

ICS 93.040

CCS P 28

团 体 标 准

T/JSJTQX 72—2025

多拱肋宽幅钢箱拱桥施工技术规范

Technical specification for construction of multi arch rib wide steel box
arch bridge

2025-06-20 发布

2025-07-01 实施

江苏省交通企业协会

发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本规定	2
5 钢结构加工制造	2
5.1 材料	2
5.2 节段划分	3
5.3 加工制造	3
6 钢结构安装	5
6.1 一般要求	5
6.2 支架上拼装	5
6.3 顶推	6
6.4 大节段吊装	6
7 施工监测	7
7.1 一般要求	7
7.2 主要内容	7
7.3 监测设备与方法	7
7.4 监测数据处理和分析	8
附 录 A （资料性） 宽幅钢箱施工期剪力滞效应	9
A.1 一般要求	9
A.2 剪力滞计算	9
A.3 正应力计算	10
A.4 多拱肋施工荷载控制	11
附 录 B （资料性） 宽幅钢箱安装稳定性分析方法	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。

本文件由江苏省交通企业协会提出并归口。

本文件起草单位：江苏常鑫路桥集团有限公司、常州市公路事业发展中心、常州交通建设管理有限公司、湖南交通职业技术学院、常州市交通运输综合行政执法支队、江苏润通项目管理有限公司、中建安装集团有限公司、无锡市市政设施建设工程有限公司、华设设计集团股份有限公司、中交二公局第三工程有限公司、无锡市航道工程有限公司、无锡交通建设工程集团股份有限公司、苏交科集团检测认证有限公司、无锡市城市道桥科技有限公司、江苏广亚建设集团有限公司、江苏森淼工程质量检测有限公司。

本文件主要起草人：薛华、陈光林、雷松、毛安静、李志刚、裴涛、孙达、邓晓杰、张进武、陈军、彭程、孙双龙、张旭、吴敏捷、侯超、钱俊祥、韩辉、杨磊、包旭、徐德民、万俊、王涛、陈杨、叶方宁、王玲丹、王骏、魏光伟、邵中磊、顾周南、陈可可、钱钧、王永友、钱龙、何小石、贡刚伟、窦传刚、羊海文、孙浩、于雪芹、宋远航、朱伟、赵世伟、郭燕飞、何雨、张惠健、葛思源、吴俊敏、刘明、马也、汤彬、曹顺钦、王芮文。

本文件由中交二公局第三工程有限公司严建和、江苏大学研究生校外导师王芮文主审。

多拱肋宽幅钢箱拱桥施工技术规范

1 范围

本文件规定了多拱肋宽幅钢箱拱桥施工的基本规定、钢结构加工制造、钢结构安装、施工监测等内容。本文件适用于多拱肋宽幅钢箱拱桥上部结构的施工。

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/T 699 优质碳素结构钢
- GB/T 714 桥梁用结构钢
- GB/T 1231-2024 钢结构用高强度大六角头螺栓连接副
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 3632 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副
- GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条
- GB/T 5118 热强钢焊条
- GB/T 5293 埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求
- GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级
- GB/T 10045 非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝
- GB/T 12470 埋弧焊用热强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求
- GB/T 14957 熔化焊用钢丝
- GB/T 17493 热强钢药芯焊丝
- GB/T 28699 钢结构防护涂装通用技术条件
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- CJJ 2 城市桥梁工程施工与质量验收规范
- JB/T 3223 焊接材料质量管理规程
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG F90 公路工程施工安全技术规范
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范
- Q/CR 9211 铁路钢桥制造规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

多拱肋拱桥 multi arch ribbed arch bridge

指由3条或3条以上拱肋组成的拱桥，拱肋之间采用横系梁（或横隔板）联结成整体，以达到多拱肋共

同受力并增加拱肋横向稳定性的效果。

3.2

宽幅钢箱拱桥 wide steel box arch

钢箱梁横向为整体式断面、且宽度不小于30m的拱桥。

3.3

剪力滞效应 shear lag effect

宽幅箱梁在承受施工横向荷载时，由于剪切变形的不均匀性，导致截面上的纵向正应力分布偏离经典梁理论（即平截面假定）的现象。即截面的轴向应力均匀分布不均，沿构件宽度或高度呈现集中的特性。

3.4

非线性迭代法 nonlinear iterative method

在进行宽幅钢箱拱桥稳定性分析时，通过从一个初始估计值出发，按照某种迭代格式构造出一个近似解的序列，不断逼近非线性方程或方程组的真实解。其核心思想是利用当前迭代点的信息（如函数值、导数值等）来预测下一次迭代的近似解。

4 基本规定

4.1 多拱肋宽幅钢箱拱桥主要承重结构包括拱肋、横撑、主梁、吊杆等。

4.2 多拱肋宽幅钢箱拱桥施工前，应编制总体实施性施工组织设计，同时应编制钢箱梁加工、安装、拱肋施工专项方案，确定施工顺序、吊装方法。施工临时支撑应开展专项设计。

4.3 多拱肋宽幅钢箱拱桥施工前，应根据选择的施工方法进行施工过程分析，并对施工期剪力滞效应进行计算，施工期剪力滞效应计算方法见附录A。

4.4 多拱肋宽幅钢箱拱桥施工时，应采取措施控制箱梁结构在纵横方向不产生不均衡变形。

4.5 多拱肋宽幅钢箱拱桥施工工艺及质量检查，应符合JTG/T 3650、JTG F80/1、CJJ 2、Q/CR 9211等规范的要求。

4.6 在施工中，应充分考虑多拱肋宽幅钢箱拱桥结构复杂、施工难度大等因素，在任一工序施工前应对结构尺寸、平面坐标、高程等关键指标进行复核。

4.7 在钢箱梁和拱肋制作过程中，应充分考虑钢箱梁、拱肋的预拱度、焊缝收缩和施工过程中梁段的压缩量。

4.8 多拱肋宽幅钢箱拱桥施工时，宜采用信息化、智能化手段进行工艺和施工质量控制。

4.9 钢结构原材料控制、零件加工、组装、试拼装、预拼装、厂内运输与储存等应满足Q/CR 9211、JTG/T 3650、JTG/T 3651、JTG F80/1的要求。

5 钢结构加工制造

5.1 材料

5.1.1 采用的钢板应进行预处理，预处理应按JTG/T 3651执行。

5.1.2 材料应满足以下要求：

- a) 钢箱梁用主辅材的质量应满足GB/T 699、GB/T 714、GB/T 1231、GB/T 1591、GB/T 3632的要求；
- b) 焊条（丝）和焊剂质量应符合GB/T 5117、GB/T 5118、GB/T 5293、GB/T 10045、GB/T 12470、GB/T 14957、GB/T 17493的要求，焊材的保存应分类、分规格存放于干燥处；
- c) 钢结构的防腐涂装应符合JTG/T 3650、JTG/T 3651、GB 50205、GB/T 8923.1、GB/T 28699的规定；
- d) 钢结构不同部位采用的不同钢板类型（Z向板）及相应探伤标准，在加工制造过程中不应混淆；

- e) 钢板不应有负差，钢板沿纵横向拉伸性能均应满足规范要求；
- f) 圆柱头焊钉、高强度螺栓连接副、高强度环槽铆钉连接副、密封材料等应符合JTG/T 3650、JTG/T 3651的规定。

5.2 节段划分

- 5.2.1 钢结构节段划分应综合考虑厂内制造、运输、安装方法等因素。
- 5.2.2 钢结构节段划分应结合剪力滞计算结果，避免将节段拼接缝设置在剪力滞发生处30cm内。
- 5.2.3 钢结构应减少环向焊缝，单元件宽度、长度应根据图纸和安装方法进行设计。
- 5.2.4 分段时应考虑板结构变厚位置及环缝避开跨中的原则。
- 5.2.5 钢箱节段划分应满足以下要求：
 - a) 钢箱顶板横向拼接缝应位于横隔板间距的 $1/5\sim 1/4$ 处，且顶板、腹板、底板的拼接缝应前后错开200mm，顶板、底板的拼接缝分列于腹板拼缝两侧；
 - b) 钢箱顶板纵向拼接缝应避开轮迹线，应靠近车道中心线或车道界线；
 - c) 支点处节段的横向划分线应避开跨径中部位置，应错开至少400cm。
- 5.2.6 拱肋节段划分应充分考虑拱轴线形控制、焊缝位置优化、节点构造等因素，并应满足以下要求：
 - a) 节段划分需避开拱顶、拱脚等曲率突变区域，优先选择等曲率区段分段。变截面箱型拱肋需按截面变化规律划分；
 - b) 焊缝应避开高应力区（如吊杆锚固点周边2米范围），节段接头宜设置在弯矩较小位置；
 - c) 拱肋相邻节段环缝应错开布置，错开的长度不宜小于200mm，且应减少焊接变形叠加；
 - d) 横撑接头、吊杆套管等需整体预制，节段划分时需预留匹配接头板安装空间；
 - e) 拱脚节段应整体制作，应避免分缝影响预埋精度

5.3 加工制造

- 5.3.1 钢结构制造工艺流程宜按排板图、制样、号料、切割、边缘加工、组装焊接、超声检测及X射线拍片、试拼装、矫正、涂装的顺序进行。
- 5.3.2 应对钢板进行统一排料，拱肋、钢箱节段长度及宽度方向不应接料。。
- 5.3.3 拱肋壁板应按曲线加工，不应以折代曲。
- 5.3.4 顶板和U形加劲肋在一个梁段长度内不应有接长焊缝，工厂内拼接焊缝应避开钢箱梁构造焊缝，两条平行焊缝间距不应小于100mm，应避免T形接料焊缝。
- 5.3.5 钢箱梁制造应按先期单元制作、后整体组装成钢箱梁的工艺方法。
- 5.3.6 钢箱梁宜按顶板单元、横隔板单元和附属结构单元分开制作。
- 5.3.7 钢结构制作应采用高精度的测量设备和工艺方法，确保各部件的尺寸和位置精度满足设计要求。
- 5.3.8 钢结构整体组装应在专用胎架上进行，胎架应满足下列要求：
 - a) 胎架的长度宜容纳纵桥向至少3节段的组装、横桥向全宽组装；
 - b) 专用胎架基础承载能力应经计算确定，在生产过程中胎架基础不应发生沉降；
 - c) 胎架的刚度应满足承载能力要求，不应随节段拼装重量的增加而变形，应采取措施避免钢结构变形或有较大的拼装应力；
 - d) 胎架外应设置独立的测量控制网，控制网测设应满足JTG/T 3650的要求；
 - e) 胎架线形的数值应由施工监控给出，胎架应考虑焊接变形的影响，胎架横向应预设上拱度。
- 5.3.9 组装工艺及控制应按JTG/T 3651进行，并应满足以下要求：
 - a) 宽幅钢箱组装宜在横桥向设置工艺拱度；
 - b) 组装前应按工艺文件要求检测胎架的几何尺寸是否符合给定的安装线形值；
 - c) 宽幅钢箱组装应确保组装精度并控制组装线形，宜尽量减少工艺板使用数量；

- d) U形肋钢衬垫组装时, 应采取措施保证其与U形肋密贴;
- f) U形加劲肋与顶板间组装间隙全长范围内不应大于0.5mm。横隔板与顶板的组装间隙不应大于1mm;
- g) 应分阶段进行组装, 组装时, 应考虑幅宽对线形、预拱度、纵横坡度对拱桥质量的影响和安全的影
响;
- h) 梁段组装宜采用连续匹配组装的工艺方案, 每次组装的梁段数量应不少于3段, 梁段匹配组焊完成后, 经检查合格, 至少应留下一个梁段参与下一次预拼装, 其余梁段运出胎架进入下道工序;
- i) 梁段整体组焊时, 梁段间预留焊接间隙, 并应计入焊接收缩量, 相邻梁段断面匹配应满足公差要求;
- j) 整体组焊完成后, 标记梁段号, 梁段拼装顺序应与吊装顺序相同, 吊装时, 不应调换梁段号;
- k) 每个梁段上均应设置长度、标高、轴线测量控制点;
- l) 每个梁段均应精确测量梁体长度和拉索锚固点的位置, 误差应在 $\pm 2\text{mm}$ 内, 半跨钢箱梁总长度累积误差
不大于15mm;
- m) 组装时应考虑钢箱梁自重、焊接收缩和胎架工艺板的影响, 并保证横坡精度。

5.3.10 钢结构的焊接应满足以下要求:

a) 钢结构焊接前, 对所有类型的焊缝应进行焊接工艺评定并编制焊接工艺报告, 评定方法和焊接质量应满足JTG/T 3650、JTG/T 3651、GB 50205、JB/T 3223的要求; 制定工地横向环焊缝的焊接工艺时, 应能保证容许的焊缝间隙可在一定范围内调整, 以帮助消化部分制造、安装误差;

- b) 熔透焊的焊缝有效厚度应不小于1.1倍的开坡口的板厚;
- c) 贴角焊缝的贴角尺寸不小于1.5倍厚板的板厚, 也不应大于1.2倍较薄板的板厚, 角焊缝端部应围焊;
- d) 同一焊道上不同焊脚尺寸的过渡坡应不小于1:5;
- e) 宜采取预热、层间温度控制、焊后热处理等焊接变形控制措施, 减小宽幅钢箱的焊接变形;
- f) 焊缝等级应满足图纸要求, 不应降低焊缝等级;
- g) 宽幅钢箱梁的结构焊接应减少变形和残余应力, 焊接工艺应采用焊接变形和焊缝收缩都较小焊接形式和方法;

- h) 宽幅钢箱梁顶板对接焊缝应为I级熔透焊缝, 宜采用熔敷金属量少、焊后变形小的坡口;
- i) 钢结构焊接宜优先采用自动焊接, 焊缝应完全熔透, 焊接时应采用平位置焊, 不应仰焊;
- j) U形加劲肋与顶板间采用坡口角焊缝, 采用有效的工艺和带有电弧跟踪的设备保证U肋与顶板的连接焊缝熔透率不小于80%, 且不应焊漏;

k) 施焊时, 应考虑到焊缝余高对结构抗疲劳性能的不利影响, 顶板焊缝的双面余高及U形肋嵌补段对接焊缝余高不应大于1.5mm。当焊缝余高超出现容许偏差时, 应将超差的焊缝磨平至钢板平面;

- l) U形肋嵌补段工地焊接组装时, 应采取措施保证与钢衬垫密贴;
- m) 钢衬垫与U形肋连接角焊缝应采用磁粉进行抽检, 比例为钢衬垫组装数量的20%, 如发现不合格, 应
翻倍抽检数量;
- n) 焊前预热温度应通过焊接性试验和焊接工艺评定确定, 预热范围一般为焊缝每侧100mm 以上, 距焊缝30mm~50mm范围内测温。修补时, 碳弧气刨前的预热温度与施焊时相同。在焊前预热中, 应注意厚板一侧的
预热效果;

- o) 钢拱与横撑、横撑与横撑间的连接采用相贯线焊接, 相贯线焊接焊缝等级为一级;
- p) 焊缝表面采用凹形平滑过渡, 可根据焊接工艺评定进行优化;
- q) 钢结构内部与外部连通的过焊孔应贴焊4mm封堵板, 横撑与拱肋、横撑与横撑接头应采用相贯节点, 相贯节点板件焊接应在工厂内完成, 不应在现场焊接;
- r) 焊接接头拉伸试验的力学韧性指标应不低于母材标准的规定值, 板厚不大于12mm者, -20°C 的V型冲击试验吸收能量27J; 板厚大于12mm者, -20°C 的V型冲击试验吸收能量34J。

5.3.11 钢结构预拼装应满足下列要求:

- a) 在厂内进行预拼装, 检查各部件的尺寸是否符合图纸要求, 相邻构件适配情况是否良好。

b) 钢结构预拼装的接口应在无应力状态下进行对接组装;

c) 钢结构预拼装时, 应进行误差矫正, 并应反复检查精度, 合格后再将相应梁段的匹配件和工地接头匹配件精确安装在梁段的相应位置。

5.3.12 钢结构的涂装应按JTG/T 3651执行。

6 钢结构安装

6.1 一般要求

6.1.1 多拱肋宽幅钢箱拱桥的安装方法选择, 应综合考虑宽幅钢箱的特点、施工条件、桥位环境、通航、通车、安装难度及安装过程中结构的整体稳定性等因素。

6.1.2 钢结构安装专项施工方案应按 JTG F90 的要求进行编制。

6.1.3 宽幅钢箱拱桥的施工不宜采用悬臂拼装, 钢拱肋转体施工和提升安装应按 JTG/T 3651 执行。

6.1.4 钢构件在梁段依次安装过程中应采取措施减少误差累积, 在合拢段安装前, 应根据现场测量梁段所在位置两相邻段间的实测距离修正合拢段长度, 对合拢段长度进行配切, 再运输至桥位处进行安装。

6.1.5 多拱肋宽幅钢箱拱桥安装时, 应进行施工稳定性分析, 分析方法宜按附录 B 进行。

6.1.6 宽幅钢箱拱桥就位应优先选择岸上整体拼装、顶推就位的方式进行, 当整体拼装有困难时, 可采用岸上分解拼装, 采用原位吊装或顶推方式就位。

6.2 支架上拼装

6.2.1 临时支架应按 JTG/T 3651 的要求委托第三方进行专项设计和安全复核算。

6.2.2 临时支架施工前, 应进行预压, 预压荷载应为所安装钢结构及施工荷载重量的 120%, 在预压时, 应获取弹性变形和非弹性变形的测量数据。

6.2.3 临时支架的线形应与钢箱成桥线形一致, 且应设置预拱度。

6.2.4 支架弹性变形量应不大于 3mm, 若弹性变形量超过限制, 应进行加固。

6.2.5 支架上安装应按施工方案确定的顺序进行安装, 且应尽量减少分段。

6.2.6 应通过预拼装或匹配件的方式提高安装精度, 并在安装过程中及时纠偏, 减少误差累积。

6.2.7 支架上焊接定位时, 应预留焊缝焊接的收缩量和反变形量。

6.2.8 拱肋安装时, 应采取措施防止拱肋与横撑节段产生变形和应力。

6.2.9 钢箱梁、钢拱肋和钢横撑的轴线距离、拼装节点连接板的密贴情况或其他特殊情况应进行重点检查。

6.2.10 钢结构节段现场安装受力状态和工厂预拼装时的受力状态应保持一致。

6.2.11 钢结构吊装用的吊环和施工配件, 应在钢结构安装后割除。

6.2.12 拱肋和横撑拼装应考虑拱肋合龙、横撑合龙和钢箱梁合龙三者系统误差的影响。

6.2.13 成桥后, 应对拱肋、横撑和钢箱梁外表面的过焊孔的各类空洞进行封闭处置。

6.2.14 原位吊装时应满足以下要求:

a) 应根据跨径、重量选择原位吊装设备;

b) 原位吊装时, 支架应满足刚度、稳定性和线形的要求;

c) 钢箱梁原位吊装应分梁段进行, 并应保证拼接精度。

6.2.15 当采用浮托方式进行吊装时, 应按以下要求进行:

a) 应根据水文条件抛锚固定浮船, 定位偏差控制在 50cm 内;

b) 采用浮船+临时支撑结构组成浮托平台, 浮船注水下沉至预定位置后固定, 通过排水顶升调整高度;

c) 使用同步拖拉系统将上层钢箱梁移动至设计位置, 过程中需实时监测轴线与标高, 通过横向千斤顶调整空间姿态;

- d) 悬臂段吊装时，浮吊船配合手拉葫芦控制箱梁空中姿态，确保临时匹配件精准对接；
- e) 通过测量系统对箱梁前点标高和轴线进行微调，采用高强度螺栓或焊接马板临时固定，随后进行环焊缝焊接；
- f) 浮船再次注水下沉，移出梁底区域后，将钢箱梁落至永久支座，完成上下层梁体合并。

6.2.16 吊杆安装施工应满足以下要求：

- a) 吊杆成品索应有完整的包装，运输过程中不应受污染和磨损；
- b) 吊杆在安装过程中应采取措施对调节套筒螺纹及 PE 层进行保护；
- c) 吊杆的张拉千斤顶施工前应进行标定，油压表精度应为 0.4 级以上。
- d) 同一对吊索应分级、同步对称张拉。

6.2.15 拱肋间风撑施工应满足以下要求：

- a) 风撑连接节点应进行三维坐标精确定位，应保证风撑与拱肋轴线、高程的匹配精度，误差应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 之间；
- b) 风撑运至现场后，应对其线形进行二次校核；
- c) 风撑安装前，应在拱肋间设置临时支撑架，支撑架刚度应满足风撑自重和施工荷载的要求，施工荷载应按 2 倍风撑自重计；
- d) 风撑安装过程中，应采用缆风绳进行临时固定，缆风绳与地面夹角不小于 45° ，拉力不小于风撑自重的 50%；
- e) 风撑安装过程中，应对拱肋截面进行应力检测，应力变化不应超过设计允许值的 20%；
- f) 风撑合龙应在 $10^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ 时进行，如果温度超出此范围，应根据热胀冷缩系数对风撑长度进行修正，宜按每 1°C 温差修正量为长度的 $1/10000$ 。

6.3 顶推

- 6.3.1 在顶推施工前，应进行稳定性分析，通过计算结构在顶推过程中的受力状态和变形情况，评估其稳定性，顶推施工应按 JTG/T 3650 的要求进行。
- 6.3.2 顶推速度应控制在合理范围内，宜在 $10\text{cm}/\text{min} \sim 15\text{cm}/\text{min}$ ，以确保施工过程的平稳性和安全性。
- 6.3.3 在顶推过程中，应根据实际情况适时调整顶推速度。在遇到施工难点或异常情况时，应停止顶推并进行分析处理，待问题解决后再恢复顶推。
- 6.3.4 在顶推过程中，应对每个工况进行实时监控，通过观测结构的变形、位移和应力变化等参数，及时发现并处理异常情况。
- 6.3.5 在工况转换时，应确保结构的稳定性和安全性。在从一种工况转换到另一种工况时，应逐步调整顶推力大小和临时支撑布置，避免对结构造成过大的冲击。
- 6.3.6 在顶推过程中，应实时监测桥梁结构的应力变化，应力异常时，应停止顶推并进行分析处理，避免桥梁结构发生破坏。
- 6.3.7 应建立施工监测系统，对桥梁结构在顶推过程中的变形、位移和应力变化等参数进行实时监控，通过反馈机制，及时调整施工方案和顶推参数，确保施工质量和安全。

6.4 大节段吊装

- 6.4.1 应按节段重量、吊装高度、跨度选择起重设备。
- 6.4.2 吊装区域的地基承载力应满足要求。
- 6.4.3 吊装过程中，应采用缆风绳对构件进行辅助固定，缆风绳与地面夹角不小于 45° ，拉力不小于自重的 50%。
- 6.4.4 吊装过程中应持续对构件进行姿态调整，保证高程、轴线偏差满足设计要求。

7 施工监测

7.1 一般要求

- 7.1.1 施工前，必须制定详细且全面的多拱肋宽幅钢箱拱桥施工监控方案，明确监控的重点、方法和频率。
- 7.1.2 应对多拱肋宽幅钢箱拱桥的加工制造、运输、安装等各个施工环节进行监控。
- 7.1.3 施工监测应涵盖拱肋的制造、运输、安装，以及钢箱的安装、焊接等全部关键工序。
- 7.1.4 通过施工监测，应确保钢箱、拱结构在施工过程中的应力、变形与稳定状态始终保持在设计允许的安全范围内。
- 7.1.5 应采取措施确保监测数据的真实性、完整性和可追溯性。

7.2 主要内容

- 7.2.1 应对拱肋和钢箱的挠度、高程、平面线形进行精确检测和控制，拱圈拱肋的线形应符合设计要求，变形或偏差不应超过 JTG/T 3650 和 JTG/T 3651 的要求。
- 7.2.2 应在钢箱和拱肋上有代表性的位置布设温度观测点，定期观测并记录温度变化，获取温度变化规律，分析其对结构应力和变形的影响。
- 7.2.3 在墩顶、支架等关键部位布设沉降观测点，定期观测并记录沉降数据，及时发现并处理不均匀沉降问题。
- 7.2.4 钢箱与拱肋安装监测时，应包括以下内容：
- a) 应对钢箱临时支撑和拱肋临时支撑进行高程测量；
 - b) 应对临时支架进行沉降监控，避免出现不均匀沉降和较大竖向位移；
 - c) 根据设计桥面曲线确定钢箱节段安装的平面位置，根据设计预拱度及竖曲线确定各支撑点高程；
 - d) 应根据设计图纸给定的坐标和高程控制点、钢箱分段尺寸，对支撑体系定位、高程及每一分段钢箱定位轴线和标高，编制详细的测量方案。
 - e) 应选择温度变化小的时段进行施工测量，将温度和日照对施工控制影响降低到最小限度。
 - f) 在拱肋安装过程中，应控制拱肋轴线的偏移量，确保拱肋轴线与设计轴线一致。
 - g) 应对拱肋轴线进行测量和校核，及时调整偏差；
 - h) 应在扣塔及吊装塔架垂直于桥轴线方向设置测站和后视点，实时监测其偏移情况
 - i) 对各拱肋节段的扣点标高进行测量和控制，确保标高与设计要求一致
 - j) 吊装拱肋过程中，用水准仪观测地锚的向上位移情况，详细记录并累加向上位移备查。
- 7.2.5 应在扣索安装和调整过程中，实时监测扣索的索力变化，观测后一段拱箱加载对前面各拱段扣索的索力影响，确保扣索系统处于正常工作状态。
- 7.2.6 应进行支架预压监测、支架高程监测。
- 7.2.7 应对钢箱梁温度进行监测，温度测量精度宜控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内。

7.3 监测设备与方法

- 7.3.1 使用经纬仪、全站仪、水准仪等高精度测量仪器进行监测，数据应准确无误。
- 7.3.2 应配置频谱分析仪、温湿度传感器等专用设备，用于测量索力、环境温湿度等关键参数。
- 7.3.3 采用定期测量与实时监测相结合的方法，全面掌握结构在施工过程中的应力、变形和稳定性状态。
- 7.3.4 对关键部位和关键参数进行重点监测和深入分析，及时发现并处理异常情况，保证施工安全和结构稳定。

7.4 监测数据处理和分析

- 7.4.1 设计数据记录表或建立数据库，详细记录每次观测的时间、地点、仪器、观测值等信息，便于后续分析和追溯。
- 7.4.2 应对收集到的监测数据进行初步筛选，识别并剔除由于仪器故障、观测错误等原因导致的异常值。对于疑似异常值，应进行进一步分析，确定其是否为真实反映结构状态的异常变化，避免误判。
- 7.4.3 采用均值、标准差、变异系数等适当的统计方法对监测数据进行统计分析，得出结构变形、应力等参数的变化趋势和规律。
- 7.4.4 宜结合历史数据和结构特点，建立预测模型，对结构未来的变形和应力状态进行预测。
- 7.4.5 根据统计分析结果，深入解读结构状态的变化趋势和可能存在的问题。
- 7.4.6 根据分析结果，及时对施工方案进行调整，如优化施工顺序、加强支撑措施等，以确保施工安全和质量。
- 7.4.7 针对可能出现的异常情况，提前制定应急措施和预案，确保在紧急情况下能够迅速响应和处理。
- 7.4.8 利用图表、曲线等工具对监测数据进行可视化处理，直观展示结构状态的变化趋势和规律，便于技术人员理解和分析。
- 7.4.9 定期编制监测报告，总结监测数据的收集、处理、分析结果以及施工方案的调整情况，为后续施工提供参考和依据。

附 录 A
(资料性)
宽幅钢箱施工期剪力滞效应

A.1 一般要求

A.1.1 宽幅钢箱拱桥施工前，应进行施工过程剪力滞分析计算。

注：

剪力滞效应可能导致腹板与顶、底接触部位应力过分集中，造成结构失稳或破坏。因此，进行剪力滞计算可以及时发现并避免这种风险。

A.1.2 剪力滞分析计算时，应重点关注腹板与顶板、腹板与底板、腹板与翼板等应力集中部位，以免在施工中造成结构失稳或结构破坏。

A.1.3 施工过程中对多拱肋宽幅钢箱拱桥进行监测和施工参数调整时，应考虑剪力滞对施工的影响，确保施工质量安全和桥梁后续运营安全。

A.1.4 剪力滞对结构的影响以剪力滞系数表示。

A.1.5 施工方案编制时，如发现宽幅钢箱拱桥翼板有效截面宽度和有效截面面积与实际情况有偏差时，应按 JTG D64 的要求进行复核。

A.2 剪力滞计算

A.2.1 剪力滞系数计算按式 (A.1) 执行。

$$\lambda = \frac{\sigma_i}{\sigma} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中， λ —剪力滞系数；

σ_i —钢箱截面实际应力值，考虑了剪力滞的应力值；

σ —根据初等梁理论得出的钢箱截面应力值。

A.2.2 剪力滞效应的影响按如下方法判定：

a) 当 $\lambda > 1$ 时，判定为正剪力滞效应现象；

b) 当 $\lambda = 1$ 时，判定为不存在剪力滞效应现象；

c) 当 $\lambda < 1$ 时，判定为负剪力滞效应现象；

d) 当 $\lambda = 1$ 时，宽幅钢箱的加工、组装、吊装、现场焊接、顶推施工等均不考虑剪力滞留对工艺的影响，当 $\lambda \neq 1$ 时，宽幅钢箱梁的加工、组装、吊装、现场焊接、顶推施工等均应考虑剪力滞留对工艺的影响。

A.2.3 剪力滞计算应注意以下事项：

a) 应根据施工和钢箱梁结构的复杂程度选择剪力滞计算方法，当幅宽超过 50m 时，应采用有限元分析法进行剪力滞计算，当幅宽不大于 50m 时，可采用简化计算法进行计算；

b) 当采用有限元模型进行计算时，应考虑钢箱梁材料非线性、施工期施力方向、施工支架支点存在高差和基础不均匀沉降等因素，进行数值分析；

c) 在有限元模型中，应提取出结构各点的应力值，计算出剪力滞系数；

d) 采用简化法时，可按式 A.2 计算；

$$\lambda = 1 + k \left(\frac{b}{L} \right)^2 \dots\dots\dots (A.2)$$

其中，当施工荷载集中时， k 取 0.12；当施工荷载均布时， k 取 0.08， b 为箱梁宽度， L 为跨度。

e) 当对剪力滞效应敏感、计算结果准确性要求高的结构，不应使用简化法进行剪力滞计算。

A. 2. 4 在计算多拱肋宽幅钢箱拱桥的剪力滞效应时，应考虑以下因素：

- a) 应考虑结构几何尺寸的影响，包括拱肋的跨度、高度、宽度以及底板的厚度等；
- b) 应考虑材料性质的影响，包括钢材的弹性模量、屈服强度等，当施工阶段局部应力超过钢材屈服强度的70%时，需采用弹塑性本构模型；
- c) 应考虑荷载条件的影响，包括施工荷载、温度荷载、风荷载等；
- d) 应考虑施工边界条件的影响，包括结构的支撑方式、约束条件等；
- e) 应考虑施工方法的影响，包括拱肋的吊装顺序、钢箱的顶推、临时支撑的设置等；
- f) 多拱肋结构的剪力滞计算需考虑各拱肋间的横向刚度差异及施工协同作用。

A. 2. 5 应结合具体的多拱肋宽幅钢箱拱桥施工情况进行数值分析。

A. 2. 6 应通过模拟施工过程和受力状态，提取出结构各点的应力值，并计算出剪力滞系数，并根据剪力滞系数的大小和分布，评估结构的施工期受力性能和施工安全性。

A. 3 正应力计算

A. 3. 1 钢箱截面正应力计算可根据初等梁理论进行，计算方法如下：

a) 钢箱局部应力的基础正应力计算按公式 (A. 3) 计算：

$$\sigma = \frac{M}{W} \dots\dots\dots (A. 3)$$

其中：

σ —表示基础正应力。

M—梁的弯矩，是梁在弯曲变形时横截面上所产生的内力矩。

W—梁截面的断面系数，它反映了截面形状对弯曲应力的影响。

b) 断面系数W的计算按公式 (A. 4) ：

$$W = \frac{I}{y} \dots\dots\dots (A. 4)$$

其中：

I—梁截面的惯性矩，是描述截面形状对弯曲变形抵抗能力的一个几何量。对于矩形截面，惯性矩I的计算公式为 $I = \frac{bh^3}{12}$ ，其中b为梁截面的宽度，h为梁截面的厚度；对于复杂截面，可采用有限元分析方法进行计算。

Y—梁截面上所求应力点到中性轴的距离。

c) 应力计算结果应与材料的容许应力进行比较，以确保施工的安全性。

A. 3. 2 剪力滞附加正应力计算应按如下要求进行：

a) 在进行正应力计算时，应首选有限元模型法。

b) 在简化的模型中，考虑剪力滞效应的正应力可以表示为式 (A. 5) ：

$$\sigma(x,y) = \sigma_0(x) + \sigma_{shear\ lag}(x,y) \dots\dots\dots (A. 5)$$

其中：

$\sigma(x,y)$ —考虑剪力滞效应后在点(x, y)处的剪力滞附加正应力。

$\sigma_0(x)$ —不考虑剪力滞效应时，根据经典梁理论计算得到的正应力分布。

$\sigma_{shear\ lag}(x,y)$ —由于剪力滞效应而在点(x, y)处产生的附加正应力。

c) $\sigma_0(x)$ 可根据弯矩和截面属性（如惯性矩）来计算；

d) $\sigma_{shear\ lag}(x,y)$ 的计算应使用数值方法求解，应模拟翼缘板内的应力分布并考虑剪力滞效应。

e) 有限元分析中，应通过建立详细的模型来模拟结构的几何形状、材料属性和边界条件，并计算整个结构中的应力分布。

A. 3.3 可直接采用有限元正应力计算结果。

A. 4 多拱肋施工荷载控制

A. 4.1 在拱肋施工时，应密切测量多拱肋间荷载分配不均和刚度耦合效应，及时调整边拱肋与中拱肋的应力差异。

A. 4.2 多拱肋施工时，应加强施工时序控制，应密切关注分阶段吊装或顶推可能导致各拱肋受力不同步，引发附加剪力滞。

A. 4.3 多拱肋结构的剪力滞计算应考虑各拱肋间的横向刚度差异及施工协同效应，宜采用空间有限元模型分析荷载分配与应力叠加效应。

A. 4.4 多拱肋吊装顺序应通过施工阶段模拟确定，异步施工导致局部应力集中或剪力滞系数超限时，应采取纠正措施。

A. 4.5 多拱肋施工过程中，应实时监测各拱肋应力分布，若相邻拱肋的剪力滞系数差异超过15%，需暂停施工并调整吊装方案或临时支撑布置。

A. 4.6 多拱肋临时支撑应具备横向刚度协调能力，支点高差需控制在 $L/2000$ （ L 为跨径）以内，避免因支撑不均匀沉降导致剪力滞恶化。

附录 B

(资料性)

宽幅钢箱安装稳定性分析方法

- B.1** 施工前,应根据施工技术方案,对宽幅钢箱和拱肋在安装过程中的稳定性进行分析。具体流程如下:
- a) 整体稳定性分析时,临界荷载系数不小于2时,采用直接分析法;当整体稳定系数不大于0.6时,采用二阶 $P-\Delta$ 分析法结合整体稳定系数的方法;
 - b) 当顶板宽厚比 ≤ 40 ,腹板高厚比 ≤ 60 ,或加劲肋间距 ≤ 3 倍板厚时,应进行局部稳定性验算;
 - c) 在施工过程中应对吊装、顶推工况进行模拟,控制跨中挠度 $\leq L/500$,临时支撑反力差异 $\leq 10\%$ 。
- B.2** 宽幅钢箱拱在施工过程中整体稳定性分析应优先采用二阶 $P-\Delta$ 弹性分析法以及直接分析设计法。
- B.3** 宽幅钢箱拱施工稳定性二阶 $P-\Delta$ 弹性分析法应满足以下要求:
- a) 应考虑 $P-\Delta$ 效应及结构的整体初始缺陷,其平衡方程按结构变位后的轴线建立;
 - b) 计算时,不考虑材料非线性,只考虑几何非线性;
 - c) 应以第一塑性铰为准则,不应进行内力重分布。
- B.4** 宽幅钢箱拱施工稳定性直接分析设计法应满足以下要求:
- a) 除考虑二阶分析的 $P-\Delta$ 效应外,还应考虑 $P-\delta$ 效应、整体结构与局部结构构件的初始缺陷、节点连接刚度、材料弹塑性和残余应力等影响因素。
 - b) 应在稳定性分析时,初始缺陷应在分析时同时引入,分析得到应力状态后,再采用设计准则判断是否塑性。
 - c) 应在非线性迭代中不断进行修正、相互影响,直至达到施工荷载水平下的平衡为止。
- B.5** 宽幅钢箱拱施工稳定性一阶弹性分析法应满足以下要求:
- a) 内力分析时,应采用线弹性分析,不考虑变形对外力效应的影响,平衡方程按结构变位前的轴线建立;
 - b) 应对宽幅钢结构进行结构分解,将结构的稳定性分析分解为钢结构施工中稳定性和支架在施工中稳定性两个部分;
 - c) 应通过构件计算长度系数来考虑结构的变形特点和构件之间相互约束对构件稳定的影响;