



潮白河大桥主桥施工监控研究

文_周 伟 (北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司, 工程师)

程岩雷 (北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司)

李 灿 (北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司)

于帅琦 (北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司)

桥梁施工过程中的监控是对桥梁建设安全、质量、进度的重要保障。施工中的每一阶段,可提前通过计算预计结构的内力和变形,再通过监测手段得到实际值,从而完全跟踪掌握施工过程中结构的受力状态和位移变化。当计算的预计值与施工过程中监测的实际值相差过大时,则有可能发生安全问题。当发现这种情况,须进行数据检查和原因分析,排除问题后才能继续施工。

潮白河大桥工程项目是京津冀协同发展重点工程,采用的三跨双塔双索面斜拉结构施工工艺复杂、难度大,施工监控的总目标是确保结构在施工中应力、变形与稳定状态在允许范围内。控制手段以在施工过程中针对确定施工方案中的塔与梁的受力、变形和稳定模拟分析为基础,通过理论计算值与实测值的比较和误差分析,来对结构状态、施工工艺和方案进行必要的调整,使结构状态稳定可控,最终成桥状态满足设计要求。

实施监测和监控,可以为桥梁设计、施工提供第一手资料和科学数据,积累经验,以便今后改进类似桥梁的设计和施工工艺,其结果还可以作为桥梁运营前初始状态的永久技术档案,是若干年后评估桥梁状态的重要依据。

一、桥梁结构概况

桥梁结构为72.50m+155m+72.50m的三跨双塔双索面混凝土梁斜拉桥,半漂浮体系,桥梁全宽45m。

主梁为主纵梁、横梁及桥面板组成的梁格系统,主梁全宽44.78m,全长300m,在中跨跨中设置2m长合龙段。主纵梁梁高2.50m,中心间距29m。横梁包括三种截面形式,A类横梁除主纵梁内采用矩形截面外,其余部分均采用T字形断面;B类、C类横梁采用矩形截面,B类横梁梁高2m,C类横梁梁高2.50m;悬臂板处横梁采用矩形截面,高度由1.75m渐变到0.25m,为避免运营中主桥边墩处出现负反力,在主桥边跨梁端处增加了配重。

主塔全高67.40m,分为混凝土塔身、混凝土横梁及混凝土基座三部分。塔身全高66.40m,分为主塔装饰段、主塔锚固段、主塔过渡段、主塔通行段、主塔过梁段、主塔加宽段;主塔装饰段为变宽箱型断面,主塔锚固段、主塔过渡段、主塔通行段为等宽箱型断面,主塔过梁段、主塔加宽段为等宽矩形断面。主塔内钢锚梁与主塔牛腿上用预埋钢板焊接,32对斜拉索均锚固在钢锚梁上。主塔横梁为钢筋混凝土结构,截面为矩形断面。主塔内钢锚梁预埋钢板通过剪力钉与牛腿混凝土连接。混凝土基座为钢筋混凝土结构,主塔基础采用摩擦桩,全桥共计96根。承台为钢筋混凝土结构,截面为八边形断面。

斜拉索采用直径为 $\Phi 15.70\text{mm}$ 的环氧涂层钢绞线成品拉索,其抗拉强度不低于1670MPa。

设计标准:道路等级为城市主干路,设计车速为60km/h;路面类型为沥青混凝土路面;机动车道按照三上三下组织交通;桥梁设计荷载为城-A级;人群荷载为4kPa。

二、施工监控的参数选取

(一) 施工阶段及顺序

潮白河大桥主塔采用液压爬模施工,每个主塔划分为16个节段施工。主塔横梁采用钢管支架现浇,塔内钢锚梁采用塔吊安装,全桥设2座塔吊。混凝土泵车臂架高度范围内采用泵送混凝土,超出的部分使用塔吊和灰斗提升混凝土浇筑。

上部结构采用支架现浇法施工。在现况河道内填土筑岛围堰,将水排空。在主梁支架下填方,顶层采取基础硬化措施进行加固。主桥主梁采用落地满堂架做支撑。脚手架搭设好后,铺设桥梁板底模和梁板侧模,底模、侧模均采用竹胶板加工而成。全桥混凝土浇筑分为三段,东、西段各长149m,中间为合龙段,长2m。东、西段桥梁板按底腹板、顶板的顺序分两次浇筑。东西段浇筑完成后,分别单独进行预应力张拉、锚固,然后浇筑中间合龙段,做最后张拉。

斜拉索施工时根据现场施工情况和监控验算的结果进行斜拉索安装和张拉的控制。斜拉索张拉后拆除主梁浇筑支架,根据监控结果确定是否进行调索。

主要施工顺序为:桩基及承台、塔托及主塔、河道排架基础、主梁支架、主梁施工、斜拉索安装。

(二) 施工监控所需参数及分类

潮白河大桥主桥施工监控所需参数可以分为几何参数、材料特性参数和环境参数。在这些参数中,有些属于施工监控中的敏感参数,有些则影响较小。表1列出了大跨度斜拉桥施工监控需要的参数,通过计算模型的模拟分析,根据各参数对结构施工影响的大小,将其敏感性分为3级。1级参数是指该参数有影响,但不突出,其参数变化对所涉及的影响范围(或对象)不敏感,即使该参数采用理论值,也可实现控制目标;3级参数是指该参数对所涉及的影响对象很敏感,必须在施工监控中获得实际参数,监控工作必须以实际参数为准,否则监控目标很难实现;敏感性2级参数介于1级和3级之间,其参数至少应采用理论加经验修正值。

表1 大跨度斜拉桥施工监控所需参数及其敏感性分类表

构件名称	参数名称	影响范围	敏感级别	备注
桥塔	构造尺寸	变形量应力大小	1	桥塔顶抗推刚度、压缩量
	弹性模量	变形量	2	桥塔顶抗推刚度、压缩量
	温度	标高、位移、应力	3	塔顶坐标
	收缩徐变、基础沉降	变形量	3	塔顶预高
钢锚梁	构造尺寸	施工变形和施工方案	1	确定锚固边界条件
	施工标高	线形和成桥目标	2	修正锚固位置
	结构重量	桥塔应力	1	—
斜拉索	面积	弹性变形量	2	—
	弹性模量	弹性变形量	2	—
	制作长度	加劲梁线形、索力	1	—
主梁	截面尺寸	重量与长度	1	—
	梁段重量	线形和桥塔顶纵向位置	3	—
	施工方案	连接方式	2	—
	温度	合龙与线形	2	—
护栏桥面铺装	铺装及栏杆重量	结构线形与内力	3	—
	施工方案	变形、内力、局部应力	1	—

(三) 施工监控各参数的获取方法及要求

潮白河大桥主桥施工监控参数根据施工现场的实际情况拟通过以下方法获取。

1. 实际现场测量

桥梁的实际沉降和变形、坐标、几何尺寸等参数，应采用现场实际测量的方法获取。

2. 试验室与工厂测量

对于材料的弹性模量等参数，应采用试验室测量的方式获取。

3. 通过现场测试识别

无法通过实际现场测量、试验室与工厂测量获取的参数，采用间接法，通过模拟、试验测试及计算分析等方法获取。

(四) 监控参数的预测与调整

施工监控的核心工作是在监测数据的基础上对施工过程进行有效控制，保证成桥线形和内力满足设计要求和预期。

在施工监控的实际操作中，先将每阶段施工数据进行实测（包括材料特性、关键截面受力状态、结构位移等）。将实测材料特性输入计算模型，计算结构的理论状态，如与实测状态不符应找出原因，确保结构计算状态与实测状态吻合。

依据现有的计算模型和实测参数预测成桥线形和结构受力状态，分析预测成桥状态与设计状态的差异。当差异不满足设计要求时，根据设计和规范的要求，调整下一施工阶段或后续几个施工阶段的施工参数和工艺，将调整后的数据导入模型中进行模拟，分析现况成桥线形的状态（包括主梁应力的状态），将此时模拟的成桥状态称为修正成桥状态。

若差异满足设计，则以理论施工状态为直接施工目标，以修正成桥状态为间接施工目标。

在桥塔、钢锚梁、上部结构浇筑施工完成后，测量塔顶位置和标高、桥面线形等实际施工状态，与理论施工状态相比，两者必然存在偏差。以塔顶位置和成桥桥面设计线形为目标状态，分析计算各索索力，得到理论施工状态，同时预测出新的成桥线形状态和内力状态。

每对斜拉索安装张拉后，上部结构和主塔的位移情况与理论施工状态相比也存在偏差。将偏差代入计算模型，以成桥桥面设计线形为目标状态，调整剩余斜拉索索力，得到理论施工状态，同时预测出新的成桥线形状态和内力状态。与上一步骤修正成桥状态相比，此时成桥状态的内力和线形、斜拉索索力同样也有所变化。随着桥梁施工过程中不断重复上述步骤，桥梁结构最终会达到修正成桥状态。

三、施工监控初步计算分析

(一) 计算方法与软件

计算软件采用桥梁结构通用有限元分析与设计软件Midas Civil 2015。根据本桥施工流程，将斜拉桥施工分析模型划分为31步进行计算。结构仿真计算分析采用Midas Civil建立空间模型。

(二) 计算模型及参数

1. 模型简介

为详细分析主塔和主梁的受力情况，建立了梁格模型，如图1所示。主纵梁截面采用单箱单室箱梁截面，横梁采用T梁截面。主塔从承台开始模拟。



图1 结构计算简图

2. 单元类型

模型中采用的单元类型包括以下两种。

索单元：斜拉索采用只受拉单元和索单元进行模拟，线性分析时自动等效为桁架单元进行计算。

梁单元：桥塔、主梁采用梁单元进行模拟。

3. 边界条件

塔柱：承台底固结。

主梁：主梁各支座处设置弹性连接，弹性模量为：竖向 $1 \times 107.00 \text{ kN/m}$ ，横向 10.00 kN/m 。

斜拉索：根据图纸计算锚点位置，主塔锚点与钢锚梁安装牛腿处主塔刚性连接，主梁锚点与最近的横梁纵梁节点刚性连接。

4. 材料特性

结构各构件材料参数见表2。

表2 结构材料参数

材料类型	弹性模量 (kPa)	等效容重 (kN/m ³)	线膨胀系数 (°C-1)	备注
斜拉索	1.95×10 ⁸	78.50	1.20×10 ⁻⁵	1860MPa
主塔	3.45×10 ⁷	27	1×10 ⁻⁵	C50
主梁	3.60×10 ⁷	27	1×10 ⁻⁵	C60

5. 几何特性

结构主要构件截面几何参数见表3。

表3 主要构件截面几何特性参数

类型	面积 (m ²)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)	I _x (m ⁴)	
斜拉索	4根直径15.20mm	—	—	—	
主梁	主纵梁	5.22	4.54	20.54	9.21
	横梁A	1.83	0.69	1.92	0.06
主塔	下塔柱	16.81	60.68	27.41	67.46
	中塔柱下部	11.68	24.07	11.65	24.61
	中塔柱上部	9.81	22.38	10.91	22.68

(三) 计算成果

1. 主塔应力

主塔最大压应力为-10.90MPa，发生于塔底处，最大应力发生在主梁支架卸架后。应力图见图2。

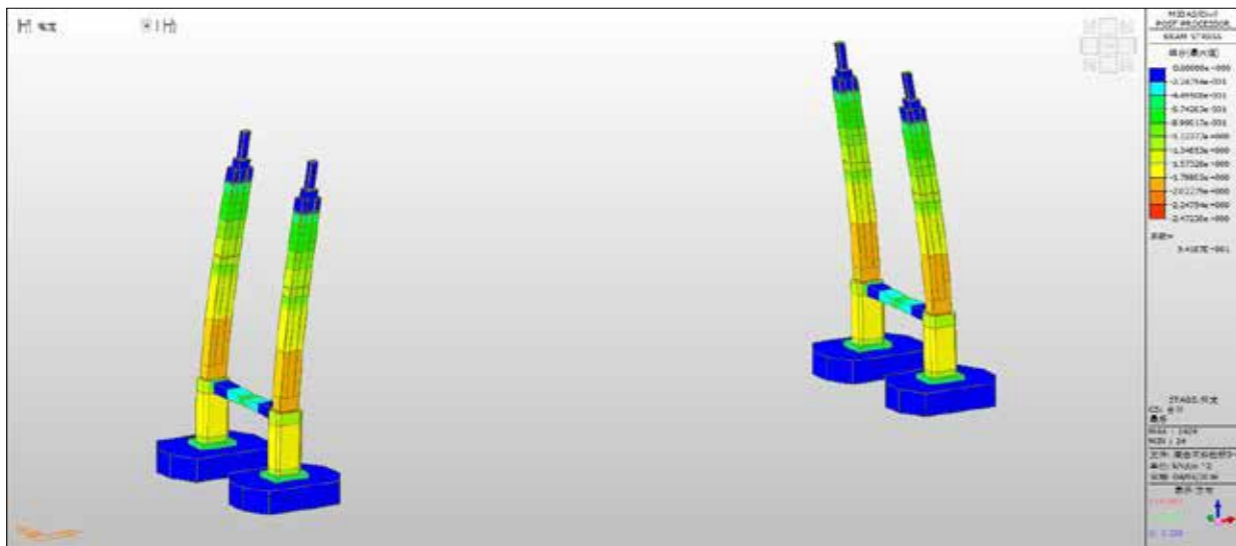


图2 恒载作用下主塔应力示意图

2. 梁应力

主纵梁最大应力为-17.50MPa，发生于跨中合龙处，最大应力发生在主梁合龙后调索阶段。横梁最大应力为-15MPa，发生于中跨1/4跨处，最大应力发生在斜拉索安装张拉完成后。

四、监控测点布设

(一) 主塔应力测点

每个主塔设置2个应力监测截面，每截面4个测点，全桥共设置32个主塔应力测点。主塔应力测点使用振弦式应变计布设。

(二) 主塔位移测点

每个主塔布置8个临时位移测点和1个永久位移测点，全桥共布置32个主塔临时位移测点，4个永久位移测点。临时位移测点使用反光标靶布设，永久位移测点使用反光棱镜布设。

(三) 主梁应力测点

全桥在主纵梁设置9个应力监测截面，每个截面布置10个应力监测测点；选取2道横梁设置应力测点，每个横梁布置12个应力测点。主梁应力采用振弦式应变计测量。

(四) 主梁位移测点

主桥起始桩号K2+45，终点桩号K2+345。满堂架支模阶段在各主纵梁南北两侧设置测线，全桥设置4条测线，各测线布置55个标高测点，共220个立模标高测点。挂索期间在每根斜拉索主梁锚点附近设置标高测点，全桥设置64个标高测点。调索期间在桥面中线南北两侧设置测线，每条测线按5m等间距设置59个测点，全桥布置118个测点。

(五) 斜拉索测点

斜拉索挂索安装阶段对每根斜拉索索力进行监测，调索阶段对重点斜拉索索力进行监测，在南侧WSC1、ESC1、WMC8和EMC8斜拉索处安装压力环对索力测试结果进行校验。

五、监控成果统计与分析

(一) 主塔应力

施工过程中，10轴主塔实测最大应力为-11.90MPa，出现在10轴南塔塔中靠近中跨一侧；11轴主塔实测最大应力-16MPa，出现在11轴北塔塔中靠近中跨一侧，实测主塔最大应力略大于计算值-10.90MPa，但远小于混凝土抗压设计强度，主塔监测截面未出现拉应力。

主塔应力变化见图3、图4。

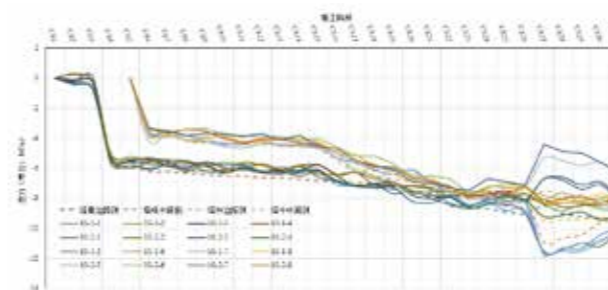


图3 10轴主塔应力变化图

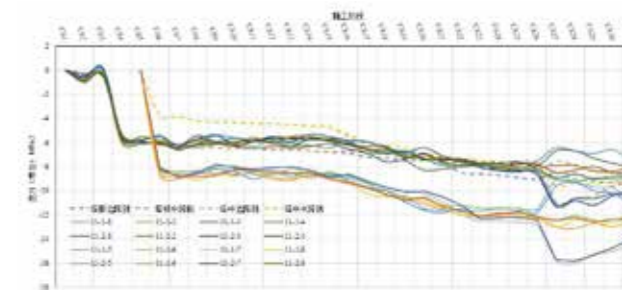


图4 11轴主塔应力变化图

(二) 主塔位移

调索完成后，10轴北塔塔顶向中跨34.80mm，10轴南塔塔顶向中跨23.30mm，11轴北塔塔顶向中跨55.70mm，11轴南塔塔顶向中跨40.90mm。

（三）主梁应力

主梁实测最大应力为-19.20MPa，出现在跨中合龙段处，略大于计算值，但远小于混凝土抗压设计强度，主梁各监测截面未出现拉应力。

（四）主梁位移

满堂架支模阶段监测结果及立模标高监测结果表明主梁立模标高满足设计和监控要求。

挂索期间监测结果表明，到主梁支架拆卸后，主梁中跨跨中最大下沉154.47mm。

调索期间监测结果表明，调索后主梁跨中北侧低于设计值41mm，跨中南侧低于设计值54mm。

（五）斜拉索索力

调索后索力基本为均匀变化，各索索力未超规范限值，满足设计要求，成桥后斜拉索索力分布见图5。

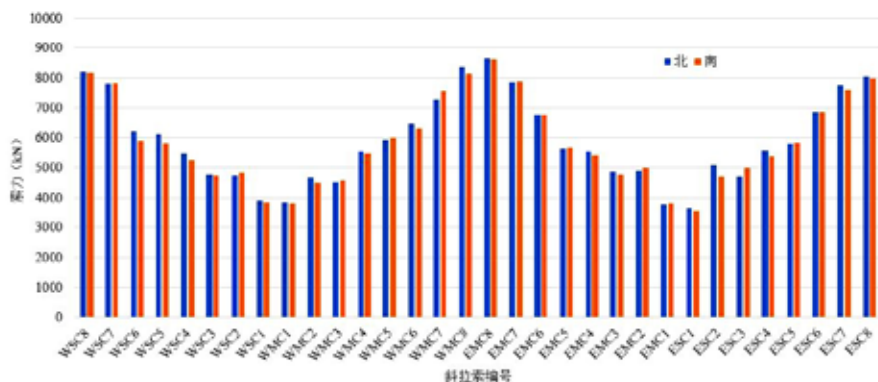


图5 成桥斜拉索索力分布

（六）监控结论

施工过程中主塔、主梁及拉索应力未超限值。到调索完成，全桥结构施工结束后，桥梁状态如下。

(1) 施工过程中主塔主要截面应力变化趋势与理论计算值基本一致，最大应力满足设计规范要求，未出现拉应力。

(2) 10轴北塔塔顶向中跨34.80mm，10轴南塔塔顶向中跨23.30mm，11轴北塔塔顶向中跨55.70mm，11轴南塔塔顶向中跨40.90mm。

(3) 主梁主要截面应力变化趋势与理论计算值基本一致，最大应力满足设计规范要求，成桥后主梁主要截面未出现拉应力。

(4) 主梁跨中北侧低于设计值41mm，跨中南侧低于设计值54mm。

(5) 调索后各索索力未超规范限值，满足设计要求。

六、结语

通过施工过程中监控表明施工过程中主塔主要截面应力变化趋势与理论计算值基本一致，最大应力满足设计规范要求，未出现拉应力。主梁主要截面应力变化趋势与理论计算值基本一致，最大应力满足设计规范要求，成桥后主梁主要截面未出现拉应力。调索后各索索力未超规范限值，满足设计要求。

通过建模来模拟施工工艺、顺序等，分析施工过程中可能存在的不安全因素，并结合施工工程中的实时监控数据，可以协助设计单位及施工单位合理调整设计及施工方案。桥梁施工过程中的监控，对桥梁施工安全、施工顺序调整及施工图设计调整，都有一定参考价值。C