

斜拉桥塔梁同步施工控制技术研究^{*}

杨则英，曲永业，孙明皓，刘阳宇东，谭婷婷

(山东大学 土建与水利工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:对烟台市滨海公路海阳段丁字河口大桥主塔塔顶合龙后 5 段和主梁第 1—5[#]块塔梁同步施工进行控制技术研究,结合同步施工的影响因素、控制原则等,提出施工监测、控制过程及施工控制措施,探讨塔梁同步施工控制技术,以尽量减少施工误差,达到合理成桥状态。

关键词: 桥梁;斜拉桥;塔梁同步施工;施工控制技术

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)04-0114-04

现代大跨度斜拉桥的修建,推动了结构分析设计理论及施工技术的发展,同时增大了斜拉桥的施工控制难度和挑战性。在施工阶段,随着斜拉桥结构体系和荷载工况的变化,其结构内力和变形不断变化,施工中的大跨度斜拉桥是一个复杂的多输入、多输出高阶时变系统。桥梁同步施工虽可适当缩短工期,但其安全风险较大、施工线形更难控制、初始索力较难确定,为确保桥梁的顺利施工,达到合理成桥状态,需对同步施工过程进行严格控制。该文结合烟台市滨海公路海阳段丁字河口大桥施工,采用自适应控制方法,根据同步施工过程中量测的标高和内力(主要包括斜拉索初张力、主梁及索塔关键部位应力)、主梁线形等结构实际数据,与理论值进行比较,对主要结构参数进行识别,得到两者差值,据此进行参数修正,并采取措施加以调整,进行最优状态控制,确定下一施工阶段的实际控制值。

1 工程概况

丁字河口大桥地处烟台海阳市与青岛即墨市交界处,主桥为 88 m+200 m+88 m 双塔双索面砼斜拉桥,采用半漂浮体系结构,塔墩固结,主梁在桥塔及共用墩处设竖向支承,并在桥塔与主梁之间设置横向、纵向限位装置。主桥立面见图 1。主塔塔顶合龙一段后,分 5 段完成塔顶合龙施工。为缩短工期,充分利用最佳施工季节,对主塔塔顶合龙后 5 段和主梁第 1—5[#] 块采用同步施工方案,图 2 为主塔上塔柱施工分段示意图。根据主桥施工进度计划横道图,塔梁同步施工过程按表 1 进行。同步施工法工期共 495 d,其中塔梁同步施工阶段 110 d,比异步

施工减少 90 d 工期。

2 塔梁同步施工控制技术

2.1 施工控制影响因素

施工阶段计算是在简化的工程背景下进行的,而实际上有许多非确定性因素会对施工状况造成影

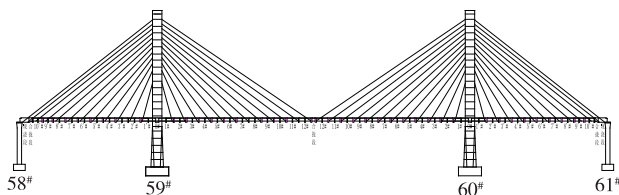


图 1 丁字河口大桥主桥立面示意图

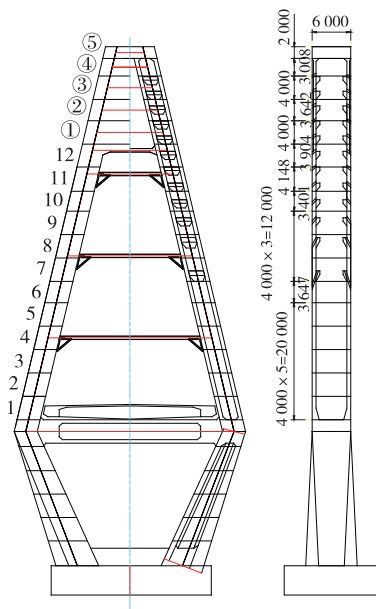


图2 丁字河口大桥主塔上塔柱施工分段示意图(单位:mm)

* 基金项目: 山东省交通运输厅科技项目(2013A12-03;2012A13)

表 1 丁字河口大桥塔梁同步施工步骤

施工步骤	持续时间/d	施工步骤	持续时间/d
承台下塔柱及横梁	60	浇筑主梁 7 [#] 块;安装索 B7、Z7;安装主梁 8 [#] 块挂篮	15
上塔柱 1 [#] ~11 [#] 段	140	浇筑主梁 8 [#] 块;安装索 B8、Z8;安装主梁 9 [#] 块挂篮	15
上塔柱 12 [#] 段	20	浇筑主梁 9 [#] 块;安装索 B9、Z9;安装主梁 10 [#] 块挂篮	15
主梁第 0 [#] ~1 [#] 块支架现浇	20	浇筑主梁 10 [#] 块;安装索 B10、Z10	15
安装索 B1、Z1;塔合龙第 1 段浇筑;安装主梁 2 [#] 块挂篮	15	满堂支架浇筑边跨现浇段	15
塔合龙第 2 段;浇筑主梁 2 [#] 块;安装索 B2、Z2;安装主梁 3 [#] 块挂篮	15	边跨合龙;安装主梁 11 [#] 块挂篮	15
塔合龙第 3 段;浇筑主梁 3 [#] 块;安装索 B3、Z3;安装主梁 4 [#] 块挂篮	15	浇筑主梁 11 [#] 块;安装索 B11、Z11;安装主梁 12 [#] 块挂篮	15
塔合龙第 4 段;浇筑主梁 4 [#] 块;安装索 B4、Z4;安装主梁 5 [#] 块挂篮	15	浇筑主梁 12 [#] 块;安装索 B12、Z12;安装合龙挂篮	15
塔合龙第 5 段	10	中跨合龙	15
浇筑主梁 5 [#] 块;安装索 B5、Z5;安装主梁 6 [#] 块挂篮	15	桥面系施工	20
浇筑主梁 6 [#] 块;安装索 B6、Z6;安装主梁 7 [#] 块挂篮	15	5 年收缩徐变	1 825

响,使设计参数有时难以反映实际情况,甚至可能在某些情况下所辨识的参数估计值超限,造成塔梁同步施工阶段线形、标高和索力误差。影响斜拉桥塔梁同步施工的因素很多,主要有:

(1) 结构参数。包括构件尺寸(梁体长度、桥塔高度、斜拉索制造长度)、施工材料的弹性模量和热膨胀系数、钢筋的预应力及拉索的初始索力、临时荷载等,施工中需对这些参数进行即时监测、取值。

(2) 误差。主要包括结构模型简化和计算误差(单元离散误差、单元变形计算误差、风荷载模拟误差)、量测误差(索力、主梁预应力)、施工误差(模板、锚导管及挂篮定位)、监测误差(应力和变形)等。

(3) 荷载。施工中始终存在荷载变化,如恒载(材料尤其是砼的容重)、活载、临时荷载(吊机、挂篮、临时堆积的材料、张拉平台)及其他荷载都会由于某种原因发生变化。

(4) 环境。1) 温度。受目前技术水平的限制,对温度场的精确测量较困难,引起实测温度偏差。

2) 湿度、风雨作用的影响,尤其是在悬臂阶段,结构的抖动极易引起线形误差和斜拉索索力测试误差。
3) 由环境导致的砼收缩徐变等。

2.2 施工控制原则

在丁字河口大桥塔梁同步施工中,为保证成桥后结构内力和变形状态符合设计要求,对主塔和主梁应力、变形和斜拉索张拉索力进行有效控制,通过实时监测和不断修正参数误差及增设必需的临时安全设施,减小并尽量消除各方面因素的影响。

(1) 力学方面的要求。反映斜拉桥力学性能的因素主要包括主塔、主梁、斜拉索应力及分布情况(或截面内力大小)。一般来说,主塔主要受压弯,主梁主要受弯,斜拉索则受拉,需保证主塔、主梁的应力和弯矩满足砼的强度要求,斜拉索的索力满足规范和设计最大索力要求(即钢丝强度要求)、最小索力要求(即拉索垂度要求)。

(2) 变形方面的要求。斜拉桥成桥时结构线形应合理(塔平梁直)且满足要求,主要包括主塔和主

梁上各位置的标高、主塔水平偏位和变形等在施工过程中和长期变形过程后满足规范、设计要求。

2.3 施工监测

施工阶段的监测既是对其进行控制的基础,也是进行施工监测、方案变更、保证桥梁结构安全的重要手段。监测目标主要有梁段标高、桥塔变位、斜拉索索力及结构各控制截面的应力、应变等。

(1) 主梁变形。主要测定梁段的挠度,在斜拉桥各节段的主要施工工况前后测量主梁标高,其中砼浇筑完及结构体系转换后的标高测量需在日出前完成,主梁轴线偏差测量需在每个主梁块件立模时进行,以校正主梁轴线方位。

(2) 索塔变形。定期测量某些关键施工工况前后塔柱在轴向的位移变化;该桥斜拉索呈空间扇形分布,需测定塔柱的横向水平位移,观测在不平衡荷载、日照等因素影响下塔柱水平变位。

(3) 索力。采用频谱分析法,借助智能信号采集处理分析系统测量索力,读数校核选用经严格标定的专门张拉索的油压千斤顶。索力观测在每个构件的工况发生重大变化时进行,如主梁浇筑完成和梁段体系转换后等。

(4) 应力、应变。测定某些重要工况前后部分梁段或桥塔控制截面的应力、应变。在梁段和索塔上选取部分代表性截面,采用应变传感器获取其应力分布。应变采用 BGK-4200 型弦振式应变计及其配套的应变读数仪测量。

(5) 挂篮变形。测定梁段砼浇筑前后挂篮变形,为调整主梁立模标高提供依据。

(6) 温度影响测量。测量典型气候条件下 1 d 中主梁挠度、塔柱位移及索力等随温度、时间的变化,得出温度对参量的影响。

2.4 施工控制过程

(1) 参考设计说明、规范和相关案例确定设计参数,以设计线形为目标,借助有限元数值模拟分析,预报第一梁段施工时主梁标高及斜拉索索力。

(2) 根据步骤 1 的结果对第一梁段进行施工,并及时测量梁段各控制截面的标高、桥塔变形、斜拉索索力及应变等。

(3) 对比上述监测变量的实际值与有限元模拟分析结果,得到两者差值。

(4) 通过识别模块对计算结果和实测结果进行参数识别与修正。若部分工况不需要进行该项,则由步骤 3 转至步骤 9。

(5) 按修正后参数进行有限元数值模拟分析,获得可观测量的二次计算值,再与实测值进行比较,得到两者差值。

(6) 分析出现差值的原因,重新对已施工梁段的参数取值,并代入数值模拟软件进行分析,同时调整梁段对应的斜拉索索力。

(7) 完成参数修正后,分析此后施工阶段中桥梁的受力是否安全。若安全,则转到步骤 9,否则继续修正参数。

(8) 调整未施工梁段斜拉索的目标索力,以合理成桥状态的目标索力为参照,得到新的目标索力。

(9) 进行有限元数值模拟分析,预报下一梁段施工时主梁标高及斜拉索索力。

(10) 按照预报值进行下一梁段施工并及时测量梁段各控制截面的标高、桥塔变形、斜拉索索力及应变等。

(11) 重复步骤 3~10,直到整个桥梁施工完成。

2.5 施工控制措施

2.5.1 整体施工控制

施工中精确、实时监测主塔变形并进行调整,及时减少主塔因设计和施工中的非确定因素产生的不平衡力矩,保证主塔达到设计要求。同时对主梁应力、变形和斜拉索索力进行实时监控并与理论值比较,结合实际施工组织和施工工艺等对结构模拟进行修正,使计算结果准确,保证施工监测能及时发现异常情况,帮助现场及时采取有效措施,确保桥梁的安全和顺利施工。随着施工进度增加,还应加大应力和位移观测频次。

2.5.2 主塔的施工控制

同步施工时主塔在临时荷载和不平衡荷载下内力变化相比异步法更敏感,其控制技术更复杂,工作量也更大。主要针对桥塔最不利截面的应力、偏位和垂直度进行施工控制。

(1) 控制施工中临时荷载和不平衡荷载所产生的影响,如现场施工器械和材料的堆放、砼浇筑方量控制等。

(2) 塔梁同步施工时桥塔上部边缘应力储备并不充足,桥塔稳定安全系数较低,上塔柱施工时需增设并加固塔柱临时横梁,以减小上塔柱底部应力和顶端偏移,提高塔柱的整体刚度。同时由于横梁拆除将造成桥塔位移,桥塔立模时需设定一定预留量,参考风荷载、温度等环境因素确定水平横梁施工方案,保护支承和桥塔的安全。

(3) 桥塔施工至第12[#]段、开始进行梁段0[#]块及塔顶合龙段施工时,结合设计和规范要求,将砼索塔垂直度允许误差控制在 $h/3\ 000$ 内,且不大于30 mm或设计要求。在已经完成的塔柱节段的多个位置设置监测点,建立高精度局部临时测量控制网和控制点,计算塔柱三维坐标,指导桥塔模板安装,并将实时的连续测量值与计算值进行比较,得出差值,进行合理修正。

(4) 塔梁同步施工前,准备好充足的纠正主塔偏离方案,一旦施工中出现较大主塔偏位,立刻停止施工,查找原因,在所准备方案的基础上进行修正、更新,并做好记录,避免产生累积误差,保证主塔的垂直度和线形,也方便以后查阅。

2.5.3 主梁的施工控制

该桥采用挂篮悬臂现浇施工法,施工中需保证主梁应力、挠度变形、标高、线形等满足要求。

(1) 主梁标高采用绝对标高控制法,以避免误差积累。由监测部门提供当前阶段梁段模板标高及斜拉索初始张拉值,施工单位以该立模标高和挂篮自身变形作为牵索挂篮与应力状态下的底模标高。浇筑时对每车砼称重并得出每段砼的实际重量。

(2) 斜拉桥主梁的应力控制主要有钢筋应力和砼应力两方面,可在钢筋和砼中埋设应力传感器,实时掌握主要施工工况(张拉预应力前后、斜拉索张拉前后及砼浇筑前后)下主梁的应力状态,并与理论预测值进行对比,保证主梁实际应力与设计应力间误差不超过 $\pm 5\%$ 。

(3) 在每个梁段的端部均匀布置不少于3个高程测点,对主梁上下缘挠度进行观测。为减少温度的影响,观测在温度稳定的时段内进行。悬臂梁段浇筑、挂篮移动、拆除等严格按设计要求的施工顺序进行,保持同步、对称施工及两侧平衡,两侧施工荷载差异不得大于7 t。

(4) 主梁线形需同时测量竖直面和水平面两个方位,全面、准确地了解主梁标高和线形的实时空间状况。挂篮操作过程中,各系统施工用的千斤顶必须同步运行。

2.5.4 斜拉索的施工控制

(1) 对斜拉索的控制需同时考虑桥塔的垂直度和变形及主梁线形状况。主梁施工中根据主塔塔顶位移和主梁应力挠度对索力实时监测,不断反馈、分析、修正,确保塔梁线形及精度等满足要求。若有需要,可放弃部分索力精度,但施工中所测得的索力误

差应在计算数值 $\pm 10\%$ 范围内。另外,每张拉4对索需标定测力传感器1次,确保测力准确。

(2) 斜拉索安装中边跨和中跨保持对称作业,防止出现过大不均匀荷载。斜拉索张拉尽量在1 d中气温最稳定的时段进行,要求张拉时桥面无动载、附加荷载尽量与设计计算状况一致。最后一次张拉以主梁线形控制为准,控制张拉索力与设计索力在 $\pm 5\%$ 以内。在中跨合龙前和全桥合龙完成的二期铺装及移动荷载后进行统一调索,修正索塔变形。

2.5.5 结构安全防护控制

该桥塔梁同步施工中,桥塔施工情况复杂,且塔上坠落物随时会对施工人员产生威胁,特别是在0[#]和1[#]悬臂浇筑梁段施工时,安全隐患大,需增加主塔和主梁施工防护措施,保证施工人员安全。

(1) 上塔柱的模板工作平台采用全封闭结构,在防护网外围加设一层网格间距在1 cm内的密目网,防止小型物件从高空坠落。

(2) 在已施工完成的塔柱上设置防坠平台,各边超出塔柱模板投影尺寸至少2 m。该平台由钢板和角钢组成,与桥塔预埋件焊接,其上铺设软质材料,对高空坠物起到缓冲作用。

(3) 主梁顶面搭设供作业人员通行的防护棚,两端分别通向主梁悬浇施工区域,一端通向索塔施工电梯,施工中作业人员均在防护棚内通行。

(4) 在桥塔内侧设置防护罩,防止斜拉索挂索时塔柱顶部电焊火花及小型物件坠落。

2.5.6 其他控制措施

(1) 施工开始前做好砼的生产,根据砼强度C50、C40及缓凝时间确定配合比等参数,保证其弹性模量、和易性、流动性等满足规范和设计要求;施工期间做好分时分批的砼试样制作和送检,同时结合主塔和主梁施工监控情况及时调整砼的生产工艺,保证砼的生产质量满足要求。

(2) 施工控制测量、挂篮精确就位黎明前的一段时间内进行,尽量减少温度的影响。

(3) 记录主要施工工况的环境、荷载、特殊荷载等,尤其注意记录和检查突变状况的相关数据,确保更改过的工况的安全、合理性。

3 结论

(1) 斜拉桥塔梁同步施工控制原则为有效控制主塔和主梁应力、变形及张拉索力,通过结构实时监

(下转第122页)

计细则》,E2类地震作用下延性构件(墩柱)可发生损伤,产生弹塑性变形,耗散地震能量,但延性构件(墩柱)的塑性铰区域应具有足够的塑性变形能力。E2作用下桥墩截面内力分布及各主墩墩底截面内力见图21、表5。

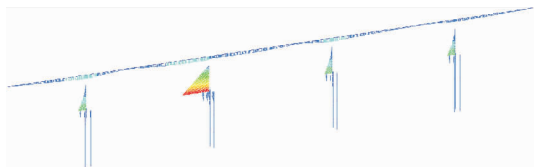


图20 E2作用下桥墩截面内力分布

表5 E2作用下墩底截面内力

墩号	剪力/kN		最大弯矩/ (kN·m)
	横向	纵向	
1	5 252.8	4 541.5	80 161.30
2	7 231.2	8 589.9	100 106.57
3	5 211.8	4 555.8	80 376.40
4	5 249.0	4 555.8	80 376.40

从图20、表5可看出:E2作用下桥墩截面内力分布与E1作用时相同;弯矩在墩底位置最大,产生最大值的桥墩位置与E1作用时相同。

4.2.4 强度验算

图21为主墩截面在现有荷载情况下弯矩-曲率曲线。E1作用下主墩最大弯矩发生在固定支座处桥墩,墩底弯矩最大,为66 766.6 kN·m,小于初始屈服弯矩,结构处于弹性状态;E2作用下,主墩最大弯矩发生在固定支座处桥墩,墩底弯矩最大,为100 106.5 kN·m,小于初始屈服弯矩,结构处于弹性状态。

5 结论

(1) 张公庙大桥各施工阶段的主梁内力及变形

(上接第117页)

测和不断修正,减小并尽量消除各因素对成桥目标的影响,使其达到合理成桥状态。

(2) 影响塔梁同步施工的主要因素有结构参数、施工误差、环境、结构模型简化和计算误差、量测误差等。

(3) 根据施工影响因素、控制原则等制定主梁标高、索塔变位、斜拉索索力等施工监测内容和同步施工控制系统运行过程,提出相应质量、进度和安全

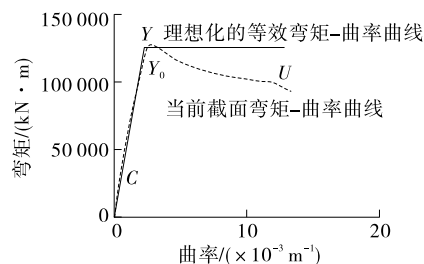


图21 主墩弯矩-曲率曲线

均符合规范要求,且全桥合龙后主梁具有较大应力储备。

(2) 各荷载工况下张公庙大桥最大悬臂阶段临时支墩计算屈曲特征值均小于5,稳定性满足要求。

(3) E1、E2地震作用下张公庙大桥主墩结构均处于弹性工作状态,桥墩承载能力满足要求。

参考文献:

- [1] 向木生,张世飙,张开银.大跨度预应力混凝土桥梁施工控制技术[J].中国公路学报,2002,15(4).
- [2] Maeda K, Otsuka A, Takano H. The design and construction of the Yokohama Bay Bridge [M]. Tokyo: Elsevier Science Publishers, 1991.
- [3] 许素平,杨晓东.大跨度斜拉桥施工控制分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(13).
- [4] 张志林,袁俊桃,王卫锋.大跨度预应力混凝土连续刚构桥施工监测仿真分析[J].科学技术与工程, 2010, 10(29).
- [5] 罗宇能.大跨度辐射式张弦梁结构的静力稳定性及施工仿真分析[D].广州:华南理工大学, 2016.
- [6] 陈舟,颜全胜,河振族.北江大桥引桥整体顶升施工仿真分析[J].桥梁建设, 2015, 45(3).
- [7] 叶晓宇.预应力混凝土斜拉桥施工仿真分析[D].兰州:兰州交通大学, 2017.

收稿日期:2017-12-16

措施,尽可能减小各种不利因素的影响,达到和异步施工一样的较合理的成桥状态。

参考文献:

- [1] 赵艺程.贵州乌江叠合梁斜拉桥非线性稳定分析研究[D].重庆:重庆交通大学, 2016.
- [2] 张南.桥梁结构质量控制技术与工程实例[M].北京:中国电力出版社, 2011.

收稿日期:2018-02-02