

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.031

复合式牵索挂篮施工过程中受力分析与监测

周苏,李新生,刘陈韬,邵明洁

(苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011)

摘要:复合式牵索挂篮又称为前、后支点组合式挂篮。该文以一独塔双索面斜拉桥的施工监控为背景,论证复合式牵索挂篮在施工过程中的合理性、实用性和先进性,并对整个施工阶段进行建模分析,根据施工阶段挂篮的变形确定施工节段索力分批张拉值,然后将施工阶段挂篮变形与应力的理论值与实测值进行分析对比,表明该挂篮在施工阶段设计安全可靠,传力明确,可为后期指导同类桥梁挂篮设计提供有效依据。

关键词:斜拉桥;复合式牵索挂篮;悬臂浇筑;数值计算;模型分析

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

0 引言

斜拉桥悬臂浇筑常用的设备一般采用牵索挂篮和后支点挂篮等。早期主梁在采用悬臂浇筑施工中所采用的挂篮都是普通挂篮^[1-4],普通挂篮在悬臂浇筑施工时,荷载全部通过挂篮底部的纵横梁传递给已浇筑梁段;牵索式挂篮是在建造现代斜拉桥时进行主梁悬臂浇筑施工的一项施工技术^[5-7],其不同于普通挂篮的显著特点是:牵索挂篮是利用斜拉索与挂篮前端弧首系统相连形成前支点,改变后支点挂篮悬臂受力的结构体系,使其类似简支梁形式,前后支点共同受力,但是传统的牵索挂篮悬臂施工时挂篮前端横向稳定性较差,当悬浇主梁宽度较大,大部分施工现场混凝土浇筑仍是人工操作,很容易导致不对称加载,伴随横向的风荷载会造成挂篮的横向失稳,其结构整体稳定性较差。复合式牵索挂篮是由于新型桥梁结构形式的出现以及为了满足其施工条件专门设计的新型挂篮。复合式牵索挂篮主要由挂篮底部承载系统、主桁架系统及伺服系统三部分组成,其主要特点是悬臂浇筑时节段混凝土重量主要由主桁架系统、拉索系统与底部承载系统共同承担。在已浇筑的主梁上设置主桁架系统,解决了挂篮走行的问题,减小了后锚点上的反力;在挂篮前端,除了设置弧首系统与牵

索系统外,另外设置前吊带,两者共同受力,从而有效控制主梁的线形与应力^[8-9]。本文以苏州长浒大桥单索面斜拉桥为依托,论证复合式牵索挂篮在施工中的合理性与实用性。

1 工程概况

苏州城北大道改建工程跨京杭大运河长浒大桥辅道桥,结构形式为独塔单索面斜拉桥,跨径组合为(104+75)m,塔墩梁固结的体系,索塔采用宝塔形结构,主梁采用单箱双室斜腹板结构,标准节段长7m,顶板宽19m,底板宽8m,节段重约230t,桥型布置及断面如图1、2所示。桥梁75m边跨采用支架现浇施工,104m主跨采用复合式牵索式挂篮悬臂浇筑施工。全桥共设置24对斜拉索(悬臂浇筑段与支架现浇段各12对),每对斜拉索由横向间距为1.4m的两根拉索组成。

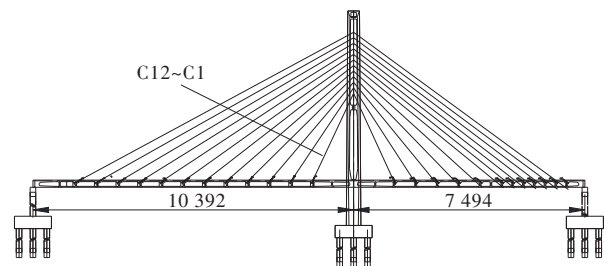


图1 桥型布置图(单位:cm)

收稿日期:2022-05-11

作者简介:周苏,男,硕士研究生.E-mail:916981676@qq.com

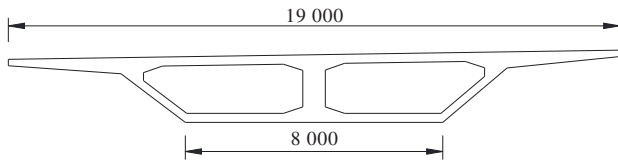
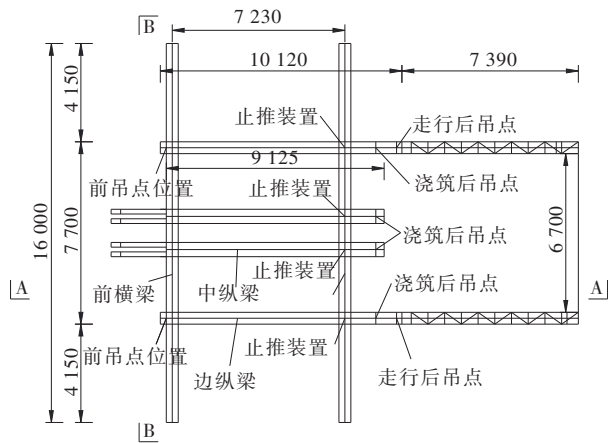


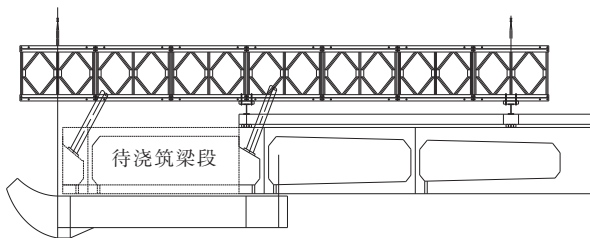
图2 箱梁横断面图(单位:mm)

2 复合式牵索挂篮组成

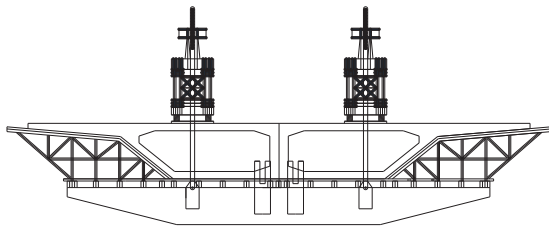
长许大桥复合式牵索挂篮由贝雷梁桁架承重系统、底部纵横梁、拉索张拉系统、平衡锚固及止推系统、行走系统、模版系统6个主要部分组成,挂篮形式见图3。



(a) 平面图



(b) A-A断面



(c) B-B断面

图3 挂篮底承重系统平面(单位:mm)

(1) 贝雷梁桁架承重系统

采用加强型“321”贝雷梁作为主梁上部承重系统,由两组贝雷桁架组成,每组主桁长21 m,由4片贝

雷梁拼装组成^[10]。贝雷片之间采用配套的连接片连接,两主桁横向之间采用12a工字钢连接。贝雷梁采用Q235钢。

(2) 底部纵横梁

主要由4根纵向钢箱梁和前、后横向钢箱梁及分配桁架组成。其中中纵梁断面为1 000 mm×600 mm,前横梁断面为1 400 mm×500 mm,其顶、底板厚16 mm,腹板厚12 mm;边纵梁断面为800 mm×500 mm,顶、底板厚12 mm,腹板厚8 mm;后横梁断面为1 000 mm×500 mm,顶、底板厚12 mm,腹板厚10 mm。

(3) 拉索张拉系统

中纵梁前端设承力弧首及操作平台,进行拉索张拉及锚固工作。弧首进行了局部加强,弧首为变截面,其最大横断面为1 000 mm×600 mm,最小横断面为600 mm×200 mm;顶、底板厚12 mm,腹板厚10 mm。

(4) 平衡锚固系统

主要包括吊带和剪力键,浇筑时由前、后吊带与斜拉索共同承受挂篮竖向荷载,水平荷载由剪力键作用于已浇筑混凝土梁端平衡^[11-13]。底部纵横梁与吊带均采用Q345钢。

(5) 行走系统

挂篮前移利用单层加强321型贝雷桁架梁及工字钢轨道系统,贝雷桁架梁尾端设后锚固抗倾装置^[14]。贝雷桁架梁通过液压千斤顶,沿轨道纵向推移。

(6) 模板系统

挂篮底模、侧模为定型模板,由8 mm槽钢、∠75 mm×5 mm角钢和Q235B钢板组焊而成,内模采用散拼木模或建筑组装钢模^[15]。

3 挂篮结构仿真分析模型

为了能够更精确地对挂篮本身结构进行仿真分析,施工中挂篮本身的应力、变形变化较大,因此假定挂篮结构作用于主梁上,拉索结构作用于主塔上,忽略主梁、主塔变形对挂篮变形的影响,单独分析挂篮系统在浇筑时所产生的应力与变形。挂篮整体模型如图4所示,贝雷梁桁架系统、底部纵横梁及弧首结构采用空间梁单元,标准贝雷桁架间的销钉连接

采用铰接处理,吊带系统采用杆单元,拉索结构采用索单元,每一节段分析模型中共有 2 105 个节点, 4 087 个梁单元,16 个杆单元,2 个索单元。

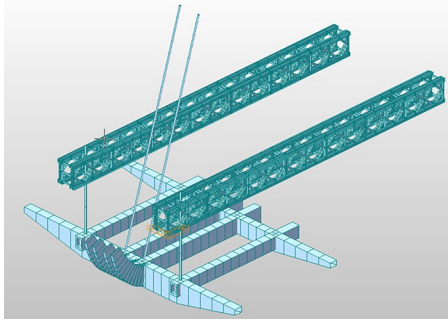


图 4 挂篮节段分析模型

4 拉索索力张拉对挂篮结构的影响分析

4.1 不考虑索力张拉节段施工对传统挂篮的影响

复合式牵索挂篮施工中必须逐步张拉索力,才能保证挂篮整体受力的安全,挂篮前端的变形在施工允许范围之内,从而确保成桥线形符合设计和规范要求。为探索本桥悬臂浇筑过程中拉索分步张拉力的大小及相应时间节点,先考查不张拉索力贝雷梁桁架承重系统在浇筑过程中的受力与变形分布。以 9#标准节段悬臂浇筑为分析对象,在前述分析模型的下底部纵梁直接施加节段浇筑荷载,其主要受力部件(贝雷桁架系统、吊带及底纵梁)应力分析结果见图 5。

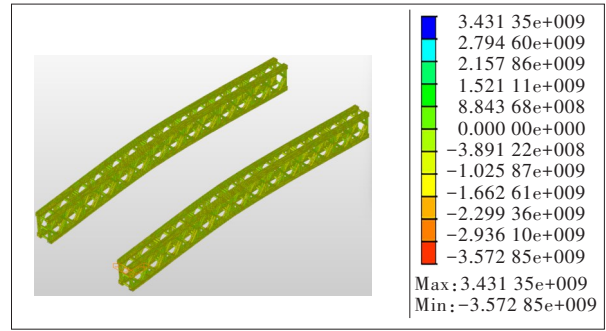
由图 5 可以看出:

(1) 在节段混凝土浇筑过程中,底部纵、横梁应力基本为 $-13.3\sim 10.17$ MPa,自身变形较小,有足够的安全储备。

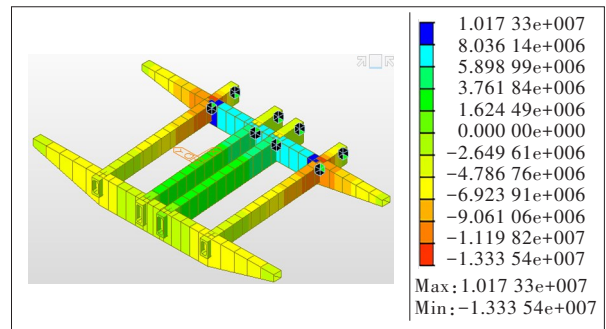
(2) 当节段混凝土浇筑完后,所有吊带应力最大值达到 1 896.6 MPa。吊带结构为 Q345 钢,在这种极端受力模式下结构仍处于安全状态。

(3) 在从节段混凝土开始浇筑至节段混凝土浇筑完后,贝雷梁桁架系统应力为 $-3\ 572.85\sim 3\ 431.35$ MPa,大大超过了贝雷桁架结构的允许应力值 ($[\sigma_R]=160$ MPa)。

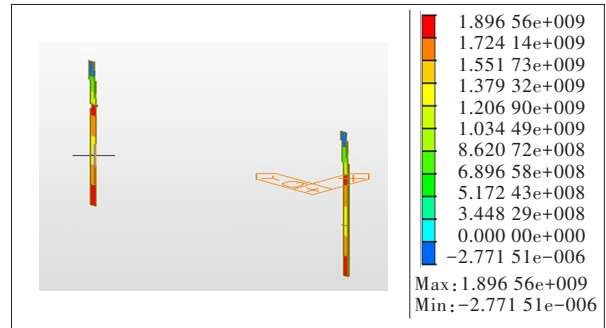
以上分析结果表明:在节段混凝土浇筑过程中如果不考虑索力张拉,贝雷梁桁架系统的结构安全储备远远不足,挂篮前端变形不满足桥梁结构线形控制要求,节段混凝土施工过程中必须考虑索力张拉。



(a) 贝雷梁应力



(b) 底部纵、横梁应力



(c) 吊带应力

图 5 无索力状态下挂篮应力图(单位:Pa)

4.2 节段施工考虑索力张拉对传统挂篮的影响

根据施工组织设计可知主梁悬臂浇筑共分 11 个标准节段,各个节段在斜拉索角度上略有差异,重量基本相同,每个节段分 3 个工况浇筑。一个标准节段混凝土浇筑用量约为 84.6 m^3 ,节段箱梁混凝土浇筑分割图如图 6 所示。其中工况①为浇筑底板混凝土,混凝土用量为 19.3 m^3 (约占总重量的 22.8%);工况②为浇筑腹板、横隔板混凝土,混凝土用量为 22.6 m^3 (约占总重量的 26.7%);工况③为浇筑顶板混凝土,混凝土用量为 42.7 m^3 (约占总重量的 50.5%)。

斜拉桥悬臂梁浇筑时,由于节段浇筑重量较大,

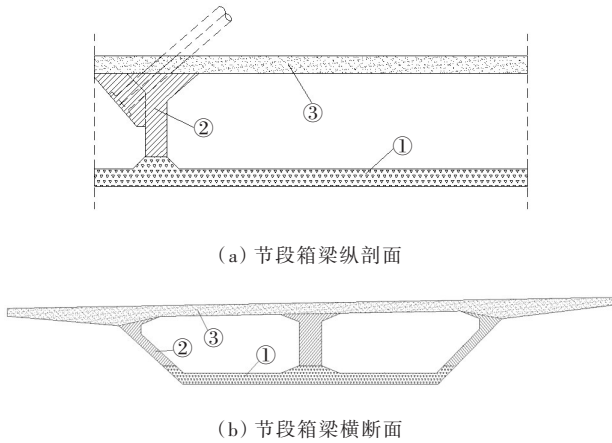


图6 节段箱梁混凝土浇筑分割图

需在浇筑过程中对挂篮产生的变形与应力进行控制。如不进行索力张拉,挂篮前端将产生很大变形,挂篮贝雷体系结构部分杆件应力也将超过规范允许值;而索力张拉过大,可能使挂篮贝雷体系结构出现脱空现象,严重时将导致挂篮出现横向失稳、侧翻等重大安全事故,根据施工规范以及考虑挂篮本身为钢结构,通过计算其结构稳定变形,得到挂篮吊带前端下缘变形最大值接近 20 mm。因此,在本桥梁施工控制过程中始终确保挂篮吊带前端下缘变形在 5~20 mm 范围内,使挂篮体系受力、变形趋于合理、可控。根据这一原则,以标准节段悬臂施工过程挂篮前吊带下缘变形分析为前提,拉索索力张拉值的垂直分量为变量,分析结果见表 1。索力张拉大小与挂篮吊带前端下缘变形关系曲线见图 7。

表1 不同工况拉索张拉前后挂篮前吊带下缘变形、应力

浇筑 工况	不张拉可能 变形值/mm	张拉值/ kN	张拉后可能 变形值/mm	张拉后可能产生 的应力值/MPa
①	24.1	57	20.0	37.6
		100	14.6	27.4
		200	6.3	12.6
②	61.1	400	20.0	37.6
		546	7.8	15.7
		894	30.7	57.7
③	114.6	1 000	20.0	37.6
		1 158	6.9	13.9

注:工况②、③中张拉力包含工况①、②中的最后张拉力值。

由图 7 可知:索力张拉大小与前吊带下缘变形为线性关系,而根据制定的挂篮前端变形范围为 5~20

mm,可得在工况①时,索力张拉最小值为 57 kN,最大值为 200 kN;工况②时,索力张拉最小值为 400 kN,最大值为 547 kN;工况③时,索力张拉最小值为 1 000 kN,最大值为 1 158 kN。

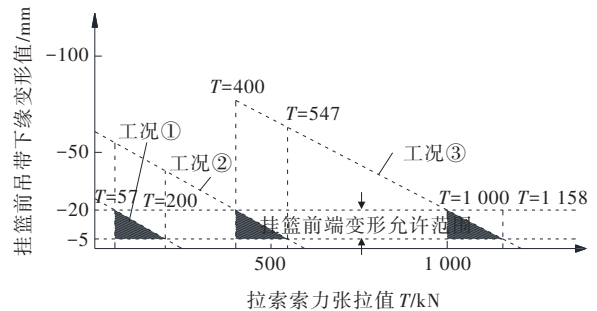


图7 索力张拉大小与前吊带下缘变形关系曲线

4.3 施工过程索力张拉控制分析结果

根据图 7 关系曲线可以制定所有索力的分级分批张拉力,其中工况④张拉索力为挂篮下放后,将主梁调整至桥梁线形所需的理论索力,工况①~④理论索力值见表 2。分批张拉挂篮系统变形与应力汇总见图 8~11。

表2 分级分批张拉理论索力

拉索 编号	张拉索力/kN			
	工况①	工况②	工况③	工况④
C02	200	600	1 100	1 250
C03	250	650	1 200	1 300
C04	250	700	1 300	1 400
C05	250	800	1 400	1 600
C06	300	850	1 500	1 650
C07	300	850	1 600	1 800
C08	300	900	1 700	1 900
C09	350	950	1 800	2 000
C10	350	1 000	1 850	2 050
C11	350	1 000	1 900	2 100
C12	400	1 100	2 000	2 200

注:表中无 C01 拉索数据,是由于 1 号主梁标准段不是采用挂篮悬臂浇筑,1 号标准段主梁是搭设支架进行浇筑,故 C01 的索力数据对于本文复合式牵索挂篮悬臂浇筑施工分析并无相关联系。后文图表中不列出 C01 拉索数据。

由表 2 及图 8~11 可得:

(1) 进行分批张拉索力,挂篮前吊带下缘变形很好地控制在施工允许范围之内;此时吊带所产生的

应力较小,有足够的安全储备。

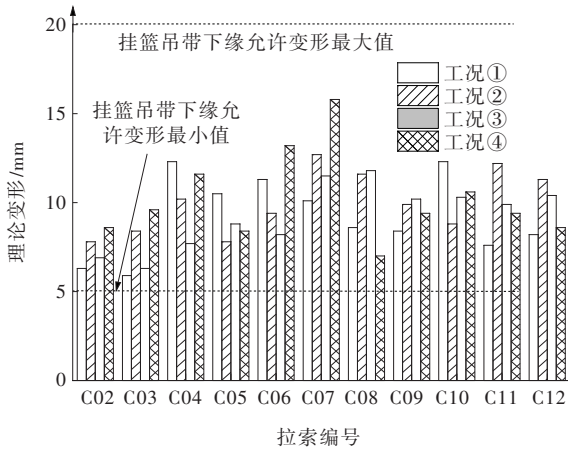


图 8 分批张拉挂篮前吊带下缘理论变形

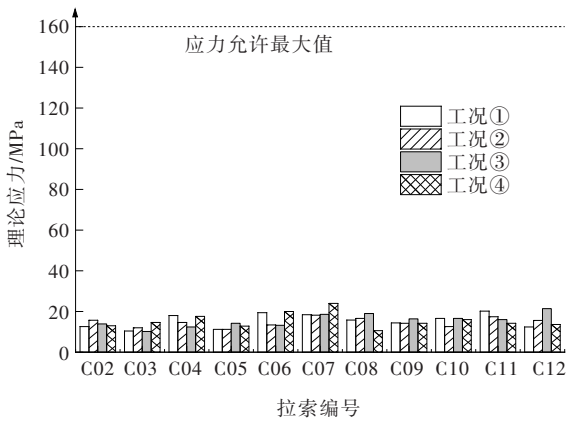


图 9 分批张拉挂篮前吊带下缘理论应力

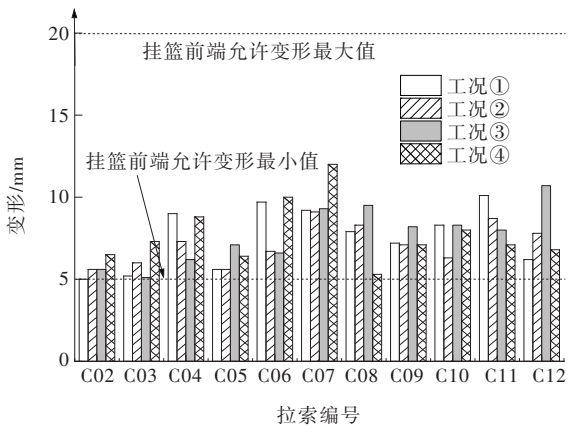


图 10 分批张拉挂篮贝雷梁前端变形

(2) 进行分批索力张拉,贝雷梁前端变形略小于挂篮前吊带下缘变形,在施工允许范围之内;贝雷梁最大拉应力位于前吊带处的斜杆,最大压应力位于支座处的竖杆,此时贝雷梁桁架系统理论应力为-37.1~36.6 MPa,远远小于贝雷桁架结构的允许应

力值($[\sigma_R]=160$ MPa)。

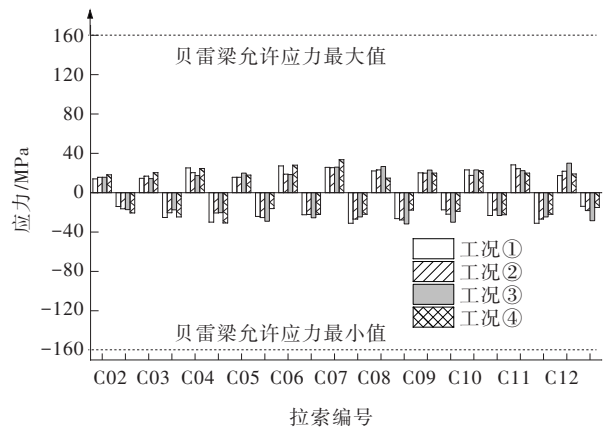


图 11 分批张拉挂篮贝雷梁应力

5 复合式牵索挂篮施工监测结果与分析

5.1 吊带变形与应力监测结果

由测点布置原则可知测点的布置应有利于试验时操作和测读,测点的位置必须有代表性,以便分析和计算^[16-17],为了保证测量数据的可靠性,还应该布置一定数量的校核性测点,通过模型分析,已知吊带与贝雷梁系统最大拉应力与最大压应力的产生位置,挂篮吊带现场监测点布置如图 12 所示。实测与理论数据对比如图 13~20 所示。

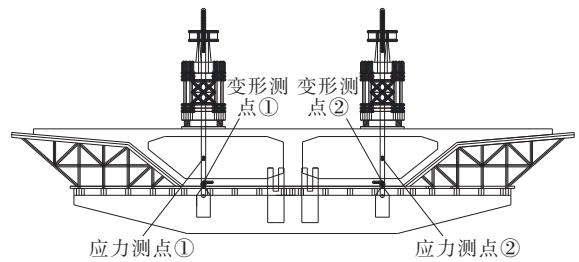


图 12 吊带实测点布置图

分批张拉后,对比变形理论值与实测值可知,挂篮前吊带实测变形均小于其理论变形,每一施工工况所产生的挂篮变形,均能被斜拉索基本抵消,前吊带下缘变形基本控制在允许范围之内;前吊带下缘实测应力为 14.3~35.8 MPa,远小于其允许应力($[\sigma_R]=240$ MPa)。

5.2 贝雷桁架系统应力与变形监测结果与分析

贝雷梁系统应力与变形监测原则与吊带监测一致,现场贝雷梁监测点布置见图 21,各工况贝雷梁

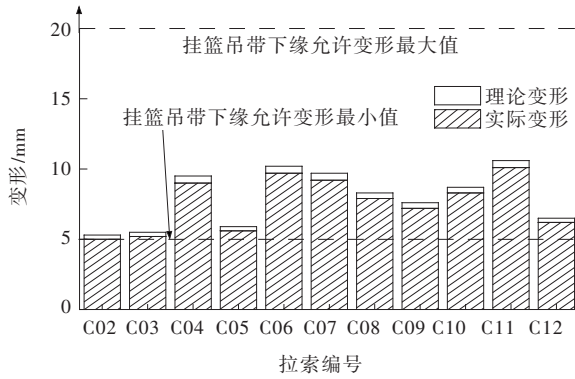


图 13 挂篮前吊带下缘变形实测与分析对比图(工况①)

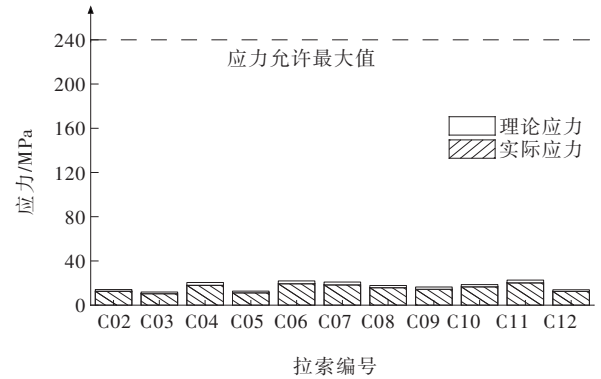


图 17 挂篮前吊带下缘应力实测与分析对比图(工况①)

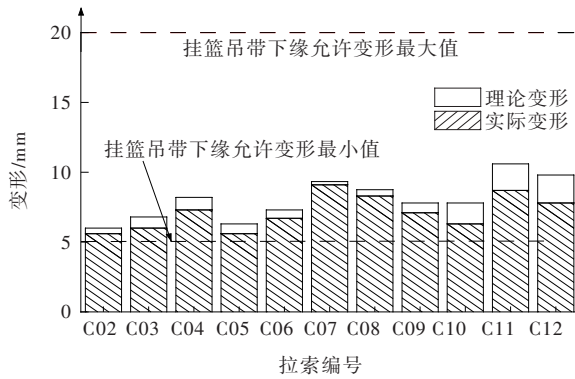


图 14 挂篮前吊带下缘变形实测与分析对比图(工况②)

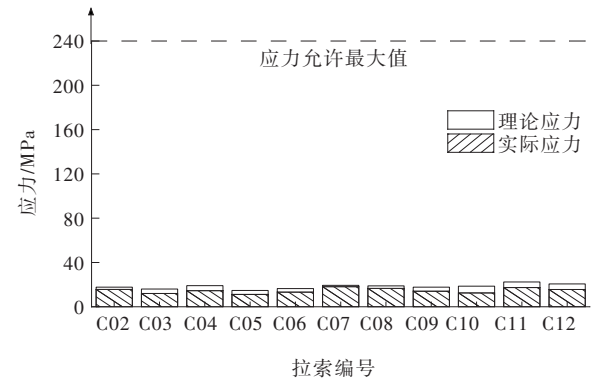


图 18 挂篮前吊带下缘应力实测与分析对比图(工况②)

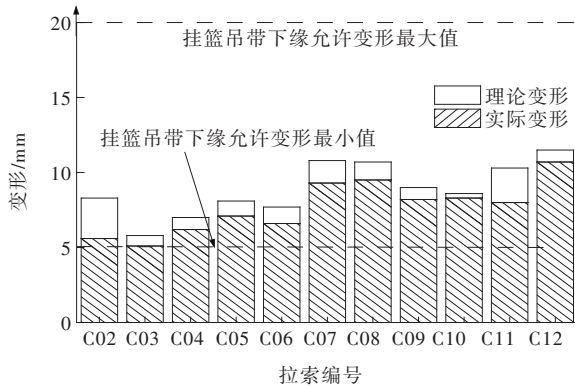


图 15 挂篮前吊带下缘变形实测与分析对比图(工况③)

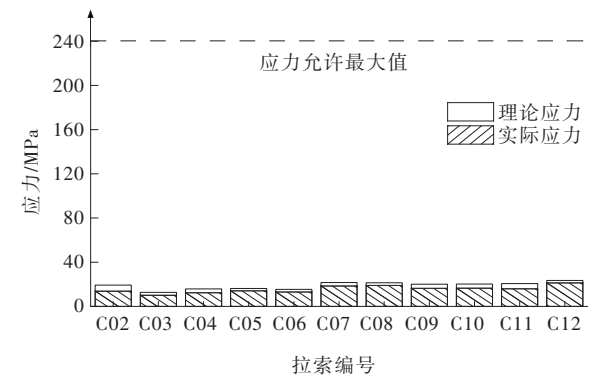


图 19 挂篮前吊带下缘应力实测与分析对比图(工况③)

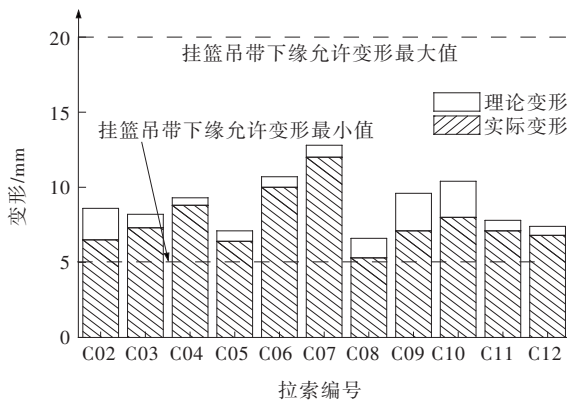


图 16 挂篮前吊带下缘变形实测与分析对比图(工况④)

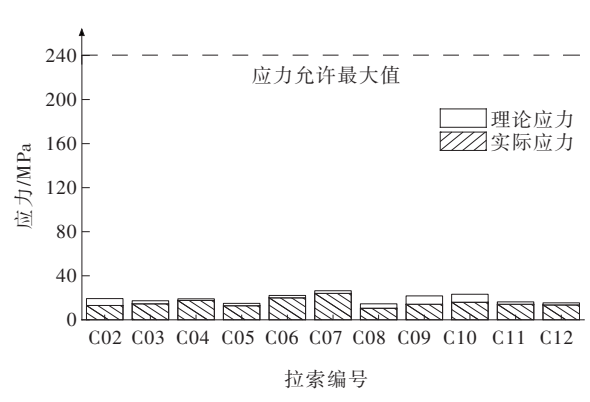


图 20 挂篮前吊带下缘应力实测与分析对比图(工况④)

桁架系统变形与应力实测与分析对比如图 22~29 所示。

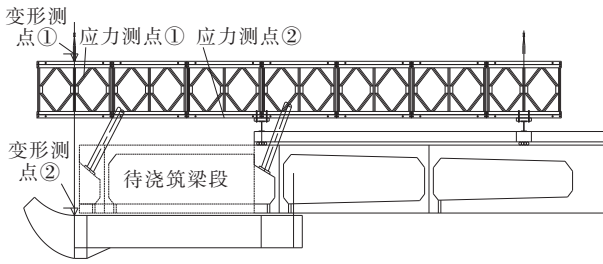


图 21 贝雷梁实测点布置图

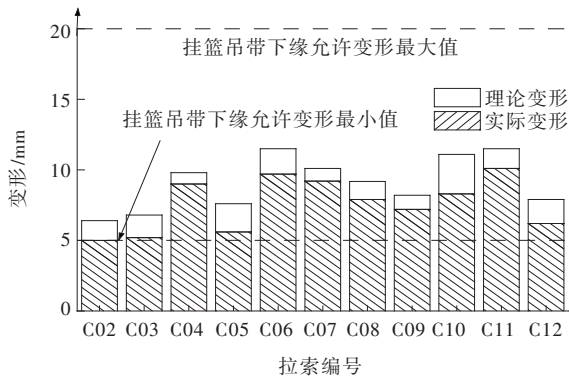


图 22 贝雷梁前端变形实测与分析对比图(工况①)

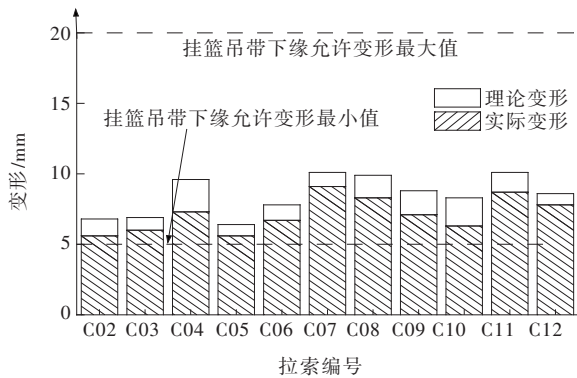


图 23 贝雷梁前端变形实测与分析对比图(工况②)

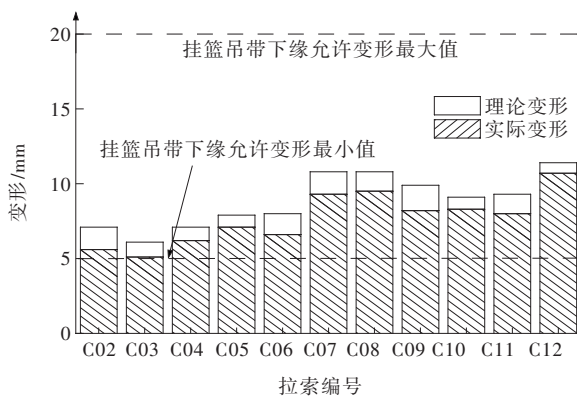


图 24 贝雷梁前端变形实测与分析对比图(工况③)

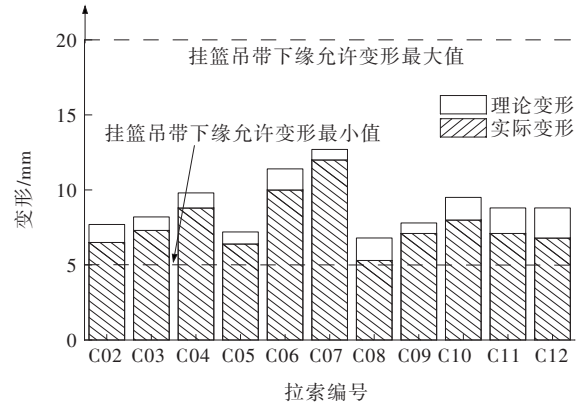


图 25 贝雷梁前端变形实测与分析对比图(工况④)

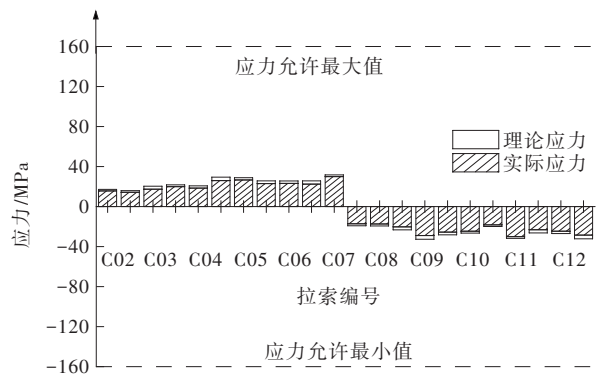


图 26 贝雷梁应力实测与分析对比图(工况①)

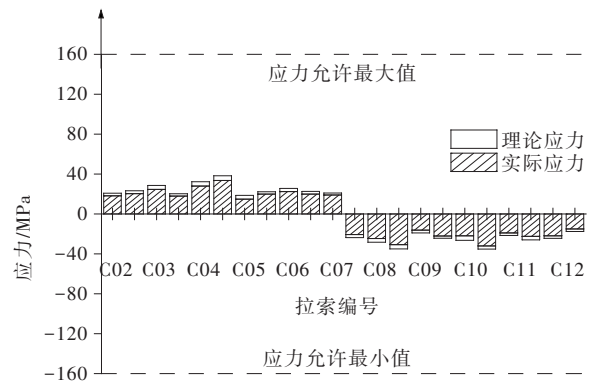


图 27 贝雷梁应力实测与分析对比图(工况②)

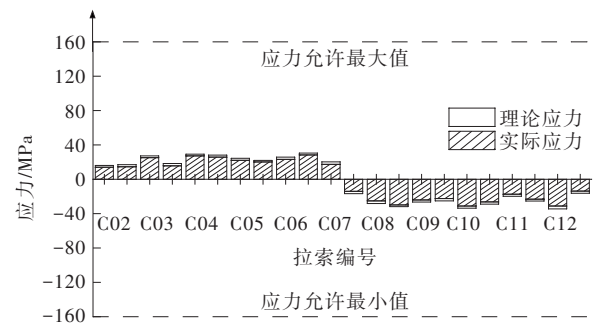


图 28 贝雷梁应力实测与分析对比图(工况③)

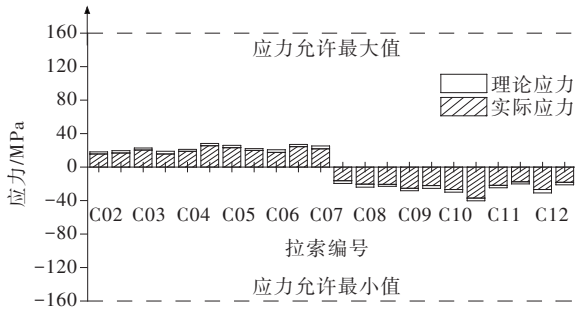


图29 贝雷梁应力实测与分析对比图(工况④)

根据以上分析结果,在节段各个工况混凝土浇筑过程中,贝雷梁桁架系统主要测点所产生的应力为 $-31.1\sim 33.6$ MPa,此时贝雷梁桁架前端的变形较小,在浇筑过程中分批张拉索力,浇筑过程所有的重量由贝雷梁与主塔一同承受,贝雷桁架系统处于安全状态,受力方式与传力机理合理。

6 结论

通过对苏州市城北大道跨京杭大运河长浒大桥牵索挂篮悬臂浇筑施工分析,得到以下结论:

(1) 在复合式牵索挂篮浇筑施工过程中需对挂篮进行监测,如不进行监测则需施工方严格控制每一阶段浇筑的混凝土量与索力张拉值。

(2) 在浇筑混凝土的过程中,对挂篮进行索力张拉,在桥梁施工控制过程中始终确保挂篮吊带前端下缘变形为 $5\sim 20$ mm,使挂篮体系受力、变形趋于合理、可控。

(3) 采用悬臂施工的预应力混凝土斜拉桥,一般标准节段较长、重量相对较重,混凝土浇筑过程中必须进行分阶段分批索力张拉,才能确保挂篮结构受力安全。

参考文献:

- [1] 张开聪.单索面斜拉桥后支点挂篮施工技术[J].云南科技管理,2007,20(2):66-69.
- [2] 曾宪柳.斜拉桥施工挂篮自动化与智能化控制技术应用[J].中外公路,2021,41(1):122-125.
- [3] 杨金龙,陈诚,胡伟邦.PC斜拉桥前支点挂篮安装及锚块定位关键技术[J].中外公路,2021,41(6):153-156.
- [4] 严伟飞,杨涛,郭智刚.高海拔寒冷地区矮塔斜拉桥施工关键技术[J].中外公路,2020,40(2):119-122.
- [5] 焦梦莹.独塔斜拉桥牵索挂篮有限元分析[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [6] 于峥.王家河特大桥高墩多跨矮塔斜拉桥施工关键技术研究[J].中外公路,2021,41(3):110-115.
- [7] 丁延书,罗浩,宋旭明,等.超大悬臂箱梁的施工挂篮构造设计及受力分析[J].建筑施工,2018,40(5):749-751.
- [8] 陈兆辉,周水兴,沈开,等.基于锚杆受力分析的前支点挂篮中间索力确定方法[J].中外公路,2021,41(1):117-122.
- [9] 何春博.不同挂篮形式对斜拉桥的受力影响分析[J].内蒙古公路与运输,2019(02):6-9,50.
- [10] 仇发.双塔双索面斜拉桥施工索力分析与优化[J].铁道建筑技术,2017(6):23-26,71.
- [11] 张争鹏.复合式牵索挂篮设计与应用技术研究[D].西安:长安大学,2010.
- [12] 杨轶.砼斜拉桥挂篮受力分析[J].公路与汽运,2020(4):101-104.
- [13] 王先宏,赵青.连续梁桥三角挂篮受力性能及优化分析[J].兰州工业学院学报,2020,27(2):41-44.
- [14] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [15] 徐凯峰.贝雷桁架式挂篮的设计和施工[J].中国西部科技,2008,7(14):26-27.
- [16] 陈伟,李明.桥梁施工临时结构设计[M].北京:中国铁道出版社,2002.
- [17] 宁世凯.三角挂篮施工法在大跨度悬臂梁施工中的应用[J].宁夏工程技术,2019,18(1):86-90.