁单元进行模拟,材料选用 $\varnothing 54$ mm钢丝绳;风缆索、扣索、背索则采用桁架单元进行模拟,材料选用Steel Strand 1960钢绞线(弹性模量为 1.95×10^5 MPa,设计抗拉强度为1 260 MPa)。桥面板采用板单元进行模拟,材料选用C60混凝土(弹性模量为 3.60×10^4 MPa)。其他

部分(如拱肋、扣塔)则采用梁单元进行模拟,其中扣塔材料选用Q345钢材,拱肋材料选用Q420钢材,这两种钢材的弹性模量均为 2.06×10^5 MPa。

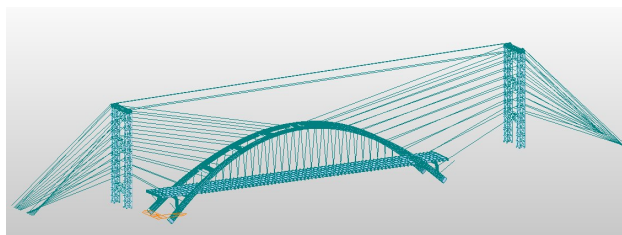


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

3 不同拆索顺序差异

采用斜拉扣挂施工的钢箱拱桥通常在主拱完成合龙后再进行扣索拆除,扣索拆除完毕后,才会进行后续施工。因此,本文主要选取拱肋跨径8等分点处的应力、位移作为分析对象,分析不同的拆索顺序对拱肋产生的影响。由于在拆索完成后,四种拆索方案及对照组的永久结构无应力构形并未

发生改变,因此结构拆索完成后的最终状态是一致的。基于此,重点分析了拆索过程中拱肋应力、拱肋竖向位移、扣索索力大小及其增幅的差异性。

3.1 拱肋应力

从有限元模型的计算结果来看,拆索过程中拱肋的受力情况基本以左右幅拱顶连线中点为中心,呈现出中心对称的状态。故选取如图4所示的5个参考截面作为分析对象(均为主拱跨径8等分处的单元),分别计算出四种方案拆索前后与拆索过程中各参考截面上下缘应力较大值,以及整个拱肋的最大应力值,模型计算结果如图5所示。从图5可以看出,不同拆索顺序下各参考截面的拱肋应力存在显著差别。在方案一的拆索过程中,拱肋1/8跨、1/4跨、跨中处产生的应力明显比其他方案的大。除拱肋跨径8等分处的参考截面应力外,还对拆索各步骤中拱肋应力极值进行了对比,如图5(f)所示,方案一在拆索过程中出现的拱肋应力极值的绝对值也比其他几种方案的大。方案三在拆索过程中拱肋应力极值的绝对值比其他三种方案的低。在拆索过程的前4个步骤中,方案二的拱肋应力极值的绝对值比方案一的大,拆索过程的后5个步骤则刚好相反。方案一在拆索过程中拱肋应力极值(-84.1 MPa)的绝对值超过了拆索完成阶段拱肋应力极值(-73.0 MPa),其他三个方案均不存在此种情况。从模型计算结果来看,四种拆索方案拱肋应力由大到小的排序为:方案一、方案二、方案四、方案三。

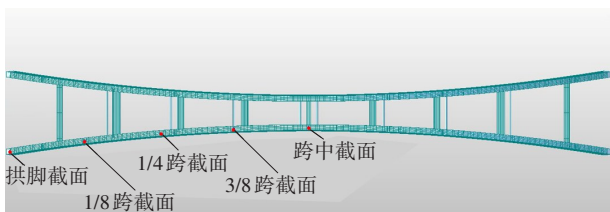


图4 参考截面具体位置

Fig. 4 Specific location of reference section

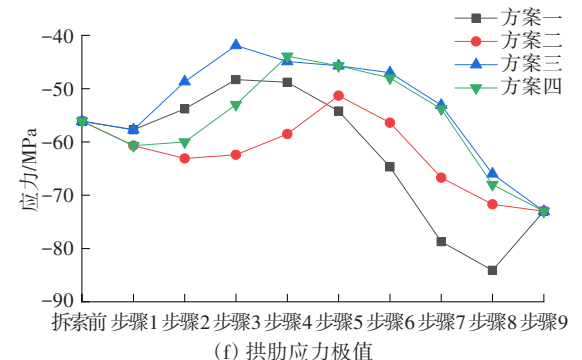
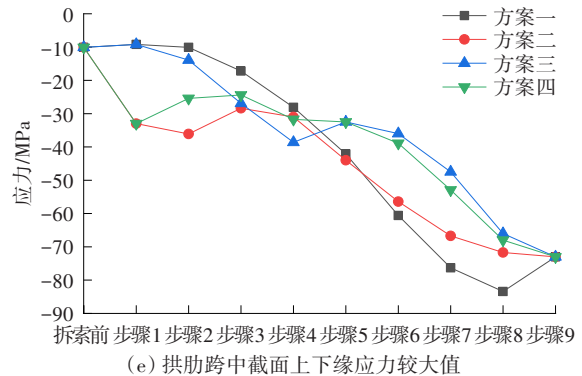
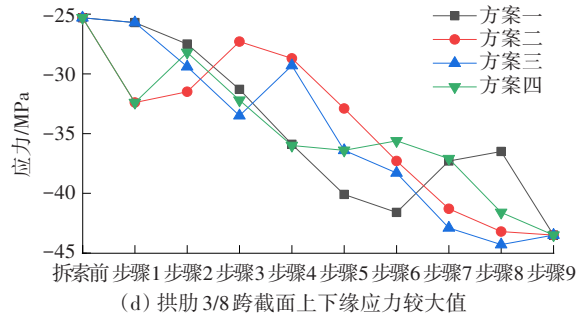
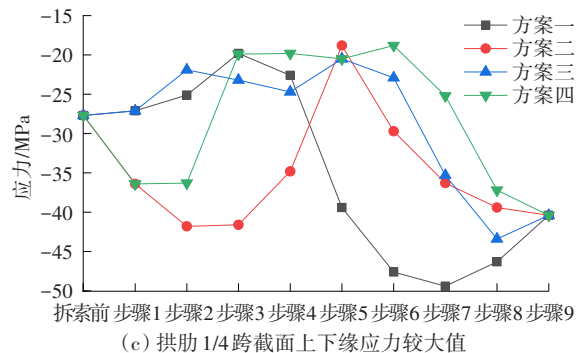
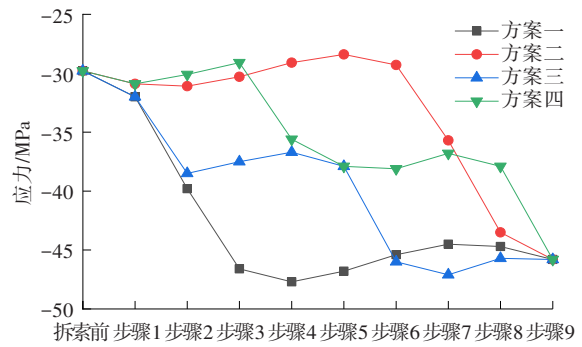
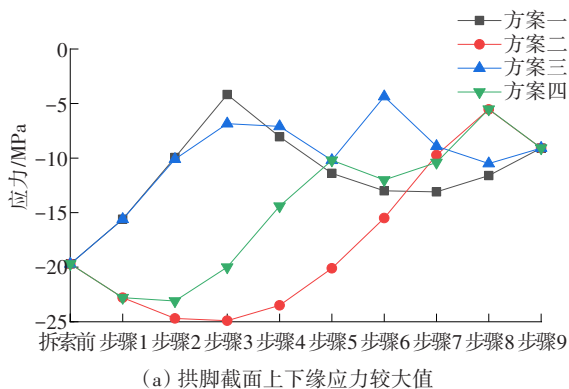
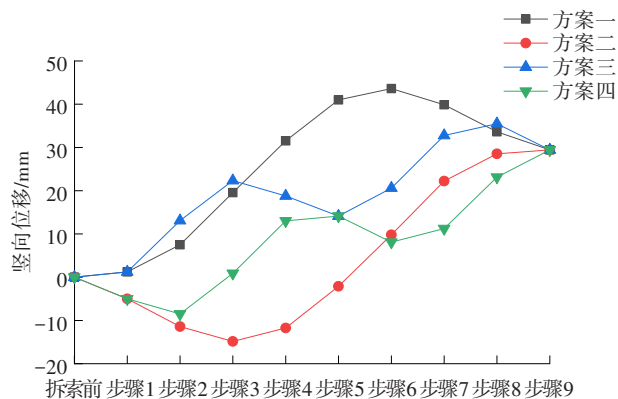
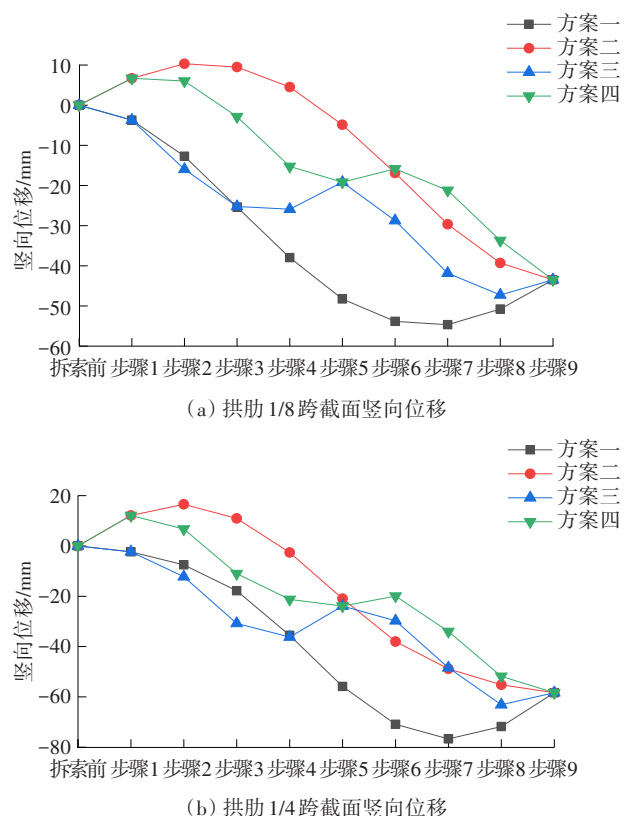


图5 各参考截面应力计算结果

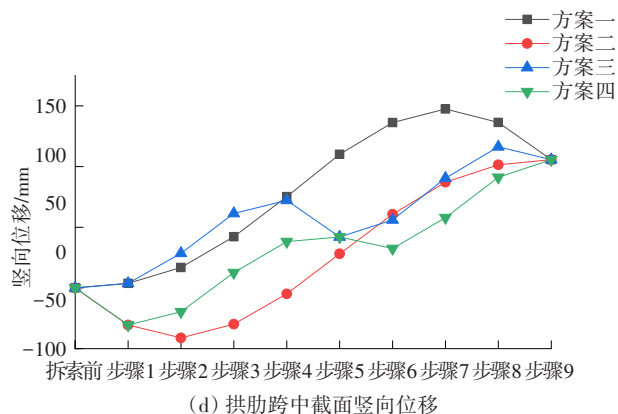
Fig. 5 Stress results of reference sections

3.2 拱肋竖向位移

在实际施工控制过程中,通常采用“控制线形为主、应力为辅”的原则^[10-12],因此扣索拆除过程中也应尽量减小拱肋变形,避免拆索过程中拱肋线形与理想线形偏离过大。为分析四种拆索方案的拱肋竖向位移差异,分别提取了四种方案拆索过程中拱肋1/8跨截面、1/4跨截面、3/8跨截面、跨中截面处节点的竖向位移(定义拆索前拱肋的竖向位移为0 mm),结果如图6所示。由图6可以看出,虽然四种方案拆索过程中各步骤的竖向位移存在差异,但四种方案拆索完成后与拆索前的竖向位移变化量一致。整体趋势表现为:靠近边跨位置,拱肋竖向位移减小;靠近跨中位置,拱肋竖向位移增大。另外,方案一、方案三拆索过程中的竖向位移相较于方案二、方案四的更大,方案一拆索过程中的竖向位移变化量甚至超过了拆索完成时的竖向位移。方案二、方案四在拆索过程中的前几个步骤中存在与拆索完成时竖向位移相反的位移。如图6(d)中的步骤2所示,方案二相对于初始位置的反向位移最大差值为-41.2 mm,该截面最终理论竖向位移为105.7 mm。针对不同拆索方案各步骤中的拱肋竖向位移进行分析,便于施工人员识别桥梁异常状况,确保施工安全。此外,方案二所采用的从上至下的拆索顺序,不仅在实际操作中更为便捷,而且还能有效地缩短施工时间,因此更加符合实际施工的需求。



(c) 拱肋 3/8 跨截面竖向位移



(d) 拱肋跨中截面竖向位移

图6 各控制截面竖向位移变化

Fig. 6 Changes in vertical displacement of control sections

3.3 扣索索力

拆索阶段,扣索索力的变化应遵循“过程可控,不利索力最小化”的原则。为了深入分析四种不同拆索方案对不利索力的影响,分别模拟了这四种方案在拆索过程中,每根索在拆索前的索力初始值、拆索中的索力最大值,以及索力的相应增幅。具体结果如表2所示。由表2可知,方案一、方案三、方案四均出现索力增幅较大的情况,其中方案三的最大增幅为6.6%。四种方案下扣索索力增幅最大值如图7所示。由图7可知,采用方案二时,各扣索拆索过程中索力增幅较小,最大索力增幅为1.3%,对应扣索编号为小里程侧2#扣索。在实际施工过程中,虽然各扣索都会考虑安全系数储备,但为了确保拆索过程的安全和可靠,应尽量避免索力出现大幅度的增长。在四种备选方案中,方案二最能满足索力增幅尽可能小的要求。

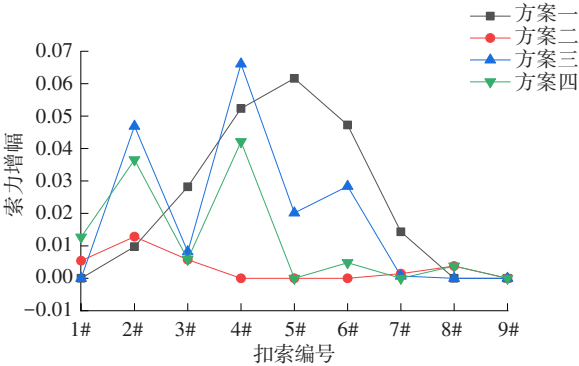
3.4 实际拆索工序

通过对比四种方案的模拟结果,最终选取从9#索至1#索依次拆除的方案进行施工。在部分拆索步骤完成后,采集了剩余扣索的索力数据,并将其与通过有限元模型提取的理论索力进行了对比。

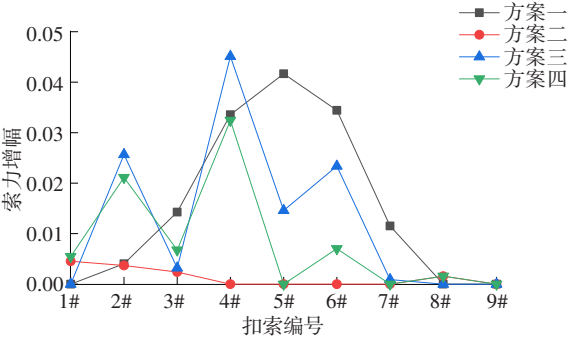
表 2 各扣索初始索力、索力最大值及增幅

Table 2 Initial, maximum and increased force values of cables

扣索编号		初始索力/ kN	方案一		方案二		方案三		方案四	
			最大值/kN	增幅/%	最大值/kN	增幅/%	最大值/kN	增幅/%	最大值/kN	增幅/%
小里程	1#	619.9	619.9	0.0	623.3	0.5	619.9	0.0	627.8	1.3
	2#	669.6	676.1	1.0	678.2	1.3	701.0	4.7	694.0	3.6
	3#	695.6	715.2	2.8	699.6	0.6	701.3	0.8	699.6	0.6
	4#	731.2	769.5	5.2	731.2	0.0	779.5	6.6	762.0	4.2
	5#	767.4	814.7	6.2	767.4	0.0	782.9	2.0	767.4	0.0
	6#	775.8	812.4	4.7	775.8	0.0	797.8	2.8	779.5	0.5
	7#	867.7	880.2	1.4	869.0	0.1	868.3	0.1	867.7	0.0
	8#	1 051.2	1 051.2	0.0	1 055.2	0.4	1 051.2	0.0	1 055.2	0.4
	9#	1 203.5	1 203.5	0.0	1 203.5	0.0	1 203.5	0.0	1 203.5	0.0
大里程	1#	658.3	658.3	0.0	661.3	0.5	658.3	0.0	661.9	0.5
	2#	753.8	756.8	0.4	756.6	0.4	773.1	2.6	769.7	2.1
	3#	800.5	811.9	1.4	802.4	0.2	803.0	0.3	805.9	0.7
	4#	793.6	820.3	3.4	793.6	0.0	829.5	4.5	819.4	3.3
	5#	831.5	866.1	4.2	831.5	0.0	843.6	1.5	831.5	0.0
	6#	825.2	853.6	3.4	825.2	0.0	844.5	2.3	831.0	0.7
	7#	919.2	929.8	1.2	919.2	0.0	920.0	0.1	919.2	0.0
	8#	1 108.5	1 108.5	0.0	1 110.3	0.2	1 108.5	0.0	1 110.3	0.2
	9#	1 291.0	1 291.0	0.0	1 291.0	0.0	1 291.0	0.0	1 291.0	0.0



(a) 小里程侧扣索



(b) 大里程侧扣索

图 7 不同方案下各扣索增幅最大值

Fig. 7 Maximum values of increased forces under different schemes

对比结果如表 3 所示。从表中的数据可以看出,模型模拟值与实测结果基本吻合。

4 不对称拆索分析

实际施工时无法像模型中一样实现完全同步拆除大小里程侧背索及左右幅扣索、背索,因此需进行不对称拆索分析。下面分别对以下三种不对称拆索情况进行有限元建模并分析计算结果:1) 扣索、背索不对称拆除(先完全拆除某扣索再拆对应背索);2) 左右幅索不对称拆除(先拆除左幅某对扣

索、背索再拆除右幅对应扣索、背索);3) 大小里程索不对称拆除(先拆除小里程侧某对扣索、背索,再拆除大里程侧对应扣索、背索)。

三种不对称拆索情况下的塔顶水平位移、拱肋应力极值及拱肋位移极值结果如表 4 所示。7#~9# 扣索分别卸载 50% 索力和一次完全卸载的塔顶水平位移、拱肋应力极值及拱肋位移极值如表 5 及图 8 所示。由结果可看出:1) 对于扣索及背索不对称的拆卸方案而言:当 7#~9# 索一次性完全卸载时,吊扣塔顶水平位移最大值为 191.8 mm,拱肋位移极值为 37.7 mm,而当上述索分两步卸载时,每次卸载

表3 拆索阶段实测索力与理论索力对比

Table 3 Comparison between measured cable force and theoretical cable force during cable removal

扣索编号		8#索拆除完成			6#索拆除完成			4#索拆除完成		
		理论值/kN	实测值/kN	差值比/%	理论值/kN	实测值/kN	差值比/%	理论值/kN	实测值/kN	差值比/%
小里程	1#	621.8	581.5	-6.5	620.0	591.7	-4.6	614.4	542.0	-11.8
	2#	664.2	708.5	6.7	663.9	696.2	4.9	668.1	717.2	7.3
	3#	683.8	727.8	6.4	686.3	738.5	7.6	699.6	711.8	1.7
	4#	715.2	745.8	4.3	720.1	758.0	5.3			
	5#	754.4	769.3	2.0	757.2	792.7	4.7			
	6#	769.2	749.9	-2.5						
	7#	868.8	811.5	-6.6						
大里程	1#	661.3	699.1	5.7	658.1	728.5	10.7	650.4	712.3	9.5
	2#	752.1	756.7	0.6	750.1	776.6	3.5	750.1	775.1	3.3
	3#	794.6	770.0	-3.1	794.5	750.8	-5.5	802.3	821.8	2.4
	4#	785.0	851.3	8.4	785.3	814.2	3.7			
	5#	823.5	865.1	5.1	821.1	872.8	6.3			
	6#	819.9	778.6	-5.0						
	7#	917.1	904.5	-1.4						

表4 不同拆索顺序各因素影响

Table 4 The influence of various factors in different order of cable removal

拆索方案编号		拆索方式	塔顶水平位移/mm	拱肋应力极值/MPa	拱肋位移极值/mm
扣索、背索不对称拆除	1	拆除小里程侧9#扣索	190.1	-61.5	23.4
	2	拆除小里程侧8#、9#扣索	375.8	-71.4	56.5
	3	拆除大里程侧9#扣索	257.1	-63.4	24.5
	4	拆除大里程侧8#、9#扣索	496.5	-73.2	59.4
左右幅索不对称拆除	5	拆除大、小里程左幅9#扣索、背索	2.0	-59.8	20.1
	6	拆除大、小里程左幅8#、9#扣索、背索	2.0	-64.7	26.8
大小里程索不对称拆除	7	拆除小里程左右幅9#扣索、背索	27.4	-67.0	46.9
	8	拆除小里程左右幅8#、9#扣索、背索	54.9	-78.9	96.1

表5 7#~9#扣索不同卸载程度差异对比

Table 5 Comparison among 7#-9# cables with different unloading degrees

索号	卸载程度	塔顶水平位移/mm	拱肋应力极值/MPa	拱肋位移极值/mm
9#扣索	卸载 50%	100.4	-59.7	13.9
	完全卸载	191.8	-62.7	27.0
8#扣索	卸载 50%	98.4	-64.7	16.9
	完全卸载	188.4	-68.1	33.6
7#扣索	卸载 50%	79.4	-66.8	17.4
	完全卸载	175.0	-70.2	37.7

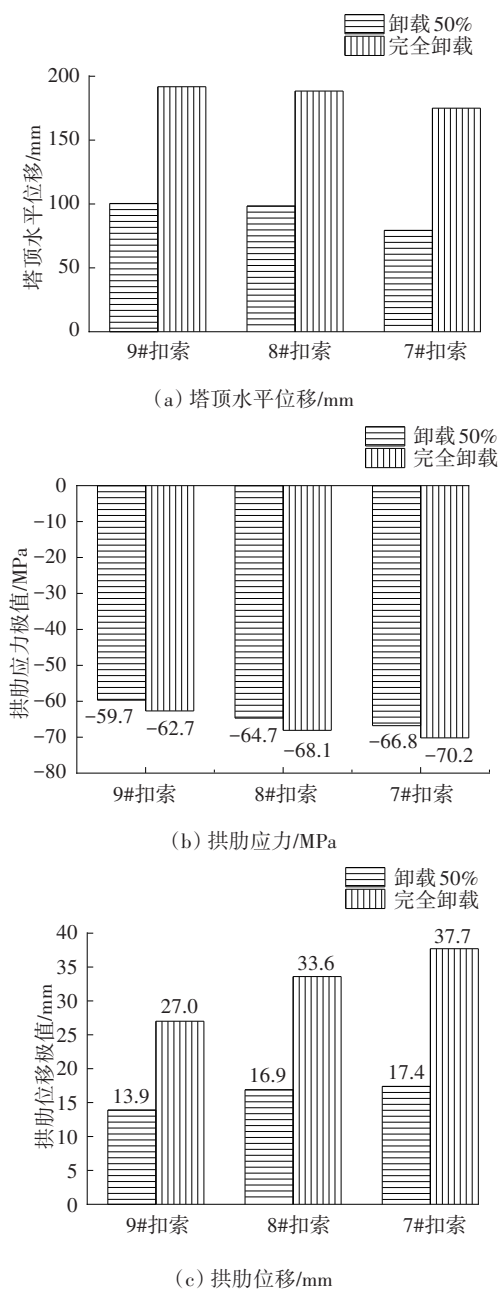


图8 7#~9#扣索不同卸载程度差异对比

Fig. 8 Comparison among 7#-9# cables with different unloading degrees

50%时,塔顶水平位移与拱肋位移较一次完全卸载有明显下降,但两种卸载方式下拱肋应力的差别不大。综上可知:对于索力较大的7#~9#扣索不对称拆除时应分两步卸载,先卸除扣索50%索力,待背索卸除50%索力后再卸除剩余索力。2) 大小里程索不对称拆索时拱肋产生的应力最大,其值为-78.9 MPa;左右幅索不对称拆索时拱肋产生的应力最小,其值为-59.8 MPa。拱肋应力极值出现位置为拱肋1/4跨(近小里程)或拱肋3/4跨(近大里程)。

三种不对称拆索状态下拱肋最大应力差值不大,均在拱肋承载范围内。3) 三种不对称拆索情况中,大小里程不对称拆索时拱肋产生的位移最大,扣索及背索不对称拆除次之,左右幅不对称拆索拱肋位移最小,左右幅索不对称拆除对拱肋位移影响的差异不大,当小里程拆8#、9#索后(大里程未拆除)拱肋位移极值达96.1 mm,因此大小里程索不对称拆除差异应在一束索以内。

5 结论

通过对四种拆索方案建立 Midas/Civil 模型分析计算,研究了采用斜拉扣挂工艺的钢箱拱桥拱肋合龙之后不同拆索顺序下拱肋应力变形情况以及各扣索索力增幅差异,由此分析出合理的拆索顺序。同时对几种扣索不对称拆索状态进行了分析,得到以下结论:

1) 整个拆索过程中,两侧拱脚处截面应力较其他位置更小(拱脚截面较其他位置截面更大且为钢-混凝土组合截面)。拆索前4个步骤,方案二(从上往下拆)拱肋应力极值较其他三种方案更大;拆索后5个步骤,方案一(从下往上拆)拱肋应力极值较其他三种方案更大。综合拱肋几个截面应力数据分析得出,方案一在拆索过程中拱肋应力最大,实际施工应避免该方案。

2) 拱肋竖向位移在拆索前后变化的总体趋势为跨中竖向位移增大,两侧竖向位移减小。从四种拆索方案下拱肋8等分点的竖向位移变化结果可以看出,方案一(从下往上拆)拆索过程中拱肋发生的位移变化远比其他三种方案的大。方案二拆索过程中拱肋竖向位移变化较方案三、四的更为平顺。

3) 从模型计算结果可以得出:方案二(从上往下拆)拆索过程中各扣索索力增幅远比其他三种方案的低,方案一扣索索力增幅总体比其余三种方案的大。实际施工要求索力增幅应尽可能地小,故方案二更符合施工需要。

4) 实际拆索时经常会出现不对称拆索状态,当扣索及背索索力较大时,拆索时应分级卸载以避免扣塔受到过大的不平衡力。同时,大小里程拆索进度不一致时,应注意控制进度差异在一束索以内,以避免拱肋出现过大应力及位移。

参考文献(References):

- [1] 陈康明, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 中日钢拱桥发展现状调查与对比分析[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 88-94. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.03.019.
CHEN Kangming, WU Qingxiong, CHEN Baochun, et al. Investigation and comparative analysis on the development status of steel arch bridges in China and Japan[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(3): 88-94. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.03.019.
- [2] 韩玉, 秦大燕, 郑健. CFST拱桥斜拉扣挂施工优化计算方法[J]. 公路, 2018, 63(1): 100-104.
HAN Yu, QIN Dayan, ZHENG Jian. Optimal calculation method of CFST arch bridge cable-stayed buckle construction[J]. Highway, 2018, 63(1): 100-104.
- [3] 董创文, 廖龙辉, 李传习, 等. 猛洞河大桥斜拉扣挂方案的确定与优化[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 62-69. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.05.011.
DONG Chuangwen, LIAO Longhui, LI Chuanxi, et al. Determination and optimization of stay-cable buckling scheme for Mengdong River bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(5): 62-69. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.05.011.
- [4] 林天然. 大跨度钢箱提篮拱桥施工控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
LIN Tianran. Research on construction control of long-span steel box basket-handle arch bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [5] 张依濛. 不同拆索顺序下钢桁架拱桥受力行为分析[J]. 工程建设, 2020, 52(11): 34-36. DOI: 10.13402/j.gcjs.2020.11.007.
ZHANG Yimeng. The analysis on bearing behavior of steel truss arch bridge under different cable release sequences[J]. Engineering Construction, 2020, 52(11): 34-36. DOI: 10.13402/j.gcjs.2020.11.007.
- [6] 任运豪, 李锐. 扣索拆除顺序对大跨径钢管混凝土拱桥线形的影响研究[J]. 南方农机, 2018, 49(10): 16, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3872.2018.10.014.
REN Yunhao, LI Rui. Study on the influence of cable removal sequence on the alignment of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 16, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3872.2018.10.014.
- [7] 刘宇飞, 李传习, 于孟生, 等. 大跨拱桥拱肋拼装温差效应分析及控制方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.011.
LIU Yufei, LI Chuanxi, YU Mengsheng, et al. Analysis and control method of temperature difference effect in arch rib assembly of large span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.011.
- [8] 杨金龙, 孙琦. 峡谷大跨度空腹式刚构桥关键施工工序分析与实践[J]. 施工技术, 2014, 43(增刊2): 220-222.
YANG Jinlong, SUN Qi. Key construction process analysis and practice of canyon large-span fasting-style rigid frame bridge[J]. Construction Technology, 2014, 43(sup 2): 220-222.
- [9] 曹宇. 钢箱桁架上承式拱桥主拱合龙与拆索施工分析[J]. 黑龙江交通科技, 2011, 34(9): 244-245. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2011.09.227.
CAO Yu. Construction analysis of main arch closure and cable removal of steel box truss deck arch bridge[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2011, 34(9): 244-245. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2011.09.227.
- [10] 杜海龙, 秦大燕, 罗小斌, 等. 超大跨径拱桥施工控制[J]. 公路, 2019, 64(6): 120-125.
DU Hailong, QIN Dayan, LUO Xiaobin, et al. Construction control of super-long-span arch bridge[J]. Highway, 2019, 64(6): 120-125.
- [11] 胡晓勇, 汪大洋, 黄永辉, 等. 某大跨度非对称外倾拱桥施工监测技术研究[J]. 公路, 2021, 66(6): 188-194.
HU Xiaoyong, WANG Dayang, HUANG Yonghui, et al. Study on construction monitoring technology of a long-span asymmetric camber arch bridge[J]. Highway, 2021, 66(6): 188-194.
- [12] 鞠玉财. 贵州木蓬特大桥施工仿真计算及关键技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
JU Yucai. The construction simulation of Guizhou Mupeng super large bridge and the research of the key technology[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.

(责任编辑: 薛仪; 英文编辑: 王佳)