

广东省地方标准制订
《大节段钢箱梁施工监控技术规范》
(送审稿)

编制说明

港珠澳大桥管理局

浙江大学

2021年8月

目 录

一、任务来源.....	1
二、编制的目的和意义.....	2
三、遵循的原则和编制依据.....	3
1 遵循原则.....	3
2 编制依据.....	3
四、标准编制过程.....	4
1 计划与安排.....	4
2 标准文稿的编制情况.....	4
3 标准文本征求意见情况.....	5
五、标准的主要内容说明.....	6
1 范围（对应规范第 1 章）.....	6
2 基本规定（对应规范第 3 章）.....	6
3 施工监控工作程序（对应规范第 4 章）.....	8
4 施工监控计算（对应规范第 5 章）.....	13
5 施工监测（对应规范第 6 章）.....	16
6 误差分析与控制（对应规范第 7 章）.....	25
7 工厂制造阶段控制（规范第 8 章）.....	28
8 运输阶段控制（规范第 9 章）.....	32
9 现场安装阶段控制（对应规范第 10 章）.....	33
10 温度效应控制（对应规范第 11 章）.....	37
11 施工监控信息化（对应规范第 12 章）.....	40

一、任务来源

按照广东省市场监督管理局通告（粤市监标准[2021]-25号），本标准于2021年1月纳入广东省地方标准制修订计划项目。本标准是为了统一大节段钢箱梁施工监控的技术要求，确保钢箱梁建设工程质量而制定。

港珠澳大桥建造中采用了百米级大节段钢梁大规模吊装施工，大桥建设的成功经验之一是强调施工监控的作用，通过施工监控工作将钢梁制造、运输、安装以及桥位连接和落梁体系转换等一系列分属于不同施工单位完成的关键环节串联起来。在大桥施工监控中先后解决了大节段钢箱梁制造精度控制问题、大节段钢箱梁运输与存放过程的结构安全问题，尤其是钢梁局部屈曲控制、大节段钢箱梁现场吊装及调位控制问题、大节段钢箱梁环缝焊接的温度效应控制、大节段钢箱梁上下部连接中的支座预偏量精确计算以及桥梁整体线形控制技术等技术难题，最终确保了大节段钢箱梁安装的顺利实施。港珠澳大桥的工程实践表明，桥梁施工控制具有连接设计、施工、质量监督等一系列重要环节的功能。由于我国缺乏跨海钢结构桥梁大节段安装控制的技术规范，严重制约了大节段吊装施工在我国其它跨海大桥上的应用。为了推广港珠澳大桥大节段钢箱梁施工监控技术成果，港珠澳大桥管理局和浙江大学共同承担了“跨海钢结构桥梁大节段安装控制技术研究”项目，系统研究了大节段钢箱梁施工监控工作程序、施工监控计算技术、施工监控测试技术、误差分析与控制技术，以及分节段施工控制技术，研究成果覆盖大节段钢箱梁施工全过程控制关键技术，解决了大节段钢箱梁施工监控应用推广的关键技术问题。该项目以港珠澳大桥大节段钢箱梁施工监控的成功经验为基础，总结编写了《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（初稿）。目前该项目已经验收、结题。

在《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（初稿）成果基础上，港珠澳大桥管理局和浙江大学共同组建了标准编制工作小组，结合广东省地方标准要求，对原《规范》（初稿）进行修改完善，形成了新的《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（初稿）；在对标准初稿进行审查后，结合审查会专家意见，修改形成了标准征求意见稿；根据征求意见稿反馈回来的意见，进一步修改形成了标准送审稿。

二、编制的目的和意义

随着我国经济发展和综合国力的提高，基础设施建设从陆地、江河延伸到海洋，已建成杭州湾大桥、港珠澳大桥，正在建造的深中通道、厦门东二通道，未来规划建设渤海湾大桥、杭州湾高铁大桥以及琼州海峡大桥等跨海大桥。然而海洋环境下受台风、海浪、强日照以及繁忙的航道通行等因素的影响，对跨海桥梁建设形成了诸多限制，跨海桥梁建设具有施工作业时间短、施工难度大、施工风险高等特点。近年来，我国在跨海桥梁建设上进行了大胆实践和有益探索，从杭州湾大桥建设中采用的 70m 整孔预应力混凝土箱梁架设到港珠澳大桥百米级钢箱梁大节段吊装。工程实践表明，在跨海桥梁建设中，采用大节段钢箱梁吊装施工具有一系列优点，诸如钢结构自重轻、刚度大，可以做成百米级大跨结构，适合采用大节段安装工艺；采用大节段安装显著缩短海上施工时间——每一大节段海上施工从吊装到环缝焊接完成仅需 5 天，相比于混凝土结构施工效率显著提高，因此大节段钢结构桥梁在未来我国跨海通道建设中将发挥更大作用。

保障大节段钢桥施工的是桥梁建设的“四化”理念，即：大型化、工厂化、标准化和装配化。该过程中，在设计层面，由于设计仅给出成桥状态，与之对应的施工初始状态未知，准确预测桥梁的初始状态，是确保实现设计成桥状态的基本保障。在施工层面，大节段钢梁建造涉及的环节众多，施工中环环相扣，每一环节均对下一环节有影响。通过桥梁施工监控工作可以指导施工，另外通过对施工过程的控制，保证了精细施工的实现。然而在桥梁施工控制方面，目前我国相关规范仅有《建筑与桥梁结构监测技术规范》（GB 50982-2014）、《结构健康监测系统设计标准》（CECS 333-2012）和《公路桥梁施工监控技术规范》（报批稿），而前两者主要针对监测技术，后者则仍处在报批阶段，因此我国桥梁施工监控领域实际上处于无规范可循的状况，桥梁施工监控只能依靠有经验的监控单位来实施；由于监控单位的经验水平不一，难以保障施工质量，也对后续桥梁建设推广大节段钢梁吊装施工形成障碍。因此有必要制定相关规范，完善钢梁大节段安装控制标准体系，规范并指导钢梁大节段安装施工，确保跨海钢桥建造质量。

在“一带一路”倡议下，广东提出了“十三五”期间打造成为“21 世纪海上丝绸之路”国家门户的规划，而基础设施互联互通又是“一带一路”建设的优

先领域。可见我省对海洋交通基础设施的需求之大。

在“一带一路”战略和粤港澳大湾区建设的背景下，我省对海洋交通基础设施建设仍有巨大需求，面对未来我省跨海大桥建设的广阔前景与缺乏相应的大节段钢梁安装控制技术规范这一矛盾，借鉴港珠澳大桥大节段钢箱梁安装施工的成功经验，总结提炼港珠澳大桥大节段钢箱梁施工监控成果，编制《大节段钢箱梁施工监控技术规范》，目的在于填补行业空白，在交通建设领域为更好地推广跨海条件下大节段钢箱梁安装施工。通过本项目的实施形成适应我国国情、具有可操作性的大节段钢箱梁施工监控技术规范，对指导我省跨海钢桥大节段安装的标准化施工，提高施工质量，确保结构的耐久性具有实际意义；对今后我国建造类似跨海桥梁工程，如渤海湾大桥、杭州湾通道以及琼州海峡大桥可直接提供技术指导，具有重要的意义。

三、遵循的原则和编制依据

1 遵循原则

本标准严格按照 GB/T 1.1-2020 的要求进行编写，遵循“相关性、一致性、准确性、透明性、真实性”的基本原则。

2 编制依据

《大节段钢箱梁施工监控技术规范》在内容上主要参考以下文件：

- 1) GB 50982-2014 《建筑与桥梁结构监测技术规范》；
- 2) CECS 333-2012 《结构健康监测系统设计标准》；
- 3) 《公路桥梁施工监控技术规范》（报批稿）。

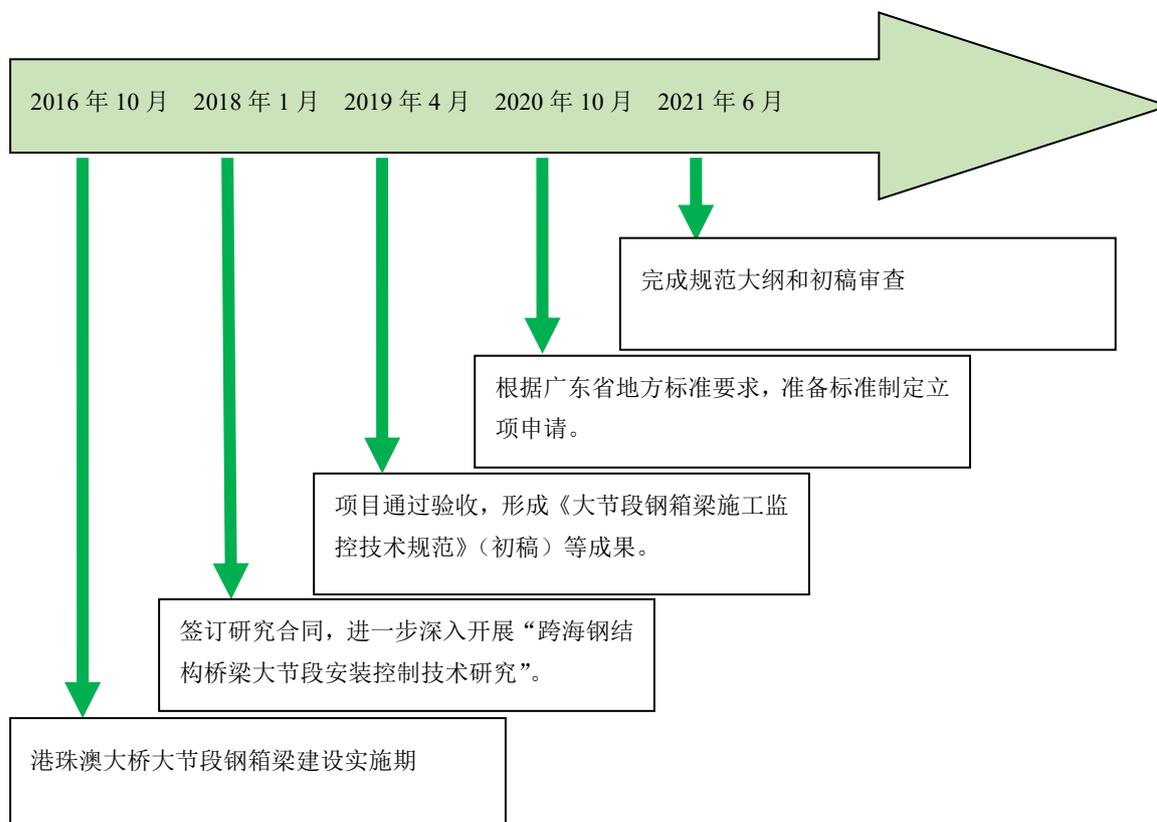
四、标准编制过程

1 计划与安排

起止时间	工作内容
2018.01-2019.04	依托“跨海钢结构桥梁大节段安装控制技术研究”课题，形成《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（初稿）成果
2019.05-2020.10	对《规范》（初稿）进行修改完善
2020.10-2020.11	提交立项申请
2021.01-2021.06	规范大纲和初稿审查，根据审查意见修改形成征求意见稿
2021.06-2021.07	规范征求意见，对征求意见稿进行修改形成报批稿

2 标准文稿的编制情况

本标准的前期研究进度如下图所示：



(1) 2018年1月-2019年4月，港珠澳大桥管理局和浙江大学开展“跨海钢结

构桥梁大节段安装控制技术研究”，在项目研究过程中，通过调研当时国内外相关标准，并结合港珠澳大桥大节段钢箱梁施工监控的经验，形成《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（初稿）。

(2) 2020年8月—2020年11月，港珠澳大桥管理局和浙江大学基于《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（初稿）已有成果申请广东省标准编写，共同组建了标准编制工作小组，开展标准制定的立项申请。

(3) 2021年1月—2021年6月，标准编制人员根据广东省地方标准编写要求，编制了标准编写工作大纲和修改完善《标准》（初稿），并召开了大纲和初稿审查会，根据会议专家意见，修改完善，形成了《大节段钢箱梁施工监控技术规范》征求意见稿。

(4) 2021年6月—2021年7月，标准编制人员根据征求意见稿反复进行讨论并对标准进行修改完善，形成了《大节段钢箱梁施工监控技术规范》送审稿。

3 标准文本征求意见情况

2021年6月24日，港珠澳大桥管理局向业主单位、设计科研单位、施工单位和高校，共17家单位征求意见，根据征求意见对《大节段钢箱梁施工监控技术规范》进行了修改，主要修改内容如下：

(1) 进一步明确了本规范的使用范畴，规定本规范使用不仅局限于“跨海”桥梁，也适用于其它钢箱梁桥施工监控。

(2) 新增“大节段钢箱梁”、“施工监控联系单”、“设计线形”等术语。

(3) 细化了大节段钢箱梁施工监控的基本规定，增加了施工监控单位由谁引进等内容。

(4) 修改了施工监控应符合的管理流程，正文中不再出现“HSE”的提法（条文4.1.3）。

(5) 修改了部分关于大节段钢箱梁施工监控计算的规定，参数敏感性分析中增加关于“墩顶支点的相对高差”分析等规定（条文5.4.2）。

(6) 修改了关于大节段钢箱梁施工监测的规定，增加了施工单位协助完成监测测点和监测传感器的保护等内容（条文6.1.5）。

(7) 删除了关于施工误差类型的条文，将原条文内容放入条文说明中（原

条文 7.2)。

(8) 细化了工厂制造阶段控制内容，增加钢箱梁制造时对胎架的要求等内容（条文 8.1.6）。

(9) 细化了现场安装阶段控制内容，增加存在合龙段的钢箱梁施工控制要求等内容（条文 10.2.4）。

(10) 重新梳理了规范条文说明，条文说明中增加了施工监控中各参建方的职责等内容。

(11) 对规范部分用词进行了修改完善，如原文出现的“大节段钢箱梁桥”统一修改为“大节段钢箱梁”。

(12) 删除规范后面的“条文说明”等内容，将该部分内容统一放在编制说明中。

根据对征求意见的回复，形成了《大节段钢箱梁施工监控技术规范》（征求意见稿）反馈意见表。

五、标准的主要内容说明

1 范围（对应规范第 1 章）

1.1 大节段钢箱梁施工监控除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。（对应规范 1.0.4）

（说明：本规范所提的大节段钢箱梁是指单次安装长度超过 40m 的节段钢箱梁；对于整孔安装的节段钢箱梁，当节段长度小于 40m 时，其施工监控的难度相对较小，仍可以参照本规范执行。）

2 基本规定（对应规范第 3 章）

2.1 施工监控应依据现行的技术规范、实际施工采用的设计文件和施工方案开展相关工作，宜在钢箱梁制造安装方案制定阶段介入。（对应规范 3.0.1）

（说明：施工监控单位一般由工程项目的业主单位或业主单位委托其它工程监理单位通过规范的程序进行引入，监控单位进场后应依据相关技术规范、设计

文件和评审后的施工方案等资料开展工作。)

2.2 大节段钢箱梁施工监控工作包括施工监控计算、结构力学行为预测、施工监控测试、施工监控误差分析与控制等环节，确定合理的施工参数。(对应规范 3.0.3)

(说明：本条解释了施工监控工作的基本内涵，对于大跨钢箱梁施工监控工作应该贯穿于桥梁施工的各个阶段，典型的桥梁施工阶段有：工厂制造阶段、运输阶段以及现场安装阶段。)

2.3 大节段钢箱梁施工监控测试应根据施工监控计算成果，对桥梁结构施工过程中关键性变形及受力状态进行跟踪监测，并对几何状态、整体受力和局部受力进行反馈、控制。(对应规范 3.0.4)

(说明：钢箱梁施工监控首先应从总体上把控桥梁结构的受力和变形，以确保施工方案总体可行，因此需要开展结构的整体效应计算。施工过程中，结构存在局部的受力和变形问题，如施工过程在非设计支撑位置设置了临时支撑，这导致结构局部承受较大荷载，出现局部受力和变形安全隐患，因此需要开展相应的局部效应控制计算，确保结构局部受力安全。整体效应控制计算一般采用杆系模型即可得到准确的结果；局部效应控制计算则需要建立更精细的模型，如板壳模型或实体模型进行计算。)

2.4 大节段钢箱梁施工监控计算应分别开展整体效应模拟计算和局部效应模拟计算，并事先评估结构受力的非线性效应及空间效应。(对应规范 3.0.5)

(说明：对于跨度超过百米的大节段钢箱梁，监控计算时应开展结构的非线性效应评估，即评估结构受力与初始位置和变形的相关程度。

对于宽幅钢箱梁或设大挑臂的钢箱梁或曲梁，结构横向变形突出，加之薄壁箱梁存在剪力滞和畸变效应，因此监控计算时应开展结构的空间效应评估。)

2.5 大节段钢箱梁监控计算关键性成果应与设计单位进行核对，经设计单位确认后方能用于编写监控指令。(对应规范 3.0.6)

(说明：大跨钢箱梁桥温度效应明显，施工过程中结构体系不断发生变化，而该变化过程并不总是在设计基准温度条件下发生，由此会导致结构生成过程中出现永久性的变形和内力，最终无法达到设计要求的线形和内力状态。因此需对大跨钢箱梁桥进行温度作业窗口控制。)

2.6 大节段钢箱梁施工监控中应对施工临时荷载进行控制。（对应规范 3.0.8）

（说明：大节段钢箱梁施工中的临时荷载是监控计算必须考虑的因素，对钢箱梁线形有影响，施工临时荷载一经确定，在施工过程中不应发生大的改变，因此应对施工过程中临时荷载大小及作用位置进行控制，确保和监控计算取值一致。）

2.7 施工监测设备选择应遵循“技术先进、性能稳定并兼顾经济性”的原则。（对应规范 3.0.9）

（说明：施工监控中选用的测试设备，包含传感器等测试元件应首先考虑其技术性能满足测试条件和精度要求；其次考虑到桥梁施工监控与健康监测有一定的关联性，施工监控选择监测设备时宜尽可能兼顾与运营期结构健康监测系统的衔接。）

2.8 施工监控工作应遵循明确固定的工作流程，保证监控信息的传递顺畅，确保监控工作成效。（对应规范 3.0.11）

（说明：施工监控标准化工作程序是确保施工监控工作有效进行的前提。项目实施过程中需建立业主、设计、监理、施工和监控等参建方的联络机制，尤其需要建立施工监控指令的签发流程和施工监控信息的反馈机制。）

2.9 施工监控应采用监控辅助信息化系统，实现监控信息的及时传递和数据收集。（对应规范 3.0.12）

（说明：桥梁施工监控宜充分利用计算机和互联网，搭建线上工作平台，建立施工监控辅助系统，实现监控信息的及时传递、数据收集和反馈。）

3 施工监控工作程序（对应规范第 4 章）

3.1 一般规定（对应规范 4.1）

3.1.1 施工监控工作中应对施工监控信息的流转、施工监控指令签发、施工监控的文件和监控成果提交等环节制定专门的工作流程。（对应规范 4.1.1）

3.1.2 施工监控工作中应建立监控单位与业主、设计、监理和施工单位的联络机制，确保监控信息的及时传递。（对应规范 4.1.2）

（说明：施工监控是联系设计与施工的纽带，在整个桥梁建设过程中起到枢纽的作用，然而施工监控的合同额占整个工程造价的比例很小（往往不到 0.5%），

从占合同金额的比例上容易忽视监控单位的作用，而监控环节沟通不畅容易造成巨大的工程损失和工期延误。因此为保证监控工作成效、确保施工监控信息的传递顺畅，需建立一套施工监控工作程序，将项目参建方与施工监控单位串联起来，确保监控信息的及时反馈、监控指令的顺利签发及工程验收的顺利推进。）

3.1.2 桥梁施工监控工作程序应符合整个工程有关健康、安全和环保方面的管理流程。（对应规范 4.1.3）

（说明：工程建设中越来越重视工作人员的健康、工作的安全和环境保护，施工监控工作程序应符合上述几个方面的要求。港珠澳大桥建设中专门制定了针对整个工程的 HSE（Health Safety and Environment——健康、安全和环保管理体系）管理流程，提出了施工监控 HSE 责任人、施工监控的 HSE 实施计划、对施工监控人员进行 HSE 培训教育等一系列要求，对确保监控工作的顺利开展起到了保障作用。）

3.2 施工监控信息流转程序（对应规范 4.2）

3.2.1 根据设计文件和施工方案，监控单位应编制相应的施工监控方案或细则，开展针对施工过程的监控计算，并与设计单位就施工监控计算进行校核。（对应规范 4.2.1）

3.2.2 设计单位应配合施工监控单位完成施工监控计算核对和施工监控指令复核。（对应规范 4.2.2）

3.2.3 监理单位应协助监控单位完成施工信息收集，将施工监控指令签发至施工单位，并督导施工单位严格执行监控指令。（对应规范 4.2.3）

3.2.4 施工监控前期，施工单位应通过监理单位或业主单位向施工监控单位提供用于工程实施的施工方案及相关施工信息，这些信息主要包括：施工进度安排、施工临时荷载堆放位置及大小、施工临时支撑设置、大节段钢箱梁环缝焊接时机以及施工环境条件等；施工监控中，施工单位应将施工监控指令的执行情况反馈给监理单位，监理单位将施工结果提供给监控单位。（对应规范 4.2.4）

3.2.5 业主单位对整个施工监控过程中的信息流转进行总体协调，确保各单位高效有序地实现施工监控信息传递。（对应规范 4.2.5）

（说明：施工监控信息流转是指项目各参建方与施工监控相关的信息的传递与反馈，重点是明确各单位在施工监控工作中应配合完成的工作。施工监控信息

流转程序可参照下列流程执行：

施工监控信息流转实际涵盖了各单位在施工监控工作中的职责，各单位职责一般如下：

(1) 业主单位

协调各成员单位的工作，根据需要召集施工控制工作会议，处理施工监控工作中各工作界面的协调问题。

(2) 设计单位

a) 提供设计阶段的结构计算数据文件、图纸、结构最终受力及线形，明确监控的目标要求；

b) 对施工监控单位提交的计算结果及监控指令进行复核；

c) 参与讨论重大监控修正。

(3) 施工单位

a) 通过监理提交施工信息（主要是施工方案）给监控单位；

b) 落实施工监控测试元件的现场保护，协助监控单位开展施工监控工作；

c) 执行施工监控指令，并将指令实施结果通过监理单位反馈给监控单位；

d) 参与讨论重大监控修正。

(4) 监理单位

a) 签发施工监控指令，并监督施工监控指令的执行情况；

b) 搜集施工单位执行的监控指令情况，并将指令执行结果反馈给监控单位；

c) 协调施工现场监控中遇到的各种问题，必要时组织展开施工监控协调会。

(5) 监控单位

a) 拟定施工监控大纲、施工监控方案或细则；

b) 根据设计文件和施工方案开展施工监控计算，并主动与设计单位进行计算结果核对；

c) 计算并提交施工监控指令，并跟踪指令执行过程；

d) 全过程分阶段开展施工中的钢箱梁应力和变形监测；

e) 识别设计参数误差，并进行有效预测；

f) 发生重大修改及时向监理及业主单位汇报并会同各单位提出调整方案；

g) 及时汇报施工监控结果并提交施工监控阶段报告和总报告。）

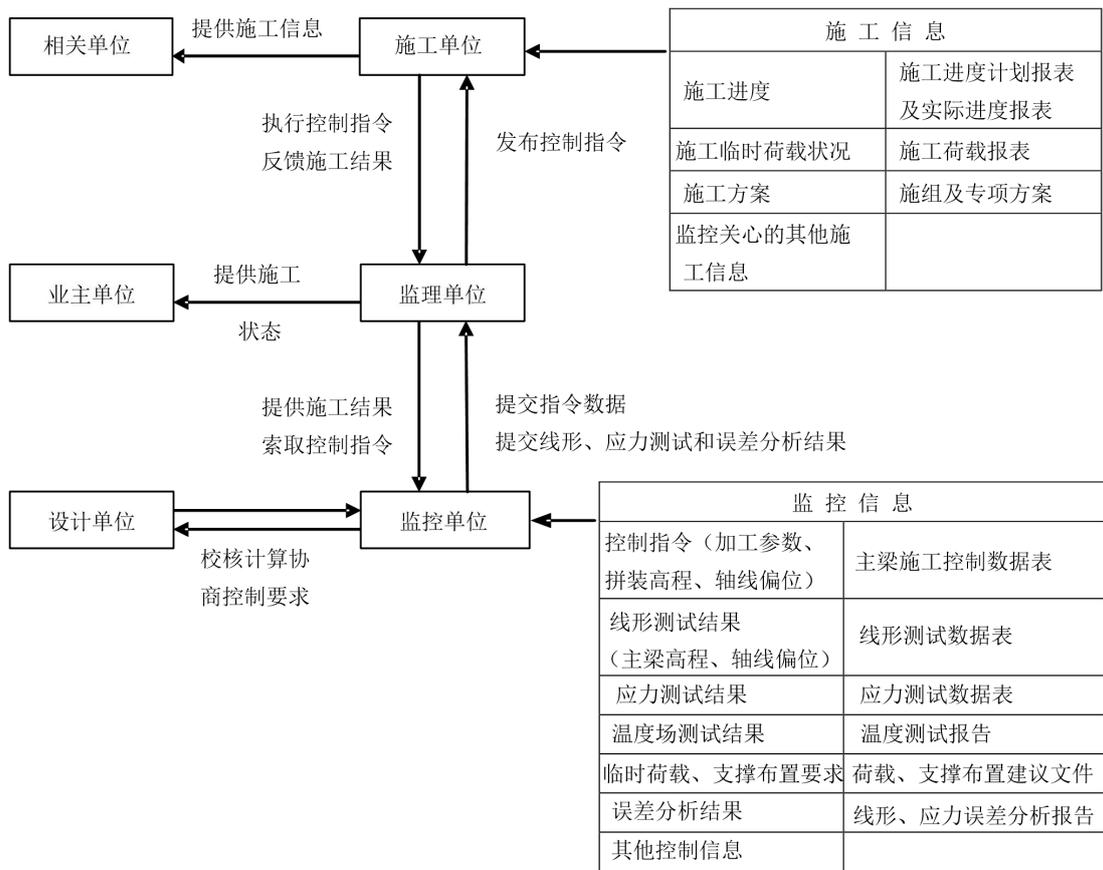


图 1 施工监控信息流转程序示意

3.3 施工监控指令签发流程（对应规范 4.3）

3.3.1 施工监控指令应经设计单位复核后，通过监理单位签发至施工单位。（对应规范 4.3.1）

（说明：施工监控指令相当于工程建设中的“法律”文件，兼具指导施工与约束施工双重效力，因此监控指令签发需经历一个严格的流程。监控指令应经设计认可，然后由监理或业主签发并监督实施，监控单位对指令的签发和执行过程进行跟踪。一般的施工监控指令签发流程如下图所示：）

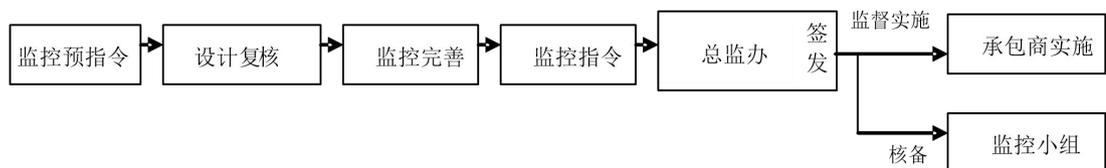


图 2 施工监控指令签发流程

3.4 施工监控文件与成果（对应规范 4.4）

3.4.1 施工监控文件包括三类：指导性文件、执行性文件和总结性文件。（对应

规范 4.4.1)

3.4.2 施工监控指导性文件有：施工监控大纲、施工监控方案或施工监控工作细则。（对应规范 4.4.2）

3.4.3 施工监控执行性文件有：施工监控联系单和施工监控指令。（对应规范 4.4.3）

3.4.4 施工监控总结性文件有：施工监控计算报告、施工监控阶段性报告和施工监控总报告。（对应规范 4.4.4）

3.4.5 施工监控大纲、施工监控方案、施工监控工作细则和施工监控计算报告应在现场具体监控工作实施前提供；施工监控指令，应在具体施工作业开始前提供；施工监控阶段性报告应在阶段施工监控工作结束后提供；施工监控总报告应在工程结束后提供。（对应规范 4.4.5）

（说明：施工监控大纲是整个施工监控工作的纲领性文件，对施工监控起总体指导作用，主要内容包含：工程概况、工程的重点与难点、施工监控总体工作内容、施工监控技术路线等。施工监控方案是针对整个工程编写的具体详尽的、具备可操作性的监控文件，主要内容包含：施工监控计算方案、几何状态监测方案、内力（应力）监测方案和误差分析与误差控制方案。针对特别重要的施工作业环节，宜进一步编写施工监控专项实施细则。大纲、方案、细则范围由大到小、由粗到细、层层递进，构成了施工监控工作的指导性文件。对于一般的桥梁工程施工监控，编写到施工监控方案即可。

施工监控过程中需要与各方互动，中间环节产生的文件属于施工监控执行性文件，其中施工监控联系单是解决需要各方明确答复问题的文件，而施工监控指令则是指导施工的文件，对于钢箱梁的下料参数、安装参数和索力张拉参数等都需要以监控指令的形式明确。

施工监控的总结性文件也是施工监控的成果文件，包括施工监控计算报告、施工监控周期性报告和施工监控总报告。施工监控计算是施工监控的基础性工作，监控单位应全面详实的反映施工监控计算的执行情况，并以施工监控计算报告的形式反映相关工作，施工监控计算报告的主要内容包括施工监控计算采用的参数、施工监控计算模型和主要的计算结果和结论；完成一个周期的施工监控工作后，监控单位应开展工作总结，撰写施工监控周期性报告，向各方汇报施工监控开展

情况；整个施工监控工作结束后，监控单位应撰写施工监控总报告，全面总结施工监控的执行情况，提供桥梁的成桥状态，并给出明确的监控结论和相关的运营建议。）

4 施工监控计算（对应规范第5章）

4.1 一般规定（对应规范 5.1）

4.1.1 大节段钢箱梁施工监控计算方法应能满足工程控制精度要求，计算参数取值应以钢箱梁结构实测数据为主或采用国家免检产品出厂标识参数。（对应规范 5.1.1）

（说明：桥梁施工监控计算应采用经工程检验过的计算方法。对于前期施工监控计算，计算参数的取值主要采用规范提供的值；对于施工过程中的监控计算，计算参数的取值应采用现场实测的值。）

4.1.2 施工监控计算应根据桥梁施工过程开展大节段钢箱梁结构的整体效应计算、局部效应计算以及参数敏感性评估。（对应规范 5.1.2）

（说明：施工控制的整体效应计算主要是控制结构最不利受力位置的应力以确保结构受力安全；控制结构的最大变形，以确保结构具有足够的刚度；此外还要控制结构的基频，以确保结构动力响应处于合理范围。局部效应计算主要是就钢箱梁施工过程中的局部受力进行分析，如钢箱梁工厂存放时局部支撑区域受力、吊装时吊点区域、放置于临时支座上的局部受力区域、搭接牛腿处钢箱梁局部受力等，确保钢箱梁局部结构强度和稳定性满足受力要求。）

4.1.3 大节段钢箱梁施工监控计算内容应包括结构力学计算和结构几何计算，前者主要是对结构的变形、应力和稳定性进行计算；后者则是计算给出钢箱梁的加工参数和安装参数。（对应规范 5.1.3）

（说明：结构几何计算是大节段钢箱梁施工监控的重要计算内容，其具体工作内容包括：根据力学计算得到的各项数据，如预拱度，进一步考虑设计给定的竖曲线和平曲线，计算给出小节段钢箱梁顶底板长度、宽度、高度，大节段钢箱梁的总长、端面倾角、竖向线形、横坡线形，海上安装时的控制点坐标等几何参数，以指导工程施工。）

4.1.4 对于曲梁、设大挑臂的钢箱梁或宽幅箱型结构的钢箱梁，计算时应考虑结

构的空间效应。(对应规范 5.1.4)

(说明:宽幅箱型结构的钢箱梁存在剪力滞效应,计算时应考虑;对于大悬臂结构的箱梁或曲梁,其截面横向变形不一致,尤其是翼缘板处,计算时也应考虑,为横向预拱度设置提供依据。)

4.2 计算方法(对应规范 5.2)

4.2.1 大节段钢箱梁整体受力与变形分析可采用杆系有限元模型,并考虑空间效应和非线性效应,同时考虑截面剪切系数影响。(对应规范 5.2.1)

(说明:杆系模型在兼顾计算结果可靠的前提下具有计算效率高的优点,在进行施工监控整体计算和非线性效应分析时,采用杆系模型即可准确的反映结构的整体变形和整体应力且计算收敛速度较快,故在施工监控整体计算和非线性效应分析时推荐采用杆系模型。

对于大节段的钢箱梁,采用杆系模型计算时截面的剪切系数不可忽略。港珠澳大桥工程实践发现:110m 钢箱梁考虑截面剪切系数时,结构变形可增加近 3cm,截面剪切系数对大节段钢箱梁的变形具有显著影响。)

4.2.2 钢箱梁局部效应分析和空间效应分析应采用能准确反映结构局部力学行为和空间力学行为的精细化有限元模型。(对应规范 5.2.2)

(说明:精细化有限元模型具有计算精度高的优点,但由于单元划分细、单元数量多,因此模型的规模大,计算效率低,对于全桥都采用板壳或实体单元的精细化模型,计算费时费力、计算成本高。杆系模型在施工监控整体控制上已有足够的精度,作为整体计算的补充,局部效应计算和空间效应分析时可采用板壳模型、实体模型或梁格模型,既具有较高的计算精度同时又不至于使计算成本过高。局部效应分析时可能存在结构局部屈曲或屈服,计算时应考虑几何非线性和材料非线性。

桥梁多尺度模拟是解决计算精度和计算效率的有效方法,在钢箱梁局部效应分析中也可考虑采用多尺度分析方法。近年来有不少学者对多尺度模拟方法进行了研究,并有相关文献报道,如:2013 年 7 月发表于浙江大学学报(工学版)上的《空间曲线蝶形拱桥顶推施工的多尺度模拟分析》,第 47 卷第 7 期。)

4.2.3 大节段钢箱梁施工过程计算应评估结构几何非线性效应,应考虑截面剪切系数和结构体系改变与边界条件变化等因素,宜采用增量法计算。(对应规范

5.2.3)

(说明：对于大节段钢箱梁，随着跨度增大、结构刚度相对变小，施工过程中可能出现结构受力与变形与初始位置相关，即存在几何非线性效应，在施工过程计算中应首先进行评估。此外，大节段钢箱梁施工过程中结构体系和边界均在不断发生变化，在进行施工过程计算时应考虑这些因素的影响。)

4.3 施工初始状态计算（对应规范 5.3）

4.3.1 施工监控计算宜采用逐步正装法求解施工初始状态，对于存在几何非线性的情况宜采用迭代法求解。（对应规范 5.3.1）

4.3.2 合理的迭代初始值可通过无应力状态法或倒拆法进行确定，以提高迭代计算的收敛速度为准。（对应规范 5.3.2）

4.3.3 施工初始状态计算可采用杆系有限元模型，应考虑结构的非线性效应。（对应规范 5.3.3）

4.3.4 应采用不同分析软件或模型对施工初始状态参数进行计算，并应相互校核。（对应规范 5.3.4）

(说明：桥梁施工初始状态是与成桥状态息息相关的量，因此施工监控中确定合理的施工初始状态至关重要。对于非线性效应不明显的结构可通过无应力状态法或倒拆法确定施工初始状态，再由正装法检验该初始状态的合理性，一般一次正装即可收敛。但是对于非线性效应明显的结构，如大跨钢箱梁的几何非线性效应，其往往需要通过多次正装迭代方可收敛，这时采用倒拆法或无应力状态法确定的施工初始状态往往可以提高正装迭代的收敛速度，减少计算时间。)

施工初始状态计算一般采用杆系模型即可获得满足工程精度要求计算结果。但对于结构空间效应明显的，杆系模型必须考虑其空间效应，如对于剪力滞效应，需要考虑截面顶（底）板的有效宽度。)

4.4 参数敏感性评估（对应规范 5.4）

4.4.1 应对大节段钢箱梁开展参数敏感性评估，以确定影响结构线形和应力状态的主要因素，明确施工过程控制的重点。（对应规范 5.4.1）

4.4.2 根据钢箱梁的结构特点，应选择材料弹模、节段重量、板材厚度、施工临时荷载及墩顶支点的相对高差等设计参数进行结构响应的敏感性评估。（对应规范 5.4.2）

4.4.3 应对风荷载、整体温度变化和截面温度梯度条件下钢箱梁结构的支反力、变形和应力等响应进行敏感性评估。（对应规范 5.4.3）

4.4.4 根据结构设计参数和环境作用的敏感性分析结果，确定施工过程中影响结构线形和应力的关键参数，在施工过程应对这些参数进行识别和控制。（对应规范 5.4.4）

（说明：参数敏感性分析是通过设定设计参数在一定范围内变化，计算桥梁结构的响应情况，如支座反力响应、结构的变形响应、结构的应力响应等，从而确定出桥梁施工过程的敏感因子，根据设计参数敏感程度进一步确定施工监控的主要目标，并在施工过程中进行识别和控制。）

钢结构具有较强的温度敏感性，施工监控应开展结构的温度敏感性分析，确定整体升降温和截面温度梯度变化下结构的响应情况，尤其是支座是否会出现负反力、结构是否会出现不可逆的变形和附加应力等。）

5 施工监测（对应规范第 6 章）

5.1 一般规定（对应规范 6.1）

5.1.1 施工监测还应考虑各监测项目的协调性和同步性，以实现耦合效应的分析。（对应规范 6.1.4）

（说明：大节段钢箱梁施工监测往往涉及到不同测试项目间的关联分析，如温度引起的钢箱梁变形和应力，此时在测试项目设置时即要考虑不同测试项目间的同步性与协调性。）

5.2 几何形态及结构位移测试（对应规范 6.2）

5.2.1 工厂制造阶段测试（对应规范 6.2.1）

5.2.1.1 测试内容

- a) 应测试小节段钢箱梁的顶底板长度、宽度和梁高；
- b) 应测试大节段钢箱梁的顶底板总长、端面倾角和控制点几何状态；
- c) 应监测大节段钢箱梁存梁过程的临时支墩沉降。（对应规范 6.2.1.1）

（说明：对钢箱梁进行工厂的线形观测目的在于通过测试获得梁段的初始几何状态，为后续安装的结构变形分析提供初值；根据几何状态测试数据，可进一步得到指导海上调梁的数据，如制作完成后顶板和底板两个轴线的相对偏位关系，

支座（垫板、螺栓孔）相对梁端的纵、横向间距等数据，这些数据涉及到与桥墩垫石参数的匹配，可用于指导海上调梁。）

5.2.1.2 测试方法

- a) 钢箱梁竖向线形测试宜采用精密水准仪进行测量；
- b) 钢箱梁中线测试宜采用经纬仪或全站仪进行测量；
- c) 大节段钢箱梁梁长测试宜采用全站仪进行测量；
- d) 钢箱梁截面高度、宽度宜采用全站仪或钢卷尺等满足测量精度要求的仪器进行测量；

e) 梁段端面倾角宜采用全站仪进行间接测量。（对应规范 6.2.1.2）

（说明：钢箱梁的几何状态测试方法应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》（GB 50982-2014）的规定。

理论上倾角仪也可用于测试梁段端面倾角，但由于倾角仪安装时无法避免局部的不平整问题，导致测试误差大。因此，本规范推荐采用全站仪测试梁段端面的空间姿态，进而推算端面转动。）

5.2.1.3 测点布置

线形测试截面位置应至少选择组成大节段钢箱梁的每个小节段钢箱梁的两个端面，截面顶底板测点数各不应小于 3 个，测点布置应能反映整个梁段的空

间几何形态。（对应规范 6.2.1.3）

（说明：钢箱梁制造往往经历板单元制造、小节段拼装、大节段组拼的过程，施工监控的结构位移测试应从小节段拼装开始。此时测试截面选择至少应包括小节段的两个端面，每一截面横向测点布置在顶底板上应至少各为 3 个点，测试截面及截面测点可根据实际情况增加，典型测试截面及截面测点布置如图 3 所示：）

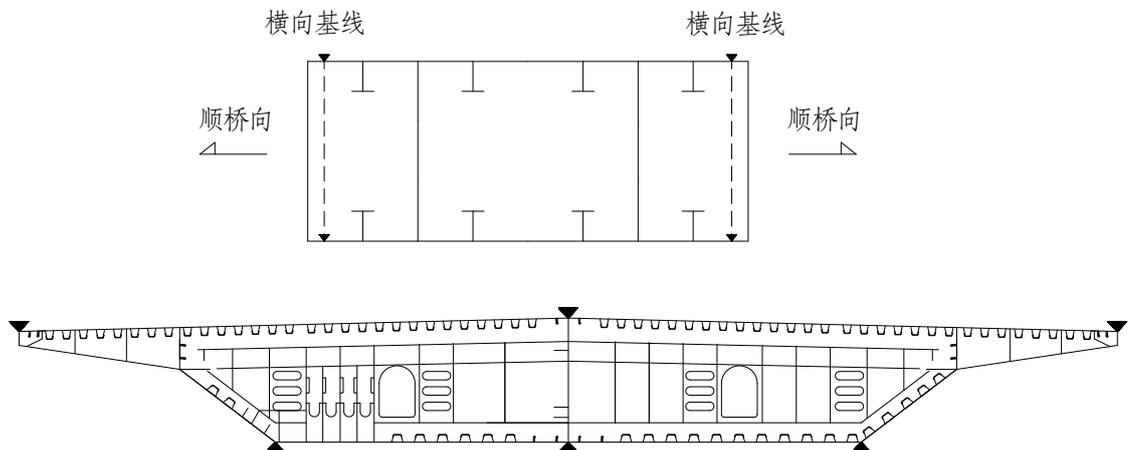


图 3 钢箱梁测试截面及截面测点布置示意图

5.2.1.4 测量工况

小节段钢箱梁制造完成、大节段钢箱梁组拼后下胎前应进行线形测试；大节段钢箱梁存放过程应监测支墩沉降。（对应规范 6.2.1.4）

（说明：工厂制造状态重点是获取钢箱梁的初始几何形态为后续变形分析提供初值，因此宜根据钢箱梁的制造进度适时对中间环节进行测试。如小节段钢箱梁制造完成后可开展节段长、高、宽等的测试，为大节段组拼变形提供初值；大节段钢箱梁组拼完成后下胎前的测试，则是完成最终大节段钢箱梁制造几何状态的测试，为后续结构变形分析提供初始参考状态。）

5.2.2 运输阶段测试

宜采用倾角仪对大节段钢箱梁装船完成后至桥位吊装前的过程进行钢箱梁的空间倾斜状态测试，倾角仪量程应介于测点倾角估计值的 2 倍~3 倍。（对应规范 6.2.2）

（说明：大节段钢箱梁往往采用船运，运输过程难免会受风、浪的影响，为确保运输过程梁段的稳定，保障运输过程梁段受力安全，建议采用倾角仪对梁段的摇摆角度进行测试。）

5.2.3 现场安装阶段测试（对应规范 6.2.3）

5.2.3.1 测试内容

a) 现场安装阶段应测试梁段的竖向位移、轴向偏位、横向扭转以及梁段安装控制点坐标；现场安装状态还应测试梁段的竖向位移和水平偏位随温度的变化情况；

b) 大节段钢箱梁安装前应测试墩顶支座表面高程；

c) 现场安装完成后应测试桥墩沉降。（对应规范 6.2.3.1）

（说明：现场安装状态的线形监测，一方面在于获得安装过程的结构实际变形情况，以便于分析实测变形与理论变形的差值；另一方面在于获得梁段的安装精度，评估梁段的安装误差。）

5.2.3.2 测试方法

a) 钢箱梁竖向线形（高程）测试宜采用水准仪进行测量；

b) 中线测试宜采用经纬仪或全站仪进行测量；

- c) 梁段端面倾角宜采用全站仪进行间接测量；
- d) 桥墩沉降宜采用全站仪进行测量。（对应规范 6.2.3.2）

（说明：对于同样的测试项目，现场安装阶段的测试方法与工厂制造阶段测试方法一致。）

5.2.3.3 测点布置

a) 现场安装阶段变形测试截面宜与工厂制造阶段一致，对于工厂制造阶段每个小节段有两个测试截面的，在现场安装阶段可减少至一个截面，截面测点数不应小于 3 个；

b) 现场安装时控制点坐标宜选择在墩顶对应的梁段顶板或底板上；

c) 桥墩沉降观测点可布置于承台或墩顶等视线良好的位置。（对应规范 6.2.3.3）

（说明：钢箱梁安装状态的测试截面和测点宜与制造状态一致，减少测点不一致引起的误差，便于更精确的分析结构变形。梁段制造状态的监测目的在于控制结构的制造精度，因此测点宜密；安装状态的监测目的在于控制安装精度和测试结构的变形。前者要求对梁段制造过程进行精确定位；后者只要能反映整孔梁的变形即可，因此安装状态的测试截面和测点可适当减少。）

5.2.3.4 测量工况

a) 每个大节段钢箱梁架设后、现场环缝焊接前后、主梁就位完成后或其他体系转换后、桥面铺装后，应进行线形测试；

b) 气候变化显著条件下应按 6.4 节的要求做钢箱梁线形随温度的连续变化监测。（对应规范 6.2.3.4）

（说明：现场安装状态的测试目的在于获取结构的实际变形和安装精度控制。前者要求对每个大节段架设前后即结构体系改变时均进行线形测试，掌握桥梁结构施工过程的变形情况；大节段对接环缝一旦焊接，则逐渐逼近成桥结构状态，对于连续梁桥结构意味着其线形状态定型，因此，环缝焊接时的线形测试目的在于确保环缝焊接后线形处于理想状态。对于后者——结构安装精度的控制，主要通过控制点的测控来保证。此外，大节段钢箱梁由于受温度影响大，施工过程中应进行温度引起的结构变形观测，在每个季节宜选择极端气温条件下进行连续的变形监测，以获取结构实际变形随梁体温度的变化情况。）

5.3 应力状态测试（对应规范 6.3）

5.3.1 工厂制造阶段测试（对应规范 6.3.1）

5.3.1.1 测试方法

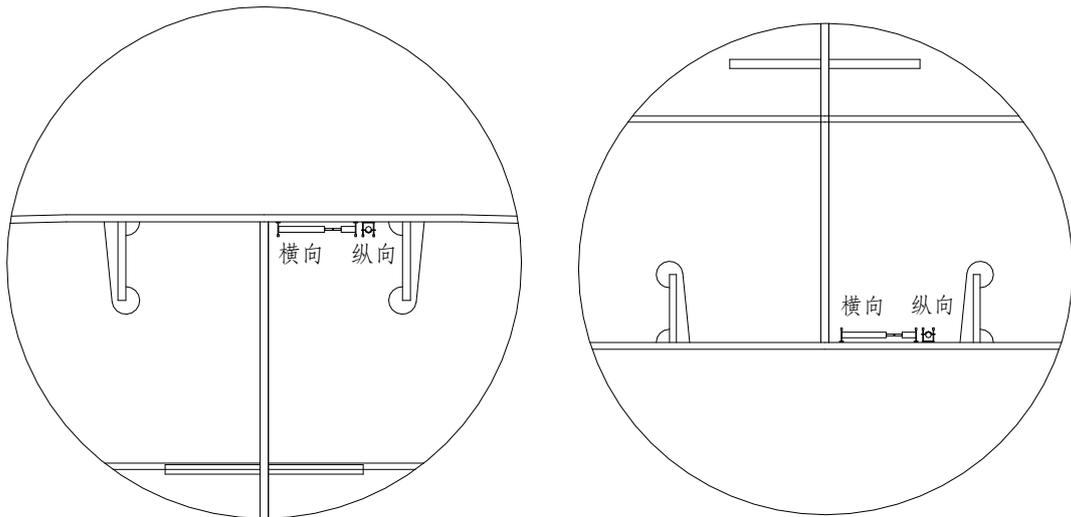
- a) 应力测试可采用应力计或其它应变传感器；
- b) 存梁过程的支墩反力监测可采用应力计或压力传感器。（对应规范 6.3.1.2）

（说明：工厂结构或临时设施的应力测试可分为长时和短时测试。短时间测试可用应变传感器，长时间测试优选应力计。）

5.3.1.2 测点布置

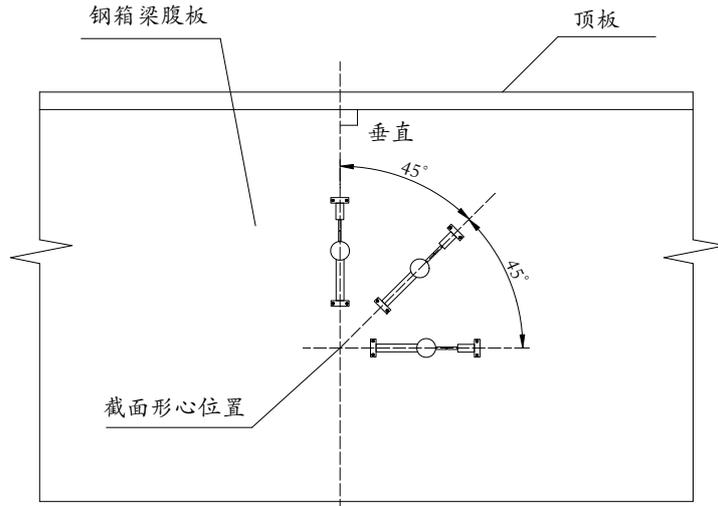
- a) 大节段钢箱梁沿纵桥向应力测试截面的选择应根据施工监控计算结果，选择受力较大的截面；
- b) 截面测点布置应遵循对称性，以起到对称点相互校核的作用；
- c) 每个截面测点宜不少于 2 个；
- d) 对于受力复杂的局部区域宜布设应变花。（对应规范 6.3.1.3）

（说明：钢箱梁应力监测截面应根据监控计算确定的结构典型受力位置，对于各个应力监测截面上的应力监测测点宜布置在顶板、底板和腹板位置，其中顶底板宜对纵桥向和横桥向应力进行监测；对吊点截面的腹板宜在截面形心位置上布设应变花对主应力进行监测，应力测点布置示意如图 4 所示：）



(a) 顶板传感器布置示意图

(b) 底板传感器布置示意图



(c) 腹板传感器布置示意图

图 4 钢箱梁截面传感器布置示意图

对于图 4 (c) 中 45° 应变花在主应力方向未知的平面应力状态下, 应力计算公式为:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \right) \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 ——测点主应力;

τ_{\max} ——测点剪应力;

φ_0 ——主应力方向角;

E ——结构材料弹性模量;

ν ——材料的泊松比;

ε_0 —— 0° 角方向测点实测应变值;

ε_{45} —— 45° 角方向测点实测应变值;

ε_{90} —— 90° 角方向测点实测应变值。

5.3.2 现场安装阶段测试（对应规范 6.3.3）

5.3.2.1 测试内容

- a) 大节段钢箱梁吊装过程和成桥状态下受力不利的截面应进行应力监测；
- b) 大节段钢箱梁吊装过程应开展实时应力监测；吊装就位后直至成桥状态应继续开展应力测试，此时可采用准静态测试；
- c) 大节段钢箱梁吊装过程应对吊具进行实时应力监测；
- d) 桥梁结构应力测试的同时应同步开展温度测试以实现温度补偿。（对应规范 6.3.3.1）

（说明：桥梁结构应力测试的典型受力断面主要指：结构的特征位置构件、施工过程中受力变化大的部位、反映结构受力特性的关键位置以及受力复杂的局部位置，这些部位的选取应结合施工监控计算结果综合确定。

桥梁施工过程中，对于结构应力变化较突然宜采用实时监测，如监测吊装施工过程的钢箱梁受力和吊具受力；应力监测应采用准静态测试方法，即采样频率不宜低于 1Hz。

在进行应力监测时，不可避免的会受温度变化的影响，因此需同步测试测点处的温度，以便于温度补偿。）

5.3.2.2 测试方法

应力测试宜采用抗干扰能力强、精度高、方便使用的应力计或其他应变式传感器、光栅光纤传感器，应采用无线传输方式。（对应规范 6.3.3.2）

（说明：桥梁结构应力测试用的仪器较多，应综合考虑监测对象并兼顾测试成本选用监测传感器。）

5.3.2.3 测点布置

- a) 截面测点布置应按对称布置；
- b) 每个截面测点宜不少于 4 个；
- c) 对于受力复杂的局部区域宜布设应变花。（对应规范 6.3.3.3）

（说明：桥梁结构应力是结构局部强度的表征，是微观上的量值，鉴于目前的测试技术，应力的测试精度较挠度测试精度低。为保证应力测试的可靠性，在截面对称位置布设测点，一方面可起到相互校核的作用；另一方面可以防止一个测点失效导致测试区域数据丢失的情况。

截面测点最少数目的要求是为了提高应力测试的可靠性。

对于复杂区域的受力，应沿主应力方向布置应变花。)

5.3.2.4 测量工况

- a) 钢箱梁吊装过程应进行应力测试；
- b) 每个大节段钢箱梁架设前后应对已架设的大节段钢箱梁进行应力测试；
- c) 气候变化显著条件下应按 6.4 节的要求进行应力随温度的连续变化监测。

(对应规范 6.3.3.4)

(说明：桥梁结构应力测试工况的划分主要以结构受力发生变化为依据。为了评估结构的绝对受力，需要采集结构刚成型未受力前的初始内力值。对于连续结构，后续梁段安装对已安装梁段有影响，因此，连续梁大节段钢箱梁安装过程宜对已安装梁段进行应力测试。

在日照和季节温差下会引起钢箱梁受力变化，因此需在施工过程中对桥梁结构进行温度应力观测，评估结构应力的温度效应。)

5.3.2.5 测试结果记录及数据分析

a) 对于采用人工进行应力测试的，应制定记录表格，表格上应填写测试时间和温度、测试人员、测试条件、测试对象属性等信息；

b) 应力测试数据应进行规律性分析排除因测试导致的数据错误；

c) 对于吊装过程的应力监测应及时对比实测数据与预警值。(对应规范 6.3.3.5)

(说明：桥梁结构应力测试目前采用自动化采集系统与人工测试并举，虽然自动化采集系统记录的信息相对较全，但对于人工测试还是有必要制定专门的记录表格，以实现规范化作业。)

5.4 温度场及温度效应测试 (对应规范 6.4)

5.4.1 测试内容

在现场安装阶段须对钢箱梁进行截面温度场测试和气候变化显著条件下的温度效应测试，即结构应力和变形随温度的变化情况。

5.4.2 测试方法

温度传感器宜选择测试范围大、精度高、线性化及稳定性好的传感器。

5.4.3 测点布置

a) 温度场测点应能反映截面温度沿梁高和梁宽方向的变化情况，测点宜覆盖整个结构区域，即截面的上下左右位置均需布置温度测点；

b) 截面温度测点宜布置在温度梯度变化较大的位置，测点宜对称、均匀布置，对于桥梁结构来说，靠近顶板区域温度梯度变化较大，测点宜加密布置；

c) 温度测点也可根据温度场模拟结果确定。

5.4.4 测试工况

夏季极高温和冬季极低温条件下，应连续 24~72 小时测试截面温度场分布，采集时间间隔宜不大于 1 次/30 分钟；温度测试的同时，观测关键点应力和变形。

(对应规范 6.4.4)

(说明：工程实践表明钢箱梁受日照和季节温差引起的受力和变形较显著，为评估施工过程中温度引起的结构受力和变形效应，需对钢箱梁进行温度监测。由于截面温度分布沿梁高和梁宽呈空间分布，因此在进行截面温度场测试时，温度测点需涵盖箱梁轮廓；尤其是顶板附近区域，往往直接承受日照，温度梯度变化大，这个区域的温度测点应加密布置。对于海洋条件下，常常出现天气骤变，引发箱梁截面温度场的显著变化，因此，温度采集频率不宜太低。)

5.5 基本物理参数测试 (对应规范 6.5)

5.5.1 施工监控过程中监控单位应对材料弹模、钢箱梁节段重量、板材厚度及施工临时荷载等设计参数进行测试或搜集。(对应规范 6.5.1)

(说明：材料弹模、钢箱梁节段重量、板材厚度及施工临时荷载等参数是参数敏感性分析的主要内容，施工过程中主要由施工单位对上述参数进行测试，监控单位应及时向施工单位搜集这些参数的实测结果，用以评估模型计算误差并及时给出纠偏建议。

其中，自重误差是引起钢箱梁施工监控计算的主要误差之一，自重误差除了来自于钢板厚度偏差外，焊缝重量也是导致出现自重误差的原因。钢箱梁工厂制造时在小节段制造完毕后应进行称重，此时称重可操作性强，称重精度较高。小节段称重宜采用高精度的压力传感器进行间接测量，传感器在全温度范围内的测试精度宜为 0.1~1FS%。)

5.6 环境条件测试 (对应规范 6.6)

5.6.1 施工监控前期进行资料搜集时应向相关单位搜集桥址处的风速风向、温湿

度等环境状态参数；现场安装阶段宜对这些环境状态参数进行测试，同时观测海浪情况。（对应规范 6.6.1）

5.6.2 风速仪量程应大于桥址处百年一遇大风的风速。（对应规范 6.6.2）

5.6.3 风速仪应安装在桥梁结构绕流影响区域之外，风速仪采样频率宜不低于 10Hz。（对应规范 6.6.3）

5.6.4 环境温度监测采集时间间隔宜不大于 1 次/30 分钟。（对应规范 6.6.4）

（说明：环境状态主要指桥址处的风速风向和环境温湿度，这些参数在施工监控前期工作中应向设计单位或其他单位搜集。风速、风向与风荷载的取值相关，宜就地采集；环境温湿度与评估结构的温度输入和耐久性有关，因此也宜监测；对于跨海桥梁还宜监测海水盐度，以供结构耐久性评估。）

5.7 测试仪器精度（对应规范 6.7）

5.7.1 大节段钢箱梁结构几何状态、应力状态、温度场和桥址气象监测所采用的测试仪器指标宜不低于表 1 的要求。（对应规范 6.7.1）

表 1 大节段钢箱梁施工监测所采用的测试仪器指标

测试项目	仪器名称	仪器最低指标要求
几何状态及位移监测	水准仪	测试精度 $\leq 1\text{mm/km}$
	全站仪	侧角精度 $\leq 1''$ ，测距精度 $\leq 2\text{mm}+2\text{ppm}$
	倾角仪	测试精度 $\leq 0.1 \times (\text{侧角估计值})$ ，量程为 2~3 倍监测估计值
应力状态监测	应力传感器	分辨率 $\leq 1 \mu\epsilon$
温度监测	温度传感器	测试精度 $\leq 0.5^\circ\text{C}$
气象监测	风速风向仪	风速 $\leq 0.1\text{m/s}$ ，风向 $\leq 3^\circ$
	湿度传感器	测试精度 $\leq 2\%\text{RH}$ ，测试范围为 12%RH~99%RH

（说明：参照《建筑与桥梁结构监测技术规范》（GB 50982）的相关规定，提出了大节段钢箱梁施工监测中采用的仪器精度要求。）

6 误差分析与控制（对应规范第 7 章）

6.1 一般规定（对应规范 7.1）

6.1.1 应根据设计文件要求及相关技术规范确定误差控制标准，即误差的控制指标和指标的取值。（对应规范 7.1.1）

（说明：桥梁设计图纸一般会明确结构施工过程的误差标准，因此施工监控

应首先根据设计要求进行误差控制。对于设计未明确误差要求的，施工监控的容许误差一般按《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80)和《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的相关规定执行。此外，对于业主提出的高于设计和上述两个规范的要求，或上述两个规范并未涉及而监控中需要明确的内容，建议由业主单位、设计单位、监控单位、监理单位和施工单位在工程实施前共同拟定。

施工误差分析应给出相应结论，结论包括：当前误差情况、当前误差对后续桥梁施工的影响、是否需要预警及是否需要采取调整措施和措施建议。))

6.1.2 对于钢箱梁几何线形误差应按照“整体线形流畅平顺、逐步过渡”的原则进行控制。(对应规范 7.1.4)

(说明：对于大节段钢箱梁几何线形误差，本规范提出采用“整体线形光滑平顺、逐步过渡”的原则，其本质是针对还未制造的大节段钢箱梁，考虑与已安装钢箱梁连接时对连接环缝附近的节段钢箱梁采用多段曲线进行线形过渡，多段曲线可采用抛物线、样条曲线或多次曲线等。)

6.2 误差分析 (对应规范 7.2)

6.2.1 钢箱梁施工监控中应针对：设计参数误差、计算方法误差和测试误差等主要误差类型进行分析。(对应规范 7.2.1)

(说明：施工误差类型一般可以归纳为三类：设计层面的误差、监控计算方法误差以及测试误差。设计层面主要是设计参数误差，如设计采用的材料弹模、节段重量、板材厚度及施工临时荷载与现场实际取值存在不一致，从而导致实测值与预测值存在偏差；计算方法误差主要是采用的计算模型未准确考虑各类型因素影响，导致计算结果不能准确反映实际的结构力学行为，从而引起误差；测试误差主要是测量采用的仪器失准或由于测量人员数据处理错误导致测试数据出现偏差。每种误差类型又是由多方面导致的，在进行误差分析时，需要结合实际情况逐条分析。此外，实际施工中出现的安装几何偏差、临时支撑边界安装偏差、实际施工工序与既定工序不符等，也会导致实际施工情况与预测情况出现偏离，从而引起误差，在进行误差分析时还应对施工情况进行调研。)

6.2.2 误差分析宜首先进行计算方法误差分析，综合评估各种效应后确保计算方法准确；其次进行测试误差分析，排除因测试问题导致出现的偏差；再者进行施工工况调查，评估可能出现的施工偏差带来的影响；最后进行设计参数误差分析。

(对应规范 7.2.2)

6.2.3 对于设计参数误差,在施工监控中宜采用现场直接量测,如钢箱梁尺寸通过测量识别、节段重量通过称重识别;若现场不具备量测条件,可根据结构响应的预测误差,采用参数识别的方法。(对应规范 7.2.3)

6.2.4 对于计算方法误差分析,应采用多种计算方法、综合考虑各种效应影响,进行评估。(对应规范 7.2.4)

6.2.5 对于测试误差分析,应通过不同测试人员和仪器设备独立测试、多次取平均值来校核。(对应规范 7.2.5)

(说明:误差分析的原始素材应全面、真实、可靠,因此除了第 5 章监控测试要求测试的基本数据(几何状态数据、应力状态数据、温度数据、环境参数和节段重量)外,还应搜集施工过程中其它可能导致显著误差的信息,这些信息主要有:施工临时荷载大小及堆放情况、施工过程中结构临时支撑边界的设置情况、实际施工工艺和工序等。

施工误差分析总体来说包括三个方面:定性分析、定量分析和误差原因分析。定性分析是基础、是宏观层面的把控,完成定性分析后可进一步开展定量分析和误差原因分析。定量分析需要结合施工监控计算,对比理论计算值与实测值的差别,给出误差的具体值。完成定量分析后,最终需要就产生误差的原因进行分析,通过采用自适应控制方法找出产生误差的原因。)

6.3 误差控制(对应规范 7.3)

6.3.1 施工监控误差控制首先应评估误差影响,判断误差是影响结构安全还是影响结构的线形状态或是均有影响。误差处理原则应符合本规范 7.1.4 和 7.1.5 节的要求。(对应规范 7.3.1)

6.3.2 对结构安全有影响的误差,需进行安全富余度评估,对于仅是增大了结构受力但仍满足受力要求的可通过优化施工工序确保成桥状态应力储备;对于是结构受力已不能满足要求,则需要增加安全防护措施。(对应规范 7.3.2)

6.3.3 对钢箱梁线形有影响的误差,需进一步区分影响范围,对于影响小节段环缝连接,在满足焊缝宽度要求的前提下考虑采用焊缝宽度调节;对于影响整个大节段,考虑对制造线形参数进行修正。(对应规范 7.3.3)

(说明:桥梁施工过程自适应的控制方法工作流程为:施工→量测→参数识

别→分析→修正→预告→施工,通过该循环过程,逐渐实现实测值与预测值一致,控制结构的实际响应沿理论预测轨迹发展。

大节段钢箱梁一旦制造成型,其误差调整手段较少,甚至无法调整,仅能对未加工的梁段进行调整。因此,对钢箱梁强调严格的施工过程控制,从小节段钢箱梁制造即开始进行控制。首先,在监控计算方面应评估计算方法误差,即:采用高精度的计算单元充分评估结构的空间效应和非线性效应,尽量减少计算方法引起的误差;其次,测试时采用性能可靠的仪器设备和操作娴熟的测量人员,保证测试数据可靠;再者,现场安装需按既定施工工艺和工序,严格把控施工环节;此外还应控制施工临时荷载的堆放,严格控制施工时的温度作业窗口,避免温差引起的误差。)

7 工厂制造阶段控制 (规范第 8 章)

7.1 一般规定 (对应规范 8.1)

7.1.1 工厂制造时,大节段钢箱梁从下料到大节段发运的过程应进行控制。(对应规范 8.1.1)

7.1.2 工厂制造阶段应按施工监控误差标准,通过施工监控计算和制造过程的线形测控,实现对桥梁纵断面、横断面和平面线形的控制。(对应规范 8.1.2)

7.1.3 工厂制造阶段应对小节段钢箱梁和大节段钢箱梁安放时最不利受力的支撑部位和转运吊装时最不利受力的吊点等局部应力进行控制。(对应规范 8.1.3)

7.1.4 工厂制造阶段应对梁段重量进行测量。(对应规范 8.1.4)

7.1.5 工厂制造阶段应进行大节段钢箱梁和小节段钢箱梁组拼长度的温度控制,温度效应控制符合本规范第 11.2 节关于工厂制造温度效应控制的要求。(对应规范 8.1.5)

(说明:大节段钢箱梁线形控制的源头在工厂制造。工厂制造阶段应对大节段钢箱梁顶底板长度、竖向线形、横坡线形以及端面倾角进行控制,这些内容组成了工厂线形控制的基本方面,对这些内容要求在工厂制造阶段严格按照监控指令的要求,确保加工精度。

钢箱梁的设计预拱度包括沿桥纵断面的预拱度和沿桥横断面的预拱度。预拱度的计算需要充分考虑桥梁施工工序和结构自重、二期恒载、施工临时荷载等荷

载因素的影响。对于宽幅箱梁或设有大悬臂的箱梁需考虑设置横向预拱度；对于大节段钢箱梁现场连接断面，由于同一截面设置多道腹板，加上架梁过程中可能存在通过牛腿临时连接的情况，断面两侧牛腿支点分别会出现压力和拉力，从而导致环缝截面变形不匹配，该问题需提前考虑，并通过设置横向预拱度予以解决。横向预拱度属于钢箱梁的局部变形，单梁模型无法反映钢梁的横向变形情况，需要采用板壳或实体模型计算。

计算得到的预拱度值并不能直接指导钢梁加工，钢梁加工过程往往采用以直代曲工艺，因此在小节段连接端面必然存在一个夹角，该夹角顶点为截面中性轴，沿梁高方向至顶板和底板，由此钢梁顶底板下料时需要予以配切或补偿，几何计算时需计算出每个小节段顶板和底部的配切或补偿量（腹板顶缘至底缘宽度进行线性插值）。

钢梁受力后发生变形，经典梁理论假设梁段中性轴位置既不伸长也不缩短，但是在顶底板位置却会发生伸长或缩短。由于底板连接支座、顶板连接伸缩缝，因此顶底板的伸缩变形会对支座安装和伸缩缝安装造成一定影响，在梁段顶底板长度计算中需考虑该影响因素。

无应力下料参数计算由监控单位组织实施，最终以监控指令的形式下达给制造单位；加工精度控制主要依靠制造单位，监理进行制造中间环节的检查。其中制造单位的测试具有控制性质，需保证钢箱梁制造精度满足监控指令的要求；监理单位的测试属于检查性质，测试目的在于检查制造单位的加工精度，尤其是无应力制造线形是否符合施工监控指令的要求；除此以外，监控单位的测试在于获得钢梁的初始制造状态信息，为后续梁段的变形分析提供初始参考值。

应力控制主要指钢梁存放及转运过程局部应力的控制，避免出现局部屈曲变形。

钢箱梁制造时的温度与设计基准温度不一致，由此会导致板单元长度变化，在掌握梁厂温度数据后，根据与设计基准温度的差别对梁段长度进行温度效应修正。）

7.2 桥梁线形控制（对应规范 8.2）

7.2.1 大节段钢箱梁工厂制造时无应力状态下的纵断面线形应考虑为：设计成桥线形-安装过程结构累计变形+成桥预拱度。（对应规范 8.2.1）

(说明:为抵消安装过程的钢箱梁累计变形,设置的预拱度须与之相反,因此其前面是负号;成桥预拱度一般根据设计要求确定,设计未做要求时,可根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64),将成桥预拱度取为1/2车道荷载频遇值引起的向下挠度的反号。)

7.3 预留连接件位置控制(对应规范 8.3)

7.3.1 大节段钢箱梁设置的与其它构件相连接的预留预埋部件,如设计支座垫板,应综合考虑制造精度和相应构件安装精度,并按要求高的标准执行。(对应规范 8.3.1)

7.3.2 对于上部结构(钢结构)连接件加工或安装晚于下部构造(桥墩或垫石)预留连接件施工的,在钢箱梁预埋件安装时应根据下部结构的施工误差做适当调整。(对应规范 8.3.2)

7.3.3 需考虑各种作用下结构受力引起的大节段钢箱梁变形对预埋件安装位置的影响。(对应规范 8.3.3)

(说明:桥梁上部结构与下部结构施工存在先后顺序,对于先施工的结构其误差也已产生,后期施工的结构宜根据已发生的误差情况做相应的调整,最终保证上下部结构的顺利连接。

结构受力引起大节段钢箱梁变形,从而对预埋件安装位置产生影响,如沿纵桥向设计支座垫板距离在无应力状态下与成桥状态下是不一样的,在工厂安装时需考虑该影响因素。

温度会对大节段钢箱梁预埋件(支座垫板)位置产生显著影响,关于温度的影响在本规范第11章进行规定。)

7.4 制造误差控制(对应规范 8.4)

7.4.1 工厂制造阶段线形制造误差和节段重量误差的大小应进行评估。(对应规范 8.4.1)

7.4.2 对于制造线形误差应评估是由于下料、组拼施工或是其它原因导致,进而采取控制措施。(对应规范 8.4.2)

7.4.3 工厂制造阶段线形误差控制宜按以下原则进行:(对应规范 8.4.3)

- a) 板单元下料误差应在小节段拼装前通过矫正或切割予以消除;
- b) 小节段钢箱梁拼装过程中出现的误差应在大节段钢箱梁组拼过程中予

以消除；大节段钢箱梁组拼过程中应逐节段组拼控制，在大节段钢箱梁环缝焊接前消除累计误差；

c) 对于无法通过焊缝宽度调整的误差，需进行板材切割，具体的切割量应考虑对预留件位置的影响；

d) 对于制造场地地基条件差引起的钢箱梁线形误差，应通过改善制造场地基础条件，如对地基采用地面硬化、扩大基础、桩基等加固措施处理；对于施工工艺等引起的误差，应通过优化施工工艺、调整焊接参数来解决。

7.4.4 小节段钢箱梁制造完成应及时进行称重，根据称重数据评估是否需要制造线形进行调整。（对应规范 8.4.4）

（说明：制造线形数据分析的主要目的是检查实际钢箱梁线形与监控指令和设计图纸要求线形的吻合程度。监控指令一般给出的是与钢箱梁变形相关的线形数据，如考虑钢箱梁沿纵桥向和横桥向预拱度的线形，而对于梁高、梁宽及对角线距离等数据仍按设计图纸给出的参数进行钢梁加工制造。

对于工厂制造阶段线形误差首先应查明误差原因，然后再采取相应处理措施。对于制造中的线形误差原因及处理措施可参照下表：

序号	误差原因	处理措施
1	板单元下料误差	板单元矫正或在小节段拼装过程中调整
2	小节段钢箱梁拼装误差	单个小节段钢箱梁出现误差或误差影响不大时可在大节段钢箱梁组拼环节进行调整；若是大规模出现小节段钢箱梁拼装误差应进行施工工艺优化
3	大节段钢箱梁组拼误差	逐段环缝连接中予以消除
4	场地基础沉降	改善地基条件
5	焊接工艺	优化焊接工艺

钢梁制造中监控单位需对板材厚度测试数据和实际焊缝宽度数据进行搜集，以评估对梁段重量的影响。）

7.5 工厂施工局部受力控制（对应规范 8.5）

7.5.1 工厂制造阶段，小节段和大节段钢箱梁可能出现的局部受力工况包括：组拼、转运、存放等过程设置临时支撑或吊点时，应进行局部应力与稳定控制。（对应规范 8.5.1）

7.5.2 局部应力状态验算按本规范第 5.2 节要求进行，同时按本规范第 6.3.1 节要求进行局部应力状态测试。（对应规范 8.5.2）

7.5.3 大节段钢箱梁工厂转运及工厂起吊或滚装过程宜对不利工况进行实时应力监测，测试方法应符合本规范第 6.3.1 节的要求。（对应规范 8.5.3）

7.5.4 工厂制造阶段对影响大节段钢箱梁线形和内力的大型临时结构应进行受力验算，并对大型临时结构使用过程的最大受力区域进行应力状态监测，计算方法应符合本规范第 5 章的要求，测试方法应符合本规范第 6.3.1 节的要求。（对应规范 8.5.4）

7.5.5 工厂制造阶段大节段钢箱梁存梁的临时支墩沉降宜进行监测，测试方法应符合本规范第 6.2.1 节的要求。（对应规范 8.5.5）

7.5.6 工厂制造阶段大节段钢箱梁存梁过程应进行临时支墩的支反力监测，测试方法应符合本规范第 6.3.1 节的要求。（对应规范 8.5.6）

（说明：工厂制造阶段出现的小节段和大节段钢箱梁组拼、存放、节段吊装中需要设置临时支撑和吊点，而临时支撑和吊点位置往往在非设计支座区域或吊点区域，导致钢梁出现局部承受集中荷载的情况。此时应采用精细模型对钢梁的局部受力进行验算，确保临时支撑方案可行。此外，为进一步确保钢箱梁制造阶段受力安全，应对局部受力较大区域（钢箱梁设置临时支撑的区域）进行应力监测，确保实际受力处于安全状态。

钢箱梁在工厂转运或起吊（滚装）过程，结构由静止状态变化为运动状态，此过程宜对不利工况进行结构实时应力监测，实时掌握梁段的应力状态，确保结构受力安全。

钢箱梁工厂制造阶段采用的大型临时结构应进行受力验算，确保临时结构设计合理。同理，在大型临时结构使用过程中应对其最大受力区域实施应力监测，实时掌握临时结构使用过程中的最大应力状态，进一步确保大型临时结构受力安全。）

8 运输阶段控制（规范第 9 章）

8.1 桥梁结构状态控制（对应规范 9.2）

8.1.1 运输过程钢箱梁局部受力应进行验算，计算方法应符合本规范第 4 章的要求。（对应规范 9.2.1）

8.2.2 运输过程钢箱梁局部最不利受力区域宜进行应力监测，监测方法应符合本

规范第 6.3.2 章的要求。(对应规范 9.2.2)

8.2.3 运输过程宜采用倾角仪对大节段钢箱梁的空间摇摆角度进行测试,并控制其摆动幅值。(对应规范 9.2.3)

8.2.4 钢箱梁运输过程测试的应力数据和倾角数据应实时分析,并与预警阈值进行对比,出现超预警值时应暂缓货物运输车(船)移动,查明原因。(对应规范 9.2.4)

(说明:大节段钢箱梁运输过程中往往需要设置临时支撑,而临时支撑设置位置与设计支座位置又不重合,因此导致桥梁结构出现非支撑位置承受较大集中力的情况,这时需要对钢箱梁的局部受力进行检算,并给出应力预警阈值。

大节段钢箱梁运输过程中会受到风荷载和波浪荷载的作用。其中波浪荷载是间接作用,其通过作用于船舶,引起船舶摇晃进而引起船上运载的结构物承受动力荷载。因此需要对钢箱梁进行运输过程的局部受力监测和摇摆角度监测,确保运输过程桥梁结构安全。

钢箱梁运输过程中,其结构已成型,而运输过程是要严格控制结构受力始终处于弹性状态,此时结构不会发生不可恢复的变形。因此,运输过程可不进行线形监测。)

9 现场安装阶段控制(对应规范第 10 章)

9.1 一般规定(对应规范 10.1)

9.1.1 现场安装时应对大节段钢箱梁应力和变形、吊装系统应力及合龙段安装应进行全面控制。(对应规范 10.1.2)

(说明:大节段钢箱梁现场安装阶段是其应力和变形发生变化的最显著阶段,此过程是施工监控的重点。首先应按设计文件和相关规范进行施工控制的标准取值,对于设计文件和规范未明确的,在施工监控前期应提出施工控制的预警阈值,预警阈值可按以下原则进行设定:

1) 黄色预警(三级):对大节段钢箱梁进行施工过程模拟分析,取各荷载的标准组合得到的理论值作为三级预警阈值,当实测值超过理论计算值时启动三级预警;

2) 橙色预警 (二级): 对大节段钢箱梁进行施工过程中及使用状态下的结构分析, 取各荷载频域组合下的包络值作为二级预警阈值, 当实测值超过该理论计算值时启动二级预警;

3) 红色预警 (一级): 以材料的强度设计值作为一级预警阈值, 当实测值超过该值时启动一级预警。

监控单位启动各级预警后, 应第一时间通告施工单位, 施工单位应迅速采取相应的应急响应措施。)

9.2 安装实施条件控制 (对应规范 10.2)

9.2.1 钢箱梁现场吊装应避开雨 (雪) 天、在 6 级风以下、无雾天气且浪高不超过浮吊安全作业水位要求。(对应规范 10.2.1)

(说明: 桥址处的环境参数对桥梁施工具有显著影响。这些参数主要有风速风向、浪高及温度条件等, 风荷载是引起施工过程中桥梁结构振动的主要外部激励, 尤其是跨海桥梁, 海上风大, 风荷载影响更加显著。海浪主要影响吊装施工, 浪高过大不宜进行水上施工, 浪高限值与施工船舶性能有关, 吨位越大的船抗浪性能越强, 港珠澳大桥大节段钢箱梁海上吊装最大浮吊吨位为 4000 吨, 允许浪高小于 0.8m 条件下开展钢箱梁吊装作业。)

9.2.2 钢箱梁调梁及环缝连接应在无日照环境条件下进行。(对应规范 10.2.2)

(说明: 钢箱梁截面温度梯度对其施工过程线形和内力均有影响, 对大节段钢箱梁应重点控制其温度效应; 港珠澳大桥大节段钢箱梁调梁及环缝焊接均在无日照条件下 (主要集中在夜间 10 点~凌晨 6 点作业) 进行, 此时梁体顶底板温差一般不超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 可获得良好的钢箱梁线形。)

9.2.3 对于存在合龙段的大节段钢箱梁, 应结合计算和监测结果给出合龙段安装作业窗口和合龙段端口匹配参数。(对应规范 10.2.4)

(说明: 对于存在合龙段的大节段钢箱梁, 应在合龙段安装前对两端合龙口的距离进行测试, 监测合龙口间距离随温度的变化情况, 给出合龙口保持稳定状态时的作业窗口条件; 并结合合龙段吊装后的钢箱梁变形计算结果, 提前给出合龙段配切建议值。)

9.3 吊装系统安全控制 (对应规范 10.3)

9.3.1 需评估吊装设备的起吊能力、变幅范围和起升高度等指标, 确保各指标满

足大节段钢箱梁吊装要求。（对应规范 10.3.1）

9.3.2 大节段钢箱梁吊装采用的吊具应进行整体受力和局部受力分析，分析应给出吊具最不利受力截面位置及典型截面吊装过程的应力包络值，同时给出应力预警阈值，计算方法应符合本规范第 5 章的要求。（对应规范 10.3.2）

9.3.3 大节段钢箱梁吊装过程中应对吊具最不利受力位置进行实时应力监测和数据分析，测试方法应符合本规范第 6.3.3 节的要求，对于出现超预警阈值的情况应立即预警，暂停吊装、查明原因。（对应规范 10.3.3）

（说明：吊具受力安全是保证桥梁结构顺利安装的前提，吊具除了应进行专门的受力计算外，也应在吊装过程中对关键受力位置实施应力监测，并设置应力监测预警值，确保吊具受力安全。）

9.4 大节段钢箱梁吊装安全控制（对应规范 10.4）

9.4.1 应对大节段钢箱梁吊装过程进行整体和局部受力分析，整体分析应给出整个吊装过程大节段钢箱梁的最不利受力截面位置及典型截面安装过程的应力包络值；局部分析应给出吊点区域和临时支撑区域的应力状态。通过分析还应给出应力监测的预警阈值。计算方法应符合本规范第 5 章的要求。（对应规范 10.4.1）

9.4.2 大节段钢箱梁吊装过程应对梁段最不利受力位置，如吊耳区域、临时支撑区域以及跨中截面等位置进行实时应力监测和数据分析，实时应力监测频率在起吊及卸载期间宜每分钟测读一次；在起吊平稳阶段可每 10 分钟测读一次，测试方法应符合本规范第 6.3.3 节的要求。应力监测数据应实时与预警值作对比，对于出现超预警阈值的情况应及时暂停吊装并进行原因分析，必要时需对大节段钢箱梁进行检查。（对应规范 10.4.2）

（说明：大节段钢箱梁吊装过程的结构受力计算与工厂制造阶段的控制计算具有密切的关系，只是工厂制造阶段更加关注结构的无应力制造线形；而现场吊装阶段更关注的是结构的吊装安全，在保证吊装安全的前提下再进行线形控制。保证吊装过程结构受力安全首先需要对该施工过程进行精细的受力分析，既包括整体受力计算，又包括局部受力计算。通过整体受力计算，给出吊装过程结构最不利受力截面位置及典型截面安装过程的应力包络值，该计算结果既对吊装过程结构的安全受力进行评估同时又可给出吊装过程应力监测的预警值。通过局部受

力计算（主要是吊点位置和临时支撑或连接位置）可进一步评估钢箱梁关键部位的受力状态，最终确保结构安全。

现场吊装过程的应力监测应实时与理论预警值作对比，及时发现超出预警值的情况，根据监测数据判断是否需要停止吊装作业，避免结构受力向不利方向进一步发展）

9.5 安装误差分析与状态评估（对应规范 10.5）

9.5.1 每个大节段钢箱梁安装完成后，应对大节段钢箱梁的安装定位进行误差分析，具体需对墩顶位置对应梁段的里程和高程进行分析。（对应规范 10.5.1）

9.5.2 每个大节段钢箱梁安装完成后应对已安装梁段的变形进行误差分析；整联安装完成后应对其进行线形状态评估。（对应规范 10.5.2）

9.5.3 大节段钢箱梁安装后应进行钢箱梁截面温度场与整个结构的温度效应监测，并对温度引起的结构应力与变形进行评估，应力监测方法应满足本规范 6.3.3 节的要求，温度场与温度效应监测应满足本规范 6.4 节的要求。（对应规范 10.5.3）

9.5.4 整联施工完成后应结合应力测试数据对钢箱梁进行应力状态评估，并给出成桥状态结构的应力储备情况。（对应规范 10.5.4）

9.5.5 大节段钢箱梁就位过程应对支座定位进行状态评估，给出支座在垫石上的定位误差和基准温度下的支座偏位情况。（对应规范 10.5.5）

（说明：大节段钢箱梁的安装控制参数指梁段安装时的里程、高程和中线控制，尤其需要控制两个地方：现场环缝连接处和桥墩支座处，前者确保环缝连接质量，后者确保墩梁上下部连接质量。对于桥墩支座处的高程控制，需要考虑架梁后的支座压缩和墩台沉降。

变形与应力数据分析是钢箱梁安装过程需要重点分析的两类数据。具体而言，需要对吊装过程结构的实测应力与理论预测值（安装阶段控制计算给出）进行对比分析，以判明吊装过程结构的安全状态；吊装到位后需要对结构的实测变形与理论预测值（安装阶段控制计算给出）进行对比分析，以评估线形误差情况。

现场安装状态的线形监测，一方面在于获得安装过程的结构实际变形情况，以便于分析实测变形与理论变形的差值；另一方面在于获得钢箱梁的安装精度，评估钢箱梁的安装误差。现场安装阶段钢箱梁将完成主要变形，这个过程发生的

变形情况将影响最终的成桥线形。控制钢箱梁安装过程的变形，使其实际变形最大程度的与理论预测一致，对于确保实现设计成桥状态具有重要意义。

港珠澳大桥的工程实践表明：对于大节段钢箱梁，前期进行精细计算、施工过程中采取有效控制，完全可以避免钢梁现场配切；此外，现场配切对于施工质量控制和安全管理不利；因此，本规范不建议在桥址处进行配切作业，现场安装参数计算时未计入钢梁现场配切量计算，该参数需在工厂下料参数计算中提前考虑。）

10 温度效应控制（对应规范第 11 章）

10.1 工厂制造温度效应控制（对应规范 11.2）

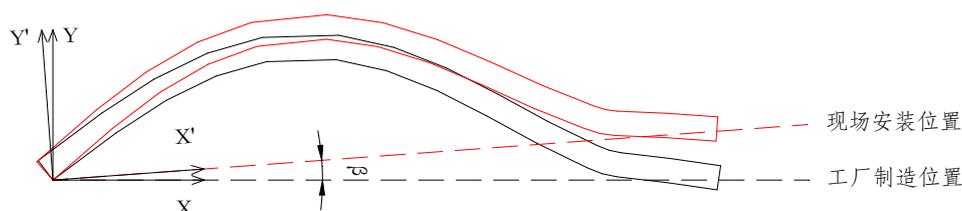
10.1.1 钢箱梁工厂下料时应考虑构件温度与设计基准温度的差异，对构件下料参数进行修正。（对应规范 11.2.1）

10.1.2 钢箱梁工厂制造中应避免直接日晒，以防止制造过程中出现梁体温度场不均匀导致的结构变形和附加内力。（对应规范 11.2.2）

10.1.3 对于存放于露天场地的钢箱梁，应充分考虑温度作用导致的存梁支墩反力变化。（对应规范 11.2.3）

（说明：对于钢箱梁制造过程由于钢板温度与设计基准温度不一致，需要考虑下料修正（正的修正值或负的修正值），该修正值具体计算公式为：下料长度修正 $\Delta L = 1.2 \times 10^{-5} \times (T - T_0) \times (S - S_0)$ 。式中 T 表示梁段调整时的恒定温度值， T_0 为设计基准温度； S 为目标截面的位置， S_0 为各跨梁段基准点位置。

工厂制造过程中钢箱梁摆放的空间位置可能与安装阶段不一致，由此导致二者的基线存在一个夹角（下图中 β ：逆时针旋转为正，顺时针旋转为负），在进行整体竖向线形评估时需考虑该因素的影响，具体做法为：将梁段进行刚体转动至基准线重合后再进行线形评估。如下图所示：



坐标变换计算公式为：

$$\begin{cases} X' = X \cos(\beta) - Y \sin(\beta) \\ Y' = X \sin(\beta) + Y \cos(\beta) \end{cases}$$

钢箱梁制造过程若出现直接日照情况，会导致截面出现不均匀温度场，从而引起温度变形；此时焊接或连接还会出现附加内力，因此制造过程要求钢箱梁不能直接受日照。

一般钢结构制造单位具备厂房制造钢箱梁的条件，但往往不具备厂房存梁的条件，制造好的钢箱梁放置于露天场地。露天存梁，导致结构直接承受日照荷载，从而出现不均匀温度场，导致存梁临时支墩反力变化，某些位置的临时支墩反力增加（如靠近钢梁两端的支墩），可能诱发结构局部屈曲变形。因此，露天存梁需充分考虑温度效应可能引起的钢箱梁局部屈曲问题。）

10.2 现场安装温度效应控制（对应规范 11.3）

10.2.1 应控制大节段钢箱梁吊装后调梁时的温度作业窗口，选择在环境温度稳定以及钢箱梁顶底板温差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内实施。（对应规范 11.3.1）

（说明：海上安装阶段对于吊装作业可不设温度限制条件（在工作人员可接受的温度前提下），但是对精调位阶段需要特别注意温度条件（环境温度和钢箱梁截面温度梯度）。在环境温度高、截面温度梯度大条件下调梁，此时虽可保证墩顶的位置，但是环缝处可能出现顶底板夹角，导致出现顶板已接触、底板还有较宽的缝隙无法焊接；此外，其它位置线形也会发生变化。对于曲梁还可能出现中线扭曲无法调整到位的情况。一般选择在夜间 10 点到凌晨 6 点或无日照的阴天可满足环缝连接的截面温差要求。）

10.2.2 对于桥址现场设置环缝连接的钢箱梁，环缝焊接应在环境温度稳定以及钢箱梁顶底板温差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内实施。（对应规范 11.3.2）

（说明：对于大节段钢箱梁在环境高温和截面温度场存在下进行环缝连接会导致成桥后梁体出现不可恢复的变形和附加内力。这是由于环缝连接前后结构体系发生变化（如从单跨简支变为双跨连续梁），该变化过程若存在温度影响，则在体系转变完成后恢复至设计基准温度条件下，结构的残余变形和附加内力无法消除。）

10.2.3 大节段钢箱梁落梁宜选择在设计基准温度条件下进行，对于落梁时环境温度和梁体温度与设计基准温度状态存在差别的情况，应根据落梁时的环境温度

和梁体温度，计算设置相应的支座预偏量。单个支座预偏量可按下式计算：（对应规范 11.3.3）

$$\Delta = \Delta_t + \Delta_f \quad (1)$$

$$\Delta_t = \alpha \cdot \Delta t \cdot l_i \quad (2)$$

式中：

Δ ——支座预偏量（单位：m）；

Δ_t ——单个支座考虑温度影响设置的预偏量（单位：m）；

α ——材料的热膨胀系数（ $\times 10^{-5}$ ）；

Δt ——梁体温度与设计基准温度的差值（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；

l_i ——安装支座距固定支座的距离（单位：m）；

Δ_f ——抵消后续施工引起支座位移而设置的支座预偏量（单位：m）。

（说明：大节段钢箱梁往往采用先吊装至临时支座，后期再落至设计永久支座的施工工序。因此落梁工况可能出现环境温度和梁体温度与设计基准温度状态不一致的情况。支座上顶板与箱梁底板连接、支座下底板与垫石连接，上顶板随钢梁底板变形而变形、下底板保持位置不变，由此引起支座体发生变形。为了保证在设计成桥基准状态下支座处于正位状态。施工过程中以支座发生作用的那一时刻为准，后续施工直至达到设计成桥基准状态，这一过程支座上顶板的累计变形值的反号即为支座预偏量。

大节段钢箱梁设计永久支座就位工序一般有整联架设完成后落梁、逐孔落梁和隔孔落梁等几种方式，本条文给出了整联架设完成后落梁下的支座预偏量计算公式。对于后两种情况，计算思路是一样的，即仍是考虑温度与结构受力引起的支座变形，但需要考虑临时固定支座位置的变化对支座预偏量的影响。整联大节段钢箱梁一般设有一个固定支座，在整联固定支座所对应梁跨安装前，需要在已安装梁跨的某个支座处设置临时限位，以防止大节段钢箱梁在昼夜温差下产生爬动。因此，大节段钢箱梁支座位置处由于温度引起的位移预偏量计算既要考虑当前工况的梁体温度和温度变形的固定边界位置，又要预测后续工况的梁体温度及其对应的温度变形的固定边界位置，直到固定支座安装形成稳定的温度变形边界。

为提高支座预偏量设置精度，钢箱梁设计支座就位宜选择在梁体温度均匀的条件下进行作业，且整联钢箱梁安装过程应明确临时限位支座的设置位置、临时限位解除时间等。）

11 施工监控信息化（对应规范第 12 章）

11.1 施工监控过程中，监控单位应使用专门的施工监控辅助系统，以提高信息传递速度、降低数据出错概率、积累桥梁信息大数据。（对应规范 12.1）

11.2 施工监控辅助系统应具备这些基本功能：文档管理、数据采集、误差分析、自动预警、结果展示、施工监控指令计算、信息流转控制、专项数据库、系统及用户权限管理等功能。（对应规范 12.2）

11.3 施工监控辅助系统应基于互联网，并有专人负责维护。（对应规范 12.3）

（说明：随着计算机与信息技术的发展，钢箱梁施工监控应利用互联网+的优势，利用线上资源辅助开展施工监控工作。施工监控工作宜开发专门的施工监控辅助系统，实现施工监控云计算和施工监控大数据分析。系统应具备及时向各方反馈施工监控进展、展示施工监控成果、反映施工监控中发现的问题等功能。）