

XXXXX

中国标准文献分类号 XX

# 团体标准

T/CCMS XXX-XXXX

## 大型结构整体安装同步施工结构设计规程

Specification for Structural Design of Integral Installation and  
Synchronous Construction of Large-scale Structures

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国工程机械学会 发布

## 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。

本文件由中国工程机械学会提出并归口。

本文件起草单位:xxxxxxx

本文件主要起草人:xxxxxx

# 目 录

1 总则 .....	1
2 术语 .....	2
3 基本规定 .....	3
4 同步施工荷载与作用 .....	5
5 同步施工总体设计 .....	8
5.1 一般规定 .....	8
5.2 总体设计 .....	9
6 同步提升结构设计 .....	12
6.1 主体结构设计 .....	12
6.2 临时结构设计 .....	14
6.3 机具设备要求 .....	16
6.4 结构计算 .....	19
7 同步滑移结构设计 .....	22
7.1 主体结构设计 .....	22
7.2 临时结构设计 .....	22
7.3 机具设备要求 .....	24
7.4 结构计算 .....	25
8 步履式同步顶推结构设计 .....	26
8.1 主体结构设计 .....	26
8.2 临时结构设计 .....	30
8.3 机具设备要求 .....	34
8.4 结构计算 .....	37
9 质量检验 .....	41
9.1 一般规定 .....	41
9.2 同步提升质量检验 .....	41
9.3 同步滑移质量检验 .....	42
9.4 步履式顶推质量检验 .....	43

# 1 总则

1.0.1 为规范大型结构整体安装同步施工结构的设计、施工与质量检验，做到安全可靠、经济合理、适用耐久、技术先进，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于采用同步提升、同步滑移和步履式同步顶推施工工艺的大型结构的设计、施工与质量检验。

1.0.3 大型结构整体安装同步施工结构的设计、施工与质量验收，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语

### 2.1.1 同步提升

将装配成整体的重型工程结构提升到预定高度安装就位的过程。

### 2.1.2 同步滑移

将滑移单元置于滑轨上,采用滑移油缸和轨道夹轨器驱动工程结构运行至预定位置,移动过程中不改变结构特性的施工工法。

### 2.1.3 步履式同步顶推

工程结构在固定部位制作或拼装,采用专用液压设备通过顶升、推进、下降和回缩四个步骤将已完成制作或拼装的工程结构向前顶推移动,最终到达预定位置的施工工法。

### 2.1.4 提升支架

提升过程中承受被提升结构荷载的结构体系。

### 2.1.5 液压提升系统

对完成整体提升的设备组合,包含用于承载的钢绞线、提升油缸、液压泵站、检测传感器和控制计算机。

### 2.1.6 顶推体

顶推施工中被顶推的已完成制作或拼装的结构体,包含被顶推的桥梁主体结构 and 与桥梁主体结构连为一体共同受力的临时结构。

### 2.1.7 顶推平台

现场进行梁段预制、制作或拼装,为实施顶推作业而设置的工作台座。

### 2.1.8 顶推跨径

顶推施工过程中支撑顶推体的两相邻支承点距离。

### 2.1.9 顶推支墩

在桥梁顶推施工过程中用于支撑顶推体、承受施工荷载、保证结构稳定性的支承结构,包括桥墩结构和为减少顶推跨径设置的临时墩。

### 2.1.10 导梁

连接在桥梁主体结构前后端,用于对桥梁进行导向并改善顶推过程中桥梁主体结构受力的临时结构。

### 3 基本规定

3.0.1 同步施工应结合工程结构特点和场地条件等因素选择合适的同步施工工法。

条文说明：同步施工技术主要包括同步顶推、同步提升和同步滑移三种典型工法。各类工法因其技术特点不同，具有各自的适用条件，工程中应根据结构特性、施工环境及技术经济性等因素进行综合比选，确定最适合的同步施工工法。

同步顶推工法通过液压设备将结构沿水平方向分段或连续推进，特别适用于桥梁结构的安装作业。其主要优势在于能够在不中断桥下交通、不断航的条件下完成结构施工，典型应用场景包括跨越铁路、公路、河流、峡谷等障碍的钢梁、混凝土梁及梁拱组合结构施工。

同步提升工法采用液压提升系统将大型结构整体垂直提升就位，以其控制精度高、同步性能好的特点，广泛应用于大跨度空间结构安装。该工法适用于体育场馆、机场航站楼等大跨度钢网架、钢桁架屋盖的整体提升，以及拱桥、桥塔等大型构件的竖向吊装，能够实现超大型构件的整体平稳就位。

同步滑移工法通过液压滑移系统使结构沿预设轨道水平移动，以其施工效率高、对场地要求低的优势，在大型空间结构施工中展现出独特价值。该工法适用于大型体育馆、工业厂房、商业中心等建筑的屋盖系统安装，特别适合在施工现场受限、无法使用大型吊装设备的工况下，实现大面积屋盖系统的就位安装。

在选择同步施工工法时，除考虑工法本身的技术特点外，还需综合评估结构形式、施工条件、工期要求、经济效益及环境影响等多方面因素，通过技术经济比较确定最优方案。

3.0.2 施工单位应根据国家、行业对危险性较大的分部分项工程管理的有关规定和规范，编制同步施工专项施工方案，并组织专家论证通过后方可实施。

条文说明：同步施工工艺复杂，施工荷载大，技术风险高，多属于超过一定规模的危险性较大的分部分项工程。施工过程中结构体系不断变化、边界条件复杂、同步控制精度要求严苛，存在较高的技术安全风险。施工单位应根据国家《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》及相关行业要求，编制专项施工方案，

并经相关领域的专家论证通过后方可实施。专家论证应重点关注方案的技术可行性、安全性以及可能存在的风险点。

3.0.3 同步施工中涉及的施工设备及材料应根据国家、行业现行有关标准的规定进行检验，设备进场应进行检验，不得使用国家及行业淘汰的工艺、设备和材料。施工设备应由专业技术人员维护和操作。

3.0.4 同步施工过程中的临时结构应按现行国家、行业标准的相关规定进行专项设计、施工与质量检验。

3.0.5 同步施工作业期间应避开大风、冰雪灾害、覆冰等不利气象和环境条件。

3.0.6 正式施工前应进行试提升、试滑移和试顶推，根据试施工中测定的数据指导正式施工。

*条文说明：试施工（试提升、试顶推、试滑移）是正式施工前检验整个施工系统性能、验证方案可行性的关键环节。其目的在于：*

*（1）检验系统可靠性：全面检验液压系统、控制系统、传感检测系统及机械结构的协同工作性能和可靠性。*

*（2）获取关键参数：通过实测试施工阶段结构内力（应力）、变形（挠度）、位移以及临时结构的沉降、设备的同步性、摩擦系数等，并与理论计算值对比，验证计算模型的准确性。*

*（3）磨合团队与流程：使所有操作与监控人员熟悉操作流程和应急响应程序，检验指挥协调体系的畅通性。*

*（4）消除潜在隐患：提前发现并解决设备、结构或方案中可能存在的潜在问题。*

*试施工获取的数据是最终调整和确定正式施工控制参数、指导后续大规模施工的核心依据。*

3.0.7 同步施工宜进行全过程施工监控。

*条文说明：同步施工是一个动态的、时变的系统工程，结构的受力状态和空间形态随施工步骤不断变化，存在诸多不确定性，因此需进行全过程施工监控，以确保施工过程安全、最终内力状态和线形符合设计要求。*

## 4 同步施工荷载与作用

4.0.1 同步施工结构分析计算应按现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001 采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。

4.0.2 大型结构整体同步提升工程的结构安全等级应为一级，大型结构整体同步顶推和同步滑移工程的结构安全等级不应低于二级。

*条文说明：根据《工程结构通用规范》（GB 55001-2021）规定，结构设计时，根据结构破坏可能产生后果的严重性，采用不同的安全等级。同步提升施工结构的破坏对人的生命、经济、社会或环境影响很大，破坏后果为“很严重”，所以结构的安全等级应为一级。同步顶推施工结构和同步滑移施工结构的破坏影响较大，破坏后果为“很严重”或“严重”，结构安全等级不得低于二级。*

4.0.3 结构荷载可分为下列类型：

1 永久作用，包括结构自重、土压力、预应力等。

2 可变作用，除风荷载外，还包括施工可变作用、温度荷载、雪荷载、基础沉降、安装过程中预紧不同步作用、提升不同步作用、提升过程中斜吊附加水平力作用等。

4.0.4 结构设计时，应按下列规定对不同荷载采用不同的代表值：

1 对永久作用，采用标准值作为代表值。

2 对可变荷载应根据设计要求采用标准值、组合值作为代表值。

4.0.5 结构自重应包括永久结构自重、临时结构自重、设备自重、工机具自重、附属安全设施自重等，荷载标准值应按实际计算。

4.0.6 同步提升施工过程中，被提升结构自重应作为可变荷载参与荷载组合。同步顶推和同步滑移施工过程中，结构自重应作为永久荷载参与荷载组合，结构自重应乘以动力系数，动力系数可取 1.05（对结构不利时）或 0.95（对结构有利时）。

4.0.7 施工可变作用应包括施工作业人员、临时放置材料、防护系统和小型工具等。其作用标准值可按实际情况计算，但取值不应小于  $2.5\text{kN/m}^2$ 。

4.0.8 风荷载计算应根据结构类型，按现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001 和相关国家及行业标准的规定执行。

条文说明：同步施工是一个支承状态不断发生变化的过程，不同支承状态下主体结构的受力状态大不相同。没有必要要求每一个状态都能承受极端风荷载作用。

对于同步提升施工，根据现行国家标准《重型结构和设备整体提升技术规范》GB 51162，风荷载应按根据支承结构安装、提升施工、应急加固和拆除四个阶段实际情况分别确定，根据不同工况，采用6级风载、8级风载、10年一遇风荷载或紧急情况修正风荷载。

对于同步提升施工和同步滑移施工，行进作业应在气象条件较好的环境中开展，根据工程实践经验，顶推行进作业时的风力等级不宜超过6级风（6级风对应的风速范围为10.8m/s~13.8m/s）。同时，在顶推行进作业中应密切关注气象变化，如果可能遭遇超出该验算风速的极端天气，可将顶推体提前停顿在受力状态较好的位置，并做好相应的防风措施。在保证顶推行进作业时风力等级不超过6级风的情况下，顶推行进中的基本风速可偏安全地取15m/s。对于非行进过程中的结构验算，设计风速可按现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01-2018第4.2.9条确定，顶推施工桥梁的施工年限一般不超过3年。

4.0.9 作用及作用效应组合应按照现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001和相关国家及行业标准的规定执行，并根据可能同时出现的作用进行最不利作用效应组合。

4.0.10 同步提升施工过程中应计入提升钢绞线和缆风绳钢绞线的预紧不同步作用，不同步作用的取值按现行国家标准《重型结构和设备整体提升技术规范》GB 51162执行。

4.0.11 同步提升施工过程中应计入斜吊附加水平力作用，作用取值按下式计算：

$$H = \frac{50}{L} \cdot F$$

式中：

H——斜吊附加水平力(kN)

F——最不利工况下提升索索力(kN)；

L——最短提升索长(mm)，不小于1500mm。

4.0.12 提升不同步作用应符合下列规定：

1 位移不同步提升工况分析时，相邻吊点的位移不同步值取 $L_0/250$ （ $L_0$ 为被

提升结构吊点距离)，且不小于 $\pm 25\text{mm}$ ；

2 荷载不同步提升工况分析时，提升索的索力变化值不小于 $\pm 10\%$ ；

## 5 同步施工总体设计

### 5.1 一般规定

5.1.1 同步施工结构设计应包括永久结构与临时结构设计，整体结构及局部构件应满足施工全过程各工况下的强度、刚度和稳定性要求。

*条文说明：同步施工（包括顶推、提升、滑移）是一个动态的、时变的过程，结构的受力体系、边界条件和荷载状态随施工步骤不断变化，与最终的使用状态存在显著差异。因此，其结构设计必须涵盖永久结构与临时结构两大系统，并将其视为一个有机的整体进行分析。设计时，不仅需验算永久结构在施工过程中的安全性，确保其强度、刚度与稳定性满足要求；同时，也必须对临时结构（如提升支架、顶推临时墩、滑移轨道、吊点、反力架等）在各种最不利工况下进行设计与验算，确保整个施工体系的安全可靠。*

5.1.2 永久结构和临时结构应根据同步施工工艺的特点，进行结构适应性设计，确保施工安全、经济合理、便于实施。

*条文说明：条文强调“结构适应性设计”的理念。永久结构的设计需预先考虑同步施工工艺的需求，进行适应性设计，方可确保在施工安全可靠基础上，提高工程经济效益，实现绿色可持续发展。例如在同步提升工法中，为确保大跨度网架在提升路径上不受阻碍，并避免网架就位后进行复杂的杆件拆换作业，可将永久支承柱设计为核心型钢柱与后浇外包混凝土的组合构件。在提升阶段，仅安装核心型钢柱作为提升支撑点及临时稳定结构，为网架提供无干涉的提升通道；待网架整体提升并精确就位后，再浇筑外包混凝土，最终形成完整的永久支承柱。例如在顶推工法中，为了便于顶推施工，顶推结构主梁截面宜采用等宽等高平底截面，纵断面线形宜采用等曲率的直线或圆曲线。*

5.1.3 同步施工结构设计应考虑施工过程中设备可能出现的不同步效应。

*条文说明：同步施工的核心在于“同步”，但实际工程中，由于设备制造精度、液压系统响应、传感器误差及现场环境等因素，绝对的同步难以实现，总会存在一定的“不同步效应”。这种不同步会在结构（特别是永久结构）中产生设计未预期的附加内力，或在临时支撑中产生超载风险。因此，在结构设计阶段，*

必须定量考虑这种不利影响，在计算中引入合理的不同步系数或进行敏感性分析，为结构（尤其是关键杆件和连接节点）提供一定的安全冗余，确保在可控的不同步范围内，结构依然安全。

5.1.4 同步施工应结合施工条件，充分利用永久结构，减少临时工程量。

*条文说明：为贯彻绿色、经济的建造理念，同步施工设计应鼓励永临结合。即在满足永久使用功能和安全的前提下，充分利用永久结构的承载能力来服务施工阶段。例如，利用已完成的桥墩或主体框架作为顶推或提升的支撑体系；将施工阶段所需的加强构造与永久结构一体化设计，避免后期拆除。这不仅能有效减少临时措施的数量和规模，降低工程成本，也能简化施工流程，缩短工期。*

5.1.5 同步施工结构设计应提出施工过程中的主要监控指标及施工技术要求。

## 5.2 总体设计

5.2.1 总体设计应包括施工工法选择、施工流程、主体结构和临时结构总体布置及施工控制要求等内容。

5.2.2 同步提升应按照支承结构安装、提升施工、应急加固和拆除四个阶段进行施工阶段的结构分析、结构补强与连接设计。

5.2.3 同步提升宜选择与工程结构永久支承点相近的位置作为提升点，使工程结构施工阶段的受力状态与使用状态接近。若工艺需要，可增加提升点数量，使载荷分布合理。

*条文说明：提升点的布置是同步提升设计的核心之一。优先选择与工程结构永久支承点相近的位置作为提升点，可以使被提升结构在施工阶段的受力模式与使用状态最大限度地接近，从而避免为满足施工期受力而对结构进行大规模额外加强，实现经济性目标。当结构跨度大、刚度较弱或平面形状不规则时，可增加提升点数量，通过调整吊点布置使荷载分布更趋合理，有效控制结构变形与应力水平。*

5.2.4 同步提升的同步控制策略应根据相邻吊点的相对刚度采用载荷均衡为主的控制策略、位移同步为主的控制策略或载荷位移组合控制策略。按相邻吊点的位移不同步值取  $L_0/250$  ( $L_0$ 为被提升结构吊点距离) 且不小于  $\pm 25\text{mm}$  进行相邻吊点载荷变化量计算，当变化量  $\geq 10\%$  时，宜采用载荷均衡为主的控制策略；当

变化量 $<10\%$ 时，宜采用位移同步为主的控制策略。

**5.2.5** 大型工程结构采用同步提升施工工艺时，宜采用“低位拼装、整体提升到位”方案。对大跨度桥梁结构，被提升段长度应结合桥梁总体布置、结构内力分布、临时支架布置、提升吨位综合考虑。

*条文说明：大型结构采用“低位拼装、同步提升”方案时，整体提升明显优于分片提升。因为整体提升可在低位胎架上完成全部主次结构的拼装，避免了分片高空组对的尺寸偏差与安装困难，一次成型精度高；同时将大量高空作业转为地面作业，大幅降低安全风险，并省去分片提升所需的高空支撑与多次校正费用；加之计算机控制液压同步技术成熟，整体提升各吊点位移均匀可控，而分片提升易产生相互牵制、协调困难。因此，只要提升架等起重条件满足要求，整体提升是首选方案，核心优势在于“地面多拼、高空少焊”。*

*大跨度桥梁结构（如钢箱梁、钢桁梁、钢拱肋等）采用“低位拼装、整体提升到位”方案，能够显著降低高空作业风险、提高拼装精度与施工效率。其中，被提升段长度的合理确定是方案成功实施的关键环节。本条明确了被提升段长度的核心设计原则。分段长度并非独立参数，而是桥梁结构体系、施工条件与经济安全的综合平衡点。首先，需服从桥梁总体布置，其分段点应尽量与结构受力节点或永久节段划分相协调，以确保提升单元的结构完整性及就位后的连接质量。此外，分段位置应符合结构内力分布规律：（1）需考虑永久结构受力，确保分段接头避开主梁（或拱肋）弯矩或应力较大区域；（2）需验算被提升结构在吊点支承状态下的临时受力，确保其强度、稳定性及变形可控。其次，受制于临时支架（含拼装支架与提升支架）布置，拼装段的长度与重量必须适应现场支架的承载能力与布置间距，保障低位拼装阶段和提升节段的稳定与安全。最后，关键控制因素是提升吨位，被提升段长度直接决定了提升重量，必须与提升设备的额定能力相匹配，并留有充足安全余量。*

*因此，确定被提升段长度需进行多方案比选与一体化计算，以实现技术合理、安全可靠与经济可行的统一。*

**5.2.6** 同步提升的提升支架宜利用既有竖向承重构件，临时提升支架结构形式和设置位置应结合主体结构确定，应避免在主体结构关键受力部位开设临时孔。

**5.2.7** 同步滑移单元的划分应综合考虑主体结构刚度、强度、稳定性、施工场

地空间、吊装设备能力及工艺等因素，采用大单元或小单元划分。

*条文说明：同步滑移的关键在于滑移单元的合理划分与滑移方式的正确选择。滑移单元划分需综合考虑结构的自然分段、自身稳定性、施工吊装能力、滑移推力及临时措施用量等因素，划分后的单元应具备足够的刚度和稳定性，能够独立完成滑移过程。*

*依据现行公路桥涵施工技术标准关于牵引节段长度确定原则，综合考虑桥墩承载能力、结构刚度和设备能力。工程实践经验表明，刚度大的网架、连续钢箱梁等大单元滑移效率高，刚度小的桁架、薄壁结构需小单元并设临时支撑以确保稳定。*

5.2.8 同步滑移的滑移方式应综合考虑结构特点、滑移距离、场地条件等因素，采用滑动滑移、滚动滑移等方式，对曲线滑移和超大跨度空间钢结构滑移宜采用滚动滑移方式。

5.2.9 同步顶推应根据航道、道路、既有构筑物等现场条件，以及结构受力和经济性，确定顶推跨径、顶推轨迹、顶推平台及顶推支墩布置。

*条文说明：确定顶推跨径和临时墩设置时，除了要满足通航、交通通行和避开既有建筑外，还要考虑桥梁主体结构和临时结构的整体经济性。临时墩数量少，节省了临时墩材料用量，但增大了顶推跨径，有可能需要增加导梁或对桥梁主体结构进行额外加强才能适应顶推施工的受力要求。临时墩数量多，会增加临时墩材料用量和墩顶临时顶推设备的数量，加大各项推设备同步性控制的难度，且桥梁主体结构的承载能力有可能没有得到充分的发挥。因此，在确定顶推跨径和临时墩设置时，应综合考虑现场条件、结构受力和整体经济性，选择较优方案。*

5.2.10 步履式顶推施工工法宜采用多点顶推方式。

5.2.11 步履式顶推施工结构的宜底面齐平，纵坡不宜大于 3.5%。

5.2.12 步履式顶推施工桥梁结构的平面及纵断面线形宜为直线或圆曲线。

5.2.13 步履式顶推施工桥梁结构根据受力需要可设置前导梁或后导梁，多联桥梁宜串联成整体一并顶推。

5.2.14 同步施工流程设计应明确拼装顺序、提升/滑移/顶推、支承转换、合龙等关键工序。

## 6 同步提升结构设计

### 6.1 主体结构设计

6.1.1 提升吊点结构构造设计应确保结构受力合理，传力直接，并应避免偏心受力构造。

*条文说明：在整体提升施工中，结构及吊点的构造设计是确保力流清晰、安全可控的基础。要求“结构受力合理，传力直接”，核心在于设计需使巨大的提升力沿明确、简短的路径传递至被提升结构，避免出现复杂的次生弯矩或应力集中，从而减少不可预见的变形与潜在风险。*

*其中，“提升吊点设计应避免偏心受力构造”是此项要求的关键体现。提升吊点是临时结构与被提升永久结构之间的核心受力接口。若该处的构造设计会导致提升力的偏心，将引入附加弯矩，导致局部应力急剧增大，极易引发吊点区域破坏。因此，吊点必须通过精心的构造设计（如设置对称加劲肋、采用对中承压板、使提升索具轴线与结构受力中心线重合等），实现力的对中、直接传递，确保在反复和巨大的提升荷载作用下，连接绝对可靠，变形与内力处于设计预期范围内。*

6.1.2 提升吊点的加强结构宜与永久结构同步设计，应保证吊点区域具备承受高集中荷载的能力，并方便安装与拆除。

*条文说明：本条强调提升吊点的设计必须融入永久结构的整体设计流程，实现“临时与永久结合”。其核心在于，吊点的加强措施不应作为事后补救，而需在结构设计阶段就同步规划，确保其传力路径与主体结构协调，避免对永久性能造成损害。重点需保证吊点区域的局部受力性能，通过精确计算与针对性加强（如设置加劲肋、局部加大截面等），以承受提升过程中的高集中荷载，并具备足够的安全储备。同时，加强结构的构造应兼顾施工便利性，便于现场精准安装与后期高效拆除，力求在满足提升安全的前提下，最大程度减少对永久结构的损伤与影响，实现安全、经济、高效的综合目标。*

6.1.3 提升吊点附近的主体结构应根据受力要求予以加强。

*条文说明：提升点是施工过程中结构的集中受力点，提升设备的拉力会在此*

处产生局部应力集中，同时提升过程中结构的约束条件、荷载分布与成型后正常使用工况存在差异，易出现局部变形过大、内力超限等问题，因此应予以加强。

**6.1.4 拱肋整体提升施工时，临时对拉系杆索锚固处的拱肋结构应根据受力要求予以加强。**

*条文说明：拱桥拱肋在整体提升施工时，需在提升段拱肋端部设置临时对拉系杆索，该临时对拉系杆索是确保被提升段拱肋保持拱合理受力模式的关键临时措施。本条旨在确保临时对拉系杆索锚固处的局部安全与整体稳定。临时对拉系杆索锚固处承受巨大且集中的索力，属于施工期的关键受力点。若未进行专项加强，该区域极易因局部应力超限而发生钢板屈曲、焊缝开裂或混凝土压溃等破坏，进而威胁施工安全及结构成形精度。*

*构造要求指在锚固位置须设置可靠的传力构造，如焊接加劲肋、设置锚垫板或局部增大截面等，以扩散集中力，优化应力分布，并与拱肋主体结构牢固连接。*

*计算要求则强调必须进行严格的局部受力验算，包括局部承压、抗剪等，确保加强措施具备明确的计算依据与足够的安全储备。*

**6.1.5 提升吊点与混凝土结构连接时宜采用预埋式构造，提升吊点与钢结构连接宜在工厂完成。**

*条文说明：提升吊点单点受力大，通过预埋式构造增强吊点与主体结构的整体性，保障提升力传递直接、可靠。对于混凝土被提升结构减少后锚固工艺对主体结构的损伤，对于钢结构被提升结构减少现场施焊保证焊缝的可靠性。*

**6.1.6 大型结构同步提升时宜在对接端头设置嵌补段。**

*条文说明：大跨度结构在提升过程中，受自重、提升不同步等因素影响，端头易产生挠曲变形、水平偏移或转角偏差，直接对接会出现间隙过大、错边超标、强行对位导致的附加内力等问题。*

*嵌补段的长度可灵活调整，适配提升就位后对接端头的间隙与错边量，保证对接接头传力路径平滑连续，避免对使用阶段造成不利影响。*

**6.1.7 主体结构预拱度的设置应计入同步提升施工过程的影响。**

*条文说明：合理设置预拱度是确保结构成形后线形符合设计要求、避免过度下垂或开裂的关键措施。在计算预拱度时，应参照实际施工步骤，精确模拟整体提升过程对主体结构的影响，确保实施线形。*

6.1.8 当提升支架及低位拼装支架布置于主体结构时，应结合支架布置和提升方案验算主体结构受力状态，并补充相关局部受力构造措施。

*条文说明：当临时塔架及低位拼装支架布置于未被提升主体结构上时，临时塔架、低位拼装支架自重、被提升主体结构自重、不同步效应荷载及各种施工机具的重量均由未被提升主体结构承担或通过其传递至下部临时支架。当由未被提升主体结构承担时，应结合其支承构造核实结构受力及变形，确保结构安全，同时，对于临时塔架、低位拼装支架与主体结构接触点，应核实其局部受力，补充相关局部承压构件或加劲，确保局部受力满足要求；当通过主体结构传递至下部支架基础时，应在主梁内部增设相关构造措施，确保传力平顺。*

## 6.2 临时结构设计

6.2.1 大型网架结构多点提升时，应设置若干组水平刚度较大的提升塔架抵抗水平力作用，并应进行群柱整体稳定性验算。

*条文说明：大型网架结构多点提升时，水平力的来源复杂且不可忽视，若塔架水平刚度不足，会引发塔架倾斜、网架结构扭转等风险。*

6.2.2 临时提升支架宜采用塔架形式，且塔架基础应具有足够的抗拔能力。

*条文说明：独立于主体竖向结构的提升架不具备主体结构的侧向约束与抗拔依托，需采用格构式塔架保障自身刚度与稳定性，同时塔架受水平力作用时柱肢底部可能会出现拔力，故要求基础有相应的抗拔能力。*

6.2.3 提升钢绞线的最短自由工作长度须经过计算确定，并不得小于 2.5m。

*条文说明：提升钢绞线的自由工作长度，指钢绞线在提升过程中，不受提升油缸夹具、导向装置约束，可自由伸缩变形的区段长度，范围为提升油缸上夹具至下夹具（或锚固端）之间的无约束段。*

*钢绞线自由工作长度不小于 2.5m 的最低限值要求，是为了保障钢绞线张拉、锚固的可靠性及提升系统的安全运行。同时可控制钢绞线偏心造成的水平荷载处于较低水平。*

6.2.4 拱肋整体提升时，应结合拱肋布置形式，在合理位置设置沿纵向的临时对拉系杆索抵抗水平力，在吊点位置设置横向临时杆件确保横向稳定性。

*条文说明：本条旨在明确拱桥拱肋中间段整体提升过程中，为保证结构姿态*

与内力可控所必须采取的临时构造措施。拱肋作为压弯构件，在脱离拼装支架后的提升状态下，其受力体系发生根本改变，成为由少数吊点支承的悬吊长细结构。

设置沿纵向的临时对拉系杆索，主要是为了平衡由于拱肋曲线形状及倾斜角度所产生的水平分力。该水平力若不加以约束，会导致拱肋在提升过程中发生纵向水平位移或过大的附加弯矩，影响就位精度与结构安全。对拉索的布置位置与张拉力，需根据拱肋的具体线形、提升角度及吊点反力进行计算确定，以有效抵消水平力并控制内力分布。

在吊点位置设置横向临时杆件，则是为了增强拱肋截面的横向刚度与抗扭能力。由于吊点处承受全部竖向提升力且通常约束较弱，在风荷载或不对称荷载作用下易发生横向失稳或扭转。增设的横向连接（如临时风撑或桁架）能将相邻拱肋或拱肋节段在横向连成整体，形成一个稳定的空间受力体系，确保提升过程的横向稳定性。

**6.2.5** 临时对拉系杆索的索力可根据提升状态下被提升拱肋在临时对拉系杆索锚固位置的竖向转角变形为零的原则确定。

**6.2.6** 提升钢绞线和临时对拉系杆索钢绞线长度超过 100m 时，每束钢绞线中间应设置约束，避免在风力作用下钢绞线相互碰荡。

*条文说明：无约束的长钢绞线在风力作用下会产生大幅摆振，多束钢绞线之间相互碰撞、摩擦，会磨损钢绞线表面的镀锌防腐层，甚至造成局部钢丝疲劳断丝；同时，钢绞线摆动时与提升塔架、导向装置的硬性接触，也会引发局部应力集中，降低钢绞线的安全承载能力。*

*钢绞线中间设置约束装置，限制长距离钢绞线在风力作用下的大幅摆动与相互碰荡，避免钢绞线磨损、断丝及由此引发的提升系统水平偏载风险。*

**6.2.7** 提升梁建议采用前端开放式 U 形槽的箱型截面或拉开一定距离（保证钢绞线穿过）的双拼工字钢。

*条文说明：该条主要考虑穿束钢绞线完成的提升油缸安装时的便利性，开放式 U 槽与双拼工字钢可允许油缸侧面吊装就位，对吊装设备起升高度要求较小。*

**6.2.8** 提升支架宜支承于现状及加固后地基上，当未提升的主体结构刚度较大时，也可支承于未提升的主体结构上。支承于现状及加固后地基上时，地基承载力应满足受力和变形要求；支承于主体结构上时，应计入主体结构变形对提升施

工的影响。

*条文说明：在同步提升施工过程中，提升支架是最关键的施工临时构件，其设置的合理性及支承方式决定了施工的安全性及经济性。对于提升支架支承方式，通过搜集已有资料，主要有直接支承于现状及加固后地基或支承于未提升主体结构之上两种方式。对于支承于地基上的提升支架，地基承载力应能达到施工要求，对于不满足要求的地基，可采用地基换填或钢管桩基础等形式进行加固，并对支架进行预压，以防后期提升荷载引起的沉降导致结构定位误差；对于支承于未提升主体结构上时，应考虑支架自重、提升荷载等对主体结构的影响，核实主体结构在施工过程中的受力，同步核实主体结构受力后的线形形态对提升节段的影响，确保施工过程中提升结构、未提升结构的安全性。*

**6.2.9** 主体结构低位拼装支架顶标高应结合主体结构施工过程中的受力变形设置。

*条文说明：考虑主体结构架设后受到自重及外荷载，主体结构一般需设置预拱度，以使结构合拢后线形达到设计要求。对于提升段主体结构，在低位拼装时不仅应考虑预拱度的影响，同时需考虑在整体提升过程中可能存在的偏差，对结构的安装线形进行调整。具体措施为通过在低位拼装支架顶部设置调节块，调整每个支架顶的安装标高，实现安装线形的精确把控。*

## 6.3 机具设备要求

**6.3.1** 液压提升系统应采用计算机控制设计应符合下列规定：

1 重型结构和设备整体提升宜用计算机控制液压提升系统(简称液压提升系统)，液压提升系统宜采用柔性钢绞线承重，由提升油缸、泵站、传感检测及计算机控制系统组成。

2 提升油缸宜用穿芯式油缸，内置一束钢绞线承载，由上锚具油缸、下锚具油缸和主油缸三部分组成。锚具夹片规格应与钢绞线的规格相对应。

3 提升泵站宜采用比例液压系统，实现多点同步控制。

4 计算机控制系统宜采用网络实现信号互连，根据被提升的结构或设备的控制要求选择传感器的种类和精度，宜配置长距离传感器和荷载传感器，应实时测量各个提升点的位移和荷载信息，通过液压比例系统实现位置同步和荷载均衡控

制。

### 6.3.2 液压提升系统的提升能力设计应符合下列规定：

1 应根据被提升结构及附属设施的重量、提升吊点布置的数量和方位及结构分析计算的结果，确定各吊点荷载。

2 应根据各吊点的荷载确定液压提升系统的总体提升能力和各吊点提升能力。

3 各吊点提升能力(指定吊点液压提升油缸额定荷载)不应小于对应吊点荷载标准值的 1.25 倍。

4 总体提升能力(所有液压提升油缸总额定荷载)不应小于总提升荷载标准值的 1.25 倍，且不大于 2.5 倍。

6.3.3 多个提升油缸组合的吊点，宜采用同一型规格的提升油缸。

6.3.4 液压泵站配置应满足提升速度和提升能力的要求。

### 6.3.5 液压提升系统的设计功能应符合下列规定：

1 应根据提升系统的控制要求，选择位移与荷载传感器。

2 应根据被提升物的控制目标设计控制系统及编制控制软件。

3 多吊点的提升系统，宜结合结构计算结果选择荷载均衡和位置同步控制，并应编制控制软件。

### 6.3.6 传感检测及液压提升系统应符合下列安全要求：

1 在控制系统的顺序控制功能中应设置安全自锁、互锁功能，不应有违反既定逻辑、既定时序的机械、液压和电气动作。

2 应选用抗干扰性能好的电气器件。

3 控制系统应有避免误触键、碰撞等引致的误动作的技术措施，应设置各种检验算法和判断逻辑。

4 控制系统应具有实时在线检测故障的手段及与控制系统完全独立的辅助检测手段。

5 控制系统应具有系统失电、失控时的保护措施。

6 控制系统的供配电设计应符合国家现行有关标准的规定，控制系统处于施工现场的高位时，应设置可靠的防雷措施。

*条文说明：条文说明：以上取自《重型结构和设备整体提升技术规范》*

GB51162-2016 第 7.1 节。

**6.3.7** 多个提升油缸组合的提升点，应采取构造措施使各个油缸受荷一致。

*条文说明：通过构造措施实现荷载均匀分配，避免单个油缸超载、受力失衡引发的设备损坏或结构附加变形，保障提升过程的同步性与安全性。*

*设备层面：单个油缸超载会导致液压系统压力异常、油缸密封件损坏等故障；受力过小的油缸则会处于空载状态，无法参与协同提升。*

*结构层面：受力失衡会使提升点产生附加内力，导致主体结构吊点区域应力集中，同时引发结构整体偏斜、扭转，增加提升就位难度。*

**6.3.8** 提升油缸应设置行程传感器并接入同步提升系统，同步提升系统应具有根据传感器数据单独控制某个油缸动作的能力。

*条文说明：通过行程传感器反馈 + 单缸独立控制的闭环控制逻辑，保障多油缸提升过程的位移同步精度，避免因油缸行程偏差引发结构偏斜、受力失衡。*

**6.3.9** 提升反力较大且位移敏感的提升点应设置称重传感器，密切监控提升反力。

*条文说明：提升反力较大且位移敏感的提升点指该点位与其他点位不同步时提升反力增量较大，通过称重传感器实时采集提升反力数据，实现对提升点的荷载动态监测与预警，避免因荷载超限或受力失衡引发结构变形失控、设备损坏等风险。*

**6.3.10** 主体结构或提升临时结构主受力构件且应力较高的部位宜设置应力传感器。

*条文说明：主体结构或临时结构应力较高部位设置应力传感器有如下必要性：*

*1、弥补理论计算与现场实际的偏差主体结构 and 提升临时结构（如提升支架、分配梁）的高应力部位，其应力状态受施工工艺（如焊接残余应力）、提升不同步、荷载偏心等现场因素影响显著，理论计算难以完全精准模拟。应力传感器可实时采集真实应力值，验证有限元分析模型的准确性，避免“计算安全、实际超限”的隐患。*

*2、实现高风险部位的提前预警主受力构件的高应力区域，应力水平接近材料设计容许应力，微小的荷载波动就可能導致应力超限。通过传感器实时监测，可在应力达到预警阈值时及时干预，避免构件进入塑性变形阶段。*

提升过程的动态调控应力监测数据可与同步提升系统联动，当某部位应力突增时，系统可自动调整对应区域油缸的提升速度或荷载，实现“应力 - 位移 - 荷载”的协同调控，保障结构受力始终处于安全区间。

6.3.11 提升钢绞线应设置收纳措施，避免钢绞线重量造成提升油缸顶部水平偏载。

条文说明：收纳措施约束钢绞线的自由下垂状态，消除其自重引发的水平分力，避免提升油缸顶部承受附加偏载，保障油缸轴心受力与提升系统稳定。

6.3.12 同步提升机具设备尚应符合现行国家标准《重型结构和设备整体提升技术规范》GB51162 的相关规定。

## 6.4 结构计算

6.4.1 同步提升计算工况应包含支承结构（含缆风）安装、缆风预紧、同步提升、合龙、卸载等工况。

6.4.2 被提升工程结构的验算分析应计入分步加载、合龙、卸载等结构体系转换影响及提升不同步效应，不同步效应应作为可变作用参与荷载组合。

条文说明：在整体提升施工中，对被提升结构进行全面的验算分析是确保安全的核心。要求考察“提升点不同步效应”及“分步卸载拆除效应”，旨在精确模拟施工的真实力学状态。

提升点不同步效应：理论上各提升点应同步位移，但实际中因液压系统微差、监测调控滞后或结构刚度不均，难免出现偏差。这种不同步会在结构内产生附加的次应力，可能导致局部杆件过载、变形超限或节点损坏。验算需设定合理的不同步值，进行最不利工况分析，确保结构在可控差异下保持安全。

支承系统分步卸载拆除效应：提升就位后，结构从由临时提升架支承，逐步转换至永久支座受力。此过程是受力体系的“二次分配”，若卸载顺序不当，将引起结构内力重分布，产生不可预见的集中应力或大幅位移，危及结构及永久支座安全。验算必须模拟分步拆除的每个工况，确保内力与变形平稳、有序过渡。

综上所述，此项要求强调对被提升结构的验算必须动态模拟提升与体系转换的全过程，以主动控制风险，保障施工绝对安全与结构最终成型质量。

6.4.3 大型结构的整体提升应对被提升结构进行施工阶段的结构验算和分析，

施工过程模拟计算工况应严格与现场施工方案一致。

*条文说明：《重型结构和设备整体提升技术规范》GB51162-2016 规定：重型结构的整体提升应对被提升结构进行施工阶段的结构验算和分析。本规范补充施工模拟与施工方案的一致性，施工过程模拟的核心价值是预判施工风险，若计算工况与现场施工方案存在偏差，会直接导致模拟结果失真，无法指导施工甚至引起结构安全性风险。*

**6.4.4** 提升施工阶段临时结构验算，提升反力应作为可变作用参与荷载组合；同时应考虑可能出现的钢绞线偏心引起的水平荷载，该水平荷载作为可变作用参与荷载组合。

*条文说明：提升工况属于临时施工状态，提升反力、钢绞线偏心荷载等相对于临时约束体系（如提升油缸、吊点、提升架），需按活荷载属性参与荷载组合，以此精准反映施工阶段的荷载不确定性与受力风险。*

**6.4.5** 验算提升点与主体结构连接节点、临时对拉系杆索在拱肋上的锚固节点、提升支架在主体结构上的支承节点的连接时，其抗力应再除以附加系数 1.2。

*条文说明：整体结构分析中，提升节点通常被简化为刚性节点或铰接节点，无法反映加劲板、焊缝、预埋件等局部构造的应力梯度；而大跨度、大吨位提升工况下，节点区域是集中力传递的核心，易出现应力集中，必须通过精细化分析识别风险。*

*提升点为特别重要的受力和易发生应力集中的部位，验算这类节点时，抗力应再除以 1.2 的附加系数。*

**6.4.6** 当提升高重心结构时，应进行抗倾覆验算。当抗倾覆力矩小于倾覆力矩的 1.2 倍时，应增加配重、降低重心或设置附加约束。

*条文说明：取自《重型结构和设备整体提升技术规范》GB51162-2016 第 5.1.6 条。*

**6.4.7** 多点同步提升的大型结构应进行群柱整体稳定性验算，验算可采用逐点失效准则进行。

*条文说明：多点同步提升大型结构时，提升柱群通常承担着数千吨级荷载，且各柱受力随提升同步性、风荷载及安装偏差动态变化。本条文规定进行群柱稳定性验算，旨在防止因单根提升柱意外失效（如液压提升器故障、锚固滑移或局*

部失稳)引发连锁破坏,导致整体倾覆。逐点失效准则是模拟连续倒塌工况的简化方法,其核心思路是:假定群柱中任意一根提升柱突然退出工作,验算剩余柱在传力路径重分布后的极限承载力和整体稳定。验算时应选取受力最不利柱、边界条件较弱柱或液压提升器故障概率较高处作为失效点,按荷载基本组合考虑提升荷载、结构自重及风荷载,分别对各失效工况进行分析,要求剩余柱最大应力不超过规范限值,且群柱整体不产生过大侧移。该方法兼顾了偶然设计状况的经济性与安全性,避免盲目增加所有柱截面,重点强化关键柱及柱间支撑。实际应用中,尚应结合提升同步精度控制标准,对失效柱相邻区域的节点构造采取加强措施,真正实现“一处失效、整体不倒”的设防目标。

## 7 同步滑移结构设计

### 7.1 主体结构设计

7.1.1 在设计阶段，对滑移施工方案应做专项主体结构设计规划，永久结构的整体设计需兼顾滑移工况的受力和变形控制需要，提升滑移过程的安全性，减少施工临时措施。

7.1.2 主体结构在滑移方向的板件宜作为滑移过程中的连续支撑。

7.1.3 滑移单元内构件间宜设置临时连接形成整体受力体系，可采用临时支撑或拉索。

*条文说明：依据建筑施工临时支撑结构技术标准关于支撑体系设置原则，工程实践证实临时连接可增强结构整体刚度。*

7.1.4 主体结构的临时连接节点，需结合主体结构原有板件进行设计，与主体结构同步加工。

7.1.5 节点构造应满足滑移过程特殊受力需求，牵引施力点、支点部位应局部加固。增设的外部加劲肋和临时支撑，在施工完成后应按原结构外观标准修复。

*条文说明：现行公路桥涵施工技术标准规定钢梁支点和牵引施力点处宜适当加固。工程实践表明滑移工况节点承受反复荷载，需增加强度储备。*

7.1.6 主体结构设计应预留施工临时开孔区域，临时开孔需避开关键受力部位，且后期易于修复。

### 7.2 临时结构设计

7.2.1 滑移装置系统包括滑轨、滑道梁、滑靴和导向装置等。滑轨和滑道梁应具有滑移结构的承载能力，并能承受摩擦力产生的反作用力。

7.2.2 滑轨的设置应根据滑移单元的重量、跨度和现场条件确定。当滑移单元跨度较大时，宜在跨中增设滑轨，滑移支架上支承点的位置应设在滑移单元的节点处。当滑移单元因增设中间滑轨引起杆件内力方向改变时，应采取临时加固措施以防失稳。

7.2.3 曲线滑轨应分段设置并调整夹角模拟轨迹，竖曲线滑轨顶面应符合设计高程。

7.2.4 滑轨宜沿滑移方向通长设置，可将滑轨直接布置于现有结构构件上；如现有结构不具备条件，可增设支撑装置，在支撑装置上布置轨道。

7.2.5 滑轨接头应采用等强连接。当采用焊接时，焊缝质量等级不应低于 GB 50205 规定的二级；当采用高强度螺栓连接时，摩擦面抗滑移系数应符合设计要求。

7.2.6 钢结构滑移施工可采用槽钢、H 型钢或钢轨等作为滑轨。槽钢适用于滑动滑移方式，H 型钢或钢轨可适用滑动滑移和滚动滑移两种方式，其规格型号应根据上部荷载并结合安装条件确定，滑轨的构造应能抵抗滑移单元支座的水平推力。

7.2.7 曲线滑移和超大跨度空间钢结构滑移宜选用滚动滑移方式，当动力充沛且卸载量较大时也可选择滑动滑移方式。

7.2.8 滑靴设置应符合下列规定：

- 1 滑靴应设置在结构刚度较大部位，如梁体腹板与隔板交界处、桁架节点处；
- 2 滑靴数量与间距应经结构分析确定；
- 3 滑靴构造应包括橡胶垫板、钢垫块、滑板（MGE 板或四氟板）、导向限位装置；
- 4 滑靴顶部标高应考虑结构预拱度进行调整；

7.2.9 滑靴与梁体应采用焊接、高强度螺栓或限位板可靠连接，有效传递水平力与竖向力，避免应力集中。

7.2.10 滑靴连接方式应便于安拆并最小化对结构损伤。

7.2.11 应设置导向装置限制横向位移，曲线滑移应适应转角与位移要求。

7.2.12 不同步效应分析应采用有限元法模拟不同步工况，计算附加应力与变形，分析多点不同步及不同步程度递增工况。

7.2.13 滑轨支墩设计应符合下列规定：

- 1 滑轨支墩应进行专项设计，并由具有相关资质的第三方进行验算；
- 2 支墩数量和位置应根据滑移施工承载力计算确定，应满足结构纵横向移动和高程调整的要求；

- 3 支墩使用的型钢、钢管等原材料应验收合格,连接焊缝质量不应低于二级;
  - 4 应对支墩立柱、分配梁、连接系进行强度、刚度和稳定性验算;
  - 5 支墩基础应根据地基条件确定,采用扩大基础时应验算地基承载力、抗弯承载力、抗冲切承载力和局部抗压承载力;采用桩基础时应进行工艺试桩和承载力试验;
  - 6 支墩顶面应设置纵横向分配梁,并应设置纵横向联结系形成整体稳定结构;
  - 7 跨路、跨航道布设支墩时,应设置安全警示标志和防撞设施;
  - 8 施工过程中应监测支墩变形及地基沉降,超过允许值时应暂停施工并采取有效措施。
- 7.2.14 对于具有拱形效应的滑移单元,应采用消除横向水平推力的施工措施,可在支座处设置临时横向止推结构,且该止推结构不应影响正常的滑移施工。

### 7.3 机具设备要求

- 7.3.1 液压同步系统配套位移传感器的测量误差不应大于 0.1%FS,分辨率不应低于 0.01mm。对安全等级为一级或跨度大于 100m 的结构,测量误差不应大于 0.05%FS,分辨率不应低于 0.005mm。传感器量程应大于最大行程的 1.2 倍。
- 7.3.2 液压同步系统应具备手动与自动控制模式,设有过载保护、行程限位及紧急停止等安全保护功能。
- 7.3.3 液压同步系统宜支持功能扩展及与其他施工管理系统数据交互,操作界面应简洁直观。
- 7.3.4 顶推/牵引设备额定承载力不应小于计算需求动力的 1.5 倍,重要结构不应小于 1.8 倍。行程应满足单次滑移距离要求,工作速度应与滑移速度匹配。
- 7.3.5 设备应通过出厂检验及现场调试,可靠度应满足施工安全等级要求,具备快速与慢速调节功能,同步性能应与控制系统匹配。
- 7.3.6 设备应设置安全阀、制动器等保护装置,维护保养应便利。
- 7.3.7 正式滑移施工前应进行试滑移,并应符合下列规定:
  - 1 试滑移距离不宜小于 5m;
  - 2 检验牵引动力系统性能、同步控制系统精度、滑靴与滑轨配合情况;
  - 3 测定实际摩擦系数,校核牵引力/顶推力计算;

4 检验导向装置和纠偏系统有效性；

5 试滑移合格后方可进行正式滑移施工。

7.3.8 结构单元滑移速度不宜超过 0.25m/min。确需提速时，应进行动力时程分析并设置实时振动监测系统，最高速度不应超过 0.5m/min。

7.3.9 滑移施工各牵引点位移同步精度不应大于 5mm，同墩两侧牵引点位移差不应大于 4mm。对曲线滑移、特大跨度结构，各牵引点位移同步精度不应大于 3mm，同墩两侧不应大于 2mm。

## 7.4 结构计算

7.4.1 同步滑移计算工况应包括滑移前拼装完成工况、滑移全过程各控制工况、就位及支架拆除等工况，宜建立空间有限元模型对整个施工过程进行模拟分析。

7.4.2 同步滑移施工应根据滑移阶段的边界条件和荷载条件等，对滑移单元、滑移支承结构、滑轨进行结构受力和变形验算。

7.4.3 作用于滑移支承结构的纵向水平力作用值按照下式计算：

$$F = KN\mu$$

式中：

K——控制水平影响系数，根据滑移的同步控制水平确定，可取 1.3~1.5。

N——滑移体重量（kN）。

$\mu$ ——滑移体滑动摩擦系数  $\mu$ ，宜通过试验确定，无试验数据时，经粗除锈充分润滑的钢与钢之间可取 0.12~0.15，设置四氟滑板时可取 0.08。

7.4.4 滑移支承结构设计时应进行强度、侧向刚度和整体稳定性分析与验算。

7.4.5 滑轨应进行横向抗弯强度和局部承压分析与验算。

7.4.6 同步滑移施工过程应按 7.3.9 条规定的各牵引点不同步位移最大限值计入不同步效应。

## 8 步履式同步顶推结构设计

### 8.1 主体结构设计

8.1.1 钢箱梁和钢-混组合梁的最大顶推跨径不宜超过 85m。结合结构前端挠度或结构应力情况，可采用临时索塔等措施增加顶推跨越能力。

*条文说明：* 桥梁顶推作业跨越道路或河流时，可能受限于下方交通、地质或水文条件，无法设置临时墩等辅助措施，导致顶推跨径过大，进一步引起导梁前端严重下挠，导梁无法正常过墩，且造成悬臂根部转角过大而接触面积变小，在临时支撑区域出现严重的应力集中现象。编制组调研了国内外桥梁顶推作业时的最大顶推跨径，一般钢箱梁和钢-混组合梁最大顶推跨径在 85m 以下，因此给出参考的建议值，设计单位可根据结构具体形式进行调整。当顶推跨径较大，严重影响顶推可行性时，可设置临时塔架及拉索（吊索塔架）综合改善主梁及导梁的受力和变形状态，保证顶推安全可靠。

临时索塔可采用门式塔架、桁架式塔架、组合式塔架等，拉索可采用平行钢丝或钢绞线。临时塔架设计计算应根据施工条件及经济性条件对顶推结构进行整体分析，以主梁及导梁的应力及变形控制为主，同时兼顾索力，将主梁和临时塔架内力和变形控制在合理范围。临时塔架验算内容包括塔架底座、塔柱结构、拉索等结构的强度，以及塔梁结合部和拉索锚固区的局部强度和局部受压稳定性。

8.1.2 采用顶推施工的梁拱组合结构的主拱、主梁宜为钢结构。当拱桥的主拱为钢管混凝土或者主梁为钢-混组合梁时，宜在顶推就位之后再进行混凝土施工。

8.1.3 顶推施工的主跨不大于 200m 的梁拱组合结构主梁可不设预拱度。

*条文说明：* 梁拱组合结构在顶推过程中设置了拱内临时撑杆等构件，其结构刚度很大，强制位移产生的附加应力问题比其他结构形式更为突出。为了减少顶推施工控制的难度、避免桥梁主体结构产生较大的附加应力，对于采用顶推施工的梁拱组合结构，如建设条件允许，建议在工程总体纵断面设计时充分考虑顶推施工的特点，将桥梁纵断面设计为直线或圆曲线，并同时顶推阶段会通过的各项推支墩墩顶的顶推设备设置在直线或相同半径的圆曲线上。

现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 第 4.2.4 条规定

“钢桥应设置预拱度，预拱度大小应视实际需要而定，宜为结构自重标准值加 $1/2$ 车道荷载频遇值产生的挠度值”，可见该条文并未对预拱度大小进行强制性规定。实际工程设计中，也常常会有仅以恒载变形为依据进行预拱度设置的情况。梁拱组合体系系杆拱桥由于拱肋的刚度和吊杆的作用，主梁的恒载挠度可以通过合适的吊杆索力进行一定程度的调节，根据多座梁拱组合体系系杆拱桥的结构计算经验，跨度在 $200\text{m}$ 以内的梁拱组合体系系杆拱桥的主梁在恒载下的最大向下挠度可以控制在 $10\text{cm}$ 以内，小于跨径的 $1/2000$ 。考虑到主梁的实际变形值较小，并结合顶推施工的特点，为了避免破坏梁底“直线”或“圆弧曲线”的线型，避免加大施工控制难度或增加施工附加应力，认为跨径在 $200\text{m}$ 以内时梁拱组合结构的主梁不设预拱度可能更为有益。因此，作出本条规定。

如跨径很大或者设计者综合考虑后认为需要设置预拱度，建议叠加预拱度后的主梁纵断面线形仍为圆曲线。

当建设条件不允许将梁拱组合结构的纵断面设计为直线或圆曲线时，处理方法参见第8.1.5~8.1.6条的条文说明。

#### 8.1.4 顶推施工梁拱组合结构的钢主梁梁高不宜小于最大顶推跨径的 $1/25$ 。

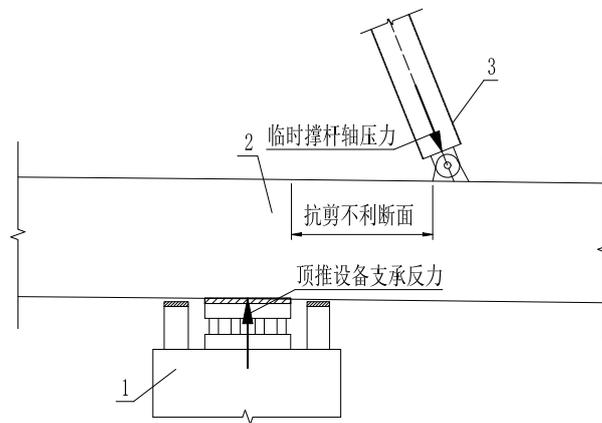
条文说明：由于顶推施工是一个支承状态不断发生变化的过程，在顶推施工的某些阶段梁拱组合结构的钢主梁会承受垂直于主梁的强大集中力（临时支承反力），主梁应具备一定的竖向抗弯刚度。设计时如建设条件允许，宜加大梁拱组合结构钢主梁梁高以提高主梁的竖向抗弯刚度（相应的顶底板厚度可适当减薄以保证经济性）。如主梁梁高过小，可能会需要更多的临时设施。例如，浙江宁波新典桥因梁高为 $2.34\text{m}$ ，为最大顶推跨径的 $1/30$ ，施工过程中采用了格构式竖向满布的拱内临时撑杆，临时结构用量和顶推体重量显著增加。云南泸水怒江连心桥梁高 $2\text{m}$ ，为最大顶推跨径的 $1/40$ ，该桥采用了网状吊杆，顶推施工时网状吊杆已经安装，对顶推施工时的结构受力有一定改善作用，但该桥顶推施工时斜向布置的拱内临时撑杆数量仍较多，临时结构用量也比较大。

#### 8.1.5 顶推施工梁拱组合结构的主梁腹板厚度宜根据成桥运营阶段的受力要求确定，并应对顶推施工阶段的抗剪性能进行验算。

条文说明：钢箱梁、钢-混组合梁及梁拱组合结构顶推过程中要求顶推设备（抄垫）与主梁接触面间的相互作用竖向力直接传递到主梁的腹板上。由于腹板

直接承受顶推设备传递的反力,腹板的受力特性与成桥状态有较大的区别。此外,顶推过程中的总体结构状态、支承体系与成桥运营阶段有非常大的区别,进一步造成了腹板受力状态与成桥状态显著不同。但实际工程中,工程人员往往重点关注顶、底板应力状态,对腹板的应力状态则关注较少,因此,此条规定可起到提醒作用。

对于梁式结构,腹板顶推阶段的受力一般不会大幅超过成桥运营阶段,但对于梁拱组合结构,情况有所不同。首先,当顶推设备支承点与拱内临时撑杆梁上节点在纵向相距较近时,两点之间的腹板所受剪力较大;此外,在顶推设备支承点位置,腹板下方受到纵向、竖向两向压力作用,存在局部失稳的可能。因此,应特别关注梁拱组合结构腹板在顶推施工阶段的抗剪性能和局部稳定性能。



图\* 梁拱组合结构腹板剪力不利状态图示

1——顶推支墩; 2——主梁; 3——拱内临时撑杆

为了保证经济性,一般不建议因为顶推施工而对腹板板厚进行全面加厚,或大幅增加腹板的加劲肋。建议设计时按照成桥运营阶段的受力状况确定腹板厚度和加劲肋布置,再对顶推施工阶段进行验算。当顶推施工阶段部分区段的腹板不能满足抗剪要求或局部稳定性能要求时,建议首先检查拱内临时撑杆的布置方式是否合理、顶推设备与主梁接触面顺桥向长度是否可以加大。如不能改变拱内临时撑杆和顶推设备的设计,可以对该区段的腹板进行局部加厚或局部增设适量加劲肋。

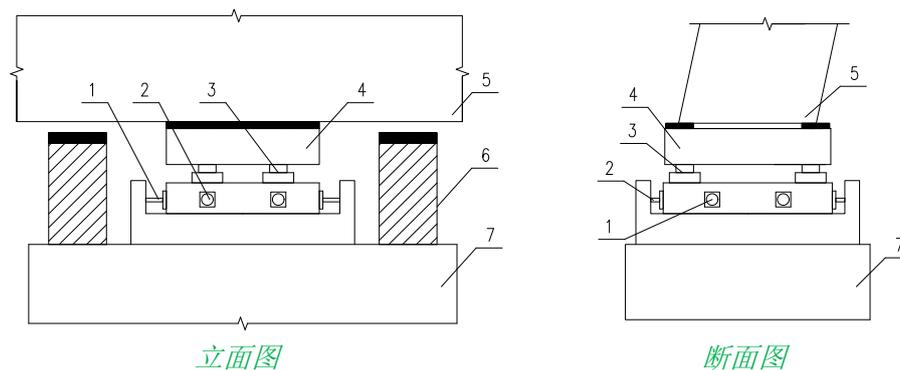
**8.1.6** 顶推施工的钢箱梁、钢-混组合梁、梁拱组合结构宜使顶推设备与主梁接触面间的竖向力直接传递到主梁的腹板中,顶推设备与主梁接触面顺桥向长度应根据腹板受力要求确定。

条文说明: 钢箱梁、钢-混组合梁及梁拱组合结构在顶推施工过程中主梁会

受到顶推设备的竖向支承力作用。主梁底板抵抗面外力的能力很弱，若直接承受顶推设备的分配梁、抄垫与主梁接触面之间的竖向力，需对底板进行额外加强，很不经济，因此，设计时应应对顶推设备提出控制要求，使其与主梁接触面间的相互作用竖向力直接传递到主梁的腹板上。为了尽量减少腹板受该竖向力的影响，应使该竖向力在顺桥向均匀扩散，且扩散范围越大越好。因此，要求顶推设备与主梁接触面顺桥向长度需要达到一定的长度，该长度根据腹板受力要求确定。

顶推设备与主梁接触面顺桥向长度越大，腹板受力越小，但同时顶推支墩顺桥向尺寸的要求也越高、顶推设备的尺寸也越庞大。因此，该长度除应根据腹板受力要求进行计算外，建议还要考虑顶推支墩顺桥向尺寸、现有顶推设备尺寸等因素后综合确定。

当不具备将顶推设备与主梁接触面间的相互作用竖向力直接传递到主梁的腹板的条件时，应确保该竖向力传递至主梁内的竖向板件（如横隔板等），进而平顺传递给主梁结构。无论何种条件下，均不应使主梁底板直接承受该竖向力。



图\* 步履式顶推工法示意图

1——平推千斤顶；2——横向纠偏千斤顶；3——竖向千斤顶；4——分配梁；5——顶推体；6——抄垫；7——顶推平台（顶推支墩）

8.1.7 顶推施工钢箱梁、钢-混组合梁、梁拱组合结构的主梁腹板应根据顶推施工最不利受力进行局部稳定验算，并根据计算结果进行局部加劲设计。

8.1.8 顶推施工钢箱梁、钢-混组合梁、梁拱组合结构的钢主梁底板板厚变化宜采用外缘对齐的布置方式。

条文说明：钢主梁采用外缘对齐的方式可保证底板底面为一个平面，方便顶推施工。

8.1.9 顶推设备支撑点位于边腹板时，钢箱梁、钢-混组合梁、梁拱组合结构的钢主梁底板相对于边腹板的伸出翼缘宽度不宜小于 50mm。

*条文说明：钢主梁底板翼缘伸出肢达到一定的宽度可保证顶推设备和抄垫与主梁底板的良好接触。*

## 8.2 临时结构设计

8.2.1 顶推临时结构设计应包括顶推平台、临时墩、导梁、拱内临时撑杆等结构设计。

*条文说明：利用桥墩结构作为顶推支墩时，如桥墩结构墩顶尺寸不满足顶推设备、抄垫及顶推作业等要求，可在桥墩旁设置临时托架。*

8.2.2 顶推施工临时结构设计应考虑桥梁主体结构、顶推工法、施工环境及既有物资设备等因素。

8.2.3 顶推施工时应在墩顶设置抄垫。抄垫设计应符合下列规定：

- 1 抄垫宜在顶推设备两侧沿顺桥向对称设置。
- 2 抄垫横桥向中心位置应与主梁腹板中心位置对应。
- 3 抄垫叠置应满足稳定性要求，高宽比不应大于 3。
- 4 抄垫纵向长度应满足主梁腹板局部受力要求。

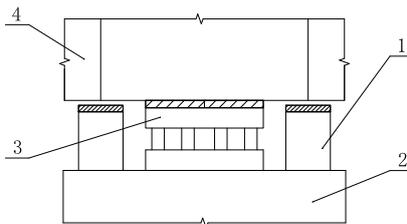


图 8.2.1 顶推设备、抄垫布置示意图

1——抄垫；2——顶推平台；3——顶推设备；4——顶推体。

*条文说明：步履式顶推设备的工作特点是步进运行，需要设置抄垫进行载荷的切换。宜在步履机的前后两侧各设置 1 个临时抄垫，空间尺寸有限的情况下可在一端设置 1 个抄垫，同时要求抄垫采用合理的构造，以保证抄垫与主梁接触面间的相互作用竖向力直接传递到主梁的腹板中。抄垫具备足够的刚度和纵向尺寸，以保证其与主梁接触面间的相互作用竖向力在纵向均匀扩散至需要的范围。*

*顶推设备竖向顶升时，主梁会受到顶推设备的竖向支承力作用。主梁底板抵*

抗面外力的能力很弱，若直接承受顶推设备与主梁接触面之间的竖向力，需对底板进行额外加强，很不经济，因此，设计时应应对顶推设备提出控制要求，使其能够确保与主梁接触面间的相互作用竖向力直接传递到主梁的腹板上。为了尽量减少腹板受该竖向力的影响，应使该竖向力在顺桥向均匀扩散，且扩散范围越大越好。但扩散范围越大，对桥墩顺桥向尺寸的要求也越高、顶推设备的尺寸也越庞大。因此，规定扩散长度应根据腹板受力要求进行计算并考虑桥墩顺桥向尺寸、顶推设备尺寸等因素后综合确定。

8.2.4 步履式顶推施工宜在顶推设备顶面和抄垫顶面设置保护垫块。

条文说明：顶推设备顶面、抄垫顶面设置保护垫块主要起到均匀受力和减少冲击力的作用。

8.2.5 顶推平台及临时墩基础应根据施工现场条件和地质条件确定。

8.2.6 顶推施工跨越航道、道路时，应对临时墩进行防撞设计，并应符合下列规定：

1 涉航道施工应进行航道安全、防撞安全保障措施专项设计，并应符合现行国家标准《内河通航标准》GB 50139 的规定。

2 涉路施工应进行控制作业区、安全防护设施的专项设计，并应符合现行行业标准《公路养护安全作业规程》JTG H30 和现行本市地方标准《城市道路养护维修作业安全技术规程》DG/TJ 08-2183 的规定。

8.2.7 顶推平台轴线应与桥梁主体结构轴线的延长线或合理顶推轨迹线重合。顶推平台长度宜不小于 3 个梁段的长度，同时应满足梁段拼装和顶推施工的要求。

8.2.8 顶推平台和临时墩顶应设置可调整顶推体平面位置以及高程的装置，平曲线上顶推施工时，应满足顶推体曲线偏转要求。

8.4.12~8.4.13 条文说明：顶推平台作为顶推施工桥梁拼装和顶推施工始发场地，顶推平台的长度主要考虑满足梁段无应力线形安装、顶推设备安装以及顶推施工作业等空间需要确定，顶推平台的标高根据顶推线形（桥梁主体结构纵坡）、千斤顶与滑靴等顶推设备高度、落梁高度等确定。

顶推过程中，避免顶推体因偏离顶推轨迹线、受力不平衡，梁底与临时支撑结构不密贴产生局部应力过大，因此需要在顶推平台和临时墩顶设置可调整桥梁主体结构平面位置以及高程的装置。根据《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T

3650-2020) 相关规定, 台座的轴线应与桥梁轴线的延长线重合, 纵坡应一致, 两轴线间的偏差应不大于 5mm; 相邻两支承点上台座中滑移装置的纵向顶面高程差应不大于 2mm; 同一支承点上滑移装置的横向顶面高程差应不大于 1mm; 台座 (包括滑移装置) 和梁段底模板顶面高程差应不大于 2mm。

8.2.9 导梁宜根据运输拼装条件采用分节设计拼装, 节段间连接宜采用高强螺栓连接, 横桥向多榀导梁之间应设置横向连接系。

8.2.10 导梁设计宜使桥梁主体结构在顶推施工过程中的最大内力与承载能力接近, 且应符合下列规定:

1 导梁长度宜为最大顶推跨径的 0.6~0.8 倍, 其刚度宜为主梁刚度的 1/9~1/15。

2 导梁与主梁连接可采用焊接连接、高强螺栓连接等方式, 并应满足等强连接要求。

3 导梁与主梁的主要受力板件应对应设置, 当不对应时应设置过渡连接构造。

4 导梁宜采用底板齐平的变高度梁, 且应与主梁底面齐平, 导梁前端应采用上墩时的挠度补偿措施, 补偿措施可采用导梁前端底面台阶构造 (图 8.4.16) 或液压顶升装置等。

5 导梁可采用腹板开孔等措施减轻自重。

6 平曲线顶推施工时, 导梁可设置成直线, 并与桥梁主体结构偏转一定的角度, 使导梁前端的中心落在设计圆曲线或合理顶推轨迹线上。

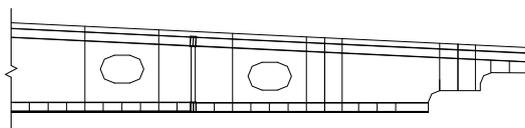


图 8.2.2 导梁前端底面台阶构造示意图

条文说明: 顶推过程中, 导梁前端会下挠, 在导梁前端即将上墩时, 需要对端部进行抬高, 所以在设定导梁长度时, 不能一味加长, 还要控制端部最大挠度, 常见做法有: ①在控制导梁自重的基础上增加其刚度, 可采用双拼工字形或桁架结构导梁, 工字形导梁的腹板可适当开孔降低自重, 也可减小风阻。②导梁前端采用底面台阶构造或液压顶升装置, 可在一定程度上提高施工便利性。

导梁可设置成直线形, 且导梁前端的中心应落在设计线形的中线上, 以确保顶推过程中的精确导向和线形控制, 顺利上墩。

8.2.11 梁拱组合结构顶推施工宜设置连接主拱和主梁的拱内临时撑杆，形成整体受力结构。拱内临时撑杆的设计应符合下列规定：

1 拱内临时撑杆的布置应根据梁拱组合结构的跨径、顶推跨径等因素比选确定，宜采用圆形钢管斜向交叉间隔布设（图 8.2.3）。

2 拱内临时撑杆应满足强度、刚度及稳定性要求。当轴压力较大时，可在拱内临时撑杆之间设置连杆以改善稳定性能。

3 拱内临时撑杆应与主拱、主梁可靠连接，连接构造应便于拆除，宜采用顺桥向可自由转动的销铰式连接。

4 拱内临时撑杆与拱肋、主梁的连接节点应进行局部受力分析计算。

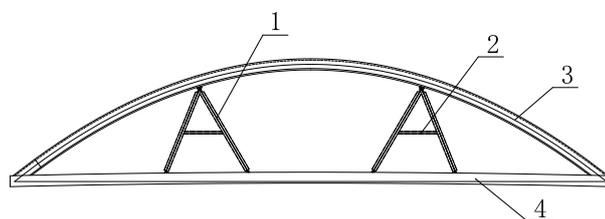
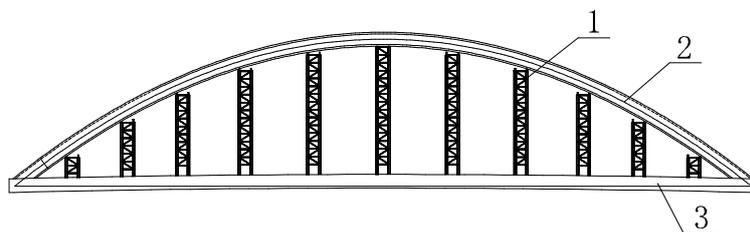


图 8.2.3 圆形钢管斜向交叉间隔布设示意图

1——临时撑杆；2——连杆；3——主拱；4——主梁。

*条文说明：* 在主拱和主梁之间设置拱内临时撑杆改变了顶推施工过程中力的传递途径和传递方式，可显著改善梁拱组合结构在顶推过程中的受力性能。拱内临时撑杆的布置方式对主梁、主拱的受力影响很大。选择合适的临时撑杆布置形式，可以在主梁、主拱受力合理的情况下更大程度地节省桥梁主体结构和临时结构材料用量。因此，建议对拱内临时撑杆布置方式进行计算比选，选择较优方案。当采用格构式布设时（图\*），布设方案宜与钢拱肋节段拼装支架一并考虑。



图\* 格构式临时撑杆竖向满布

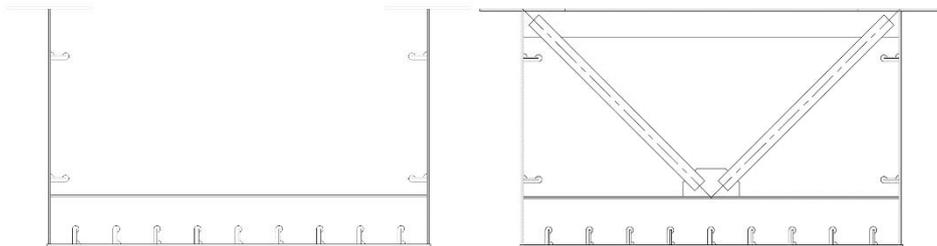
1——临时撑杆；2——主拱；3——主梁。

拱内临时撑杆对顶推过程的安全起着至关重要的作用，设计时除了保证临时撑杆本身的强度、刚度和稳定性能外，还必须保证其与主梁、主拱连接节点的可靠安全。从可靠性角度考虑，临时撑杆与主体结构可以采用固结的形式，但这样会使节点构造十分复杂，且顶推施工结束后的拆除工作也极为不便。为了方便顶

推结束后的拆除工作,建议拱内临时撑杆与主拱、主梁之间采用销铰式连接构造,即在主梁、主拱上设置耳板,临时撑杆通过穿过耳板的销轴与主梁、主拱进行连接,顶推结束后,拆除临时撑杆,并将主梁、主拱上的耳板予以割除。由于梁拱组合结构在顶推过程中可能受到横向风的作用,从避免临时撑杆节点在风载作用下产生横向弯矩的角度来看,连接节点以销轴可横桥向自由转动为宜;但是,梁拱组合结构在恒载作用下以纵向受力为主,且纵向变形随着顶推进程不断改变,采用顺桥向可以自由转动的销铰式连接构造,能够减少顶推过程中梁拱组合结构纵向变形引起的附加弯矩。考虑到恒载是顶推过程中无法回避、一直存在的,而风荷载可以通过施工控制进行规避,或者通过辅助控制措施减小其影响。因此,拱内临时撑杆与主梁、主拱之间宜采用顺桥向可自由转动的销铰式连接构造。

8.2.12 当顶推钢梁为开口槽型断面时,顶推施工前应设置防失稳的临时措施。

条文说明:钢-混组合梁在顶推过程中,钢梁部分一般为开口槽型断面(图\*)。由于开口断面的抗扭性能相对较差,为防止顶推过程中,梁体出现扭转变形,需要在开口区域布置横撑和斜向撑杆(图\*),提升箱体的稳定性。



图\* 槽型梁原始断面

图\* 槽型梁强化断面

### 8.3 机具设备要求

- 8.3.1 顶推设备应根据结构特点、顶推工法和现场条件选用,符合安全可靠、经济合理的要求。
- 8.3.2 顶推设备与梁体接触面强度应满足设计要求,确保钢梁受力不发生应力集中而失稳。
- 8.3.3 顶推设备安装位置应设置在梁体底腹板夹角处、纵向隔板加劲等刚度较大部位。
- 8.3.4 步履式顶推的速度不宜大于 10m/h。

8.3.5 顶推施工应采用机电液协同同步控制技术，顶推设备的液压油缸应具备负载保持功能。

*条文说明：保压装置采用平衡阀、液压锁或机械锁，可避免设备异常停机或爆管等故障导致的设备突降或水平移位。*

8.3.6 桥梁宜沿上坡方向进行顶推，当顶推纵坡大于 3.5%时，应设置反向制动装置。

8.3.7 步履式顶推设备应由步履机、液压泵站和控制系统组成。步履式顶推设备规格型号应包含步履机的额定竖向顶升力指标。

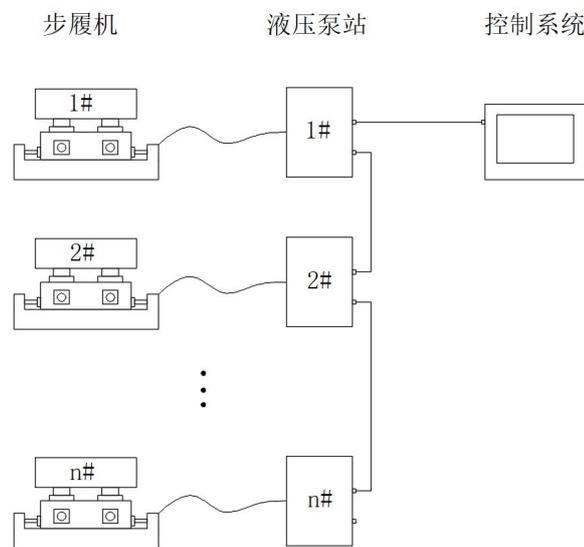
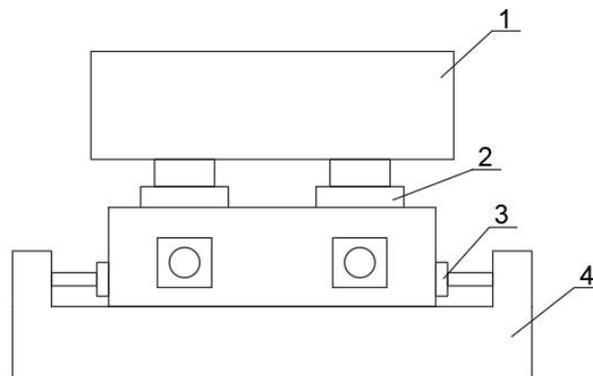
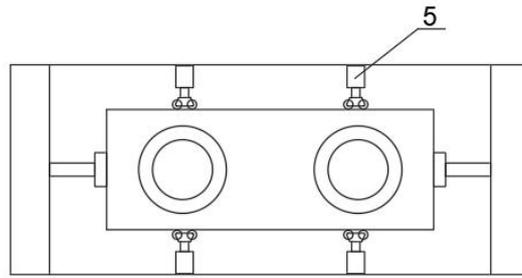


图 8.3.5 步履式顶推设备组成图

8.3.8 步履机应包含分配梁、竖向顶升油缸、水平顶推油缸、底座和横向纠偏油缸，应具备竖向、纵桥向和横桥向三向调节能力。



立面图



平面图

图 8.3.6 步履机一般组成图

1——分配梁；2——竖向顶升油缸；3——水平顶推油缸；  
4——底座；5——横向纠偏油缸。

8.3.9 单台步履机宜设置 2 台及以上的竖向顶升油缸，竖向顶升能力不应小于顶推时最大竖向力的 1.25 倍。

*条文说明：单台步履机设置单台竖向顶升油缸易发生倾翻事故。步履机竖向顶升油缸设置 2 台及以上数量可增大设备纵桥向的稳定性。*

8.3.10 单台步履机的水平顶推能力应不小于额定竖向顶升力的 0.1 倍。

8.3.11 单台步履机宜设置 4 台及以上横向纠偏油缸，纠偏能力应不小于额定竖向顶升力的 0.1 倍，横向纠偏油缸应横桥向对称布置。

8.3.12 步履机的底座滑移面应设置不锈钢板与高分子工程塑料合金材料组成的摩擦副，摩擦系数不应大于 0.06，摩擦面须保持清洁及良好的润滑。

8.3.13 液压泵站的配置方式应根据顶推设备的数量、分布及顶推速度等要求确定。各项推设备的运行压力应能独立调节，不应并联使用。

8.3.14 纵桥向顶推设备不宜共用液压泵站，液压泵站与顶推设备之间的管路长度不宜超过 20m。

*条文说明：通过泵站布置位置以缩短管路长度，可减小液压系统的压力损失，并降低爆管风险。*

8.3.15 液压泵站的额定压力应与顶推设备的额定压力相匹配，额定压力不宜大于 31.5MPa。

*条文说明：31.5MPa 适用于中等压力的液压系统，常见于工程机械和重型机械，该系统可选用的液压元件较为通用和成熟。*

8.3.16 液压泵站与顶推设备之间宜采用高压软管连接,高压软管应配备快速接头。

*条文说明: 使用液压快速接头,可方便对设备进行快速的连接和拆除,并可防止油液泄漏。*

8.3.17 控制系统应由传感检测装置、计算机控制中心和网络通信系统组成。控制系统宜应用智能化和信息化技术,具备智能控制功能。

8.3.18 计算机控制中心应具备同步与异步、手动与自动、自锁与互锁以及故障指示与报警等功能。应具备友好的交互界面,操作者应能直观查看各设备的运行状态,并对各设备进行统一或独立操控。

8.3.19 传感检测装置应具备实时采集功能,能实时监测各设备的运行状态及故障状态。

8.3.20 网络通信系统应采用有线或无线方式。网络通信系统应运行稳定,网络延迟不应大于 300ms。

## 8.4 结构计算

8.4.1 顶推施工结构计算应包含下列内容:

- 1 桥梁主体结构顶推过程的强度、刚度和稳定性验算。
- 2 混凝土梁顶推过程的抗裂验算。
- 3 临时结构顶推过程的强度、刚度和稳定性验算。
- 4 临时结构与桥梁主体结构的连接验算。

8.4.2 顶推施工结构计算应符合现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001和现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的相关规定,应对起控制作用的极限状态进行计算。

8.4.3 结构分析模型应模拟施工过程,应符合下列规定:

- 1 结构分析模型应反映施工过程中结构的边界条件、刚度与重量分布。
- 2 总体分析宜采用空间杆系模型。
- 3 对于临时结构与桥梁主体结构连接部位等受力复杂的关键节点宜进行局部有限元分析。

条文说明：顶推结构施工计算时，设计人员除对结构进行总体计算分析外，必要时还应对临时结构与桥梁主体结构连接部位、承受较大集中荷载部位、传力不明确或构造复杂部位的关键节点进行局部有限元分析。

#### 8.4.4 作用应符合下列规定：

1 作用于顶推支墩的纵向水平力作用值按照下式计算：

$$F = KN\mu \dots\dots\dots 8.5.4$$

式中：

K——控制水平影响系数，根据顶推的同步控制水平确定，可取 1.2~1.5。

N——顶推支墩的最大支反力（kN）。

$\mu$ ——顶推体静摩擦系数  $\mu$ ，宜通过试验确定，无试验数据时，步履式顶推可取 0.06，拖拉式顶推可取 0.08。

2 顶推结构横向纠偏时，作用于顶推支墩的横向水平力作用值可按式 8.5.4 计算。

3 流水压力及汽车撞击力计算等应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的相关规定执行。

条文说明：本条有关结构作用的规定，兹说明如下：

1 下部结构或临时墩计算时，还需考虑滑道及钢垫板自重、动力系统自重、支撑架自重等。

2 顶推施工是一个支承状态不断发生变化的过程，不同支承状态下顶推主体结构的受力状态大不相同。没有必要要求每一个状态都能承受极端风荷载作用。

顶推行进作业应在气象条件较好的环境中开展，根据工程实践经验，顶推行进作业时的风力等级不宜超过 6 级风（6 级风对应的风速范围为 10.8m/s~13.8m/s）。同时，在顶推行进作业中应密切关注气象变化，如果可能遭遇超出该验算风速的极端天气，可将顶推体提前停顿在受力状态较好的位置，并做好相应的抗风措施。在保证顶推行进作业时风力等级不超过 6 级风的情况下，顶推行进中的基本风速可偏安全地取 15m/s。

对于非顶推行进过程中的结构验算，设计风速可按现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01-2018 第 4.2.9 条确定，顶推施工桥梁的施工年限一般不超过 3 年。

8.4.5 顶推总体分析时,应根据结构的受力特点按一定的分析步长进行结构计算,并应对计算工况进行包络分析,计算工况应包含:

- 1 前端上墩前、后工况。
- 2 后端脱墩前、后工况。
- 3 最大弯矩工况。
- 4 最大支反力工况。

*条文说明: 结构在顶推施工过程中的内力状态不断发生变化,为了真实反映这一变化,应根据结构的受力特点,确定合理的分析步长进行结构计算,尤其不能遗漏工况 1~工况 4 等关键控制工况。*

8.4.6 梁拱组合结构顶推总体分析时,除应满足 8.5.5 条外,计算工况还应包含:

- 1 梁拱组合结构拱内临时撑杆最大轴力工况。
- 2 梁拱组合结构主梁最大剪力工况。

8.4.7 混凝土结构验算应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的相关规定。

*条文说明: 顶推施工的混凝土结构验算应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362-2018 的相关规定,并尤其关注混凝土结构的抗裂验算、局部承压验算等。*

8.4.8 钢结构验算应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的相关规定,临时墩和顶推平台钢结构验算可按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 相关规定执行。

8.4.9 顶推施工过程中顶推体的抗倾覆稳定系数不应小于 1.5。

*条文说明: 顶推体的纵向抗倾覆稳定性验算不满足要求时,可采用配重等方式,提高顶推体的纵向抗倾覆稳定系数。顶推体的横向抗倾覆稳定性主要受风荷载影响,对于梁拱组合结构、桁架等结构高度较高、迎风面较大的结构(尤其是窄桥),需尤其关注顶推体的横向抗倾覆稳定验算。*

8.4.10 顶推施工过程应进行钢结构腹板局部稳定性验算。

*条文说明: 顶推施工过程中,在顶推设备支承点位置,腹板下方受到剪应力和纵向、竖向两向压力作用,存在局部失稳的可能。因此,需要特别关注钢结*

构腹板的局部稳定性能。现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 第 5.3.3 条关于钢结构腹板局部稳定的验算方法只考虑了剪应力和纵向正应力，不支持三向复合应力作用下的腹板稳定性验算，需采用其他更精确的方法计算。

现行行业标准《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091-2017 条文说明第 8.0.6 条提供了关于板梁腹板整体稳定和板块局部稳定的验算方法，可支持三向复合应力作用下的腹板稳定性验算。其中，安全系数  $V$  的计算公式可参考由兰州铁道学院工程系结构研究室和铁道部第三勘测设计标准处所著，由人民铁道出版社于 1978 年出版的《箱型钢梁薄腹板稳定》一书。

有限元方法也可验算钢结构腹板的局部稳定性。准确分析钢腹板的局部稳定性能应采用非线性分析方法。但实际工作中，大多数工程技术人员更倾向于采用更为方便的线弹性稳定分析方法。目前，尚无国家或行业标准对线弹性稳定系数进行明确规定，设计人员普遍用线弹性稳定系数 4.0 作为衡量成桥运营阶段稳定性能的标准。顶推施工阶段为短暂工况，要求可以适当降低。已有的工程案例杭州市九堡大桥，在衡量顶推施工阶段腹板局部稳定性能时，按照恒载下的线弹性稳定系数不低于 3.0 控制，恒载+风荷载下的线弹性稳定系数不低于 2.5 控制，按此标准进行设计的该桥在顶推施工过程中腹板状态良好。顶推施工过程中的钢腹板失稳与施工控制工艺密切相关，钢腹板稳定计算只是控制钢腹板失稳的基础，施工控制工艺对钢腹板失稳的影响尤其重大。顶推施工过程中，应保证顶升点与腹板的严格对正，保证顶推体与垫块的充分接触，并控制好抄垫质量。

## 9 质量检验

### 9.1 一般规定

9.1.1 原材料及构配件进场后应对材质、规格尺寸、焊接质量、螺栓连接质量、外观质量等进行检查验收，建筑钢结构工程应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的相关规定。桥梁工程应符合现行行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2、《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1 的相关规定。

9.1.2 进入现场的新购原材及构配件应具备下列证明材料：

1 产品标识及产品质量合格证。

2 供应商配套提供的型材、铸件、冲压件、常备式定型钢构件等材料的材质、产品性能检验报告。

9.1.3 重复使用的材料及构配件应经检查合格后方可使用。

### 9.2 同步提升质量检验

9.2.1 被提升结构提升点的位置应与提升点在同一铅垂线上，水平偏差不应大于提升高度的 1/1000，且不应大于 50mm。

9.2.2 提升点的连接构造和结构调整、加固的部位应按设计要求检查验收。

9.2.3 被提升工程结构的组装与拼装应满足现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 及结构设计的相关规定。

9.2.4 提升支承结构的组装与拼装应满足现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 及结构设计的相关规定。

9.2.5 提升支承结构基础验收应符合现行国家标准《重型结构和设备整体提升技术规范》GB 51162 的相关规定。

### 9.3 同步滑移质量检验

- 9.3.1 滑移施工前，应对滑移支架、滑移轨道、结构单元进行质量验收。
- 9.3.2 当结构划分单元长度不大于 20m 时，拼接长度允许误差为±10mm，当结构划分单元长度大于 20m 时，拼接长度允许偏差为±20mm。
- 9.3.3 每 12m 长轨道的垂直方向的弯曲矢高不宜大于 8mm；每 12m 长轨道的中心线定位偏差不应大于 5mm，滑移限位偏差不应大于 10mm。
- 9.3.4 滑移施工前，应分别对液压顶推滑移系统的液压顶推器、液压泵源系统、计算机控制系统进行质量验收。
- 9.3.5 滑移轨道安装检验应符合表 9.3.5 的规定。

表 9.3.5 滑轨安装允许偏差

检查项目	允许值
直线度偏差	1mm/m
轴线偏差	5mm
同一条轨道轨顶高差	1mm/m
轨道接头处水平偏差	1mm
轨道接头处轨道面高差	1mm

- 9.3.6 滑移轨道压板预埋件的安装精度应符合表 9.3.6 的规定。

表 9.3.6 预埋件埋设允许偏差

检查项目	允许偏差
标高	±3mm
水平度	1/1000
轴线位置	±10mm

- 9.3.7 槽钢滑轨侧向挡板的安装精度应符合表 9.3.7 的规定。

表 9.3.7 侧向挡板安装允许偏差

检查项目	允许值
同一轨道相邻两块侧向挡板间距偏差	±L/500
同一轨道 30m 范围内任意两块侧向挡板间距偏差	±5mm
相邻轨道横侧向挡板间距向中心线偏差	±5mm

注：（1）检查数量：抽查 10%，且不小于 3 个；

（2）检验方法：全站仪、钢尺；

（3）L 表示相邻侧向挡板的中心间距。

- 9.3.8 滑移施工前，应对滑移支承结构安装质量、滑移结构安装质量进行质量

验收。

9.3.9 结构滑移安装完成及屋面工程完成后应分别测量结构挠度值，所测的挠度值不应超过现荷载条件下相应挠度计算值的 1.15 倍。

9.3.10 滑移结构就位安装后验收应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的相关规定。

## 9.4 步履式顶推质量检验

9.4.1 顶推平台及临时墩的质量检查项目、质量要求、检验方法和频率应符合表 9.4.1 的规定。

表 9.4.1 顶推平台及临时墩检验项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	总体质量	与基础接触面	密贴、平整	尺量：查看全部
		顶标高	-20, 0mm	水准仪测量
		联结系	位置准确，连接牢固	尺量：查看全部
2	立柱钢管	外观质量	纵轴线弯曲矢高 $\leq L/1000$ 且 $<10\text{mm}$ ，不应有严重锈蚀，脱皮	尺量：查看全部
		焊缝	外观质量符合设计要求	尺量：查看全部
3	柱顶分配梁	规格	符合设计要求	尺量：查看全部
		外观质量	弯曲矢高 $\leq L/1000$ 且 $<10\text{mm}$ ，不应有严重锈蚀	尺量：查看全部
		加工、安装质量	加劲符合设计要求，连接牢固	尺量：查看全部
		焊缝	外观质量符合设计要求	尺量：查看全部

注：L 为钢管立柱长度或梁长，以 mm 计。

9.4.2 临时墩混凝土扩大基础的检查项目、质量要求、检验方法和频率应符合表 9.4.2 的规定。

表 9.4.2 混凝土扩大基础检验项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	混凝土强度 (MPa)	在合格标准内	满足规范及设计要求
2	平面尺寸 (mm)	$\pm 50$	尺量：长度、宽度各测 3 处
3	基础顶面高程 (mm)	$\pm 30$	水准仪：测 5 处
4	轴线偏位 (mm)	$\leq 25$	全站仪：纵、横向各测 2 点
5	预埋件位置/数量	符合设计要求	全站仪和尺量，全部

9.4.3 临时墩沉入桩基础的检查项目、质量要求、检验方法和频率应符合表

9.4.3 的规定。

表 9.4.3 沉入桩检验项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	桩位 (mm)	群桩	$\leq D/2$ 且 $\leq 250$	全站仪：抽查 20% 桩，测桩中心坐标
		排架桩	$\leq 50$	
2	桩底高程 (mm)		$\leq$ 设计值	水准仪测桩顶面高程后反算
3	贯入度 (mm)		$\leq$ 设计值	与控制贯入度比较：每桩测量
4	倾斜度 (%)	直桩	$\leq 1$	铅锤法：每桩测量
		斜桩	$\leq 15 \tan \theta$	

注：1.D 为桩径或短边长度，以 mm 计。

2. $\theta$  为斜桩与垂线间的夹角。

9.4.4 导梁结构的材质、规格尺寸、焊缝质量应按现行行业标准《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》JTG/T 3651 的规定进行质量检验验收。

9.4.5 导梁安装检验应符合表 9.4.5 的规定。

表 9.4.5 导梁安装检验项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位 (mm)	$\leq 10$	全站仪：每段测 3 处
2	对接错边 (mm)	$\leq 2$	尺量：测各对接断面
3	焊缝尺寸	按一级焊缝检测	量规：检查全部，每条焊缝检查 3 处
4	焊缝探伤		超声法：检查全部
5	高强螺栓扭矩	$\pm 10\%$ 设计值	扭矩扳手：检查 5%，且不少于 2 个

9.4.6 顶推设备进场应提供产品手册、合格证明，压力表应具备相应的标定证书。

9.4.7 顶推设备现场检验应符合表 9.4.7 的规定。

表 9.4.7 顶推设备现场检验项目

序号	检查项目	规定值
1	顶推设备安装平面位置	满足设计要求，偏差 $\leq 5\text{mm}$
2	顶推设备滑移面	平面高差 $\leq 1\text{mm}$ ，均匀涂抹润滑油脂
3	液压管路连接	管路无漏接和破损，无油液泄漏
4	液压泵站油液液位	油液液位在允许标线以上
5	液压泵站最大系统压力	泵站压力应能调到最大系统压力
6	控制系统指令信号检查	各指令收发正常，无明显延迟

9.4.8 液压顶推系统应进行现场安装调试和检查验收，并应符合现行国家标准

《液压传动系统及其元件的通用规则和安全要求》GB/T 3766 的相关规定。

9.4.9 桥梁主体结构质量检验应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1 的相关规定。

9.4.10 桥梁主体结构检验项目应符合表 9.4.10 的规定。

表 9.4.10 桥梁主体结构检验项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位 (mm)		≤10	全站仪：每段测 2 处
2	落梁反力		满足设计要求；设计未要求时，≤1.1 倍的设计反力	查油压表读数：检查全部
3	支点高差 (mm)	相邻纵向支点	满足设计要求；设计未要求时，≤5	水准仪：检查全部
		同墩两侧支点	满足设计要求；设计未要求时，≤2	

9.4.11 桥梁主体结构外观质量应符合下列规定：

- 1 钢结构线形不得出现异常弯折、变形。
- 2 钢结构内外表面不得有凹陷、划痕、焊疤，边缘应无毛刺。
- 3 焊缝应无裂纹、焊瘤、气孔、夹渣、电弧擦伤、未焊透、未填满弧坑及设计不允许出现的外观缺陷，构件表面无焊渣和飞溅物。
- 4 终拧后高强螺栓丝扣外露应为 2 扣~3 扣，不符合的不应超过 10%，设计另有规定的除外。
- 5 钢结构防护损失的应修复。
- 6 顶推设备与桥梁主体结构的接触面不得有异常局部破损、变形及表观缺陷。