

多塔斜拉桥顶推合龙关键技术研究

肖剑

(中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 由于多塔斜拉桥中间无约束塔的柔性特征, 无约束塔会向中跨位置偏移, 加上主梁施工大多采用悬臂浇筑, 主梁因其自重、砼收缩徐变导致出现较大挠度, 直接影响合龙后成桥线形。为此, 合龙前一般在合龙口两端预先施加一水平方向的推力来抵消无约束塔的偏移, 使成桥线形符合设计及精度要求。文中以汝郴(汝城—郴州)高速公路赤石特大桥为工程背景优化顶推合龙方案, 并对关键施工工艺、顶推监控方式进行阐述, 通过对顶推施工的有效控制, 确保高效、高精度完成合龙施工。

关键词: 桥梁; 多塔斜拉桥; 合龙优化; 顶推施工

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0110-04

大跨度双塔或多塔砼斜拉桥成桥后受砼收缩徐变的影响, 主塔会往跨中方向产生偏位。为使成桥稳定后主塔在恒载作用下保持竖直状态, 施工至主梁阶段需对主塔进行预偏处理。目前, 主塔往边跨预偏主要通过边、中跨的索力差来实现, 会给施工过程中主梁受力带来不利影响。另外, 在确定的成桥目标状态下, 施工索力确定既要满足成桥索力、主梁内力、线形目标, 又要满足塔偏目标, 在成桥后塔偏由于收缩徐变变化较大的情况下, 难以得到满意的施工索力, 即使得到了也会降低成桥目标状态实现的精度。加上多塔斜拉桥主跨存在多个合龙口, 会给后期高精度合龙带来较大难度。为同时满足高精度合龙和预加塔偏的要求, 采用顶推方式增加预偏力, 达到合龙后改善塔偏及减小应力的目标, 确保桥梁在合理期限内的使用安全。该文主要研究顶推方案的优化、顶推关键技术的实施及控制。

1 工程概况

(汝城—郴州)汝郴高速公路赤石特大桥为四塔砼斜拉桥, 总体桥型设计为左幅 4×40 m 连续 T 梁 + (165 + 3×380 + 165) m 斜拉桥 + 16×40 m 连续 T 梁、右幅 4×40 m 连续 T 梁 + (165 + 3×380 + 165) m 斜拉桥 + 15×40 m 连续 T 梁。中间双塔采用墩梁固结, 边塔采用支座, 每个主塔独立布设 23 对斜拉索并呈扇形锚固于上塔柱。主塔外观为曲线收腰形, 主梁采用预应力砼箱梁形式。主跨分为 3 个合龙端, 边跨分为 2 个合龙端, 合龙端长度均为 2.0 m(见图 1)。



图 1 赤石特大桥桥型布置

2 顶推合龙方案

2.1 顶推合龙方案优化

多塔斜拉桥依据施工工序不同, 产生的应力会有变化, 应根据悬臂施工实际工序及监测数据选择合龙方案。该桥施工步骤主要包含主塔施工、主梁浇筑、合龙、二期恒载施作等。原合龙顺序为边跨合龙→次边跨合龙→中跨合龙(方案一)。计算结果显示, 主桥徐变 10 年后完成索塔偏位偏大(边塔表现得尤其明显), 且表现为偏向中跨(见表 1)。

表 1 原合龙方案下 10 年后塔顶偏位情况

主塔 编号	塔顶偏位/mm		主塔 编号	塔顶偏位/mm	
	设计	监控		设计	监控
5	163	177	7	-58	-120
6	85	108	8	-172	-192

注: 正负号分别表示往大、小里程方向偏位; 8[#] 主塔为大里程边塔, 5[#] 主塔为小里程边塔。下同。

为降低后期成桥后因砼收缩徐变造成的主塔应力变化的不利影响, 并进一步减小塔偏量, 对合龙顶推方案进行优化:

(1) 调整合龙顺序。将原合龙顺序即方案一调整为边跨合龙→中跨合龙→次边跨合龙(方案二)。

(2) 因中跨首先进行合龙施工,在中跨合龙口两端进行水平方向顶推力施加,确保中间塔可向边跨侧预偏;次边跨进行合龙口施工时,于次边跨合龙口进行水平顶推力施加,使2个边塔也向边跨预偏。

(3) 确定推力值。中跨施加顶推力的目标为桥梁完工并达到10年收缩徐变期后,中间塔墩梁结点处产生的位移累计值基本为零;次中跨施加顶推力的目的为桥梁完工并达到10年收缩徐变期后,边塔主梁0#段产生的位移累计值约为零。因此,确定中跨施加400 t顶推力,次边跨施加200 t顶推力。

2.2 顶推方案理论计算结果对比

2.2.1 塔顶偏位

顶推合龙施工顺序优化并将顶推力施加于中跨合龙口和次边跨合龙口后,成桥10年后由砼收缩徐变导致的理论塔偏量见表2。

表2 顶推合龙方案优化前后成桥10年后塔偏情况对比

主塔编号	塔顶偏位/mm		改善量/mm
	方案一	方案二	
5	177	-32	-209
6	108	-13	-121
7	-120	-10	110
8	-192	28	220

由表2可知:顶推合龙方案优化后,成桥10年后主塔偏位大大减小,对改善主塔受力状态有利。

2.2.2 主塔应力

顶推合龙方案优化后,施加顶推力后中间塔偏位趋于合理。下面以主塔左侧为例,对主塔左右缘10年徐变完成阶段应力情况进行分析。合龙方案优化前后5#~8#主塔左塔柱应力对比见图2~5。

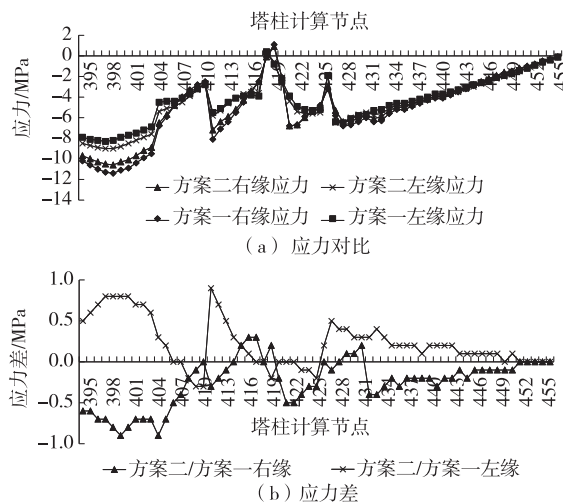


图2 顶推合龙方案优化前后10年徐变完成阶段5#主塔左塔柱应力对比

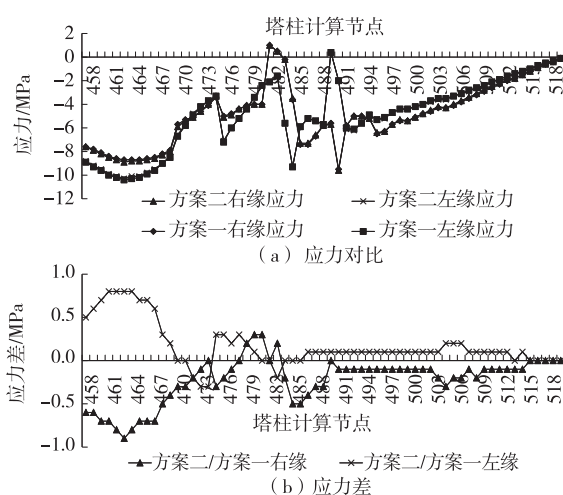


图3 顶推合龙方案优化前后10年徐变完成阶段6#主塔左塔柱应力对比

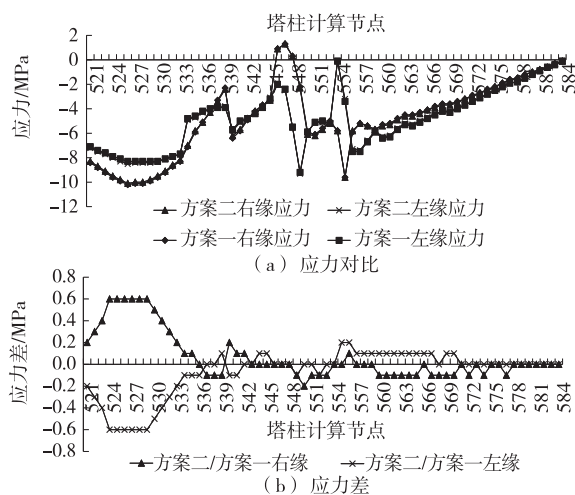


图4 顶推合龙方案优化前后10年徐变完成阶段7#主塔左塔柱应力对比

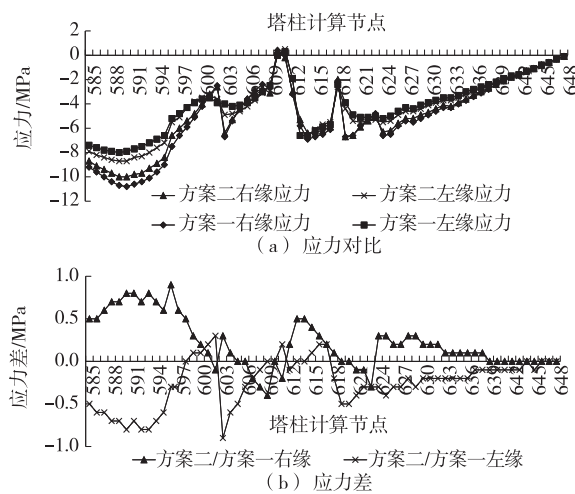


图5 顶推合龙方案优化前后10年徐变完成阶段8#主塔左塔柱应力对比

3.3 顶推过程监控

(1) 塔偏监控。因塔顶处偏位值受顶推影响明显,使用全站仪对6[#]、7[#]主塔偏位变化量进行实测,确保两侧位移在顶推过程中处于计算范围内。

(2) 合龙口高差及长度变化监控。利用卷尺实测中跨及次中跨合龙口相对高差的变化;在合龙口两侧固定选取两个点用卷尺测量长度变化,左、右幅各选择1个点。

顶推监控主要以塔顶偏位控制为主,兼顾主梁标高,确保合龙后线形顺畅、顶推中结构受力安全。

4 顶推成果分析

4.1 顶推影响因素分析

该桥为斜拉桥,需考虑材料指标因素对顶推效果的影响,确保顶推结果处于合理范围内。

(1) 主塔砼弹性模量与理论值的差异。1) 采用6[#]、7[#]主塔弹性模量比理论值大50%进行模拟计算,以塔偏调整量为75 mm为基数计算得顶推力为400 t,再以该顶推力为基数计算主梁和主塔应力、索力影响量。应力影响量出现在主梁1[#]段处,最大为0.1 MPa;主塔应力影响量最大为0.3 MPa,处于横梁C、D之间。顶推以塔偏量不变为原则,对

索力没有影响。2) 以5[#]、8[#]主塔弹性模量比理论值大50%进行模拟计算,以塔偏调整量为108 mm计算得顶推力为200 t,以该顶推力为基数计算索力影响量、主梁及主塔应力。应力影响量出现在主梁1[#]段处,最大为0.1 MPa;主塔应力影响量最大值为0.2 MPa,处于C、D横梁中间。由于顶推以塔偏量不变为原则,对索力没有影响。

(2) 主梁砼弹性模量实际值与理论值的差异。通过建模分析,主梁各梁段之间刚度的差异性并不会影响顶推成效。

(3) 两塔之间弹性模量的差异。各塔水平位移一致(塔高一样),说明两塔砼弹性模量没有差异。

以上情况表明弹性模量和塔偏的取值会对主塔和主梁应力产生明显影响,需在建模计算时根据实际工况合理取值,否则将影响桥梁结构的稳定性。

4.2 顶推结果分析

因顶推操作对梁体及塔偏位移量精度要求较高,且外界环境温度对梁体变化及内力影响较大,为确保顶推完成后合龙口及塔偏位移值达到设计效果,顶推时间选择在一天中温度较低的晚间进行。表3、表4为主塔合龙位移、塔偏量理论值与现场实测值对比及误差。

表3 中跨合龙口顶推结果分析

项目	中跨 顶推 力/t	6 [#] 、7 [#] 主塔合 龙口位移/mm						5 [#] 、6 [#] 主塔合 龙口位移/mm				7 [#] 、8 [#] 主塔合 龙口位移/mm				塔偏/mm			
		水平位移		6 [#] 端标 高上抬		7 [#] 端标 高上抬		水平位移		6 [#] 端标 高下降		水平位移		7 [#] 端标 高下降		6 [#] 塔		7 [#] 塔	
		左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左塔 顶	右塔 顶	左塔 顶	右塔 顶
理论值	400	98	98	77	77	76	76	50	50	89	89	58	58	89	89	90	90	92	92
实测值	300	88	84	71	70	61	62	44	44	67	67	42	42	67	68	76	74	75	77
偏差绝对值	-100	-10	-14	-6	-7	-15	-14	-6	-6	-22	-22	-16	-16	-22	-21	-14	-16	-17	-15
偏差比值%	133	90	86	92	91	80	82	88	88	75	75	72	72	75	76	84	82	82	84

注:偏差绝对值=实测值-理论值;比值=实测值/理论值×100%。下同。

表4 次中跨合龙口顶推结果分析

项目	次中跨顶 推力/t	5 [#] 、6 [#] 主塔合 龙口位移/mm				7 [#] 、8 [#] 主塔合 龙口位移/mm				边塔主梁永久 支座滑移量/mm				塔偏/mm			
		水平位移		5 [#] 悬臂端 标高下挠		水平位移		8 [#] 悬臂端 标高下挠		5 [#] 支座		8 [#] 支座		5 [#] 支座		8 [#] 支座	
		左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左幅	右幅	左塔 顶	右塔 顶	左塔 顶	右塔 顶
理论值	200	146	146	-45	-45	146	146	-45	-45	146	146	146	146	123	123	123	123
实测值	285	115	113	-25	-28	120	122	-28	-26	115	113	120	122	102	104	108	110
偏差绝对值	85	-31	-33	20	17	-26	-24	17	19	-31	-33	-26	-24	-21	-18	-15	-13
偏差比值/%	43	79	77	56	62	82	84	62	58	79	77	82	84	83	85	88	89

(下转第118页)

圈跨中弯矩成线性比例增加,内力比值由 0.94 增加至 1.06;主拱圈跨中挠度同样成比例增加,位移比值由 0.97 增加至 1.03,并引起主梁跨中挠度小幅增加;其他关键截面内力、位移变化量均在 1% 以内。

由此可见,主拱圈容重参数在承载能力极限状态下对斜拉拱式体系主拱圈自身受力的影响较大,并对其他结构产生小幅影响,说明斜拉拱式体系中结构自重恒荷载主要由拱式结构承受,斜拉式结构承受少部分恒荷载。

4 结论

以湘潭市莲城大桥为工程实例,通过 MIDAS/Civil 有限元软件建立模型,从材料性质、构件刚度等角度分析斜拉拱式体系结构在承载能力极限状态下各参数变化对结构受力的影响,得出以下结论:1) 只改变拱肋刚度时,桥梁体系在相同荷载作用下的内力、位移响应明显,斜拉拱式体系整体刚度对拱肋刚度变化的响应较大,主拱圈挠度、主梁挠度与拱肋刚度成反比且变化明显,斜拉索索力与拱肋刚度成反比且变化较明显。2) 只改变斜拉索刚度时,斜拉索索力与斜拉索刚度成正比,主塔顶部位移与斜拉索刚度变化成反比,其他结构响应很小且关键截面内力、位移变化值均在 1% 以内。3) 分别只改变主梁、吊杆刚度时,桥梁体系主拱圈、斜拉索、主塔的内力和位移变化均很小,只对主梁内力和挠度产生较大影响,对结构整体刚度影响不大。主梁和吊杆需

具有一定强度、刚度储备,以保证行车安全与行车舒适度。4) 分别只改变主梁容重、主拱圈容重时,桥梁体系在荷载作用下响应变化明显,结构自重在大跨度桥梁体系荷载中占比较大,设计中应减少结构自重,以增强活载承载能力。

综上,在桥梁运行阶段,拱肋刚度、主拱圈容重、主梁容重变化对斜拉拱式体系结构受力的影响较大,斜拉索刚度、吊杆刚度、主梁刚度变化对结构受力的影响较小。在桥梁运营阶段,主要以拱式结构受力为主,斜拉式结构受力为辅。因此,在斜拉拱式桥梁设计、运营、维护等环节以拱式结构为主。

参考文献:

- [1] 方磊.斜拉拱桥受力性能及设计参数分析[D].西安:长安大学,2008.
- [2] 吕建根,赵跃宇.大跨度斜拉拱组合桥极限承载能力分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2007,34(6):1-5.
- [3] 王莲香,周水兴.马来西亚吉隆坡普特拉贾亚城的斜拉拱组合桥[J].世界桥梁,2004(4):9-12.
- [4] 余海燕.斜拉拱式协作体系桥梁合理成桥索力与施工控制研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.
- [5] KLEI P, MICHAEL Y. Cable-stayed arch bridge, putrajaya, kuala lumpur, malaysia[J]. Structural Engineering International, 2003, 13(3): 196-199.
- [6] 刘剑,王达.基于响应面法的大跨径斜拉桥静力参数敏感性分析[J].公路交通科技,2015,32(8):100-106.

收稿日期:2020-06-22

(上接第 113 页)

由表 3、表 4 可知:各主要部位位移状态及顶推力均在可接受范围内,顶推施工达到了预期效果。6#、7# 主塔产生顶推误差的主要原因是主塔砦实际弹性模量比理论值大 50% 左右;次中跨顶推误差产生的主要原因是永久支座(5#、8# 主塔及交界墩支座)摩擦力及主塔砦弹性模量误差。

5 结语

根据顶推完成后实测数据进行分析,赤石特大桥采用的顶推方案合理,控制得当,预偏达到了设计和规范要求。得到以下经验:1) 斜拉桥合龙口顶推施工应采用塔顶偏位及顶推力双控的方式才能为合龙后线形提供有力保障。2) 顶推施工前应根据桥梁结构特性及外界环境影响合理确定顶推时间,这对施工管控非常重要。3) 顶推施工中应充分考虑

结构砦弹性模量误差,通过砦试块弹性模量测试或试顶推确定结构实际弹性模量。

参考文献:

- [1] 中交第一公路工程局有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTJ/T F50-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 陈明宪.斜拉桥建造技术[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 路桥集团第一公路工程局.公路桥涵施工技术规范:JTJ 041-2000[S].北京:人民交通出版社,2000.
- [4] 中铁大桥局集团有限公司.赤石特大桥顶推合龙监控计算方案[Z].武汉:中铁大桥局集团有限公司,2016.
- [5] 中铁大桥局集团有限公司.赤石特大桥中跨合龙段施工方案[Z].武汉:中铁大桥局集团有限公司,2016.
- [6] 张晓东.桥梁顶推施工技术[J].公路,2003(9):45-51.

收稿日期:2020-07-20