

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.041

连续刚构桥梁高墩悬臂施工 监控与稳定性分析

苏 鹏

(山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006)

摘 要: 从我国连续刚构高墩建筑现状入手, 分析了对高墩悬臂施工监控和稳定性分析的必要性。为了对高墩连续刚构施工监控提供有利指导, 以山西省太佳高速公路黄河特大桥为例, 通过对结构变形、应力特性进行监控, 得到高墩悬臂施工引起结构挠度、应力复杂变化的情况; 并分析了高墩和悬臂在施工中的稳定性特征, 得出在最大悬臂时, 结构的稳定性最差, 顺桥向风荷载对桥梁稳定的影响大于横桥方向, 温差引起结构内力变化, 墩柱发生横向和纵向偏转。

关键词: 连续刚构; 桥梁高墩; 悬臂; 施工监控; 稳定性

中图分类号: U448.23

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0216-05

Cantilever Construction Monitoring and Stability Analysis of High Pier Continuous Steel Bridges

SU Peng

(Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: This research analyzed the necessity of high pier cantilever construction monitoring and stability analysis starting from the continuous steel high pier construction present situation. To provides favorable guidance to construction monitoring of high pier continuous steel bridges, this paper took Yellow River Bridge of Tai-Jia highway in Shanxi province as an example, the deformation characteristics, stress characteristics were monitored. The results showed that: high pier cantilever construction will cause the structural deflection and complex stress changes. The stability characteristics of high piers and cantilever in construction were also analyzed. The structural stability is worst when the cantilever is longest. The influence of along bridge wind load is more serious than cross-bridge wind load. The structure temperature difference will cause the structural forces change and lead to pier column horizontal and vertical deflection.

Keywords: continuous steel; high pier; cantilever; construction monitoring; stability

由于连续刚构桥梁具有墩与梁固结便于悬臂施工、结构抗震性能好等优点, 自1988年引进连续刚构桥梁形式起, 连续刚构桥梁在我国取得举世瞩目的成绩^[1]。近年来, 随着西部大开发进程的逐渐推进, 铁路、高速公路向山区延伸, 高墩的发展步伐逐渐加快。但是, 由于连续刚构桥梁结构庞大, 受力复杂^[2], 对其施工技术进行深入研究十分重要。孙斌科^[3]针对高墩大跨径特大桥的下部施工技术进行了分析, 提出桩基施工方案、大体积混凝土承台施工方案以及高墩施工中的一些关键技术。

国外的一些国家对连续刚构高桥的研究相对较早, 随着翻模技术^[4]和爬模施工技术^[5]的逐渐成熟, 高墩建设迅速发展, 而我国对高桥墩的研究相对较晚, 但是, 目前我国已经建成多座主墩高度超过100m的连续刚构桥梁, 表1中列举几座典型桥梁的基本情况。

目前我国高墩连续刚构桥梁主要集中在大山深沟或跨越大江大河地区。在山西境内, 太佳高速公路黄河特大桥建设以前, 还没有桥墩高度超过100m的连续刚构桥墩, 因此, 有必要针对桥梁所在地区

的特征进行桥梁施工监控和稳定性评价。笔者以山西太佳高速公路黄河特大桥为例,对连续刚构桥梁高墩悬臂施工中的变形特性、应力特性等方面进行监控,然后进一步分析了风力响应和温度响应对桥梁悬臂或高墩结构稳定性的影响,为工程施工安全提供指导数据,保证结构在施工过程中的稳定性。

表 1 我国几座典型连续刚构高墩桥梁基本情况

桥梁名称	主墩高度/m	主跨/m	主墩截面类型
云南元江特大桥	123.5	265	双臂空心薄壁墩
湖北龙潭河大桥	178.0	200	双臂空心薄壁墩
重庆红石梁大桥	101.0	180	双臂空心薄壁墩
陕西洛河特大桥	142.0	160	双臂空心薄壁墩
贵州清水河大桥	100.0	128	空心箱型截面墩
贵州李子沟特大桥	128.0	128	圆端面矩形空心墩

1 工程概况

黄河特大桥是连接山西和陕西两省的重要桥梁,该桥梁的起点为黄河山西岸的太佳高速公路终点位置,终点位于黄河陕西一侧,并和榆佳高速公路的佳县隧道相互连接。在山西省“三纵十一横十一环”规划网中,黄河特大桥是太佳高速公路重要组成部分之一,该桥梁主跨为连续刚构,桥梁按照分离式断面设计,设计荷载为公路 - I 级^[6],设计车速为 100 km/h,采用双向四车道高速公路设计标准,桥的单幅宽度为 13 m,两幅共 26 m,设计 300 年一遇的防洪标准,通航标准为 IV 级。由于该地区的风荷载较大,并且这是山西省内首座主墩高度达到 100 m 以上的桥梁,结合气候特征和施工技术特征,在施工过程中,对结构进行实时监控和稳定性评价^[7]。笔者以墩身高度为 109 m 的 15# 主墩为例进行施工监控和稳定性评价,15# 墩及其悬臂节段号如图 1 所示,在整个稳定性分析和施工监控中,将两端对称节段施工称为一个施工过程,整个桥梁悬臂施工分为 18 个施工过程,采用两边对称施工,并对施工时的各参数进行监控分析。

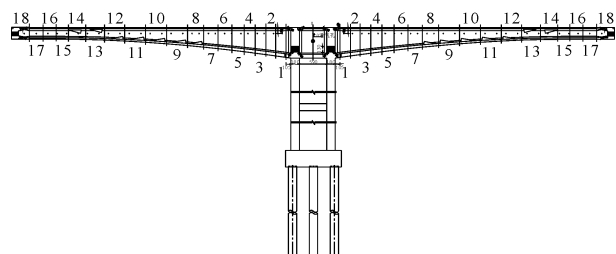


图 1 15# 墩节段分布示意图

2 施工监控

施工监控的任务是保证桥梁正常施工建设,保证结构的可靠性。其内容主要包括变形监控、应力监控和安全监控等方面^[8]。

2.1 变形监控

桥梁结构施工时,由于结构变形,材料收缩等因素会引起结构的实际位置偏离预期设计状态,从而导致结构难以顺利合拢^[9]。在高墩建设中,竖轴偏位或结构发生侧向变形都会产生不利影响。对于高墩在悬臂施工过程中,其变形主要形式为图 2 所示几种形态。

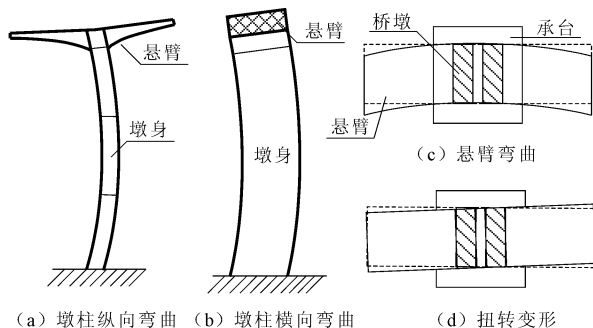


图 2 高墩悬臂施工时的几种变形形态

在高墩悬臂施工过程中,挂篮移动、混凝土浇筑以及预应力张拉情况对悬臂内的挠度变化都有影响,19 节段是悬臂合拢时的施工段,通过计算分析桥梁自重、二期恒载、预应力大小以及混凝土的徐变等因素在第 19 节段时的挠度如图 3 所示。

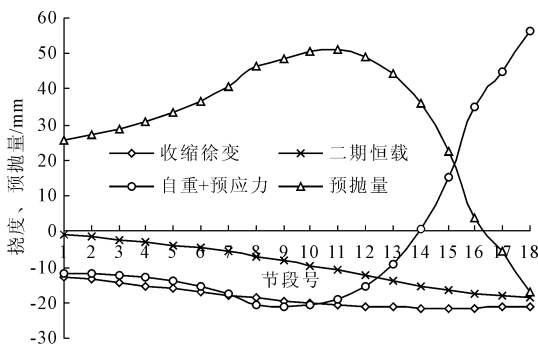


图 3 15# 墩 19 节段两端施工挠度分析结果

首先计算预定值,并通过实时监控获得实测值与预定值进行对比,对相应的参数做出修正,以 15# 墩 15 节段在挂篮移动前后、预应力张拉前后以及混凝土浇筑前后的 9~14 号段的挠度变化监控情况为例进行分析,施工过程中的挠度变化实测值如表 2 所示。

表 2 15 号节段施工对 9~14 号节段挠度的影响

节段	挂篮影响挠度/mm		混凝土影响挠度/mm		预应力影响挠度/mm	
	移动前	移动后	浇筑前	浇筑后	张拉前	张拉后
9 号	-12.8	-11.8	-11.8	-17.1	-20.3	-17.8
10 号	-12.4	-11.0	-11.0	-17.6	-21.6	-18.4
11 号	-10.8	-9.1	-9.1	-17.1	-21.9	-17.9
12 号	-6.9	-4.8	-4.8	-14.4	-20.5	-15.3
13 号	-0.7	-1.7	-1.7	-9.4	-16.2	-10.2
14 号	8.6	-11.6	-11.6	-1.3	-9.2	-2.0

通过实时监控确定各节段的实际挠度,并与计算值进行数值对比分析,初步判断出引起偏差的设计参数,然后预测该节段施工完成时候的标高,与设计标高对比,得出极差,根据该数据进行调整。通常情况下,实际标高都会有一定的允许误差范围内围绕预计标高发生微小变动,这将不会影响下一节段的正常施工。但是,当偏离较大,超过误差允许范围时,则需在下一节段的施工架立模板时加上该误差调整值,从而实现变形的实时调整。

2.2 应力监控

对该桥的应力监控是为了全面反映在各个施工阶段中,桥梁结构内部的应力变化状态。对桥梁施工过程的应力进行监控时使用的元件主要包括混凝土应变计、钢筋计、温度传感器,将这些元件按照一定的规则布置在桥梁主梁或墩台特殊部位,一般情况下需要布置在各跨的主梁根部、四分之一节段和跨中段位置处,并在各截面的顶板和底板横向布置 3 个测点。钢筋计埋设于主梁根部腹板位置,温度传感器则主要用于墩柱两侧温度测试。应力监控以 15#墩悬臂根部截面为例进行分析,在各施工过程中,根部上下缘应力变化情况如图 4 所示。图中拉应力为正,压应力为负,1~18 表示浇筑悬臂节段,每个编号代表一节段施工,测试的结果为节段施工结束后的应力值。

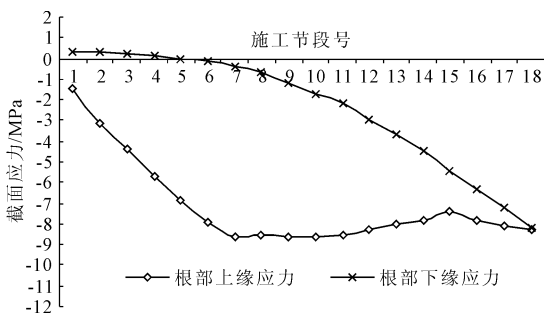


图 4 15#墩悬臂根部各施工阶段应力变化监控结果

从图 4 所示曲线看,在悬臂根部,上缘应力和下

缘应力变化规律差异较大,对于下缘应力而言,起初处于微小拉应力状态,这主要由于张拉顶板预应力引起的,随着施工节段的逐渐增加,悬臂根部负弯矩不断增加,随之箱梁下缘拉应力逐渐消失,到第 5 节段时几乎为零,随后便加速受压,根据曲线变化规律,施工段越大,应力越大,在节段为 18 时,压应力达到 8.3 MPa。对于根部上缘而言,在 7 号节段以前,随着施工节段的增加,压应力逐渐增大,但是,在 7~11 号节段施工过程中,应力趋于平稳,随后略有小幅度上升,在 15 号节段时开始下降,18 号节段时与上缘压应力相当。

在桥梁施工的模板移动安装、混凝土浇筑以及预应力张拉中,预应力张拉对结构应力影响最明显,关键阶段是中跨合拢。因此对该截面进行特殊监控,预应力张拉前后,桥梁结构跨中截面应力变化情况如表 3 所示。

表 3 预应力张拉前后跨中截面应力变化监控结果

预应力状态	预应力张拉前	预应力张拉后
上缘应力/MPa	1.87	-2.95
下缘应力/MPa	-2.58	-11.70

从表 3 中的监控结果看,由于合拢段预应力钢筋的数量较多,在施加预应力前后,跨中位置的应力会发生较大变化。

在太佳高速公路黄河特大桥中,15#墩墩身高度为 109 m,在桥墩两侧的悬臂施工中,容易出现不平衡荷载导致墩底产生较大的弯矩和应力。同样以 15#墩墩底为例,分析在施工过程中应力变化情况。如图 5 所示,在第 1、2 节段施工中,墩底应力变化幅度较大,2~18 节段施工时,墩底截面压应力增大十分平稳。这是由于 1、2 节段的混凝土体积较大,自重应力大,加之机械设备、模板、钢绞线等材料的运入,给墩柱施加了不少附加应力作用,而随后的节段增加的应力比较平衡,自始至终上缘应力略大于下

缘应力,影响应力差异的重要原因是不平衡受力,加上施工设备分布不均匀以及风荷载、日照引起温差等因素的影响所致。通过对墩底上下缘的应力进行监控有利于确保施工作业安全有序进行。

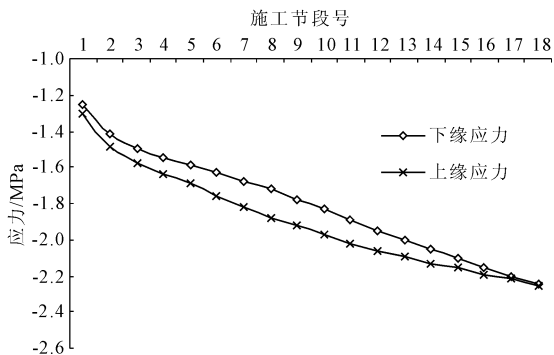


图 5 15#墩双肢薄壁墩左肢墩底截面应力监控结果

3 施工稳定性分析

3.1 风效应分析

根据气象资料,该地区风力影响较大,通常情况下 6~7 级。3 月份最大可达到 8~9 级,短时存在 10 级大风,而风向在不同的季节会有所不同。在零攻角的横风和纵向风作用于双肢薄壁墩,风力绕流压力分布情况如图 6(a)和图 6(b)所示。

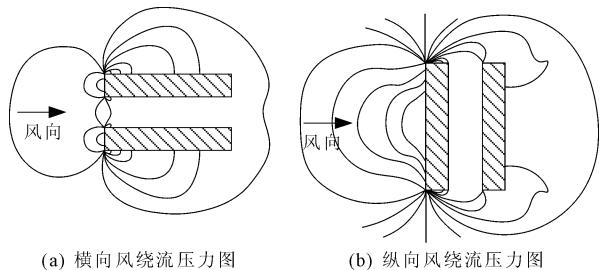


图 6 双肢墩柱绕流压力示意图

根据《公路桥涵设计通用规范》^[10](JTG D60—2004)计算方法对风荷载标准值进行计算。

$$F_{wh} = k_0 k_1 k_3 W_d A_{wh} \quad (1)$$

式中: F_{wh} 为桥梁横向风荷载的标准值,kN; k_0 为围殴风速换算系数,取 0.75; k_1 为风荷载的阻力系数; k_3 为地理、地形影响系数,本文取 1.4; W_d 为基准风的压力; A_{wh} 为迎风面积。根据工程实际情况,对最大悬臂状态下,墩的面内和面外稳定性系数进行分析,用于计算分析的施工过程中主要荷载见表 4。

按照我国现行《钢结构设计规范》^[11](GB 50017—2003)中的计算方法,按照一阶、二阶验算方法对桥梁结构进行稳定性验算,计算过程中,考虑最不利荷载工况,荷载状态为桥梁结构自重+施工临时荷

载+挂篮自重以及悬臂一端滞后施工一个梁段,并考虑冲击力和顺桥风向荷载和横向风荷载的影响,其中荷载工况 1 表示考虑横桥风荷载作用,荷载工况 2 表示顺桥风荷载作用,计算结果如表 5 所示。

表 4 桥梁主要荷载取值

荷载名称	荷载大小/kN	荷载名称	荷载大小/kN
结构自重	26 × V	钢绞线重量	100
挂篮重量	800	电焊机重量	10
千斤顶重量	16	压浆设备重	5
作业人员	15	压浆材料重	4

表 5 最不利荷载状态下桥墩稳定性系数分析结果

工况	一阶稳定性系数	失稳部位	二阶稳定性系数	失稳部位
荷载工况 1	24.1092	高墩面内	47.6422	高墩面外
荷载工况 2	24.1015	高墩面内	47.6318	高墩面外

从分析结果看,一阶计算得到的失稳系数都大于 24,因此,在最大悬臂施工状态下的稳定性是能够满足结构性能要求的,而二阶计算得到的稳定性系数几乎能够达到一阶的 2 倍,这说明,桥梁薄壁墩的面外稳定性大于面内,而风向垂直于桥梁走向的横风,在最大悬臂状态下对结构的稳定性产生的影响较小,顺桥梁的风荷载对结构的稳定性会产生较大的影响。

3.2 温度效应分析

温度对桥梁影响主要因素有太阳辐射、冷空气以及缓慢温度变化对桥梁的局部或者整体产生均匀或不均匀影响,导致桥梁结构应力发生变化^[12]。其中,日照温度由于影响的是局部范围,而且分布状态不均匀,使得结构局部应力过大,因此其复杂性最大,在桥墩从下往上设置从 0~5# 控制截面观测点,0# 截面、1# 截面设于墩底,2# 截面设与承台顶,3# 截面、4# 截面设与横梁部位,5# 截面设在悬臂根部,双肢薄壁墩中,其中一面向阳,另一面背阳,桥墩的温差引起结构变形观测结果如图 7 所示。

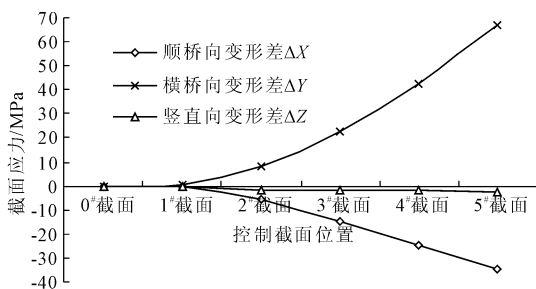


图 7 墩柱向阳肢与背阳肢温差引起结构变成观测结果

如图 7 所示,双肢薄壁墩的两肢之间存在的温度差异,引起结构发生变形,整体向温度较低的一侧发生倾斜,由于墩柱高度较大,墩柱顶端向阴凉一侧发生的偏移量最大,根据观测结果,顶端偏移量最大达到了 34.6 mm,横向弯曲值在墩顶部位达到 67.1 mm。这种变形与施工过程中引起的挠度变形有所不同,因种变形是可以恢复和改变的。

此外,温度差异还会引起结构发生应力变化,通常情况下,墩柱部位的温差对上部主梁结构的应力不会产生影响,但是,对墩柱自身的应力影响较大,根据工程实际情况,同样在观测变形的特殊截面观测应力变化情况,观测结果如表 6 所示。

表 6 墩柱控制截面应力观测结果

截面编号	0# 截面	1# 截面	2# 截面	3# 截面	4# 截面	5# 截面
截面上缘应力差/MPa	0.00	0.00	-1.89	-2.09	-2.11	-2.05
截面下缘应力差/MPa	0.00	0.00	2.02	2.17	2.29	2.24

由表 6 所示结果可知,在向阳一侧出现拉应力,背阳一侧则出现压应力,最大拉应力和压应力均出现在 4# 控制截面位置,该部位受到温度差异影响最大,而 5# 控制截面,由于上部悬臂结构的遮阳作用,使之应力有所减少,温度差异使得结构发生拉应力,对结构的稳定性不利,这种应力变化规律的原因在于薄壁墩的墩柱与横系梁和承台部位形成了局部超静定结构,使结构在温度效应下产生较大的次内力。

4 结 语

以太佳高速公路黄河特大桥为例,分析了连续刚结构桥梁高墩施工过程中对变形、应力、安全等方面的监控数据,并对桥梁在风力和温度荷载下的稳定性能进行分析,结果显示:高墩悬臂施工过程中主要引起结构挠度发生变化,悬臂越长,结构变形越复

杂,最大悬臂状态下,结构的整体稳定性最差,结构自重、挂篮以及其他临时作用对桥梁稳定性都有影响,风荷载对桥梁稳定的影响在顺桥方向影响大于横桥方向,日照温度差异引起墩柱发生横向和纵向偏转,结构内的应力发生变化,会影响结构稳定性。这些应力和变形特征,对施工质量控制和桥梁总体稳定性控制十分重要^[13]。因此,对桥梁的施工过程中各因素进行实时监控和稳定性分析具有重要意义。

参考文献:

- [1] 蒙 昊. 预应力混凝土连续刚构桥的概念设计[D]. 成都:西南交通大学,2013:21-23.
- [2] 刘秀珍. 多跨连续刚构桥的结构分析[J]. 山西交通科技,2012(6):64-65.
- [3] 孙斌科. 高墩大跨径特大桥下部施工的技术措施[J]. 山西交通科技,2002(2):43-45.
- [4] 董 锴. 桥梁高墩施工中滑模与爬模施工工艺的应用[J]. 交通世界(运输·车辆),2015(11):70-71.
- [5] 罗其青,邓继华. 桥梁高墩爬模施工[J]. 湖南交通科技,2005,31(3):74-76.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准:JTG B01-2014[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [7] 王 菲,田山坡. 高墩大跨连续刚构桥的稳定性分析[J]. 铁道工程学报,2012(10):57-62.
- [8] 梁 峰,刘离榕. 某变截面连续箱梁施工监控技术与实践[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(6):134-138.
- [9] 王 义. 某连续梁桥悬臂施工过程的仿真分析[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(4):106-109.
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [11] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计规范:GB 50017-2003[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [12] 郭瑞军. 非线性日照温度下连续刚构桥的温度应力分析[J]. 公路,2013(12):67-73.
- [13] 杜耀辉. 浅析悬臂现浇连续刚构桥施工监控和施工控制有机结合的重要性[J]. 公路,2014(9):96-101.