

非对称大跨度悬索桥主梁吊装顺序优化

熊邵辉^{1,2}, 钱锋³, 程军委⁴, 李洋¹

(1. 重庆交通大学, 重庆市 400067; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆市 400067;

3. 普洱市交通建设工程质量监督局, 云南 普洱 665000; 4. 云南交投普洱澜高速公路有限公司, 云南 普洱 665000)

摘要:随着非对称大跨度悬索桥的出现,针对该类型悬索桥主梁吊装顺序优化的研究很有必要。通过设置主塔偏移最大允许值和主塔成桥目标线形两个控制因素,根据主梁吊装顺序和主塔顶推方案的关系给出优化非对称大跨度悬索桥主梁吊装顺序的方法流程。以广东某非对称大跨度悬索桥为工程实例,利用该方法对主梁吊装顺序进行优化并付诸实施,取得了良好效果并验证得到:主梁吊装应从跨中向两塔方向推进,中边跨吊装推进速度应保持和中边跨标准梁段数的比例一致,主塔顶推方案应以主塔最大偏移允许值和主梁吊装顺序为基础来制定。

关键词:桥梁工程;非对称;大跨度悬索桥;主梁吊装;主塔顶推;优化

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

非对称大跨度悬索桥主梁吊装的研究目前尚不多见。

1 悬索桥主梁吊装国内外研究现状

悬索桥具有很强的跨越能力,成为大跨度桥梁的首选桥型。美国、欧洲、日本都曾经历过悬索桥的建设高峰期,而目前中国正在经历悬索桥的建设高峰期。针对悬索桥主梁吊装研究国内外也有很多成果:Brotton^[1]在加劲梁架设计算过程中忽略了加劲梁刚度的影响,将加劲梁的重量简化为竖向荷载作用在主缆上,所以得到的计算结果精度不高;吕建鸣^[2]以虎门大桥为工程实例分析比较了从跨中到桥塔、从桥塔到跨中、吊装完部分梁段固结和吊装完全部梁段固结等不同吊装顺序和安装方案;陈彩霞^[3]建立主塔顶推模型模拟整个主梁吊装过程,得到吊索力和加劲梁截面应力等控制参数;姜军等^[4]提出了一种反馈控制分析方法,采用有限元正装计算各吊装阶段施工控制参数的理论值和主索鞍自由滑移量,根据计算结果和主塔的抗弯能力来确定索鞍的顶推量和顶推时机;常大宝^[5]着重研究了三塔悬索桥合龙方案,对比了不同合龙方案的利弊,为此类桥型提供了借鉴;刘吉晗^[6]利用 BNLAS 分别采用了 3 种不同的铰接方式模拟主梁吊装,得出了不同吊装顺序对吊装过程的影响结果。

为适应中国地势地貌繁多复杂的特点,只有一岸边跨有吊索的非对称大跨度悬索桥开始出现,但针对此类

2 主塔受力分析

众所周知,悬索桥在进行主梁吊装时,主缆张力随着吊装梁段的增多发生变化,破坏了主索鞍两侧主缆水平分力相等的平衡状态,导致主塔塔顶发生移动以重新调整主索鞍两侧主缆力,最后主缆水平分力达到新的平衡状态。当只有中跨梁段需要吊装时,主塔只会产生偏向中跨一个方向的移动。为保证主塔底部最不利截面的应力安全,只需要控制主塔在一个方向上的最大偏移量。但对于非对称大跨度悬索桥来说,除中跨梁段外边跨也有吊装梁段,这就会使主塔对应产生偏向中跨和边跨两个方向的移动。同样为保证主塔底部最不利截面的应力安全,需要同时控制主塔在两个方向上的最大偏移量,大大增加了施工和控制难度。

此外由于主塔只能往边跨一个方向顶推,因此制定合理的主梁吊装顺序是保证主塔受力安全和达到成桥线形目标的关键。

3 主梁吊装顺序优化方法流程

3.1 主塔最大允许偏移确定

根据有关规范要求并结合混凝土强度条件,有以

收稿日期:2020-12-01

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0806000)

作者简介:熊邵辉,男,硕士,正高级工程师。E-mail:381234694@qq.com

下几个主塔底部最不利应力的控制指标可供选择:

- (1) 主塔底部截面不出现拉应力。
- (2) 主塔底部截面不出现拉应力且压应力小于0.5倍的轴心抗压强度标准值。
- (3) 主塔底部截面拉应力不大于0.7倍的轴心抗拉强度且压应力小于0.5倍的轴心抗压强度标准值。

一般情况下为保证主塔底部最不利截面应力留有足够的安全冗余,在施工控制中都以第(2)条作为控制指标,且用裸塔模型计算最大容许偏移值。

3.2 主梁吊装顺序优化

根据施工实际情况初拟主梁吊装顺序,按照该吊装顺序暂不考虑主塔顶推进行正装、倒拆施工模拟计算,得到各吊装工况主塔偏移值。然后结合主塔最大允许偏移值,拟定主塔顶推方案,再进行考虑主塔顶推的正装、倒拆施工模拟计算。若成桥主塔线形计算结果达到控制目标,则该吊装顺序即为合理顺序。反之继续调整优化吊装顺序,再重复进行下一循环计算,直到成桥主塔线形计算结果达到控制目标。非对称悬索桥主梁吊装顺序优化的方法流程如图1所示。

4 工程实例

以广东某非对称大跨度悬索桥为例。该桥中跨738 m(8.3 m+48×15 m+9.7 m),50个梁段,其中标准梁段48个。北边跨202 m,14个梁段(13.7 m+12×15 m+8.3 m),其中标准梁段12个。桥型及主

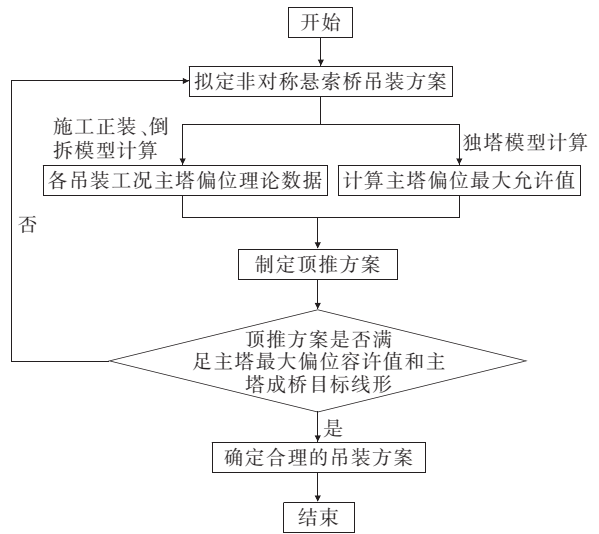


图1 非对称悬索桥主梁吊装顺序优化方法流程图
梁梁段布置见图2。

4.1 吊装顺序拟定

该桥中跨标准梁段48片,边跨标准梁段12片,为了保证中边跨钢箱梁吊装协调推进同时达到合龙条件,按照中边跨4:1的比例吊装,即中跨每吊装4片(两个主塔方向各2片)边跨吊装1片。另外再考虑从跨中向主塔方向推进和从主塔向跨中方向推进两种推进顺序,初步拟定方案1和方案2。方案3则是根据常规吊装顺序,中跨先吊装24片,然后中跨每吊装2片(两个主塔方向各1片)边跨吊装1片,从跨中向主塔方向推进。3种方案推进示意图见图3,各方案工况划分见表1。

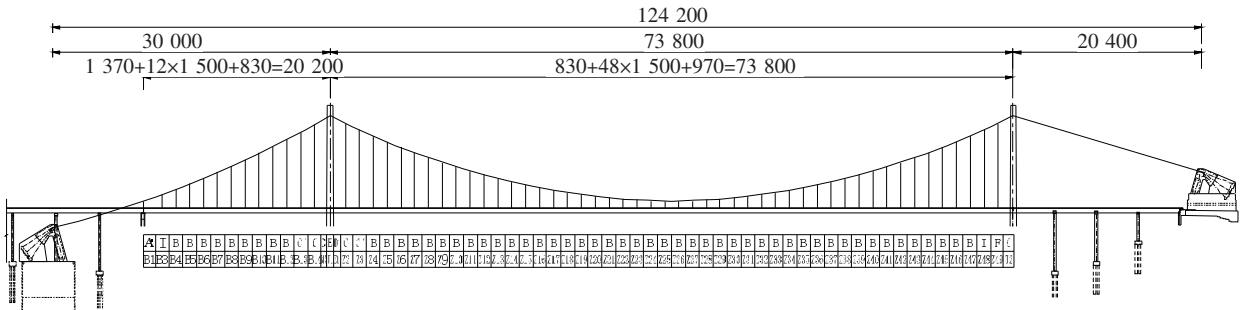


图2 某非对称大跨度悬索桥桥型及主梁梁段布置图(单位:cm)

4.2 主塔偏移计算

利用Midas/Civil分别按照3种方案的吊装顺序在不考虑主塔顶推的情况下进行正装模拟计算(图4)。考虑正装计算的收敛问题,在整个吊装过程中主索鞍与主塔采用临时固结约束,并将主梁单元钝化,将其重量转换成节点荷载加在主缆对应吊点处。这种处理方法会导致主缆线形计算结果产生一定的误差,甚至

会使主塔底部最不利截面应力出现拉应力,但对主塔塔顶位移计算结果则影响很小。此计算就是为了获取在不考虑主塔顶推的情况下各吊装工况主塔偏移数据。

图5为3种吊装方案在不考虑顶推施工情况下通过正装模拟计算得到的主塔偏位结果。图中北塔偏位:“-”表示在北边跨侧,“+”表示在中跨侧,南塔偏位:“-”表示在中跨侧,“+”表示在南边跨侧。下同。

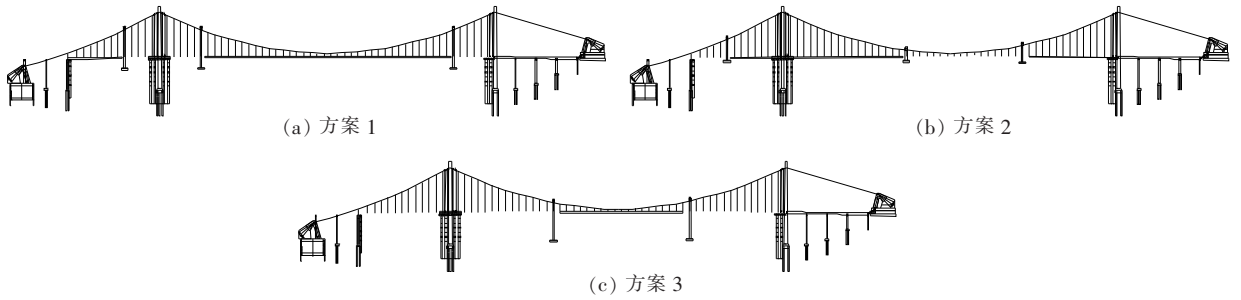


图3 3种主梁吊装推进方式

表1 主梁吊装顺序拟定

施工工况	方案1	施工工况	方案2	施工工况	方案3
1	主塔施工	1	主塔施工	1	主塔施工
...
6	吊装 Z25/Z26	6	吊装 T2	6	吊装 Z25/Z26
7	吊装 Z24/Z27	7	吊装 B15/T1/Z1
8	吊装 B1/B2	8	吊装 Z2/Z49	16	吊装 Z15/Z36
...	...	9	吊装 Z3/Z48	17	吊装 Z14/Z37
36	吊装 Z5/Z46	10	吊装 B14	18	吊装 B1/B2
37	吊装 Z4/Z47
38	吊装 B12	38	吊装 Z22/Z29	37	吊装 B15/T1/Z1
39	吊装 B15/T1/Z1	39	吊装 Z23/Z28	38	吊装 T2
40	吊装 T2	40	吊装 B4	39	吊装 Z4/Z47
41	吊装 Z2/Z49	41	吊装 Z24/Z27	40	吊装 Z2/Z49
42	吊装 B14	42	吊装 B3	41	吊装 B12/B14
43	吊装合龙段 Z3/Z48	43	吊装 Z25/Z26	42	吊装合龙段 Z3/Z48
44	吊装合龙段 B13	44	吊装 B1B2	43	吊装合龙段 B13
...



图4 有限元计算模型图

由图5可知:

方案1的北塔偏移变化范围为 $-0.098 \sim +0.910$ m,南塔偏移变化范围为 $-0.678 \sim +0.075$ m。

方案2的北塔偏移变化范围为 $-0.098 \sim +1.446$ m,南塔偏移变化范围为 $-0.881 \sim +0.075$ m。

方案3的北塔偏移变化范围为 $-0.098 \sim +1.503$ m,南塔偏移变化范围为 $-0.678 \sim +0.075$ m。

4.3 顶推方案拟定

该桥北塔主索鞍设定的预偏量为1.160 m,南塔主索鞍设定的预偏量为0.810 m。

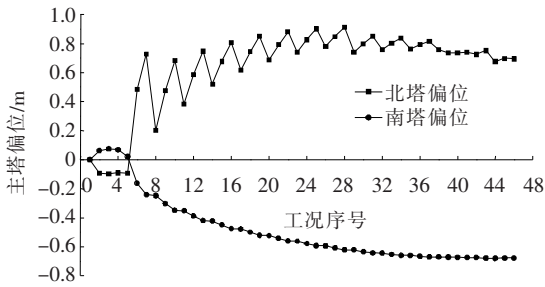
以第(2)条作为控制指标,通过裸塔模型计算分析得到,南、北主塔最大容许偏移值均为0.306 m。根据各方案主塔偏移计算结果和最大容许偏移值,可制定相应顶推方案见表2。

4.4 顶推施工模拟计算

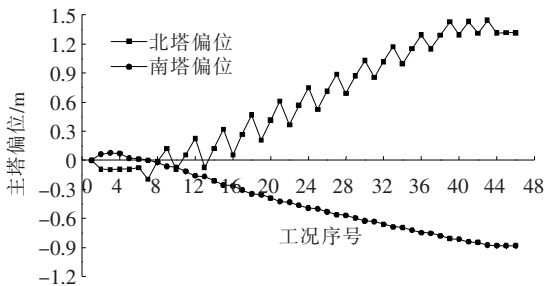
如图6所示,在主塔中心采用刚度很大的刚性梁模拟顶推支架,且与主缆IP点采用刚度同样很大的刚性杆进行连接,通过修改刚性杆的无应力长度来模拟顶推工况。图7为3种吊装方案在考虑顶推施工情况下通过正装模拟计算得到的主塔偏移结果。

表2 各主梁吊装方案对应主塔顶推方案

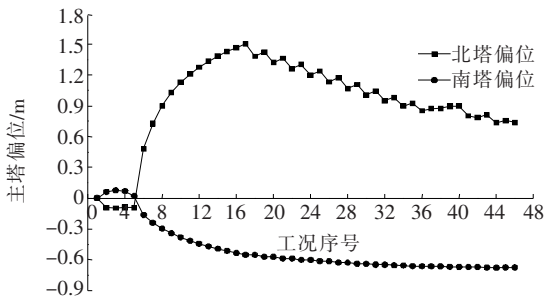
顶推工况	方案1		方案2		方案3	
	顶推时机	顶推量/mm	顶推时机	顶推量/mm	顶推时机	顶推量/mm
北塔第1次顶推	吊索安装	200	吊装 Z6 Z45	330	吊索安装	200
北塔第2次顶推	吊装 Z25 Z26	300	吊装 Z9 Z42	150	吊装 Z25 Z26	500
北塔第3次顶推	吊装 Z21 Z30	260	吊装 Z13 Z38	320	吊装 Z23 Z28	300
北塔第4次顶推	吊装 Z19 Z32	400	吊装 Z17 Z34	310	吊装 Z20 Z31	160
北塔第5次顶推	—	—	吊装 Z22 Z29	50	—	—
南塔第1次顶推	吊装 B1 B2	300	吊装 B12	200	吊装 B1 B2	300
南塔第2次顶推	吊装 Z15 Z36	280	吊装 B11	360	吊装 Z15 Z36	280
南塔第3次顶推	吊装 B8	230	吊装 B5	250	吊装 B8	230



(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3

图5 主塔偏位计算结果(不考虑主塔顶推)

由图7(a)可知:在按方案1进行吊装的整个过程中,各工况南、北主塔偏移量均未超过最大容许偏移值。南、北塔顶推施工主要集中在吊装前期,需要克服的摩擦力较小对顶推施工有利。当主梁合龙后南塔向边跨偏0.133 m,北塔向边跨偏0.171 m,对后续二期

铺装施工和运营都非常有利。综合考虑方案1是最优的吊装方案。

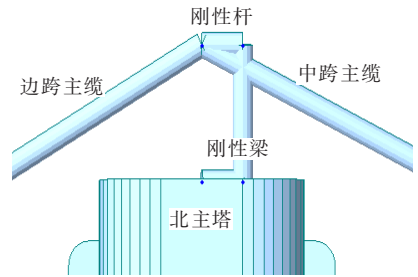


图6 顶推工况有限元模拟

由图7(b)可知:在按方案2进行吊装的整个过程中,各工况南、北主塔偏移量也均未超过最大容许偏移值。但北塔顶推施工大都在吊装中后期进行,需要克服的摩擦力大致使顶推施工较为困难。主梁合龙后南塔偏向中跨0.016 m,北塔也偏向中跨0.156 m,对后续二期铺装施工和桥梁运营也比较不利。综合考虑方案2较不合理。

由图7(c)可知:在按方案3进行吊装(不考虑顶推)的整个过程中:在吊装Z14/Z37工况,北塔向中跨累计偏位1.503 m,这意味着即使把北主索鞍的预偏量1.160 m全部顶推完成,还偏向中跨0.343 m,超过最大容许偏移值0.306 m。随后继续吊装至合龙工况,北塔会向边跨累计偏移0.765 m(合龙工况北塔向中跨偏移0.738 m,1.503-0.738=0.765 m),由于主塔无法向中跨顶推,这意味着合龙时北塔会偏向边跨0.422 m(0.765-0.343=0.422 m),也超过最大容许偏移值0.306 m。从图7(c)也可以看出整个吊装过程中有些工况的北塔偏移量已超过最大容许偏移值,所以方案3为最不合理吊装方案,应首先排除。

4.5 合龙后线形

综合4.4节所述,选择最优的方案1为主梁吊装

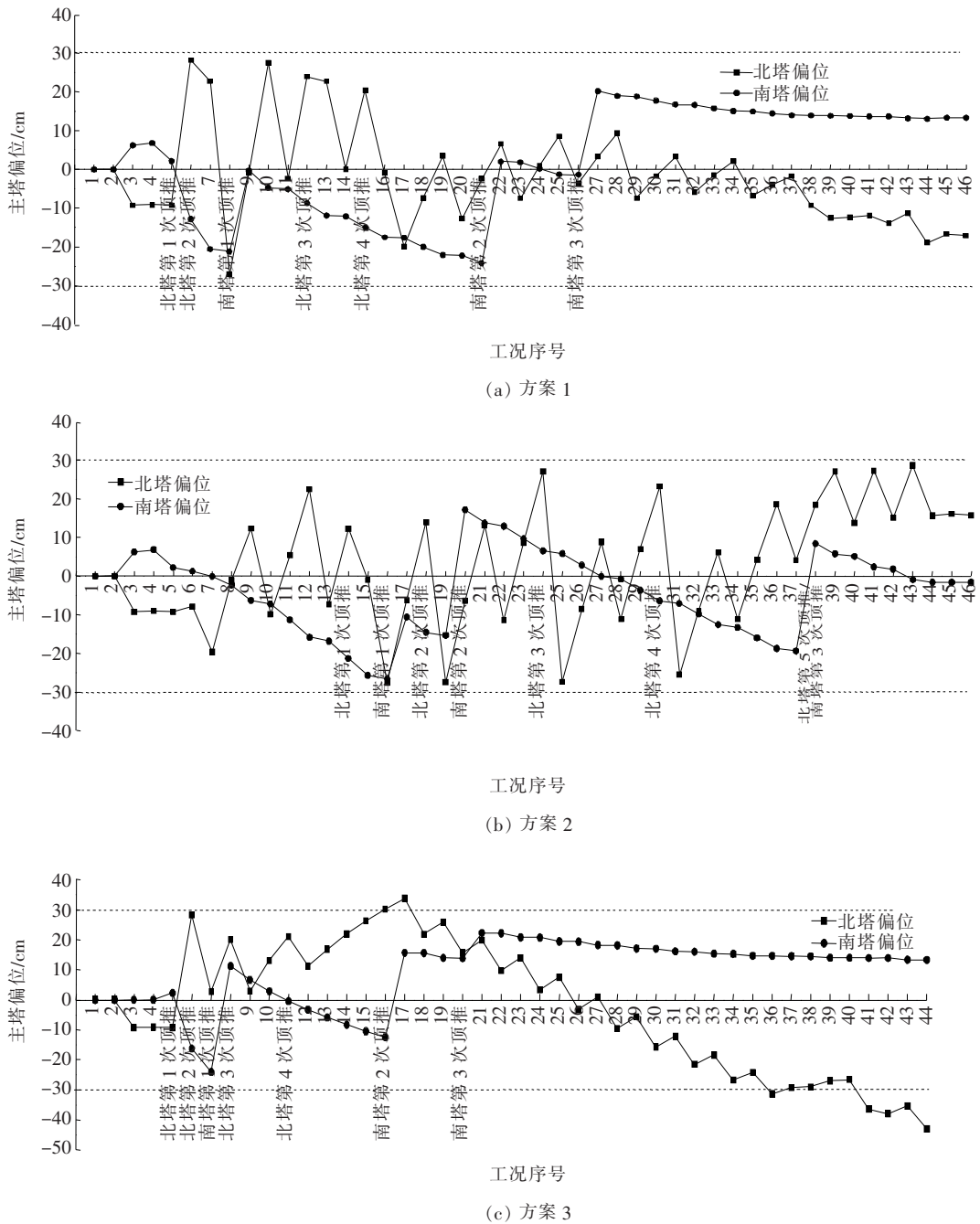


图7 主塔偏移计算结果(考虑主塔顶推)

方案并付诸实施。在整个主梁吊装过程中,各工况南北主塔偏移量皆未超过最大容许偏移值,主塔最不利截面应力安全得到很好保障。主梁合龙后线形美观,北塔实测偏向边跨 0.196 m,南塔实测偏向边跨 0.121 m,与理论值吻合较好,完全达到主塔线形控制目标。

5 结论

根据该文给出的非对称大跨度悬索桥主梁吊装顺

序确定和优化的方法流程,以广东省某非对称大跨度悬索桥为实例进行验证实施,最终成桥线形良好。得出以下结论:

- (1) 主梁吊装顺序应以主塔最大偏移允许值和主塔成桥线形为主要控制因素进行制定和优化。
- (2) 主塔只能单向顶推,所以主塔顶推方案应以主塔最大偏移允许值和主梁吊装顺序为基础来制定。
- (3) 主梁吊装应从跨中向两塔方向推进,这种推进顺序前期顶推量较大,后期顶推量较小,对顶推施工

高墩多塔预应力混凝土斜拉桥主梁施工关键技术

任雷

(中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430012)

摘要:汝郴高速公路赤石特大桥为四塔双索面预应力混凝土斜拉桥,跨径为(165+3×380+165) m,最高主塔 286.63 m,最重梁段 1[#]块方量达 269.2 m³,主梁与地面高差约 185 m。大桥主梁采用多约束条件下 0[#]块施工技术、7 600 kN 承载力超大前支点挂篮施工、边跨无约束合龙技术、中跨次中跨顶推合龙技术、竖直下拉索+TMD 主梁抗风研究 5 个关键技术,解决了大桥超高超重预应力混凝土主梁施工技术难题,可为同类型斜拉桥主梁施工提供参考。

关键词:高墩多塔斜拉桥;超高超重预应力混凝土结构;0[#]块施工;前支点挂篮;合龙技术;竖直下拉索;TMD

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

1 工程概况

赤石特大桥是厦门至成都高速公路汝城至郴州段控制性工程,主桥为跨径(165+3×380+165) m 四塔预应力混凝土双索面斜拉桥,边塔支承、中塔塔梁墩固结体系,索塔为双曲线薄壁收腰造型,最高主塔 286.63 m,为目前世界第一大跨径高墩多塔混凝土斜拉桥^[1-2]。大桥总体布置如图 1 所示。

赤石特大桥主梁采用单箱四室预应力混凝土箱梁,主梁中心高 3.2 m,箱梁顶宽 27.5 m,风嘴部分宽为 2×0.25 m,桥面设 2% 的双向横坡。主梁截面有 3 种形式,其中标准截面顶板、底板、斜腹板厚 0.28 m,

中间腹板厚 0.3 m。主梁标准断面如图 2 所示。单个索塔设 23 对斜拉索,每对斜拉索与主梁相交处均设置横梁,横梁中心处厚 0.35 m,至近拉索区厚度过渡到 0.65 m^[3]。

赤石特大桥单个索塔主梁共分为 25 个节段,其中 1 个 0[#]节段、23 个悬臂节段、1 个合龙节段,如表 1 所示。悬臂节段最重梁段为 1[#]块,方量 269.2 m³,主梁与地面高度差约 185 m,超高超重上构预应力混凝土箱梁施工为赤石特大桥施工关键性工序。

结合大桥主梁结构特点及现场实际地势情况,赤石特大桥主梁采用如下施工工艺:0[#]块采用三角托架现浇、悬臂段 1[#]~23[#]块采用前支点挂篮悬浇,边跨采用无约束合龙技术,中跨、次中跨采用顶推法合龙。

较为有利。

(4) 中边跨主梁吊装推进速度应保持和中边跨标准梁段数的比例一致。

(5) 以上结论也适用于两岸边跨都有吊索的悬索桥主梁吊装顺序确定和优化。

参考文献:

[1] BROTTON D M. A General Computer Program for the Solution of Suspension Bridge Problems [J]. Structural Engineer, 1966, 44(5):161-167.
[2] 吕建鸣. 大跨度悬索桥施工控制分析[J]. 公路交通科技, 1994, 11(1):33-39.
[3] 陈彩霞. 悬索桥钢箱加劲梁安装过程及临时连接的研究

[D]. 成都:西南交通大学,2007.
[4] 姜军,忻刚明,孙胜江. 大跨悬索桥加劲梁吊装阶段的施工控制[J]. 公路,2009,54(12):35-38.
[5] 常大宝. 泰州长江大桥钢箱梁吊装施工关键技术[J]. 中外公路,2012,32(4):195-199.
[6] 刘吉哈. 大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
[7] 赵少杰,肖丹,王芝兴,等. 大跨径公路悬索桥拆除施工及监控关键技术研究[J]. 中外公路,2017,37(1):163-166.
[8] 姜宏维,郭建明. 大跨度悬索桥鞍座顶推研究[J]. 中外公路,2018,38(1):127-130.
[9] 范杰. 大跨度非对称悬索桥主缆线形合理施工状态研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.