



团 体 标 准

T/GZHTS 22—2025

挂篮悬臂浇筑钢筋混凝土箱形拱桥
技术规范

Technical specifications for key technologies of design and construction of
cast-in cantilever with travelling form for reinforced concrete
box arch bridges

2025-09-30 发布

2025-12-01 实施

贵州省公路学会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体设计与构造	2
4.1 总体布置	2
4.2 主拱圈构造	2
4.3 横隔板布置	2
4.4 主拱圈悬浇节段长度划分	3
4.5 拱上建筑布置	3
5 施工	3
5.1 挂篮构造	3
5.2 扣挂系统	3
5.3 锚固	4
5.4 拉索	4
5.5 扣塔	5
5.6 锚碇	5
5.7 拱圈混凝土悬臂浇筑施工	5
6 主拱圈施工监控	7
6.1 一般规定	7
6.2 几何线形控制	8
6.3 内应力控制	8
6.4 施工监控主要监测内容	8
6.5 施工监控计算	10
6.6 施工监控精度要求	11
6.7 监控成果	11
7 质量控制	12

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由贵州路桥集团有限公司提出。

本文件由贵州省公路学会归口。

本文件起草单位：贵州省交通规划勘察设计研究股份有限公司、贵州交通投资集团有限公司、长沙理工大学、湖南文理学院、贵州省山区桥隧工程智能建造与运维全省重点实验室。

本文件主要起草人：韩洪举、张基进、叶洪平、刘建军、刘小飞、田仲初、杨健、郭吉平、韦定超、李银斌、廖正杰、肖黔、彭文平、刘臻、万麟、彭浪、邓晓红、朱金波、张祖军、刘远昆、龙金文、李用江、郑戈瑞。

挂篮悬臂浇筑钢筋混凝土箱形拱桥 技术规范

1 范围

本文件规定了挂篮悬臂浇筑钢筋混凝土箱形拱桥的总体设计与构造、施工、主拱圈施工监控、质量控制、监控量测关键技术。

本文件适用于挂篮悬臂浇筑钢筋混凝土拱桥的设计、施工与监控。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准

JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范

JTG/T 3650-01 公路桥梁施工监控技术规程

JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钢筋混凝土箱形拱桥 **reinforced concrete box arch bridge**

一种上承式拱桥,其核心受力构件拱圈采用箱型截面,使用钢筋混凝土材料建造。

3.2

主拱圈 **main arch ring**

拱桥上部结构中两端支承在墩台上、呈曲线形向上拱起的主要承重结构。

3.3

矢跨比 **rise span ratio**

在拱桥中,矢高与跨径之比(f/L)。

3.4

拱轴线 **arch axis**

拱圈(或拱肋)各横截面(或换算截面)形心点的连线。

3.5

挂篮悬臂浇筑 **cast-in-cantilever**

一种借助可行走专用挂篮、结合扣挂体系逐段向跨中悬臂浇筑形成主拱圈的施工方式。

3.6

悬浇挂篮 cantilever casting form traveler

需满足主拱曲线要求,具有承担主拱圈节段混凝土湿重和斜向移动功能的一种挂篮。

4 总体设计与构造

4.1 总体布置

- 4.1.1 挂篮悬臂浇筑钢筋混凝土箱型拱桥(以下简称“悬浇拱”)主跨跨径宜为100 m~400 m。
- 4.1.2 主拱圈矢跨比取值范围宜为1/4~1/8。
- 4.1.3 拱轴线宜采用悬链线,拱轴系数宜取1.2~2.2。
- 4.1.4 大跨径钢筋混凝土拱桥多采用梁式腹孔构造,腹孔宜布置为7~15的奇数孔。

4.2 主拱圈构造

4.2.1 主拱圈截面形式

悬浇拱主拱圈宜采用由顶板、底板和腹板组成的箱形截面,常见的有单箱单室、单箱双室、单箱三室三种截面形式。

4.2.2 拱圈宽度与高度

- 4.2.2.1 主拱圈宽度应根据主跨跨径、桥面宽度、拱上建筑等综合确定,宜采用窄拱圈形式。
- 4.2.2.2 当拱圈宽跨比小于1/20时,应按照JTG D62的相关规定验算其横向稳定性。
- 4.2.2.3 跨径是决定拱圈截面高度的主要因素,在初步拟定拱圈高度 h 时,可按公式(1)进行估算:

$$h = \frac{L}{0.2L + 22} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- h —— 拱圈高度;
- L —— 计算跨径。

4.2.3 主拱圈截面构造

- 4.2.3.1 当拱桥跨径小于250 m时,拱圈截面宜采用等截面,根据受力需要调整腹板及顶底板厚度。
- 4.2.3.2 当拱桥跨径大于250 m时,拱圈截面宜采用变截面,结合宽跨比,截面变化可采用等宽变高、等高变宽或变高变宽等设计。
- 4.2.3.3 当拱圈采用变高的设计时,拱脚高度大,拱顶高度小,拱顶宜取跨径1/60~1/90,拱脚高与拱顶高之比应为1.2~1.7,宜采用1.5~1.7。
- 4.2.3.4 拱圈顶板、底板应根据受力和构造要求确定,取拱圈高度的1/9~1/15,宜取30 cm~45 cm;当混凝土强度等级较高时取小值,较低时取大值;拱脚段顶板和底板应增厚至50 cm~80 cm。顶、底板宜在外腹板处悬出40 cm~50 cm。
- 4.2.3.5 腹板厚度宜取30 cm~50 cm,拱脚段增厚至60 cm~80 cm。

4.3 横隔板布置

- 4.3.1 主拱圈内应每隔一定间距设置横隔板,横隔板厚度宜取25 cm~50 cm。
- 4.3.2 横隔板设计应综合考虑悬臂浇筑节段长度、扣索锚固位置及拱上立柱进行布置。

4.3.3 横隔板宜沿拱轴线正交方向或垂直方向布置。

4.4 主拱圈悬浇节段长度划分

主拱圈悬浇节段长度划分应根据主拱圈截面尺寸、悬臂施工过程中混凝土拉应力限值、挂篮的承载能力及扣挂体系等综合确定,宜取5 m~8 m。

4.5 拱上建筑布置

4.5.1 桥道系结构宜选用简支、连续和刚构三种形式,特大跨径时宜选用刚构腹孔。

4.5.2 桥道梁的跨径宜结合结构受力、桥道梁施工方法和美观等因素综合确定。

4.5.3 桥道梁结构宜选用板梁、T梁、箱梁和钢混组合梁等形式。

4.5.4 拱上立柱构造形式宜选用排架式、分离式或横墙式。

5 施工

5.1 挂篮构造

5.1.1 挂篮应根据拱圈截面形式、悬浇节段长度等参数做专项设计,可采用倒三角形、侧三角形或桁架形等结构形式。

5.1.2 挂篮应由承重系统、止退系统、支反力系统、走行系统、模板系统、工作平台及安全防护系统等组成。

5.1.3 用于悬臂浇筑施工的挂篮,其结构除应满足强度、刚度和稳定性要求外,还符合下列规定。

- a) 挂篮与悬浇节段混凝土的质量比不宜大于0.4。
- b) 挂篮在浇筑混凝土状态和行走时的抗倾覆安全系数、锚固系统的安全系数及水平限位的安全系数均不应小于2。
- c) 挂篮的支承平台应有足够的平面尺寸,应能满足梁段现场施工作业的需要。
- d) 挂篮模板的设计应考虑主拱圈曲率。
- e) 当节段倾角大于 10° 时,应设置顶面压模,且应有效设置钢筋的抗浮措施。
- f) 挂篮锚固、反力点等主要着力点应尽量靠近腹板、隔板位置。
- g) 挂篮锚固系统所用的轴销、拉杆、螺栓、分配梁等应专门设计、加工,并不应随意更换或替代。
- h) 悬挂系统两端应能与承压面密贴配合,应避免混凝土承压面不规则、不平整的情况,应使吊杆能轴向受拉而不承受额外的弯矩和剪力。
- i) 挂篮制作加工完成后应进行试拼装。挂篮在现场组拼后,应全面检查其安装质量,并应进行模拟荷载试验,符合挂篮设计要求后方可正式投入使用。

5.2 扣挂系统

5.2.1 扣挂系统设计时,应根据主拱圈构造特点,并结合地形、地质条件进行设计。

5.2.2 扣挂系统应由锚固、拉索、扣塔和锚碇等组成(见图1)。

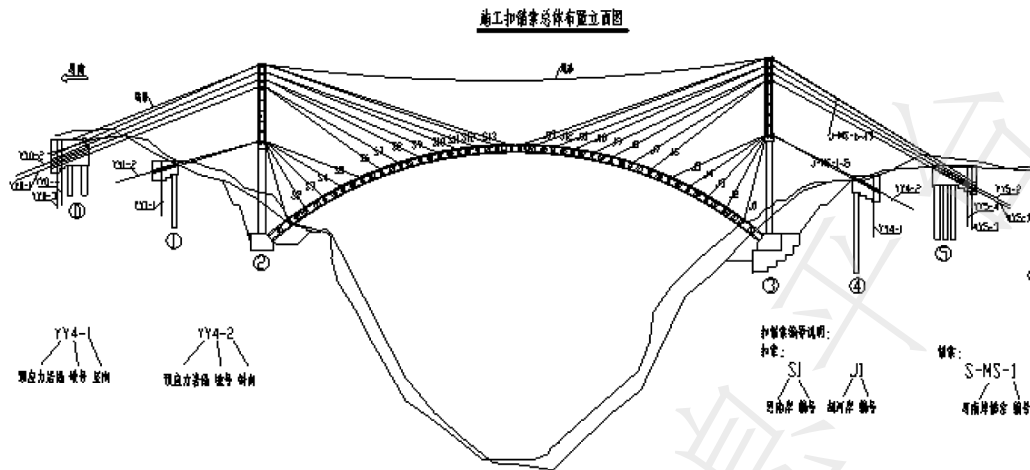


图1 扣挂系统总体布置立面图(示例)

5.2.3 拉索在塔上锚固宜采用分层布置,以适应主拱圈的混凝土拉应力控制。

5.2.4 扣索的角度不宜小于 16° ,拱脚区附近节段扣索应根据主拱圈的混凝土拉应力水平和上端锚固条件合理确定。

5.2.5 主拱圈的节段自重及施工荷载应通过扣索、扣塔和锚索传给锚碇。

5.3 锚固

5.3.1 锚固应结合主拱圈构造特点设计,设置在每个节段的端部横隔板与腹板交接位置。

5.3.2 系统应包括扣索系统、锚索系统、锚箱和锚碇系统四部分。基本设置如下:

- a) 扣索系统和锚索系统应通过交界墩、交界墩盖梁和塔架上的钢锚箱连接成整体;
- b) 扣索锚固端宜设在主拱圈各个节段上;
- c) 张拉端宜位于交界墩或钢锚箱;
- d) 锚索锚应固于锚碇系统上,将主拱圈的节段自重及施工荷载通过扣索、锚箱和锚索传给锚碇系统;
- e) 锚碇系统应利用永久结构的桥台或承台,采用重力式锚碇和预应力岩锚。

5.4 拉索

5.4.1 拉索宜选用星式和扇形布置两种常见布置。

5.4.2 在需要提供较大的拉索倾角时宜选择星式布置,应将几根扣索和锚索集中布置在同一高程面上,并分散在不同位置。

5.4.3 在选择扇形布置时,应将拉索沿桥墩或扣塔高度方向按一定间隔布置。

5.4.4 在拉索施工时,注意以下方面:

- a) 拉索宜采用预应力钢绞线、平行钢丝束,其安全系数应大于2;
- b) 拉索应有合理的防火、防锈及减振措施;
- c) 拉索宜在塔上张拉和放张;
- d) 拉索两端锚固应采用有效的夹片防退措施;
- e) 当拉索采用钢绞线时,束内各根钢绞线安装宜保持平行;
- f) 当拉索锚固端与锚碇或拱圈采用穿心式锚固时,预埋管道应准确定位,出口端宜采用喇叭口,避免拉索折弯。

5.5 扣塔

5.5.1 扣塔系统应由交界墩和置于交界墩顶面的临时钢扣塔组成。

5.5.2 临时钢扣塔宜采用变形小的钢管扣塔或型钢扣塔；当拱圈跨径大于 300 m 时，可采用钢管混凝土或者预制混凝土节段拼装作为临时扣塔。

5.5.3 扣塔的设置符合以下规定：

- a) 当主跨大于 150 m 时，宜设置缆索吊装系统作为主拱圈施工的纵向运输设备，缆索吊装系统的吊塔可设置于扣塔的顶部；
- b) 扣塔应根据主拱圈的混凝土拉应力控制需求分层设置，分层高度宜标准化；
- c) 扣塔底部与基础连接方式宜采用固结体系；
- d) 扣塔应在拉索锚箱处设置支撑梁，有效传递拉索锚固力；
- e) 锚箱的尺寸应充分考虑拉索的张拉空间需求；
- f) 扣塔应具有足够的强度、刚度和稳定性，荷载作用下塔顶的最大纵桥向偏位不大于 50 mm。

5.6 锚碇

5.6.1 锚碇应利用永久结构的墩台。

5.6.2 锚碇宜采用重力式锚碇、预应力岩锚或组合锚碇等形式。

5.6.3 锚碇的抗拔、抗滑安全系数不应小于 2，抗倾覆安全系数不应小于 1.4。

5.6.4 当地质较好时，锚碇宜优先采用预应力岩锚形式。

5.7 拱圈混凝土悬臂浇筑施工

5.7.1 施工顺序

起步段支架安装→起步段施工并养护待强→扣、锚索安装及张拉→起步段支架拆除→安装、调试悬浇挂篮及荷载试验→节段底板、腹板、隔板钢筋绑扎→节段内模、侧模安装→节段顶板钢筋绑扎→节段顶底板压模安装→节段混凝土浇筑及养护待强(达到设计强度要求)→节段扣、锚索安装及张拉锚固→挂篮前移就位→循环进行下一节段施工至全部悬浇段施工完成→合龙段施工→扣、锚索分级拆除→挂篮拆除。

5.7.2 起步段施工

5.7.2.1 位于拱脚的起步段拱圈混凝土宜采用落地支架现浇，当地形条件受到限制，不能搭设落地支架时，可采用斜拉杆扣挂支架或其他方式。

5.7.2.2 起步段浇筑长度应满足挂篮安装需要，不宜小于 8 m。

5.7.2.3 在起步段施工时注意以下方面：

- a) 在拱圈顶板、底板的上表面应设置压板；
- b) 应精确布置挂篮止退装置和轨道锚固预埋件或预埋孔、拉杆孔等，定位牢固；
- c) 应做好拱脚应变(力)、温度传感器等元件系统的布设及保护；
- d) 起步段应充分考虑混凝土的防裂措施。

5.7.3 挂篮的安装、预压与行走

5.7.3.1 挂篮安装

5.7.3.1.1 在拱脚起步段施工完成后，应立即进行挂篮的安装。

5.7.3.1.2 挂篮安装施工流程图(以倒三角挂篮为例)见图2。

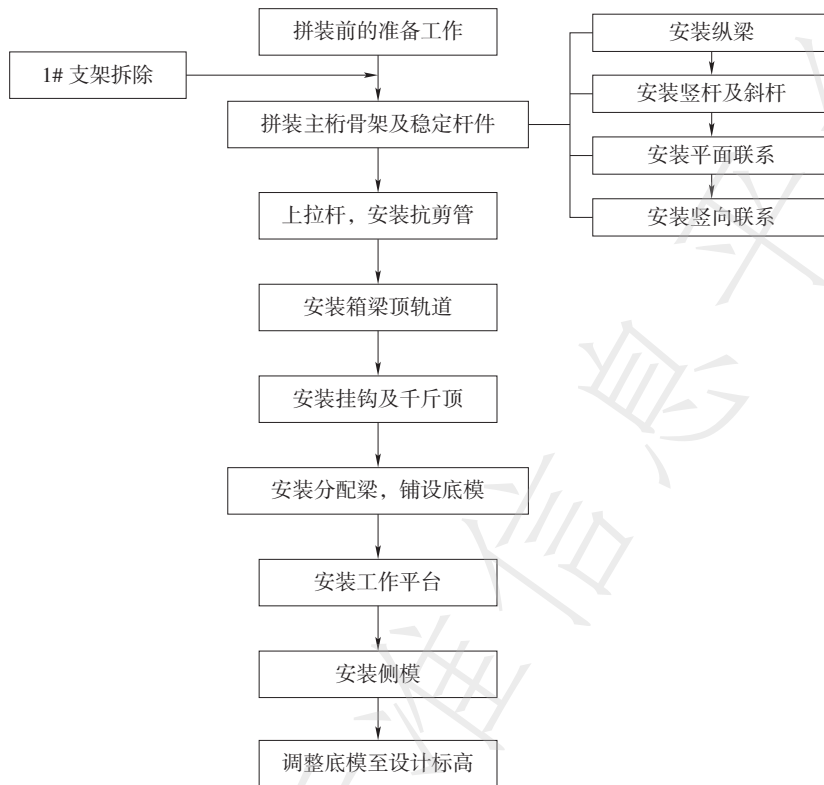


图2 挂篮安装施工流程图

5.7.3.1.3 挂篮安装时应注意以下方面:

- a) 所有的连接装置连接牢靠,并做好相应的标记,便于后期检查;
- b) 搭设好相应的工作平台(通道)和安全防护;
- c) 做好扣索的保护,避免发生碰撞或者损伤。

5.7.3.2 挂篮预压

5.7.3.2.1 挂篮预压荷载应根据 JTG/T 3650 的相关规定设置为挂篮所受最大荷载的 1.05 倍~1.1 倍,预压荷载的分布宜模拟需承受的荷载,同时荷载计算应考虑不同倾角的影响。

5.7.3.2.2 挂篮预压时应测定其弹性挠度的变化、高程调整的性能及其他技术性能。

5.7.3.3 挂篮行走

5.7.3.3.1 挂篮行走轨道应具有足够的刚度,轨道分段长度宜为 0.5 m~1.5 m。

5.7.3.3.2 挂篮行走轨道应定位准确和锚固可靠。

5.7.3.3.3 挂篮行走前应完成节段扣锚索张拉。

5.7.3.3.4 挂篮行走前应调节挂篮底模板与主拱圈间隙,间隙应大于 5 cm。

5.7.3.3.5 挂篮行走应采用同步行走千斤顶,行走步差不宜大于 2 cm。

5.7.3.3.6 挂篮行走千斤顶顶升力不宜小于 1.5 倍挂篮自重,单循环行程不宜大于 50 cm。

5.7.3.3.7 挂篮行走应在轨道前端设置防坠措施,且距离节段端部不小于 30 cm。

5.7.3.3.8 挂篮行走应设置侧模板的抗风措施。

5.7.4 主拱圈混凝土浇筑施工与扣、锚索张拉

5.7.4.1 主拱圈钢筋安装

5.7.4.1.1 节段钢筋安装可采用常规逐根安装、分片安装或节段钢筋整体吊装的方式。

5.7.4.1.2 纵向主筋应与顶底板的曲率保持一致。

5.7.4.2 混凝土浇筑

5.7.4.2.1 在浇筑混凝土前和浇筑混凝土中,应对挂篮、模板、钢筋和锚固端钢板和预埋钢管进行检查,确保其无破损且位置和尺寸正确、定位牢固。

5.7.4.2.2 混凝土浇筑时宜在腹板、顶底板合理位置开孔设布料槽孔,下料高度应小于2 m。

5.7.4.2.3 混凝土振捣宜采用插入式振动器,在底板及两侧腹板底部可辅助附着式振动器。

5.7.4.2.4 节段混凝土应一次性连续对称浇筑。

5.7.4.2.5 混凝土浇筑两半跨的节段数差不宜大于2个节段,时间差不宜大于30 d。

5.7.4.3 拉索张拉

5.7.4.3.1 拉索应在混凝土达到设计规定的强度后张拉,张拉力应按监控指令执行。

5.7.4.3.2 挂索使用前应对其力学指标进行检验。

5.7.4.3.3 拉索挂索时,初张力不应大于张拉力的50%。

5.7.4.3.4 拉索张拉控制应以索力、扣塔偏位和拱圈应力为主。

5.7.4.3.5 拉索张拉宜采用智能张拉系统。

5.7.4.3.6 拉索应分级同步对称张拉。

5.7.5 主拱圈合龙施工

5.7.5.1 合龙段宜采用挂篮或吊架合龙。

5.7.5.2 合龙段劲性骨架宜采用埋置式结构,且有足够的强度和刚度。

5.7.5.3 合龙段劲性骨架宜在设计温度下锁定。然后绑扎钢筋,浇筑合龙段混凝土,完成结构状态的合龙。

5.7.5.4 合龙前应根据现场实际分析计算调整拱圈内力。

5.7.5.5 在合龙施工完成后,体系转换,拉索应及时拆除。

6 主拱圈施工监控

6.1 一般规定

6.1.1 施工监控过程中应实时监测结构状态响应值,识别与修正参数偏差,确保施工过程结构安全,最终达到或逼近设计线形与内力状态。

6.1.2 施工监控宜采用拉索索力和主拱变形“双控”为主,兼顾结构应力和稳定性的原则。

6.1.3 施工监控过程中宜采用自适应施工控制方法,比对主拱线形、拉索索力、结构应力的实测值与理论计算值,识别桥梁结构的主要基本设计参数,分析偏差原因,修正设计参数,达到“双控”的目的。

6.1.4 施工监控应满足JTG/T 3650-01的相关规定。

6.2 几何线形控制

6.2.1 主拱变形包括悬臂浇筑施工过程至裸拱状态的累计变形、拱上立柱和桥道系及二期恒载引起的变形、混凝土徐变收缩变形、温度变形以及车辆荷载引起的变形等。

6.2.2 主拱线形通过设置预拱度进行控制,预拱度应包括成桥预拱度和施工预拱度。各施工节段应结合仿真计算分析结果及现场实际情况给出预拱度指令数据。预拱度指令应根据结构实际状态及时修正。

6.2.3 立模标高的确定应考虑挂篮系统变形及混凝土时变性能,立模标高为设计标高加上预拱度值,可按公式(2)进行计算:

$$H_{lmi} = H_{sjl} + \sum f_{1i} + \sum f_{2i} + \sum f_{3i} + \sum f_{4i} + \sum f_{gl} + \sum f_{wc} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

H_{lmi} —— i 节段立模标高;

H_{sjl} —— i 节段设计标高;

$\sum f_{1i}$ —— 由后续梁段自重引起的在 i 节段产生的挠度总和;

$\sum f_{2i}$ —— 混凝土收缩、徐变在 i 节段引起的挠度,收缩徐变时间段考虑至成桥通车;

$\sum f_{3i}$ —— 施工临时荷载在 i 节段引起的挠度(包括不平衡荷载);

$\sum f_{4i}$ —— 二期恒载在 i 节段引起的挠度;

$\sum f_{gl}$ —— 挂篮变形值;

$\sum f_{wc}$ —— 误差修正值。

6.3 内应力控制

6.3.1 所有施工工况应保证主拱应力在允许范围内,主要通过拉索索力的设置和调整进行控制。

6.3.2 宜采用拉索“一次张拉到位”策略,避免频繁索力调整,在施工关键部位(如拱脚、拱顶、四分点)设置应力传感器,实时监测各工况下的应力变化。

6.3.3 拉索索力的确定应同时兼顾施工期安全和成桥状态的内力均衡。

6.4 施工监控主要监测内容

6.4.1 几何线形监测

6.4.1.1 主拱高程监测

6.4.1.1.1 应在每个主拱节段上设置高程测点,测点宜布置在拱段悬臂前端,横向设3个测点观测主拱节段的高程和扭曲程度。测点应高出主拱圈混凝土顶面3 cm~5 cm,并做好保护措施。

6.4.1.1.2 应在挂篮移动、混凝土浇筑、拉索张拉和拆除等工序时,测量该施工拱段及相邻4个拱段的高程。主拱施工过程中应安排的主拱高程通测,并定期校核测量高程基准点。

6.4.1.2 主拱轴线偏位监测

6.4.1.2.1 应在桥轴线处主拱高程测点上刻十字丝设置拱轴线偏位测点。

6.4.1.2.2 测量阶段和测量时间应与高程测量相同。

6.4.1.3 挂篮变形测量

6.4.1.3.1 挂篮变形观测应包括主拱和挂篮的高程测量,主拱测点应取悬臂端已成两个拱段高程的测量点,挂篮测点应取当前浇筑拱段前端对应得挂篮位置高程测点。

6.4.1.3.2 在考虑主拱预拱度时,应根据计算结果及现场实测数据合理修正各节段挂篮的弹性变形值。

6.4.1.4 扣塔、墩水平偏位监测

6.4.1.4.1 主拱施工过程中应进行扣塔及墩顶的水平偏位监测。

6.4.1.4.2 应在拉索张拉、节段浇筑前后对扣塔和墩的纵向水平位移进行监测,得出本次张拉或浇筑过程的变形量,并与理论计算值进行对比分析。

6.4.1.5 主拱、扣塔、墩日照温差变形监测

当需要确定日照温差下主拱、扣塔墩的实际变形状态时,应进行主拱、扣塔、墩日照温差监测,分析日照温差对结构内力及变形的实际影响,确保施工过程中结构安全,成桥后线形合理。

6.4.2 索力监测

6.4.2.1 宜采用整索穿心式高精度压力传感器、索力动测仪、微波雷达等进行测试和控制,测试精度应满足施工监测要求,张拉时应辅以伸长量和千斤顶油压表进行校核。安装压力传感器时应与锚垫板紧贴,与拉索中轴线对中,避免偏置和倾斜。

6.4.2.2 索力测试应包括张拉索本身索力的测试和已有索力的通测。索力测试过程注意以下方面:

- a) 张拉过程中索力测试应反映拉索的实时张拉过程,应结合扣塔、墩水平偏位测量分析并调整施工中油压表读数误差及拉索锚固回油引起的回缩误差;
- b) 节段浇筑、拉索张拉前后应对施工节段附近3对~5对拉索索力进行测试,若移动挂篮对主拱结构影响较大时,挂篮移动前后也应进行索力的监测;
- c) 在施工到一定阶段后,应对所有索力进行通测分析施工阶段中的索力误差,并及时对误差进行调整,必要时修正后续施工节段的拉索初张索力。

6.4.3 应力监测

6.4.3.1 应力测试元件可采用振弦式、电阻应变式、压电式、压磁式及光纤式等传感器,分别率不应低于 $1\mu\epsilon$ 。

6.4.3.2 应力监测点应布设在主拱和扣塔、墩的控制截面中,应观测施工过程中该截面处的应力变化和分布情况。

6.4.3.3 主拱应力监测符合以下规定:

- a) 在关键受力截面及八分点截面处应进行主拱应变测点的布置,各截面应变测点数量及布置应根据具体截面形式而定,但不应少于4个(顶、底板各2个);
- b) 宜选用埋入式应变传感器,用于监测主拱内测点的混凝土应力状态,通过各截面测点的监测数据来反馈主拱整体受力状态;
- c) 节段浇筑、拉索张拉、挂篮移动前后均需对主拱各测试截面的应变数据进行监测分析,及时掌控主拱结构受力状态,与理论数据进行对比分析。

6.4.3.4 扣塔、交界墩应力监测符合以下规定:

- a) 在交界墩墩底及关键受力截面应布置埋入式应变传感器,用于测试关键截面应力状态,及时掌握墩的整体受力状态;
- b) 扣塔宜采用钢结构,在扣塔底部及关键受力截面(如各张拉平台的主构件连接处)处应布置表贴式应变传感器;
- c) 在节段浇筑、拉索张拉、挂篮移动前后处均需对扣塔及交界墩各测试截面的应变数据进行监测分析,及时掌控结构受力状态,与理论数据进行对比分析。

6.4.3.5 如有特殊要求,可根据仿真计算结果对挂篮关键受力构件进行应变测点的布置。

6.4.3.6 应力测点布置要求如下:

- a) 应根据仿真计算分析进行测点布置方案的设计;
- b) 若其在断面上的分布为箱顶板和底板内,应力测点宜与主筋在同一平面内并平行埋设;
- c) 扣塔测点宜布置在扣塔底部、扣塔中部或最不利杆件上布设(理论计算),测点布设方向应符合杆件轴向受力方向,如塔底测点布设应按竖向进行测点布置,并宜布设于构件外侧受力最大位置;
- d) 所有应变监测元件应自带温度监测或修正功能,应总结温度效应对结构受力的影响。

6.4.4 温度监测

温度测试应包括环境温度和结构温度两种,环境温度宜用微型气象站进行监测,结构温度宜采用热电偶、热敏电阻温度传感器,其分辨率不应低于 0.1°C 。在桥梁设计施工过程中,以下情况应重点进行温度测试:

- a) 应考虑温度对结构体系的内力分布,构件安装和测试精度等方面的影响;
- b) 采用悬臂浇筑法施工的拱桥,需要跨季施工,应考虑温度对悬臂长度和悬臂施工的影响;
- c) 扣索和锚索对温度变化敏感,应考虑温度升降对主拱、桥墩、扣塔变形的影响;
- d) 施工过程中拉索张拉及主拱节段立模标高均应考虑温度效应修正;
- e) 关键施工阶段应对结构温度效应影响规律进行总结分析,重点关注主拱线形及扣塔局部应力;
- f) 主拱合龙期间的环境温度监测,应在合龙前每隔2h监测1次,测试总次数不宜小于12次。

6.5 施工监控计算

6.5.1 一般规定

6.5.1.1 施工监控计算是应通过建立监控计算体系,对扣塔、主拱、拉索、拱上建筑施工过程中每一阶段结构的应力、位移状态以及施工监控参数进行计算。

6.5.1.2 在监控计算过程中,应综合考虑施工误差、实际节段的重量误差、材料属性差异等因素的影响。

6.5.2 主要计算内容

6.5.2.1 桥梁的施工控制计算分析方法应反映整个施工过程结构的真实受力行为,能确定结构各个阶段的理想状态,为施工提供中间阶段结构理论状态。应包含以下计算内容:

- a) 设计成桥状态的校核;
- b) 施工过程及成桥运营阶段模型计算分析;
- c) 节段施工前的预测计算分析;
- d) 节段施工后的校核计算分析;
- e) 施工阶段及成桥阶段状态变量的理论数据,包括主拱线形和控制截面应力应变、扣塔偏位及受力、拉索索力及稳定性计算;
- f) 施工控制数据理论值,包括立模标高、初张索力控制、截面应力应变;
- g) 临时结构(临时支架、挂篮及扣塔)的受力及稳定性计算;
- h) 施工全过程的结构稳定性与承载力分析;
- i) 温度效应分析。

6.5.2.2 悬浇拱桥施工过程计算应细化具体施工工况,确保结构仿真计算贴合现场实际施工状态。各节段施工中的混凝土浇筑、拉索张拉及拆除、挂篮移动等关键工况应在施工过程计算分析中明确考虑。

6.5.3 主要计算参数

结构设计参数一般是按规范取用,施工监控应对主要设计参数与项目施工方核实确定,必要时开展现场参数测试试验,确保计算参数指标与实际现场参数一致。应包含如下主要计算参数:

- a) 实际材料的物理力学性能参数;
- b) 实际施工中的荷载参数,如节段自重、施工荷载、可变荷载、二期恒载等;
- c) 气象资料、晴雨气温、风向风速等资料;
- d) 挂篮重量、挂篮支点反力及其他施工荷载在结构上布置的位置与数值;
- e) 挂篮在混凝土浇筑过程的变形值;
- f) 拉索的实际弹性模量和截面面积;
- g) 实际工期与施工组织工序安排。

6.6 施工监控精度要求

6.6.1 施工监控应确保结构在施工中应力变形与稳定状态在允许范围内,确保成桥后桥梁的内力和线形贴近设计目标状态。

6.6.2 成桥后结构的标高应满足设计标高的要求,节段施工过程中的实测高程应与实际状态计算的理想高程偏差在容许范围内。应确保在成桥状态和施工状态各截面应力极值在允许范围之内。

6.6.3 施工监控允许偏差均应以温度效应剔除后的数据对比结果为准,具体控制指标如下。

- a) 当混凝土结构应力的理论值大于10 MPa时,其结构应力的绝对误差应在 ± 3 MPa内,应力相对误差宜在20%内;而当理论值小于10 MPa时,结构应力的绝对误差应在 ± 2 MPa内,应力相对误差宜在30%以内。
- b) 当钢结构应力理论值大于100 MPa时,结构应力绝对误差应在 ± 15 MPa内,应力相对误差宜在10%内;而当理论值小于100 MPa时,大部分结构应力绝对误差宜在 ± 10 MPa内,应力相对误差宜在20%以下。
- c) 悬臂浇筑主拱高程误差限值应 ≤ 30 mm,悬臂浇筑主拱合龙口相对高差应 ≤ 20 mm;各拱轴线偏差应 ≤ 40 mm;内外拱高差应 ≤ 30 mm。
- d) 拉索索力悬浇过程中,最大索力和过程索力均不应超过理论索力值的 $\pm 5\%$;拉索安全系数应大于2,如有极端天气场景,可适当调整安全系数富余量。
- e) 扣塔纵向绝对偏位不应超过 ± 5 cm,绝对偏位应考虑扣塔顶部偏位减去交界墩顶偏位,并应剔除安装初始缺陷偏位。
- f) 大跨度拱桥应对悬臂状态下的关键控制工况进行压屈稳定性分析,压屈稳定系数应大于4。
- g) 对支架浇筑的首段和悬臂浇筑段的主拱,应严格控制其尺寸、轴线平面及立面的精度。

6.7 监控成果

6.7.1 主拱施工的监控成果应包括施工监控方案、设计复核计算报告、施工监控阶段性报告、施工监控总报告及施工过程中提交的相关监测指令与反馈控制文件。

6.7.2 施工监控方案应包括工程概况、监控依据与目标、施工监控方法、项目重难点、施工监控计算内容、施工监控监测内容及方案、人员及设备安排、施工监控工作管理制度等内容。

6.7.3 设计复核计算报告应包括工程概况、计算依据、计算模型介绍、施工全过程计算、成桥运营阶段计算等内容。

6.7.4 施工监控阶段性报告应包括工程概况、监控依据、阶段性工作进展、几何线形及内应力状态、阶段性工作总结及后续工作建议等内容。

6.7.5 施工监控总报告应包括工程概况、监控依据与目标、监控实施工作内容、施工监控控制计算结果、关键施工过程及成桥状态几何线形及内应力状态监控结果、施工监控结论及建议等内容。

7 质量控制

- 7.1 混凝土浇筑质量应符合 GB 50204 的相关规定。
 - 7.2 钢结构的质量应符合 GB 50205 的相关规定。
 - 7.3 桥梁验收质量应符合 JTG F80/1 的相关规定。
-