

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.024

混合梁斜拉桥 A 形索塔施工方案比选与优化^{*}

张玉平¹, 雷丰红¹, 杨胜江², 吴健³

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.贵州交通建设集团有限公司, 贵州 贵阳 550001;

3.中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 为确定混合梁斜拉桥 A 形索塔的最优施工方案, 以某 530 m 主跨斜拉桥为工程背景, 按照索塔塔肢与中横梁同步、异步施工和横撑设置的不同, 优选 3 种索塔施工方案分别建立有限元模型, 通过对比分析 3 种方案下索塔线形和应力, 确定索塔最优方案为塔肢与中横梁同步施工且设置 6 道横撑; 分别建立先塔后梁和塔梁同步施工时桥梁施工全过程有限元模型, 通过对比两者成桥状态下主梁和索塔应力、斜拉索索力和塔顶位移, 论证不对称双悬臂施工下混合梁斜拉桥塔梁同步施工的可行性, 结果表明塔梁同步施工对成桥索塔竖向位移的影响较小, 但对纵桥向位移的影响较大, 应重视并采取相应措施。

关键词: 桥梁; 混合梁斜拉桥; A 形索塔; 塔肢与横梁同步施工; 塔肢与横梁异步施工

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0098-06

斜拉桥索塔主要有钻石形、A 形、倒 V 形、倒 Y 形、H 形、门形等。A 形、倒 V 形、倒 Y 形索塔建造过程中, 受索塔塔肢自重和施工临时荷载的影响, 索塔根部和索塔与横梁连接位置产生较大弯矩, 使该位置外侧或内侧的砼出现拉应力。为减小和控制该位置砼的应力, 确保施工过程安全, 根据需要在两塔肢之间设置一定数量临时横撑和拉杆对索塔的应力和变形进行控制。如果对塔肢之间的临时横撑和拉杆论证分析不够准确, 可能导致横撑或拉杆损坏、索塔局部裂纹等。因此, 索塔施工前需对索塔临时横撑及拉杆的位置、尺寸及顶推力或拉力等进行优化分析。

斜拉桥一般采用先塔后梁的施工顺序, 施工周期较长。为加快施工进度, 采用塔梁同步的施工方法。塔梁同步施工是在索塔还未施工完成时就进行主梁施工, 塔、梁施工同时进行, 并同时斜拉索挂索及张拉。已有学者对拱塔、不对称独塔、矮塔等斜拉桥进行了塔梁同步施工可行性分析, 并针对施工影响因素和工程难点提出了控制措施和处理方案。目前对混合梁斜拉桥塔梁同步施工的研究主要集中于边跨主梁支架现浇、中跨主梁单悬臂施工方案, 而对边、中跨主梁进行不对称双悬臂施工的塔梁同步施工研究甚少。这类桥梁采用塔梁同步施工时, 由于较大不对称施工荷载的存在, 索塔施工中左右摇摆, 会增加安全风险, 故对双悬臂施工的混合梁

斜拉桥进行塔梁同步施工可行性和优化研究十分必要。该文以采用不对称双悬臂施工的双塔三跨、索塔类型为 A 形的某混合梁斜拉桥为工程背景, 对索塔塔肢与中横梁同步、异步施工方案进行比选, 对塔梁同步施工全过程进行有限元分析, 确定可行且最优施工方案。

1 工程背景

某双塔三跨混合梁斜拉桥主桥跨径布置为 (56.8+131.2+530+131.2+56.8) m, 全长 906 m, 边中跨比约 0.335, 采用半漂浮体系。中跨采用组合梁, 边跨采用砼梁。其立面布置见图 1。采用 A 形索塔, 3[#]、4[#] 索塔构造相同, 索塔立面布置和节段划分见图 2。索塔分为 38 个节段施工, 标准节段高度为 6.0 m, 采用爬模施工。

2 塔肢与中横梁同步、异步施工方案比选

索塔施工可分为塔肢与横梁同步施工和塔肢与横梁异步施工 2 种。塔肢与横梁同步施工可保证塔肢与横梁的结合质量, 避免在塔梁连接处设施工缝, 结构整体性好, 且在施工阶段可较早形成整体框架, 有利于结构整体受力; 塔肢与横梁异步施工可减少索塔爬模系统的拆装次数, 但横梁与塔肢间有新老砼结合面, 结构整体性稍差。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52078059); 湖南省教育厅创新平台资助项目(16K005)

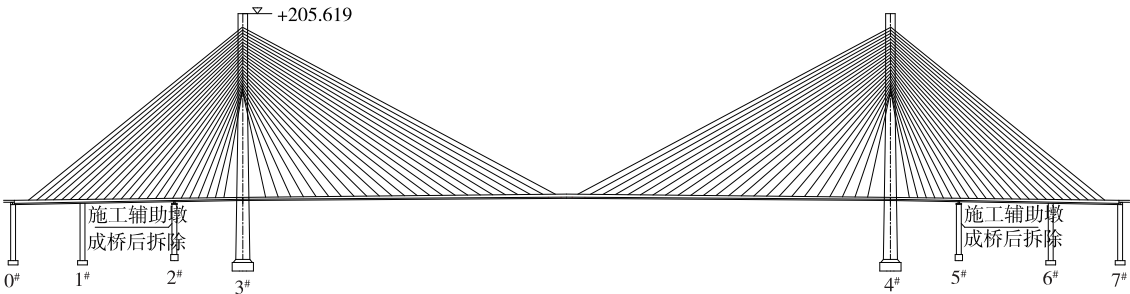


图 1 全桥立面布置图(单位:m)

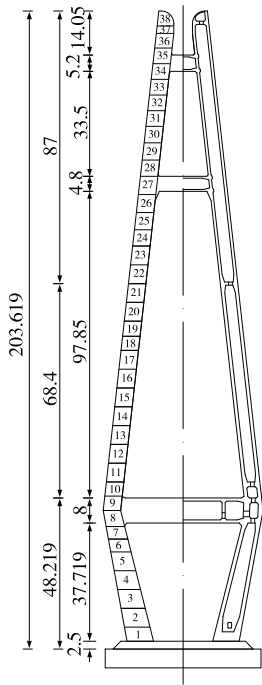


图 2 索塔立面布置和节段划分示意图(单位:m)

2.1 施工方案及拉杆与横撑的设计和布置

根据塔肢与中横梁同步或异步施工拟定 3 种施工方案:方案一为塔肢与中横梁异步施工;方案二和方案三为塔肢与中横梁同步施工,但两方案的主动横撑数量不同。

在索塔施工过程中,塔肢处于悬臂倾斜状态,如

果悬臂高度过大,会使索塔根部及索塔与横梁连接位置的拉应力过大,导致该位置砼开裂。为保证索塔施工安全,在下塔柱布置合适数量的拉杆,中、上塔柱布置合适数量的横撑,并在拉杆及横撑位置适当施加主动力。拉杆及横撑位置的确定需保证索塔施工安全,主动力大小确定应遵循内力控制为主、变形控制为辅的原则。

根据拉杆及横撑的布置原则对 3 种方案进行拉杆与横撑设计和布置(见表 1),其中主动拉杆采用精轧螺纹钢,5 道被动横撑采用 630 mm×8 mm 钢管。方案一和方案二的第 1 道主动横撑采用 630 mm×8 mm 钢管,第 2 道主动横撑采用 820 mm×10 mm 钢管,方案三的主动横撑采用 820 mm×10 mm 钢管。

2.2 索塔施工有限元建模

采用 MIDAS/Civil 软件建立索塔模型,进行施工全过程模拟分析。索塔单元、托架、横撑采用梁单元模拟,拉杆拉力采用节点荷载模拟,主动横撑的轴力以温度荷载形式施加,避免顶推力以集中力施加在塔柱上。塔底固结,下横梁支架采用只受压弹性支承模拟。拉杆在下横梁施工完成后拆除,方案一的第 1 道主动横撑在中横梁施工完成后拆除,其余横撑在索塔施工完成后由上往下逐步拆除。索塔施工工况见表 2,索塔有限元模型见图 3。

表 1 索塔拉杆及横撑布置

部件	安装高程/m			主动力/kN		
	方案一	方案二	方案三	方案一	方案二	方案三
主动拉杆	+30.000	+30.000	+30.000	3 000	3 000	3 000
被动横撑 1	+65.219	+65.219	+65.219	0	0	0
被动横撑 2	+81.519	+81.519	+81.519	0	0	0
被动横撑 3	+97.139	+97.139	+97.139	0	0	0
被动横撑 4	+113.139	+113.139	+113.139	0	0	0
被动横撑 5	+131.049	+131.049	+131.049	0	0	0
主动横撑 1	+153.679	+144.219	+168.349	1 000	1 000	1 000
主动横撑 2	+173.500	+168.349	—	1 500	1 000	—

注:主动拉杆的主动力为拉力,主动横撑的主动力为顶推力。

表 2 索塔施工工况

方案	工况号	施工内容
方案一	1~33	第 1~26 节段及下横梁施工,拉杆安装及拆除,设置 5 道被动横撑
	34~36	第 27~29 节段施工
	37	中横梁托架施工
	38	设置第 1 道主动横撑
	39~40	第 30~31 节段施工
	41	中横梁施工,张拉中横梁预应力
	42	拆除第 1 道主动横撑
	43	第 32 节段施工
	44	拆除中横梁托架
	45	第 33 节段施工
	46	设置第 2 道主动横撑
	47~51	第 34~38 节段施工
	52	上横梁托架施工
	53	上横梁施工,张拉上横梁预应力
	54~60	由上往下拆除上横梁托架、主动横撑及被动横撑,索塔施工完成
方案二	1~33	第 1~26 节段及下横梁施工,拉杆安装及拆除,设置 5 道被动横撑
	34	中横梁托架施工
	35	设置第 1 道主动横撑
	36	第 27 节段与中横梁同步施工
	37	第 28 节段施工
	38	拆除中横梁托架
	39~42	第 29~32 节段施工
	43	设置第 2 道主动横撑
	44~49	第 33~38 节段施工
	50	上横梁托架施工
	51	上横梁施工,张拉上横梁预应力
	52~59	由上往下拆除上横梁托架、主动横撑及被动横撑,索塔施工完成
方案三	1~33	第 1~26 节段及下横梁施工,拉杆安装及拆除,设置 5 道被动横撑
	34	中横梁托架施工
	35	第 27 节段与中横梁同步施工
	36	第 28 节段施工
	37	拆除中横梁托架
	38~41	第 29~32 节段施工
	42	设置第 1 道主动横撑
	43~48	第 33~38 节段施工
	49	上横梁托架施工
	50	上横梁施工,张拉上横梁预应力
	51~57	由上往下拆除上横梁托架、主动横撑及被动横撑,索塔施工完成



图 3 索塔有限元模型

2.3 索塔施工方案比选

2.3.1 索塔位移对比分析

塔肢与中横梁同步或异步施工主要影响索塔第 27~38 节段的横向累积位移,索塔节段在索塔施工完成后的横向累积位移见图 4。

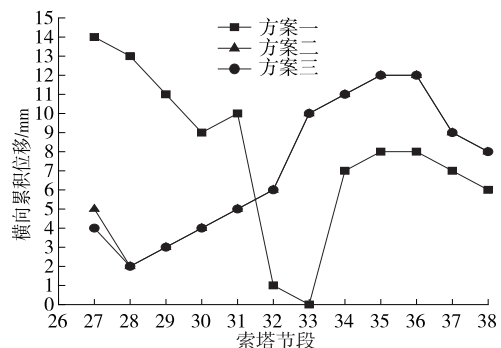


图 4 第 27~38 节段在索塔施工完成后的横向累积位移

由图 4 可知:采用方案二和方案三时索塔横向累积位移基本一致,差别很小。方案二和方案三由于中横梁与塔肢同步施工,形成框架时间较早,第 27 节段横向累积位移较异步施工方案一小,方案一和方案三相差 10 mm。采用方案一时索塔第 32、33 节段的横向累积位移较小的原因是第 2 道主动横撑处施加了较大主动力,限制了其横向累积位移。

索塔节段和横梁的施工顺序、横撑位置及所施加主动力大小等是方案之间索塔节段横向累积位移出现差异的主要原因。索塔施工方案需提前确定,如果在施工过程中发生施工工序较大改变而又没有提前预偏,会给塔柱线形带来不利影响。

2.3.2 索塔应力对比分析

塔肢与中横梁同步或异步施工的主要控制截面是与中横梁相连接的索塔节段截面(第 27 节段截面),选取若干关键施工工况对其进行分析。关键施

工况 1~11 为索塔第 28~38 节段施工;关键施工工况 12~16 为 5 道被动横撑由上往下逐步拆除,索塔施工完成。控制截面(索塔第 27 节段截面)内、外侧应力变化见图 5、图 6。

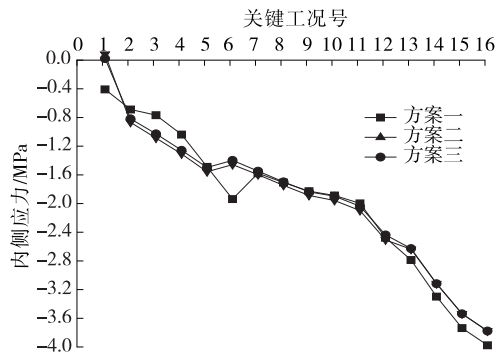


图 5 第 27 节段截面内侧应力变化

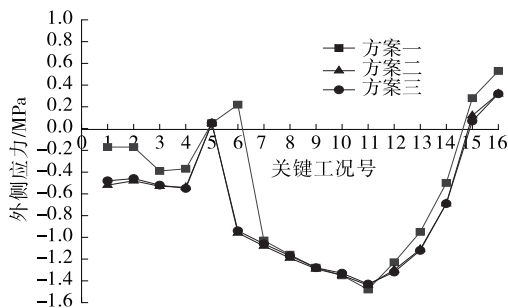


图 6 第 27 节段截面外侧应力变化

由图 5、图 6 可知:3 种施工方案下索塔第 27 节段截面内、外侧应力的变化规律仅在前几个工况有所不同,后续工况基本一致。3 种施工方案下控制截面最大压应力均在 -4.0 MPa 以内,最大拉应力均控制在 1.0 MPa 以内;方案二和方案三的最大拉应力均控制在 0.4 MPa 以内,但方案三比方案二少 1 道主动横撑。综上,比较控制截面应力及主动横撑数量,方案三优于其他 2 种方案。

3 塔梁同步施工研究

3.1 塔梁同步施工方案及全桥有限元模型

斜拉桥原施工方案为先索塔后主梁施工,全桥主梁共划分为 24 个节段。为加快施工进度,论证在中横梁施工完成后进行塔梁同步施工的可行性,塔梁同步施工工况见表 3。

采用 MIDAS/Civil 建立全桥有限元模型(见图 7),主梁和索塔采用梁单元模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟,桥面纵坡及横坡按设计进行模拟。斜拉索与主梁及索塔间采用弹性连接中的刚性连接。

表 3 塔梁同步施工工况

工况号	施工内容
1	索塔施工至第 30 节段,施工主梁 1 [#] 梁段
2	索塔施工至第 31 节段,施工主梁 2 [#] 梁段
3	索塔施工至第 32 节段,施工主梁 3 [#] 梁段
4	索塔施工至第 34 节段,施工主梁 4 [#] 梁段
5	索塔施工至第 36 节段,施工主梁 5 [#] 梁段
6	索塔施工至第 38 节段,施工主梁 6 [#] 梁段
7	索塔施工完成,施工主梁 7 [#] 梁段

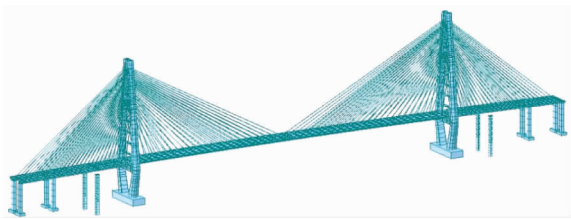


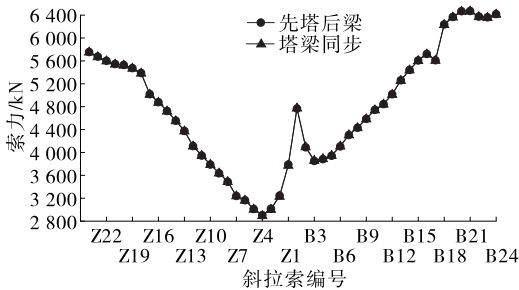
图 7 全桥有限元模型

3.2 成桥状态对比分析

不同施工方法会使斜拉桥成桥状态产生差异,两者间的差异直接决定最终是否可以达到设计成桥状态。因此,对先塔后梁、塔梁同步施工方法下成桥状态进行对比分析。

3.2.1 成桥索力对比

成桥索力是主梁应力和线形的主要影响因素。先塔后梁、塔梁同步施工方法下成桥索力见图 8。



斜拉索编号中,Z 表示中跨,B 表示边跨

图 8 不同施工方法下成桥索力对比

从图 8 可看出:塔梁同步施工对成桥索力的影响较小,主要影响靠近索塔的短索索力,索力最大差值为 12.0 kN ,仅为成桥索力的 0.31% 。

3.2.2 成桥主梁应力和线形对比

成桥主梁应力和线形是合理成桥状态的关键指标。先塔后梁、塔梁同步施工方法下成桥组合梁应力见图 9~11。

由图 9、图 10 可知:大跨混合梁斜拉桥采用先塔后梁、塔梁同步施工时成桥主梁应力基本一致,仅在前几个主梁梁段有些许差别,组合梁(钢梁)应力

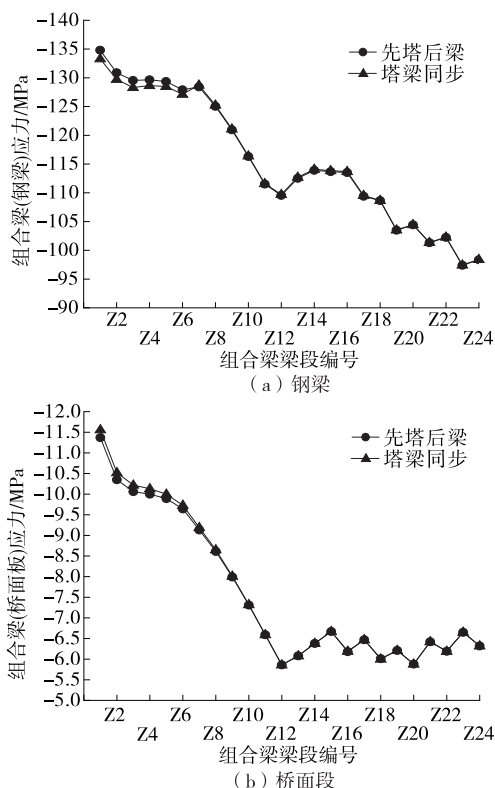


图9 不同施工方法下成桥组合梁应力对比

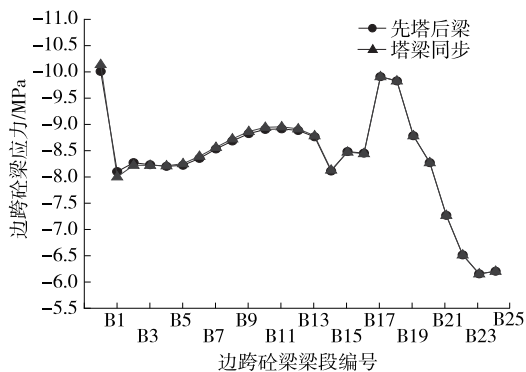


图10 不同施工方法下成桥边跨砗梁应力对比

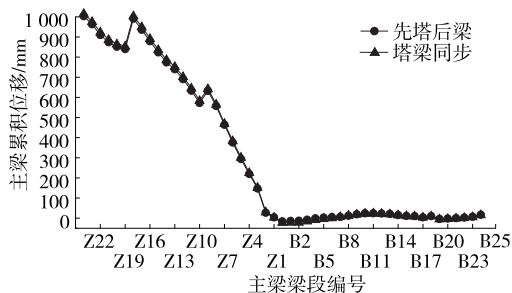


图11 不同施工方法下成桥主梁累积位移对比

最大差值为 1.5 MPa, 组合梁(桥面板)应力最大差值为 0.19 MPa, 边跨砗梁应力最大差值为 0.13 MPa, 且随着施工的进行, 两者间的差值不断减小。

由图 11 可知: 2 种施工方法对中跨组合梁累积位移的影响略大于边跨砗梁, 中跨组合梁的累积位移最大差值为 15 mm, 仅为累积位移值的 1.61%。

综上, 采用塔梁同步施工对成桥主梁应力和线形的影响不大。

3.2.3 成桥索塔应力和位移对比

先塔后梁、塔梁同步施工时成桥索塔应力和位移分别见图 12、图 13。

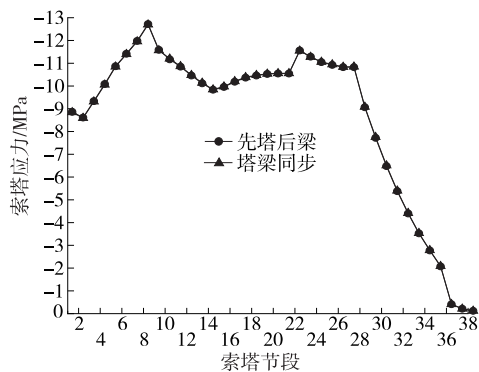
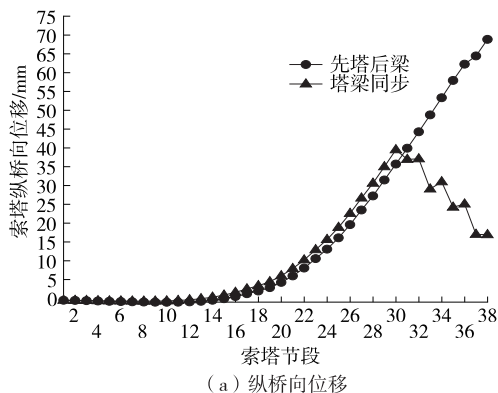
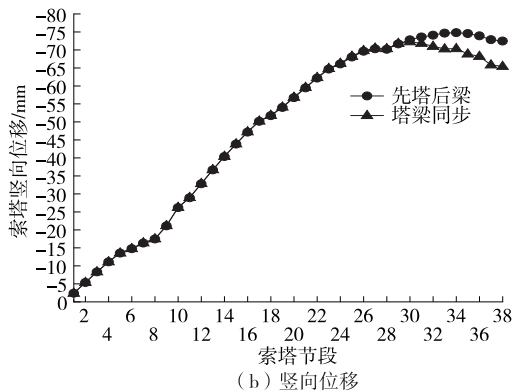


图12 不同施工方法下成桥索塔应力对比



(a) 纵桥向位移



(b) 竖向位移

图13 不同施工方法下成桥索塔位移对比

由图 12 可知: 采用先塔后梁、塔梁同步施工时, 索塔截面均处于受压状态, 两者的应力变化规律基本一致, 且两者间的差值极小, 应力最大差值仅 0.03 MPa。塔梁同步施工对索塔应力的影响很小。

由图 13 可知:塔梁同步施工主要影响同步施工的索塔节段位移,对竖向位移有一定影响,但影响不大;对纵桥向位移的影响较大,塔梁同步施工的索塔节段纵桥向位移小于先塔后梁施工的索塔节段,先塔后梁施工时成桥塔顶端纵桥向位移为 69 mm(往边跨侧),塔梁同步施工时为 17 mm(往边跨侧),减小 52 mm。这是由于塔梁同步施工中,斜拉索的张拉使索塔纵桥向往边跨侧移动,而同步施工的索塔节段施工时间较晚,其纵桥向位移累积较少,且越晚同步施工的索塔节段其成桥纵桥向位移越小。

4 结论

(1) 在索塔 3 种施工方案中,方案二和方案三塔肢与中横梁同步施工较方案一塔肢与中横梁异步施工更能有效控制索塔应力,而方案三的主动横撑数量比方案二少,方案三更优。

(2) 塔肢和横梁的施工顺序、横撑位置及所施加主动力大小等发生改变会使索塔的横向位移产生变化,故索塔施工方案需提前确定。如果在施工中发生施工工序较大改变而又没有提前预偏,会给塔柱线形带来不利影响。

(3) 塔梁同步施工对成桥状态下索塔应力、斜拉索索力、主梁应力和线形的影响不大,塔梁同步施工安全可行。但应充分考虑塔梁同步施工作业面交叉可能带来的高空坠物等安全隐患并采取必要的遮挡措施。

(4) 塔梁同步施工对成桥索塔竖向位移的影响较小,对成桥索塔纵桥向位移的影响较大。塔梁同步施工时成桥塔顶端纵桥向位移小于先塔后梁施工时。

参考文献:

- [1] 胡晓东,陈平.甬江铁路斜拉桥索塔塔梁同步施工方法对比分析[J].铁道标准设计,2016,60(2):89—92.
- [2] 严瑾.独塔斜拉桥主塔主动横撑结构计算[J].公路工程,2017,42(3):180—183.
- [3] 卫军,曾志豪,李定有.斜拉桥异型拱塔施工临时横撑方案比选[J].桥梁建设,2017,47(4):113—118.
- [4] 吕长荣,王岩.内倾式斜拉桥桥塔临时横撑施工方案优化应用研究[J].公路,2018(9):105—111.
- [5] 陈明宪.斜拉桥建造技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 王正.带协作跨预应力混凝土斜拉桥裂缝成因分析及防治对策[D].西安:长安大学,2016.
- [7] 张淑坤,张向东,陆启珂.大跨度斜拉桥塔梁同步施工控制技术[J].广西大学学报(自然科学版),2012,37(1):88—93.
- [8] 张玉平.多塔空间索斜拉桥施工控制关键技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [9] 王彬力.不对称独塔斜拉桥塔梁同步施工预测探析[J].公路工程,2017,42(6):165—170+187.
- [10] 熊琦,郭辉,刘爱林,等.矮塔斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].铁道建筑,2019,59(7):37—41.
- [11] 张永良,刘晨,华峰,等.柴埠大桥塔梁同步施工控制技术[J].公路,2017(5):105—110.
- [12] 顾箭峰,曾祥红.混合梁斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].桥梁建设,2016,46(1):111—116.
- [13] 曾洋,冯仲仁.混合梁斜拉桥塔梁同步施工中主塔偏位影响因素分析[J].中外公路,2017,37(6):205—209.
- [14] 陶龙,徐国挺,邓亨长,等.赤水河红军大桥门式框架桥塔施工关键技术[J].世界桥梁,2020,48(1):30—34.

收稿日期:2021—03—08

(上接第 89 页)

- [9] 徐向峰,张峰,刘佳琪.波形钢腹板箱梁温度分布[J].重庆交通大学学报,2018,37(12):1—10.
- [10] 廖乾健.波纹钢腹板箱梁桥的温度效应与疲劳性能研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [11] SALLAL R Abid, NILDEN Tayşi, MUSTAFA Özakaça. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders[J].Construction and Building Materials,2016,106:523—532.
- [12] 王毅.预应力混凝土连续箱梁温度作用的观测与分析研究[D].南京:东南大学,2006.
- [13] 姚彬,李国平,陈贤俊,等.混凝土箱梁日照温度效应

研究[J].中国市政工程,2019(4):81—85.

- [14] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [15] 郭翔飞.波纹钢腹板预应力混凝土箱梁温度效应研究[D].西安:长安大学,2011.
- [16] 张峰,刘佳琪,高磊,等.波形钢腹板 PC 组合箱梁内衬混凝土部位温度分布研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(1):123—133.
- [17] 刘永健,刘江,张宁.桥梁结构日照温度作用研究综述[J].土木工程学报,2019,52(5):59—78.

收稿日期:2021—03—09