

④ 围堰结构应根据施工过程中的各种工况，按最不利荷载组合进行强度、刚度及稳定性计算。围堰内设置支撑的，除应对内支撑结构本身进行局部验算外，尚应将其与围堰作为整体进行总体稳定性验算；设置外支撑时，对支撑与堰壁的连接处应设置纵、横向分配梁予以局部加强，并考虑其对承台及后续墩身施工的干扰影响。

⑤ 钢围堰的混凝土封底厚度应符合设计规定；设计未规定时，应根据桩周摩擦力、浮力、围堰结构自重及封底混凝土自身强度等因素经计算后确定。

⑥ 钢围堰施工前应制定专项施工方案，明确施工工艺流程。

⑦ 围堰钢结构的制造可按照规范相关规定执行，保证其在施工过程中防水严密，不渗漏。

⑧ 岸上整体加工制造的钢围堰，当通过滑道或其他装置下水时，其进入的水域面积和水深应足够，并采取措施控制其下水的速度；采用起重船吊装时，起重船的吊装能力应能满足整体吊装的要求，各吊点的受力应控制均匀，必要时宜进行监控。

⑨ 钢围堰在灌注封底混凝土前，应将桩身和堰壁上附着的泥浆冲洗干净，经检验合格后方可进行封底混凝土的施工。封底施工可按《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 关于沉井基底检验与封底的规定执行。

⑩ 钢围堰拆除时，除应采取措施防止撞击墩身外，对水下按设计规定可不拆除的结构，尚应保证其不会对通航产生不利的影响。

#### （2）钢板桩围堰的施工应符合下列规定：

① 钢板桩的材质、性能和尺寸应符合产品的相应规定。钢板桩在存放、搬运和起吊时，应采取措施防止其变形及锁口损坏。经过整修或焊接后的钢板桩，应采用同类型的短桩进行锁口试验，合格者方可继续使用。

② 钢板桩施打前应设置测量观测点，控制其施打定位。

③ 钢板桩施打前，其锁口宜采用止水材料捻缝，防止在使用过程中漏水。

④ 施打钢板桩应有导向装置，以保证桩的位置准确。施打顺序应遵照施工技术方案，宜从上游开始分两头向下游方向合龙。施打时应随时检查其位置和垂直度是否准确，不符合要求的应立即纠正或拔起重新施打。施打完成后，所有钢板桩的锁口均应闭合。

⑤ 同一围堰内采用不同类型的钢板桩时，宜将不同类型桩的各半拼焊成一根异形钢板桩，分别与相邻桩进行连接。接长的钢板桩，其相邻桩的接头位置应上下错开。

⑥ 拔除钢板桩前，应向堰内注水使堰内外的水位保持平衡。拔桩应从下游侧开始逐步向上游侧进行，拔除的钢板桩应对其锁口进行检修并涂油，堆码妥善保存。

#### （3）锁口钢管桩围堰施工除应符合钢板桩围堰施工的相关规定外，尚应符合：

① 钢管的材质和截面特性应满足围堰受力的要求。锁口形式应根据土层地质情况和止水要求确定。用于水中或透水性土层中的围堰时，应对锁口采取可靠的止水处理措施。

② 施打钢管时，如土层中有孤石、片石或其他障碍物，其底口应作加强处理。

#### （4）钢套箱围堰的施工应符合下列规定：

① 对有底钢套箱，除应进行结构的计算和验算外，尚应针对套箱内抽干水后的工况进行抗浮验算。钢套箱采用悬吊方式安装时，应验算悬吊装置及吊杆的强度是否满足

受力要求。

② 钢套箱应根据现场设备的起吊能力和移运能力确定采用整体式或装配式制作，制作时应采取防止接缝渗漏的措施。

③ 钢套箱下沉就位过程中应保持平稳。当采用多个千斤顶吊放时，应使各千斤顶的行程同步，宜设置导向装置或利用已成桩作为导向的承力结构进行准确定位。钢套箱就位后应对其平面位置和高程进行精确调整，并及时予以固定；当水流速度过大而使套箱的位置发生改变时，应具有稳定套箱的可靠措施。

④ 有底钢套箱在浇筑封底混凝土前，应对底板和钢护筒的表面进行清理，并采用适宜的止水装置或材料对底板与桩基之间的缝隙进行封堵。

⑤ 钢套箱内的排水应在封底混凝土符合设计规定的强度或达到设计强度的80%及以上时方可进行。封底混凝土未达到规定强度前，应打开套箱上设置的连通器，保持套箱内外水头一致。排水不应过快，排水过程中应加强对套箱情况变化的监测；对有底钢套箱，必要时可设反压装置，抵抗过大的浮力。

⑥ 钢套箱侧壁兼作承台模板时，其位置和尺寸应符合承台结构的允许偏差规定。

(5) 双壁钢围堰的施工应符合下列规定：

① 围堰的双壁间距应根据下沉时需要克服的浮力、土层摩阻力及基底抗力等经计算确定，并在双壁之间分设多个对称、横向互不相通的隔水仓。

② 双壁钢围堰兼作钻孔平台时，应将钻孔施工产生的全部荷载及各种工况加入围堰结构最不利荷载组合中进行设计和验算。钢围堰需度汛或度凌施工时，应制定稳定和防撞击、防冲刷的可靠方案，并进行相应的验算。

③ 双壁钢围堰结构的制作宜在工厂按设计要求进行，各节、块应按预定的顺序对称组装拼焊。制作完成后应进行焊接质量检验，并进行水密性试验。

④ 围堰应根据现场的水文、地质和通航等情况，设置可靠的定位系统和导向装置，其浮运、下沉、定位等工序的施工及允许偏差应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020关于沉井施工的相关规定。

⑤ 围堰下沉至设计高程，在灌注封底混凝土前，应对河床面进行清理和整平。围堰置于岩面上时，宜将岩面整平；基岩岩面倾斜或凹凸不平时，宜将围堰底部制作成与岩面相应的异形刃脚，增加其稳定性并减少渗漏。

### 3) 承台模板、钢筋施工与混凝土浇筑

(1) 承台模板一般采用组合钢模，施工前必须进行详细的模板设计，以保证使模板有足够的强度、刚度和稳定性，能可靠地承受施工过程中可能产生的各项荷载，保证结构各部分形状、尺寸的准确。模板要求平整，接缝严密，支撑牢固，拆装容易，操作方便。

(2) 承台施工前应进行桩基等隐蔽工程的质量验收，桩顶混凝土面应按水平施工缝的要求凿毛，桩头预留钢筋上的泥土及锈蚀等应清理干净。

承台基底为软弱土层时，应按设计要求采取措施，避免在浇筑承台混凝土过程中产生不均匀沉降。承台底位于河床以上的水中时，应采用有底吊箱或利用桩基、临时支撑等在水中将承台模板支撑和固定，承台模板安装完毕后抽水、堵漏，即可在干处浇筑承台混凝土。

(3) 承台钢筋就位和混凝土浇筑应在无水条件下进行，并根据地质、地下水位和基坑内的积水等情况采取防水或排水措施。钢筋制作严格按技术规范及设计图纸的要求进行，墩身预埋钢筋位置要准确、牢固。应采取有效措施，使承台钢筋的混凝土保护层厚度符合设计规定。桩伸入承台的长度以及边桩外侧与承台边缘的净距应不小于设计规定值。

(4) 承台混凝土的配制、运送、浇筑及养护按前述混凝土工程施工的要求进行；若承台结构属于大体积混凝土，则应按大体积混凝土的技术要求进行施工。

### 3.4.6 桥墩与桥台施工

#### 1. 桥墩施工

钢筋混凝土桥墩施工一般在现场就地整体浇筑或分节段浇筑，桥墩高处作业的施工安全应符合相关规范的规定。

##### 1) 高度小于40m的桥墩施工

(1) 桥墩施工前，应对其施工范围内基础顶面的混凝土进行凿毛处理，将表面的松散层、石屑等清理干净；对分节段施工的桥墩，其接缝亦应作相同的凿毛和清洁处理。

(2) 应尽量缩短首节桥墩墩身与承台之间浇筑混凝土的间隔时间，间歇期宜不大于10d。当不能满足间歇期要求时，应采取防止墩、台身混凝土开裂的有效措施。墩身平面尺寸较大时，首节墩身可与承台同步施工。

(3) 桥墩高度小于或等于10m时可整体浇筑施工；高度超过10m时，可分节段施工，节段高度宜根据施工环境条件和钢筋定尺长度等因素确定。上一节段施工时，已浇节段的混凝土强度应不低于2.5MPa。各节段之间浇筑混凝土的间歇期宜控制在7d以内。

(4) 桥墩钢筋可分节段制作和安装并保证其连接精度；条件具备时，可采用整体制作、整体安装的方式施工，但在制作、存放、运输和安装时应采取有效措施保证其刚度，避免产生过大的变形。

(5) 模板安装前，应在基础顶面放出桥墩的轴线及边缘线；对分节段施工的桥墩，其首节模板安装的平面位置和垂直度应严格控制。模板安装过程中应通过测量监控措施保证桥墩的垂直度，并有防倾覆的临时措施；对风力较大地区的墩身模板，应考虑其抗风稳定性。

(6) 浇筑混凝土时，串筒、溜槽等的布置应便于混凝土的摊铺和振捣，并明确划分工作区域。混凝土浇筑完成后，及时进行养护，养护时间应不少于7d。

(7) 作业人员的上下步梯宜采用钢管脚手架或专用产品搭设，并进行专项设计，设置时应固定在已浇筑完成的墩身上。

##### 2) 高度大于或等于40m的高墩施工

高度大于或等于40m的高墩施工，除应符合上述高度小于40m的桥墩施工要求之外，尚应符合下列规定：

(1) 应编制专项施工方案，对各项临时受力结构和临时设施应进行必要的施工设计计算和验算。

(2) 宜设置塔式起重机或其他可靠的起重设备，用于施工期间钢筋或其半成品材料以及其他材料的垂直起吊运输。

(3) 宜设置施工电梯作为运送作业人员和小型机具、操作工具的垂直运输设施。

(4) 塔式起重机和施工电梯的平面位置宜根据环境条件和桥墩的结构特点进行比较选择，其布置除应方便施工操作外，不应影响到其他作业的安全。塔式起重机和施工电梯均应有可靠的附墙安全措施。

(5) 模板体系宜根据施工的环境条件、桥墩截面形式的特点、分节段施工高度、施工作业人员的经验等因素综合选择确定，模板的施工要求应符合相关规定。

(6) 绑扎和安装钢筋时，应在作业面设置具有外围护的操作平台。当采用劲性骨架辅助钢筋安装时，劲性骨架宜在地面上制作好后再起吊就位安装。整体制作安装的钢筋应有保证刚度防止变形的可靠措施。主筋宜采用机械方式连接。

(7) 混凝土的垂直输送宜采用泵送方式，泵管可沿已施工完成的墩身或搭设专用支架进行布设，而不应布设在塔式起重机和施工电梯上。

(8) 混凝土的浇筑应符合相关规定，每一节段混凝土的养护时间应不少于7d。养护用的水管可布设在墩身上，且应与电缆分开设置。

(9) 高墩施工前应编制测量控制方案，施工过程中应对墩身的平面位置和垂直度进行监控，条件具备时宜采用激光铅垂仪进行控制。施工测量应考虑日照对墩身扭转的影响。当日照影响较大时，测量宜在夜间气温相对稳定的时段进行。

## 2. 桥台施工

桥台在施工前应在基础顶面测量放样出台身的纵、横向轴线和内外轮廓线，其平面位置应准确。当台身较宽需要设置沉降缝时，应在施工前确定其设置位置。

### 1) 重力式桥台施工

(1) 混凝土或钢筋混凝土台身宜一次连续浇筑完成，当台身较宽或截面积过大，一次连续浇筑完成难以保证混凝土质量时，可分段或分层浇筑。分段浇筑时，其接缝宜设置在沉降缝处；分层浇筑时应采取有效措施控制接缝的外观质量，防止产生过大的层间错台。

(2) 以片石混凝土浇筑圬工台身时，应选用无裂纹、无夹层、未煅烧过并具有抗冻性的石块，片石混凝土的施工要求应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020的相关规定。

(3) 采用石料砌筑圬工台身时，其施工要求应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020的规定。

(4) 翼墙、八字墙施工时，其顶面坡度的变化应与台后边坡的坡度相适应。

(5) 桥台后背与回填土接触面的防水处理应符合设计规定。

### 2) 加筋土桥台施工

(1) 混凝土面板的预制施工应符合相关规定。露出面板混凝土外面的钢拉环、钢板锚头应作防锈处理，加筋带与钢拉环的接触面应作隔离处理。筋带的强度和受力后的变形应满足设计要求，筋带应能与填料产生足够的摩擦力，接长和与面板的连接应简单。

(2) 面板应按要求的垂度挂线安砌，安砌时单块面板可内倾1/200~1/100作为填料压实时面板外倾的预留度。不得在未完成填土作业的面板上安砌上一层面板。

(3) 钢带应平顺铺设于已压实整平的填料上，不得弯曲或扭曲；钢筋混凝土带可直接铺设在已压实整平的填料上或在填料上挖槽铺设；加筋带应呈扇形辐射状铺设，不

宜重叠，不得卷曲或折曲，并不得与尖锐棱角的粗粒料直接接触。在与桥台立柱或肋板相互干扰时，筋带可适当避让。

(4) 台背筋带锚固段的填筑宜采用粗粒土或改性土等填料。当填料为黏性土时，宜在面板后不小于0.5m范围内回填砂砾材料。

(5) 填料摊铺厚度应均匀一致，表面平整，并设置不小于3%的横坡。采用机械摊铺时，摊铺机械距面板应不小于1.5m。机械的运行方向应与筋带垂直，不得在未覆盖填料的筋带上行驶或停车。

(6) 台背填料应严格分层碾压，碾压时宜先轻后重，不得使用羊足碾。压实作业应先从筋带中部开始，逐步碾压至筋带尾部，再碾压靠近面板部位，且压实机械距面板应不小于1.0m。台背填筑过程中应随时观测加筋土桥台的变化。

### 3) 其他形式桥台施工

(1) 肋板式埋置式桥台施工时，肋板的斜面方向应符合设计规定的方向，避免反置。柱式和肋板式等埋置式桥台施工完成后的填土要求均应符合规范规定，台前溜坡坡度及其坡面防护应符合设计规定。

(2) 薄壁轻型桥台施工时，对混凝土的浇筑应采取有效措施，保证其浇筑质量。施工完成后，台背的填土除应符合规范规定外，如设置支撑梁，尚应在支撑梁安装完成后填土。

(3) 组合式桥台应按其各组成部分的相应要求施工。锚碇(拉)板式组合桥台可按加筋土桥台施工的规定进行；挡土墙组合桥台中挡土墙的施工应符合现行《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610—2019的规定；后座式组合桥台中的后座可按重力式桥台的规定进行施工，台身与后座之间的构造缝应严格按设计要求施工。

## 3. 预制安装墩台身与盖梁

预制安装墩台身和盖梁的施工具有较高的技术难度和施工风险，因此应制订专项施工方案，其施工方法、施工工艺、临时设施和设备等宜根据结构的构造特点和施工环境条件综合确定，施工中使用的受力装置和受力临时结构应进行专门设计和验算。墩台身预制安装施工的安全要求应符合相关规范的规定。

### 1) 墩台身和盖梁的预制

(1) 墩台身和盖梁预制场地应进行专门规划和设计，并符合下列规定：

① 场地布置应有利于预制、存放、搬运和装车(船)的施工作业。

② 场地内道路、料场等均应硬化处理并应有防排水设施。

③ 场地内各种临时设施的地基应具有足够的承载能力，不满足要求时应对地基进行加固处理。

④ 在水域中安装的墩台身，应在预制场地设置构件的出运线路和出运码头。

(2) 预制台座的设置应符合下列规定：

① 台座地基应具有足够的承载能力、稳定性和抗变形能力，必要时应对地基进行加固处理，施工过程中应定期监测台座的整体和不均匀沉降量。

② 预制台座可采用混凝土结构和钢结构组合而成并进行必要的受力分析计算，且与墩台预制节段底部的预留钢筋和预埋件相适应。

③ 采用混凝土底座时，宜在混凝土结构中通过计算配置必要的受力钢筋，底座基

础宜采用整体式钢筋混凝土板。

④ 钢结构台座宜采用钢板和型钢进行制作，可将墩台预制节段的底模与台座连接成整体，并在底模处开孔。开孔处应采取局部加强的措施，开孔位置应准确，保证预制节段底部的预留钢筋和预埋件能顺利通过。

⑤ 预制台座的设置数量宜根据墩台身安装施工的规模和进度要求综合考虑确定。

(3) 预制墩台身和盖梁的存放台座的设置除应符合上述预制台座设置的相关规定外，尚应满足地基不沉陷和稳定的要求。如预制出场与安装进度相匹配，可不设存放台座。

(4) 墩台身预制的节段尺寸划分应符合设计规定。设计未规定时，宜根据墩台结构的构造特点、运输能力、安装时的起重能力以及施工方便性等因素综合考虑确定；对海上桥梁，尺寸划分时宜将节段之间的接缝设置在浪溅区以上。高度不大或运输能力和安装起重能力足够时，宜进行整体预制、整体安装。

(5) 墩台身和盖梁的预制宜采用整体式定型钢模板，模板应具有足够的强度、刚度和稳定性，并符合下列规定：

① 模板应以刚度控制设计，并满足多次重复使用不变形的要求。

② 模板安装时位置应准确，各部位的连接应牢固可靠，接缝应严密、不漏浆。

③ 底模应平整，其平整度在 2m 长度范围的允许偏差应不超过 2mm，并应垂直于预制墩身的中轴线；侧模平整度在 1m 长度范围的允许偏差应不超过 2mm。

④ 剪力键（槽）处的模板尺寸应准确，表面应平整。

(6) 钢筋宜在专用胎架上制作成钢筋骨架或分片钢筋网后再进行整体起吊安装，必要时可增设劲性骨架增强其整体刚度。墩台身和盖梁钢筋的下料、加工制作、安装、绑扎、连接等或采用特殊钢筋时，以及设置有预应力钢束时的施工，均应符合设计要求。设计未要求时应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 的规定。

(7) 墩台身和盖梁预制混凝土的施工除符合本书“3.3.2 混凝土工程施工”的规定，尚应符合下列规定：

① 每一预制节段的混凝土应一次浇筑完成。

② 浇筑混凝土时应采取有效措施保证预应力管道和各种预埋件的位置准确，不产生移位。

③ 混凝土浇筑完成后，带模洒水养护时间宜不少于 3d，混凝土的外露面应覆盖、保湿和保温；拆除模板后仍宜对混凝土表面进行覆盖并保湿养护至少 7d。对高性能混凝土，其保湿养护的时间宜适当延长。

(8) 墩台身宜采用立式的方式在台座上预制，并符合下列规定：

① 对多节段预制的墩台身，当节段安装采用湿接缝连接时，可将节段分别预制；节段安装采用胶接缝连接时，应按底节、中间节、顶节的顺序从下至上匹配预制，或采用工具式端模匹配预制。

② 各节墩台身预制时，应采取有效措施保证其线形和外形尺寸准确，其垂直度的精度应满足设计要求。设计未要求时，垂直度误差应不超过其高度的 0.1% 且不大于 10mm。

③ 各节墩台身在预制时均应设置吊装孔，孔的位置和形式应符合设计规定，在设

置前对吊点的受力进行必要的复核和验算。安装所用导向装置和锁定装置的位置应准确，并满足设计规定的精度要求。

④ 墩台身整体预制或顶节墩台身预制时，支座垫石的位置应准确，锚栓孔的位置、直径和深度应满足支座安装就位的精度要求，锚栓孔的位置相对于墩中轴线的偏差应不大于5mm，安装时不得改变锚栓的直径和形状。

### 2) 预制节段的起吊、场内搬运和存放

墩台身预制节段的起吊、场内搬运和存放应符合下列规定：

(1) 墩台身的预制节段或整体墩身宜采用龙门式起重机起吊。当采用其他起重设备起吊时，除应有足够的起重能力外，尚应具有较好的稳定性，应能保证起吊作业的安全。

(2) 起吊用的吊架、吊具和索具等应进行专门设计和受力分析计算，且与起吊节段的构造形式及其吊装孔相适应，同时宜结合不同节段、安装起吊中采用的起重设备等进行必要的配置组合。

(3) 节段起吊时，混凝土强度应满足设计规定。

(4) 场内搬运墩台预制节段时，可采用滑道或轨道式台车进行立式搬运，亦可采用轮胎式台车、气囊等方式进行搬运。不论采用何种方式，均应在场地布置时预设相应的搬运通道，且该通道的地基应坚固、不沉陷；应提前对节段的支点受力、稳定性等进行分析计算和验算，并在节段的中、下部设置必要的扶稳装置以及下部与台车固定的装置，或采取其他稳定措施，保证搬运作业安全。

(5) 墩台预制节段宜采用立式的方式在台座上存放，并采取有效措施保证其稳定，不应产生受力不均、偏斜、倾倒等现象。存放时间应符合设计要求。设计未要求时，自混凝土浇筑完成后起算至安装的时间应不少于28d。

### 3) 预制节段的运输

(1) 墩台身预制节段的陆地运输应符合下列规定：

① 陆地上运输墩台身预制节段时，宜采用专用运输台车，或采用经改装能适应节段运输的车辆。

② 运输线路的路面应平坦，路基或桥涵应有足够的承载能力。

③ 采用立式方式运输节段时，除应通过合适的装置将节段固定在车上外，尚应具有防止节段倾倒的可靠稳定措施；采用平卧方式运输节段时，应提前对节段的受力进行验算，合理设置支点，并在支点处设置缓冲材料，使节段受力均匀，对节段的捆绑固定措施应可靠。

(2) 墩台身预制节段的水上运输应符合下列规定：

① 水运墩台身预制节段时，宜采用自航式运输驳船，其有效使用面积和载质量应满足节段装载和载重的要求并有足够的稳定性。

② 运输前，应按装载和运输条件下的各种工况，对船舶的强度进行核算和加固计算，并对船体进行必要的加固处理；同时应对船舶的稳定性进行验算。

③ 运输船上装载墩台身预制节段时，用于固定节段的专用支架和底座应采用型钢设计，保证节段在水上运输过程中各种工况条件下的稳定性。

④ 运输时除应采取可靠措施保证预制墩台身节段在风浪颠簸中不产生移位和倾覆外，尚应符合海事和航道管理部门对水上运输的相关规定，保证水上运输的安全。

#### 4) 墩台身预制节段的安装

(1) 应采用满足吊装施工能力的起重机械和设备进行墩台身预制节段的安装，陆地上安装时，宜采用履带起重机或龙门式起重机；水上安装时，宜采用起重船。吊具和索具的要求除应符合上述“2) 预制节段的起吊、场内搬运和存放”的规定外，尚应满足预制墩台身节段吊装的各项力学性能要求，并具有较好的通用性。

(2) 墩台身预制节段安装的调位装置应具有三维调节功能，并能满足节段安装的精度要求；导向装置、定位装置和锁定装置等应能满足实施快速、准确安装作业的功能要求。

(3) 承台顶设置槽口、安装墩台身时，应符合下列规定：

① 预制墩台身构件宜与承台基座对应编号、对应安装，且宜在基座的适当位置预设导向装置。

② 安装前应检查各墩台身预制构件的尺寸以及基座支承的顶面高程是否符合设计要求；基座槽口四周与预制墩台身构件之间的空隙宜不小于20mm，经检验合格后方可进行安装。

③ 起吊安装就位后，应对墩台身的平面位置和竖直度进行检测，确认符合设计要求后，应尽快对其进行固定或锁定。固定装置或锁定装置应牢固、可靠，应能保证墩台身的稳定和位置准确，确保后续施工中不产生倾斜和移位。

④ 槽口湿接头预留孔内的钢筋设置应符合设计规定，必要时宜适当加密连接钢筋。湿接头应采用符合设计规定的混凝土，其配合比应进行专门设计并经试验验证。对连接面混凝土应进行严格凿毛处理并清理干净，浇筑前应采用淡水充分湿润或涂刷界面剂。湿接头混凝土宜在一天中气温相对较低的时段浇筑，养护时间应不少于14d。

(4) 采用胶接缝分节段安装墩台身时，应符合下列规定：

① 墩台身应按节段匹配预制的顺序，进行匹配安装。

② 宜在下节墩台身顶部的适当位置预设安装导向装置。

③ 对已安装和待安装节段的匹配面应进行检查、清理，保证匹配面平整，无异物和凸出。

④ 在节段上部的适宜位置设置操作平台，在墩侧的承台上设置供作业人员上下的步梯。作业平台和步梯宜采用钢结构制作，且应进行受力计算和验算。安装应牢固、稳定；步梯应附着在已安装完成的墩台身上。

⑤ 胶粘剂应符合设计规定的质量和力学性能要求，接缝处理应符合相关规范规定。

⑥ 墩台身节段起吊安装就位后，应立即检查复核其平面位置、高程与竖直度，不符合要求时应及时进行调整。安装应保证节段之间的剪力键（槽）密贴，上下墩台身应顺直。

⑦ 墩台身节段安装完成并经检测其平面位置与竖直度符合要求后，应进行临时固定，并按设计规定对预应力钢束施加预应力，同时对胶接缝进行挤压。挤压时应采取措施对预应力孔道的端口处进行防护，防止胶粘剂进入孔道内。

⑧ 预应力张拉和孔道压浆应符合设计的要求，设计未要求时遵照本书“3.3.3 预应力混凝土工程施工”的规定；孔道压浆完成后应按设计要求浇筑封锚混凝土。

(5) 采用湿接缝分节段安装墩台身时，除应符合上述“胶接缝分节段安装墩台身”

的相关规定外，尚应符合下列规定：

① 除顶节墩台身外，应在承台顶面和各节段顶面设置具有支承功能和导向功能的装置。承台顶面的该类装置可单独预制、单独安装；各节段顶面的该类装置宜与墩台身节段同时预制。

② 墩台身节段起吊安装时，应进行测量控制，通过导向装置使节段缓慢地落在支承装置上；就位后应立即检查复核其平面位置、高程与竖直度，不符合要求时应及时进行调整，并采取可靠措施进行临时固定。

③ 湿接头处钢筋的绑扎应符合设计要求。

④ 湿接头处的模板应专门设计。模板板面应与墩台身表面密贴；模板的固定方式应可靠，且应与墩台身的构造相适应，安装拆除应方便。

⑤ 湿接头应采用设计规定的混凝土，其配合比应进行专门设计并经试验验证。

⑥ 湿接头混凝土的施工应严格控制原材料的质量和计量；拌制时应保证其达到规定的搅拌时间；浇筑时的分层厚度应严格控制在300mm以内；振捣时应根据不同部位，采用不同规格的振捣器，必要时应进行二次振捣。

### 5) 盖梁的预制安装

盖梁的预制安装除应符合上述“预制安装墩台身”的相关规定外，尚应符合下列规定：

(1) 盖梁的预制安装方式应符合设计规定。设计未规定时，宜根据盖梁结构的构造特点、运输能力、起重能力以及施工的方便性等综合考虑，确定采用整体或分节段预制安装。

(2) 盖梁分节段预制安装时，应采用匹配预制、匹配安装的方式进行。

(3) 盖梁预制安装对场地布置、预制台座、存放台座、钢筋、模板、混凝土、预应力、运输、安装等要求应符合相关规定。

(4) 盖梁预制构件的吊点位置应符合设计规定。设计未规定时，应通过计算确定。

(5) 安装盖梁预制构件前，应先检查盖梁预留槽（孔）的位置是否与墩台身的相应位置一致，有偏差时应采取适当的措施进行调整。

(6) 匹配安装盖梁预制构件时，应采取可靠的临时固定措施。在构件精确就位后对其进行临时固定，未固定前不得将起重机的吊钩松脱。

(7) 匹配安装时的接缝处理应符合规范相关规定。

(8) 预应力张拉和孔道压浆应符合设计和规范规定。

(9) 安装完成进行体系转换时，应符合设计规定的程序和步骤。

## 3.4.7 墙工结构施工

### 1. 墙工结构材料要求

墙工结构材料主要包括石料、混凝土预制块、砂浆、小石子混凝土等。

(1) 墙工砌体工程所用的石料应符合下列规定：

① 石料应符合设计规定的类别和强度，石质均匀、不易风化、无裂纹。

② 片石厚度应不小于150mm。用作镶面的片石，应选择表面较平整、尺寸较大者并稍加修整。

③ 块石形状应大致方正，上下面大致平整，厚度为200~300mm，宽度为厚度的1.0~1.5倍，长度为厚度的1.5~3.0倍。

④ 粗料石的外形尽量方正，厚度为200~300mm，宽度为厚度的1.0~1.5倍，长度为厚度的2.5~4.0倍，表面凹陷深度不大于20mm。

(2) 用于圬工砌体工程的混凝土预制块，其规格、形状和尺寸应统一，表面应平整，强度应符合设计要求。

(3) 圬工砌筑采用的砂浆类别和强度等级应符合设计规定，砂浆中所用水泥、砂、水等材料的质量应符合规范相关规定。砂浆配合比应通过试验确定，砂浆配制宜采用质量比。各类砂浆均宜采用机械拌和并随拌随用，保持适宜的稠度，且宜在3~4h内使用完毕；气温超过30℃时，宜在2~3h内使用完毕。

(4) 小石子混凝土的配合比设计、材料规格、强度试验及质量检验标准应符合规范规定，粗集料可采用细卵石或碎石，最大粒径宜不大于20mm；小石子混凝土的拌合物应具有良好的和易性，对片石砌体，其坍落度宜为50~70mm；对块石砌体，其坍落度宜为70~100mm。

## 2. 墩、台身圬工砌体施工

(1) 圬工砌体的砌筑应符合下列规定：

① 砌块使用前应浇水湿润，砌块的表面如有泥土、水锈，应清洗干净。

② 砌筑基础的第一层砌块时，如基底为土质，可直接坐浆砌筑；如基底为岩层或混凝土地基，应先将基底表面清洗、湿润，再坐浆砌筑。

③ 砌体宜分层砌筑，砌体较长时可分段分层砌筑，但两相邻工作段的砌筑高差宜不超过1.2m；分段位置宜设在沉降缝或伸缩缝处，各段的水平砌缝应一致。

④ 各砌层应先砌外圈定位行列，再砌筑里层，其外圈砌块应与里层砌块交错连成一体。砌体外露面石料的镶面种类应符合设计规定，对有流冰或有漂浮物河流中的墩台，当设计未明确要求时，其镶面宜选用强度等级不低于MU30且较坚硬的石料或C30以上较高强度等级的混凝土预制块进行镶砌。砌体里层应砌筑整齐，分层应与外圈一致，先铺一层适当厚度的砂浆，再安放砌块和填塞砌缝。砌体的外露面应勾缝，并在砌筑时靠外露面预留深约20mm的空缝备作勾缝之用。砌体隐蔽面的砌缝可随砌随刮平，不另勾缝。

⑤ 各砌层砌块应安放稳固，砌块间的砂浆应饱满，粘结牢固，不得直接贴靠或脱空。砌筑时，底浆应铺满，竖缝砂浆应先在已砌石块侧面铺放一部分，然后在石块放好后用砂浆填满捣实。用小石子混凝土填竖缝时，应捣固密实。

⑥ 砌筑上层砌块时，应避免振动下层砌块。砌筑工作中断后恢复砌筑时，对已砌筑的砌层表面应加以清扫和湿润。

⑦ 圬工砌体沉降缝、伸缩缝、泄水孔及防水层的设置，应符合设计规定。

(2) 浆砌片石、浆砌块石、浆砌粗料石与混凝土预制块、附属工程圬工砌体（锥坡、护坡、河床铺砌层等）的砌筑，以及圬工砌体的勾缝和养护按《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020的相关规定进行。

## 3. 后背回填施工

(1) 桥涵台背及锥坡、护坡后背的填料应符合设计规定。设计未规定时，宜采用

天然砂砾、二灰土、水泥稳定土或粉煤灰等轻质材料，不得采用含有泥草、腐殖质或冻块的土。采用膨胀性聚苯乙烯泡沫塑料、泡沫轻质土等特殊材料回填施工时，应符合相关规范规定。

(2) 后背回填应顺路线方向，自台身起，其填土的长度在顶面应不小于桥台高度加2m，在底面应不小于2m；拱桥台背填土的长度应不小于台高的3~4倍。锥坡填土应与台背填土同时进行，并按设计宽度一次填足。

(3) 后背回填应严格控制土的分层厚度和压实度，设专人负责监督检查，检查频率应每 $50m^2$ 检验一点，不足 $50m^2$ 时应至少检验一点，每点均应合格，且宜采用小型机械压实；桥涵台背填土的压实度应不小于96%。

(4) 后背回填的顺序应符合设计规定。设计未规定时，拱桥的台背填土宜在主拱圈安装或砌筑以前完成；梁式桥轻型桥台的台背填土宜在梁体安装完成以后，在两端桥台平衡地进行；埋置式桥台的台背填土宜在柱侧对称、平衡地进行。

## 3.5 桥梁上部结构施工

### 3.5.1 梁式桥施工

#### 1. 装配式梁、板桥施工

##### 1) 装配式梁、板预制安装

###### (1) 一般要求

① 装配式桥的构件在脱底模、移运、存放和安装时，混凝土强度应不低于设计规定的吊装强度；设计未规定时，应不低于设计强度的80%。

② 构件安装前应检查其外形、预埋件的尺寸和位置，允许偏差不得超过设计规定。

③ 安装构件时，支承结构（墩台、盖梁）的混凝土强度和预埋件（包括预留锚栓孔、锚栓、支座钢板等）的尺寸、高程及平面位置应符合设计要求。

④ 构件安装完毕经检查校正符合要求后，方可焊接或浇筑混凝土固定构件。简支梁的安装应采取措施保证梁体的稳定性，防止倾覆。

⑤ 对分层、分段安装的构件，应在先安装的构件可靠固定且受力较大的接头混凝土达到设计强度的80%后，方可继续安装；设计有规定时，应从其规定。

⑥ 分段拼装梁的接头混凝土或砂浆强度应不低于构件的设计强度；不承受内力的构件的接缝砂浆强度应不低于M10。与其他混凝土或砌体结合的预制构件的砌筑面应按施工缝处理。

(2) 构件预制场的布置应满足预制、移运、存放及架设安装的施工要求；场地应平整、坚实，应根据地基情况和气候条件，设置必要的防排水设施，采取有效措施防止场地沉陷。砂石料场的地面宜作硬化处理。

###### (3) 构件的预制台座应符合下列规定：

① 预制台座的地基应具有足够的承载能力和稳定性。当用于预制后张预应力混凝土梁、板时，宜对台座两端及适当范围内的地基进行特殊加固处理。

② 预制台座应采用适宜的材料和方式制作，且应保证其坚固、稳定、不沉陷。

③ 预制台座的间距应能满足施工作业的要求；台座表面应光滑、平整，在2m长度

上平整度的允许偏差应不超过2mm，底座或底模的挠度应不大于2mm。

④ 对预应力混凝土梁、板，应根据设计提供的理论拱度值，结合施工的实际情况，正确预计梁体拱度的变化情况。在预制台座上按梁、板构件跨度设置相应的预拱度。当预计后张预应力混凝土梁的上拱度值较大，会对桥面铺装的施工产生不利影响，宜在预制台座上设置反拱。

⑤ 预制台座应具有对梁底支座预埋钢板或楔形垫块进行角度调整的功能，预制施工时严格按设计要求的角度进行设置。

（4）各种构件混凝土的浇筑除应符合本书“3.3.3 预应力混凝土工程施工”的有关规定外，尚应符合下列规定：

① 腹板底部为扩大断面的T形梁和I形梁，应先浇筑扩大部分并振实后，再浇筑其上部腹板。

② U形梁可上下一次浇筑或分两次浇筑。一次浇筑时，宜先浇筑底板至底板承托顶面，待底板混凝土振实后再浇筑腹板；分两次浇筑时，宜先浇筑底板至底板承托顶面，按施工缝处理后，再浇筑腹板混凝土。

③ 箱形梁宜一次浇筑完成，且先浇筑底板至底板承托顶面，待底板混凝土振实后再浇筑腹板、顶板。

④ 中小跨径的空心板浇筑混凝土时，对芯模应有防止上浮和偏位的可靠措施。

（5）对高宽比较大的预应力混凝土T形梁和I形梁，应对称、均衡地施加预应力，并采取有效措施防止梁体产生侧向弯曲。

（6）构件的场内搬运应符合下列规定：

① 后张预应力混凝土梁、板，在施加预应力后可将其从预制台座吊移至场内的存放台座再进行孔道压浆，但必须满足下列要求：

- A. 从预制台座上移出梁、板仅限一次，不得在孔道压浆前多次倒运。
- B. 吊移范围必须限制在预制场内的存放区域，不得移往他处。
- C. 吊移过程中不得对梁、板产生任何冲击和碰撞。
- D. 不得将构件安装就位后再进行预应力孔道压浆。

② 后张预应力混凝土梁、板在预制台座上进行孔道压浆后再移运的，移运时其压浆浆体的强度应不低于设计强度的80%。

③ 梁、板移运时的吊点位置应符合设计规定；设计未规定时，应根据计算决定。构件的吊环必须采用未经冷拉的HPB300钢筋制作，且吊环应顺直。吊绳与起吊构件的交角小于60°时，应设置吊架或起吊扁担，使吊点垂直受力。吊移板式构件时，不得吊错上、下面。

（7）构件的存放应符合下列规定：

① 存放台座应坚固稳定，且宜高出地面200mm以上。存放场地应有相应的防排水设施，并应保证梁、板等构件在存放期间不致因支点沉陷而受到损坏。

② 梁、板构件存放支点应符合设计规定的位置，支点处应采用垫木和其他适宜的材料进行支承，不得将构件直接支承在坚硬的存放台座上；存放时混凝土养护期未满的应继续养护。

③ 构件应按其安装的先后顺序编号存放，预应力混凝土梁、板的存放时间宜不超

3个月，特殊情况下应不超过5个月。存放时间超过3个月时，应对梁、板的上拱度值进行检测。当上拱度值过大，将会严重影响后续桥面铺装施工或梁、板混凝土产生严重开裂时，则不得使用。

④当构件多层叠放时，层与层之间应以垫木隔开，各层垫木的支点位置应符合设计，上下层垫木应在同一条竖直线上；叠放高度宜按构件强度、台座地基承载力、垫木强度及叠放的稳定性等经计算确定，大型构件以2层为宜，应不超过3层；小型构件宜为6~10层。

⑤雨季或春季融冻期间，应采取有效措施防止因地面软化下沉而造成构件断裂及损坏。

#### (8) 构件的运输应符合下列规定：

①板式构件运输时，宜采用特制的固定架稳定构件。对小型构件，宜顺宽度方向侧立放置，并应采取措施防止倾倒；如平放，在两端吊点处必须设置支搁方木。

②梁的运输应按高度方向竖立放置，并应有防止倾倒的固定措施；装卸梁时，必须在支撑稳妥后，方可卸除吊钩。

③采用平板拖车或超长拖车运输大型构件时，车长应能满足支点间的距离要求，支点处应设活动转盘，防止撞伤构件混凝土。

④水上运输构件时，应有相应的封舱加固措施，并根据天气状况安排装卸和运输作业时间，同时应满足水上（海上）作业的相关安全规定。

#### (9) 简支梁、板的安装应符合下列规定：

①安装前应制定专项施工方案，安装方法和安装设备应根据构件的结构特点、重力及施工环境条件等因素综合确定；对安装过程中各种临时受力结构和设备的工况应进行必要的安全验算，所有施工设施均宜进行试运行和荷载试验。

②安装前应对墩台的施工质量进行检验，对支座或临时支座的平面位置和高程进行复测，合格后方可进行梁、板等构件的安装。

③采用架桥机进行安装时，其抗倾覆稳定系数应不小于1.3；架桥机过孔时，应将起重小车置于对稳定最有利的位置，且抗倾覆稳定系数应不小于1.5；不得采用将梁、板吊挂在架桥机后部配重的方式进行过孔作业。

双导梁架桥机施工工艺流程主要包括：①梁体预制及运输、铺设轨道→②架桥机及导梁拼装→③试吊→④架桥机前移至安装跨→⑤支顶前支架→⑥运梁、喂梁→⑦吊梁、纵移到位→⑧降梁、横移到位→⑨安放支座、落梁→⑩重复第⑤~⑨步，架设下一片梁→⑪饺缝施工，完成整跨安装→⑫架桥机前移至下一跨，直至完成整桥安装。

④采用起重机吊装构件时，如采用一台吊机起吊，应在吊点位置的上方设置吊架或起吊扁担；如采用两台起重机抬吊，应统一指挥，协调一致，使构件的两端同时起吊、同时就位。

⑤采用缆索吊机进行安装时，应事先对缆索吊机进行1.2倍最大设计荷载的静力试验和设计荷载下的试运行，全面验收合格后方可使用。

⑥梁、板安装期间及架桥机移动过孔时，严禁行人、车辆和船舶在作业区域的桥下通行。

⑦ 梁、板就位后，应及时设置保险垛或支撑将构件临时固定，对横向自稳定性较差的T形梁和I形梁等，应与先安装的构件进行可靠的横向连接，防止倾倒。

⑧ 安装在同一孔跨的梁、板，其预制施工的龄期差宜不超过10d，特殊情况应不超过30d。梁、板上有预留孔道的，其中心应在同一轴线上，偏差应不大于4mm。梁、板之间的横向湿接缝，应在一孔梁、板全部安装完成后方可施工。

⑨ 对弯、坡、斜桥的梁、板，其安装的平面位置、高程及几何线形应符合设计要求。

⑩ 当安装条件与设计规定的条件不一致时，应对构件在安装时产生的内力进行复核。

#### （10）施工先简支后连续的梁应符合下列规定：

① 除符合上述第⑨条的规定外，当设置临时支座进行支承时，对一片梁中的各临时支座，其顶面的相对高差应不大于2mm。

② 简支变连续的施工程序应符合设计规定。

③ 对湿接头处的梁端，应按施工缝的要求进行凿毛处理。永久支座应在设置湿接头底模前安装。湿接头处的模板应具有足够的强度和刚度，与梁体的接触面应密贴并具有一定的搭接长度，各接缝应严密、不漏浆。负弯矩区的预应力管道应连接平顺，与梁体预留管道的接合处应密封；预应力锚固区预留的张拉齿板应保证其外形尺寸准确，且不被损坏。

④ 湿接头混凝土宜在一天中气温相对较低的时段浇筑，且一联中的全部湿接头应尽快浇筑完成。湿接头混凝土的养护时间应不少于14d。

⑤ 湿接头按设计要求施加预应力、孔道压浆且浆体达到规定强度后，应立即拆除临时支座，按设计规定的顺序完成体系转换。同一片梁的临时支座应同时拆除。

## 2) 箱梁整孔预制安装

（1）箱梁预制场地的建设除应符合上述“1) 装配式梁、板预制安装”的规定外，尚应符合下列规定：

① 预制场地应进行专门设计，其布置应有利于制梁、存梁、运梁和架梁的施工作业；制梁台座、存梁台座及运梁线路的地基应具有足够的承载能力，并应有防排水设施；场地内的道路、料场等应作硬化处理。

② 在水域中架设安装的箱梁，应在预制场地设置箱梁的出运码头；从岸的一侧开始延伸至水域中或在陆上架设安装的箱梁，应设置必要的提梁设施和装置。

（2）钢筋宜在专用胎架上绑扎制作成整体骨架后，进行整体起吊安装；采用拼装式内模时，钢筋宜分片制作、分片起吊安装。

（3）箱梁的预制宜采用定型钢模板，模板应具有足够的强度和刚度，并能满足多次重复使用不变形的要求。模板制作、安装与拆除除应符合前述“3.2 常用模板、支架和拱架设计与施工”的有关规定外，尚应符合下列规定：

① 钢模板在加工制作时，模板的全长和跨度应考虑箱梁反拱度的影响及预留压缩量。附着式振捣器的支座应交错布置，安设牢固，并应使振动力先传向模板的骨架，再由骨架传向面板。

② 对外侧模和端模的拆除期限，尚应满足箱梁混凝土的表层温度与环境温度之差

不大于 15℃的要求；当气温急剧变化时，不宜进行拆模作业。

(4) 箱梁混凝土宜一次连续浇筑完成，且宜采取水平分层、斜向推进的方式浇筑，水平分层的厚度不得大于 300mm，各层间混凝土的间隔浇筑时间不应超过其初凝时间。梁体腹板下部的底板混凝土宜采用设于底模处的附着式振捣器振动；腹板混凝土宜采用插入式振捣器及附着式振捣器辅助振捣；对钢筋和预应力管道密布区域的混凝土，应提前按一定间距设置混凝土溜槽和插入式振捣器辅助导向等装置，保证该区域的混凝土能振捣密实。

(5) 箱梁混凝土浇筑完成后，应按本书“3.3.2 混凝土工程施工”中“高性能混凝土”的有关规定及时进行覆盖和养护，并符合下列规定：

① 当采取蒸汽养护时，除应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 的冬期施工规定外，尚宜分为静停、升温、恒温、降温及自然养护五个阶段。静停期间应保持蒸养棚内的温度不低于 5℃；混凝土浇筑完成 4h 后方可升温，且升温的速度应不大于 10℃/h；恒温时应将温度控制在 50℃以下，恒温时间宜由试验确定；降温的速度应不大于 5℃/h；蒸汽养护结束后，应立即进入自然养护阶段，且养护时间宜不少于 7d。蒸养期间、拆除保温设施及模板时，梁体混凝土表层的温度与环境温度之差应不大于 15℃。

② 采取自然养护时，对暴露于大气环境中的混凝土表面应采用适宜的材料进行覆盖，并洒水养护；拆模后尚未达到养护时间的梁体混凝土表面，宜采用喷淋方式或养护剂喷洒养护。当环境相对湿度小于 60% 时，自然养护时间宜不少于 28d；相对湿度大于等于 60% 时，宜不少于 14d。

(6) 梁体混凝土的抗压强度达到设计强度的 1/3 以上、弹性模量不低于设计值的 50% 时，可对部分预应力钢束进行初张拉，但其张拉应力不应超过设计张拉控制应力的 1/3，且初张拉的预应力钢束编号及张拉应力应符合设计规定。对箱梁预应力钢束的终张拉，应在其混凝土抗压强度达到设计强度的 80%、弹性模量不小于设计值的 80% 后进行。设计对张拉有具体规定时应从其规定。

(7) 梁体预应力管道的压浆应符合本书“3.3.3 预应力混凝土工程施工”的规定。压浆结束后应将锚具外部清理干净，并对梁端混凝土凿毛，对锚具进行防锈处理，按设计要求设置钢筋网片，浇筑封端混凝土。封端应采用无收缩混凝土，其强度应符合设计规定，并严格控制梁体长度。

(8) 箱梁的场内搬运及存放应符合下列规定：

① 箱梁在场内的搬运可采用龙门式起重机、轮胎式移梁机或滑移方式，且应预设相应的搬运通道。

② 采用滑移方式移梁时，滑道应设在坚固、稳定的地基基础上。滑道应保持平整，滑移时 4 个支点的相对高差不得超过 4mm，两滑道之间的高差不得超过 50mm。滑移动力设施应经计算及试验确定。滑移过程中应采取有效措施保证梁体不受损伤。

③ 梁体预应力钢束初张拉后进行吊运或滑移时，箱梁顶面严禁堆放重物或施加其他额外荷载；终张拉后吊运或滑移箱梁时，应在预应力管道压浆浆体达设计规定强度后方可进行。

④ 箱梁的存放台座应坚固、稳定，有相应的防排水设施，保证箱梁在存放期间不

致因台座下沉受到损坏。存放箱梁时，其支点距梁端的距离应符合设计规定。

(9) 箱梁的运输应符合下列规定：

① 采用运梁车运输箱梁时，运梁线路的路面应平坦，地基应有足够的承载能力，纵向坡度应不大于3%，横向坡度（人字坡）应不大于4%，最小曲率半径应不小于运梁车的允许转弯半径。在运梁车通过的限界内，不得有任何障碍物。

② 运梁车装载箱梁时，其支承应牢固，起步和运行应缓慢，平稳前进，严禁突然加速或紧急制动。重载运行时的速度宜控制在5km/h以内，曲线、坡道地段应严格控制在3km/h以内。当运梁车接近卸梁地点或架桥机时，应减速慢停。

③ 采用水运方式运输箱梁时，除支承应符合结构受力及运输要求外，尚应对梁体进行固定并采取防止船体摆动的有效措施，保证其在风浪颠簸中不移位。

(10) 箱梁的架设安装应符合下列规定：

① 箱梁应采用通过技术质量监督部门产品认证的专用架桥机，或由海事部门颁发船舶证书及起重检验证书的起重船进行架设安装，且起重参数应能满足架梁的要求，起重船的锚泊系统应能满足作业水域的条件。吊架和吊具应专门设计。起重设备、吊架和吊具等应经试吊确认安全后方可用于正式施工，吊具应定期进行探伤检查。

② 采用架桥机安装时，其抗倾覆稳定系数应不小于1.3；架桥机过孔时，起重小车应位于对稳定最有利的位置，且抗倾覆稳定系数应不小于1.5。

③ 采用起重船安装作业时，起重船进入安装位置后应根据流速、流向、风向和浪高等情况抛锚定位，定位时不得利用桥墩墩身带缆；在起重船定位和箱梁架设过程中，船体和梁体均不得对桥墩或承台产生碰撞。

④ 架设过程中，箱梁应保持水平并两端同步缓慢起落，不得碰撞临时支座。箱梁就位时，应设置必要的装置对梁体的空间位置进行精确调整。

⑤ 墩顶设置的临时支座形式和位置应符合设计规定，梁底与支座应密贴；4个临时支座的顶面相对高差不得超过4mm。

⑥ 箱梁安装后的吊梁孔应采用收缩补偿混凝土封填。

(11) 箱梁简支变连续时的体系转换除应符合设计要求和上述“1) 装配式梁、板预制安装”第(10)条的规定外，尚应符合下列规定：

① 需浇筑湿接头的箱梁端部的形状应符合设计规定，预应力钢束及其他预留孔道的位置偏差应不大于4mm。

② 宜先将一联箱梁采用型钢在纵向予以临时固结，且宜在一天中气温最低且温度场均匀、稳定的时段浇筑湿接头混凝土。

## 2. 支架现浇施工

(1) 梁式桥梁、板的现场浇筑可采用满布支架或梁式支架。现浇支架除应符合前述“3.2 常用模板、支架和拱架设计与施工”的相关要求外，尚应符合下列规定：

① 支架应稳定、牢固，其地基应采取换填压实、混凝土条形基础、桩基础加混凝土横梁等处理形式，使其具有足够的承载力。支架位于水中时，其基础宜采用桩基；对弯、坡、斜桥，其支架的设置应适应梁体相应几何线形的变化，且应采取有效措施保证支架的稳定性。

② 满布支架的地基表面应平整，并应有防排水措施；满布支架位于坡地上时，宜

将地基的坡面挖成台阶；在软弱地基上设置满布支架时，应采取措施对地基进行处理，使其承载力满足施工要求。

③ 梁式支架各支点的基础应设在可靠的地基上，当地基沉降过大或承载力不能满足要求时，宜设置桩基或采取其他有效措施进行处理。梁式支架不宜采用拱式结构；必须采用时，应按拱架的要求施工。

④ 对梁式桥现浇支架，应根据支架的类型和结构形式、地基的沉降量和承载能力，以及荷载大小等因素，按前述“3.2 常用模板、支架和拱架设计与施工”的规定确定是否采取预压措施。

⑤ 梁式桥跨越需要维持正常通行（航）的道路（水域）时，对其现浇支架应采取防碰撞的安全措施，设置必要的交通导流标志，保证施工安全和交通安全。

（2）梁式桥现浇施工时，梁体混凝土在顺桥向宜从低处向高处浇筑，在横桥向宜对称浇筑。混凝土浇筑过程中，应对支架的变形、位移、节点和卸架设备的压缩及支架地基的沉降等进行监测，如发现超过预警值的变形、变位，应及时采取措施予以处理。

### （3）支架现浇施工工序（以现浇箱梁为例）

支架现浇梁单个施工单元施工工艺流程主要包括：地基处理→支架搭设→模板系统安装→支架加载预压→钢筋、预应力筋安装→内模安装→混凝土浇筑→混凝土养护→预应力张拉→预应力孔道压浆→落架、模板支架拆除。

## 3. 移动模架逐孔现浇施工

当桥墩较高，总桥跨较长或桥下净空受到约束时，可以采用非落地支承的移动模架逐孔现浇施工，称为移动模架法。移动模架法适用在多跨长桥。为适应这类桥梁的快速施工，要求有严密的施工组织和管理。

移动模架是以移动式桁架为主要支承结构的整体模板支架，可一次完成中小跨径桥一跨梁体混凝土的浇筑，适用于20~70m跨径、梁体断面形式基本相同的多跨简支和连续梁的就地浇筑。连续施工时每孔仅在(0.2~0.25)L附近处(L为跨长)设一道横向工作缝，浇完一孔后，将移动模架前移到下孔位置，如此重复推进和连续施工。

移动模架是混凝土的直接支承体系，既是施工作业平台，也是梁体混凝土的模具。移动模架主要由主梁导梁系统、吊架支撑系统、模板系统、移位调整系统、液压电气系统及辅助设施等部分组成。移动模架结构按行走方式分为自行式和非自行式；按导梁的形式分为前一跨式导梁、前半跨式导梁、前后结合导梁等；按底模的拆装方式分为平开合式、翻转式等；按与箱梁的位置和过孔方式分为上行式（上承式）、下行式（下承式）等形式。

主梁在待制梁体上方，借助已成梁体和桥墩移位的称为上行式移动模架；主梁在待制梁体下方，完全借助桥墩移位的称为下行式移动模架。上行式、下行式移动模架特征见表3.5-1。

### 1) 模架的安装

移动模架宜采用定型产品，模架的功能、承载能力、长度、模板的尺寸及支承系统等，应与所施工的预应力混凝土连续梁的各项要求相适应，设计制造厂家应提供模架的产品出厂质量合格证书以及操作手册等相关技术文件。

表 3.5-1 上行式、下行式移动模架特征

序号	项目	上行式	下行式
1	承重支承方式	一般通过支腿支撑，后端支撑在已成梁上，前端支撑在前方墩上	一般通过墩旁托架支撑，两端均支撑在桥墩上
2	模板支承方式	通过吊件吊挂在主梁上	通过千斤顶直接或间接支撑在主梁上
3	外模开合方式	旋转张开或横向滑移	横向滑移
4	过孔方式	借助下导梁滑移或立柱迈步	借助墩旁托架滑移
5	施工安全性	施工时主梁支承安全可靠，但整机重心较高	施工时主梁支承的可靠性受摩擦力及锚固力的影响大，但整机重心较低
6	施工方便性	主梁下可设起重设备、雨篷，作业空间相对封闭，过孔速度快	主梁上不宜设置起重设备、雨篷，墩旁托架倒装相对复杂，过孔速度慢
7	施工适应性	使用不受墩的高度限制，可方便地完成首末跨箱梁施工，但不易在桥中部拼装	使用受墩的高度限制，墩高矮于4m时不宜采用。首末跨箱梁施工需要设置临时支墩
8	制梁周期	制梁周期长	制梁周期短
9	制造费用	用钢量大，自重大	用钢量少，自重小

移动模架现浇施工主要包括模架的拼装、运行、拆除三个关键环节，拼装是施工准备阶段的重点，运行是施工过程中的关键，拆除是施工收尾阶段的难点。

整套移动模架的拼装分为支承托架（牛腿）拼装、钢主梁（导梁）拼装、横梁拼装、模板系统及其他附属部件拼装四大部分，移动模架拼装完成后应对其拼装质量进行检验，并应在首孔梁的浇筑位置就位后进行荷载试压试验，检验和试压合格后方可正式使用。

## 2) 主要工序

主要工序包括：支腿或牛腿托架安装、主梁安装、导梁安装、模板系统与液压电气系统及其他附属设施安装、加载试验、支座安装、预拱度设置与模板调整、绑扎底板及腹板钢筋、预应力系统安装、内模就位、顶板钢筋绑扎、箱梁混凝土浇筑、内模脱模、施加预应力和管道压浆、落模拆底模及滑模纵移。

## 3) 移动模架施工要点

(1) 模架的支承系统应安全、可靠，具有足够的承载能力、刚度和稳定性。模架的后端宜设置后吊点，应使模架中的模板与已浇梁段的悬臂端梁体紧密贴合，防止该处产生错台或漏浆。模架应设置预拱度，预拱度值应经计算并参考荷载试验结果确定。

(2) 首孔梁浇筑混凝土前，应做好各项准备工作，制定详细的施工方案、施工工艺、各项保障措施及应急预案；浇筑施工时，应对模架进行挠度监测，监测数据及分析结果应作为修正模架预拱度的依据。首孔梁的混凝土在顺桥向宜从桥台（或过渡墩）开始向悬臂端进行浇筑，中间孔宜从悬臂端开始向已浇梁段推进浇筑，末孔宜从一联中最后一个墩位处向已浇梁段推进浇筑，最终与已浇梁段接合；梁体混凝土在横桥向应对称浇筑。连续梁逐孔现浇的纵向分段接缝位置应符合设计规定；设计未规定时，宜设在1/5跨的弯矩零点附近。

(3) 任一孔梁的混凝土浇筑施工完成后, 内模中的侧向模板应在混凝土抗压强度达到 $2.5\text{ MPa}$ 后, 顶面模板应在混凝土抗压强度达到设计强度的75%后, 方可拆除; 外模架应在梁体建立预应力后方可卸落。

(4) 模架横移和纵向移动过孔前, 应解除作用于模架上的全部约束。纵向移动时两侧的承重钢梁应保持基本同步, 不同步的最大距离偏差应符合产品设计的规定, 且应有限位和紧急制动装置; 移动到下一孔位置后, 应立即对模架进行准确就位并固定。模架在移动过孔时的抗倾覆稳定系数应不小于1.5。

(5) 梁体混凝土浇筑过程中, 应随时对模架的关键受力部位和支承系统进行检查, 有异常时应采取有效措施及时处理; 移动过孔时, 应对模架的运行状态进行监控。每完成一孔梁的施工, 均应对模架的关键部位及支承系统等进行检查, 发现问题应及时处理。

#### 4. 悬臂浇筑施工

##### 1) 概述

悬臂浇筑适用于大跨径的预应力混凝土梁桥、连续梁桥、T形刚构桥、连续刚构桥。其特点是无须建立落地支架和大型起重与运输机具, 主要设备是一对能行走的挂篮。

##### 2) 施工准备

###### (1) 挂篮设计及加工

① 挂篮是悬浇箱梁的主要设备, 是利用已浇筑的箱梁段作为支撑点, 通过桁架等主梁系统、底模系统等形成的一个工作平台, 或者说是沿着轨道行走的活动脚手架及模板支架。挂篮按主要承重结构形式可分为桁架式、斜拉式及钢板梁式; 按受力原理可分为垂直吊杆式、斜拉式、刚性模板式; 按抗倾覆平衡方式可分为压重式、锚固式、半压重式半锚固式; 按移动方式可分为滑动式、滚动式、组合式。对某一具体工程, 应根据梁段分段情况, 结合挂篮的重量、要求承受荷载及施工经验对挂篮进行认真详细的设计。除必须满足强度、刚度、稳定性要求外, 还要使其行走、锚固方便可靠, 重量不大于设计规定。挂篮由主桁架、锚固、平衡系统及吊杆、纵横梁等部分组成, 由工厂或现场根据挂篮设计图纸精心加工而成。

② 挂篮与悬浇梁段混凝土的重量比宜不大于0.5, 且挂篮的总重应控制在设计规定的限重之内。

③ 挂篮的最大变形(包括吊带变形的总和)应不大于 $20\text{mm}$ 。

④ 挂篮在浇筑混凝土状态和行走时的抗倾覆安全系数、锚固系统安全系数、斜拉水平限位系统的安全系数及上水平限位的安全系数均应不小于2。

⑤ 挂篮锚固系统所用的轴销、键、拉杆、垫板、螺母、分配梁等应专门设计、加工, 并不得随意更换或替代。

⑥ 悬挂系统两端应能与承压面密贴配合, 混凝土承压面不规则、不平整时应事前处理, 应使吊杆能轴向受拉而不承受额外的弯矩和剪力。

⑦ 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。

(2) 0号块、1号块的施工: 0号块、1号块一般采用落地支架或扇形托架浇筑, 托

架可由万能杆件、贝雷片或其他装配式杆件组成。支撑在桥墩基础承台上或墩身上。托架除须满足承重强度要求外，还须具有一定的刚度，各连续点应连接紧密，螺栓旋紧，以减少变形，防止梁段下沉和出现裂缝。

(3) 临时固结：对于连续箱梁，梁与墩未固结在一起，两侧悬浇施工不能保持平衡。因此在预应力混凝土连续梁的墩顶梁段施工时，应按设计规定在墩梁间设置临时固结装置，并应进行必要的施工验算。且临时固结装置的结构和采用的材料应满足方便、快速拆除的要求。临时固结一般采用在支座两侧临时加预应力筋，梁和墩顶之间浇筑临时混凝土垫块，将梁固结在桥墩上，使梁具有一定的抗弯能力，施工后再采用静态破碎方法，解除固结。

### 3) 悬臂浇筑施工工艺流程

(1) 连续刚构桥悬臂浇筑施工流程：0号块支架搭设、预压→0号块混凝土浇筑→0号块预应力钢束张拉→组拼挂篮→挂篮预压→对称悬臂浇筑1号块→1号块预应力钢束张拉→挂篮分离，前移就位→悬臂浇筑2号块及后续块段施工→边跨合龙（边跨现浇混凝土浇筑）→中跨合龙。

(2) 连续梁桥悬臂浇筑施工流程：0号块支架搭设、预压→0号块混凝土浇筑→0号块预应力钢束张拉→墩梁临时固结→组拼挂篮→挂篮预压→对称悬臂浇筑1号块→1号块预应力钢束张拉→挂篮前移就位→悬臂浇筑2号块及后续块段施工→边跨合龙（边跨现浇混凝土浇筑）→解除临时固结→中跨合龙。

### 4) 悬臂浇筑施工要点

(1) 主梁各部分的长度应充分结合主梁的形式、跨径、墩宽、挂篮形式及施工周期来确定。0号段长度一般为5~20m，悬浇分段长度一般为3~5m。

(2) 墩顶梁段及桥墩顶附近梁段施工宜全断面一次浇筑完成，当梁段过高一次浇筑完成难以保证质量时，可沿高度方向分两次浇筑，但首次浇筑的高度宜超过底板承托顶面以上至少500mm，且宜将两次浇筑混凝土的龄期差控制在7d以内。

(3) 挂篮主纵横梁的分联和移动操作应特别精心，以防急剧塌落或倾覆；浇筑混凝土时，后端应锚固于已完成的梁段上，后锚和移动架可采取保险锚、保险索或保险手拉葫芦等安全措施；挂篮桁架在已完成的梁段上行走时，应于后端压重稳定。

(4) 钢筋制作及安装除应符合“3.3.1 钢筋工程施工”规定外，尚应符合下列规定：

① 底板钢筋与腹板钢筋的连接应牢固，且宜采用焊接；底板上、下两层的钢筋网应采用两端带弯钩的竖向筋进行连接，使其形成整体；顶板底层的横向钢筋宜采用通长筋。

② 钢筋与预应力管道、预应力施工相互影响时，钢筋仅可移位但不得切断。若挂篮的下限位器、下锚带、斜拉杆等部位影响下一步操作必须切断钢筋时，应在该工序完成后，将切断的钢筋重新连接。

(5) 悬臂浇筑应符合下列规定：

① 悬臂浇筑应对称、平衡地进行，两端悬臂上荷载的实际不平衡偏差不得超过设计规定值；设计未规定时，宜不超过梁段重的1/4。悬臂梁段应全断面一次浇筑完成，并应从悬臂端开始，向已完成梁段推进分层浇筑。

② 悬臂浇筑过程控制宜遵循变形和内力双控的原则，但以变形控制为主。

③ 悬臂浇筑时，立模高程的误差应不大于±5mm，立模轴线的偏位应不大于5mm。

④ 挂篮前移时，宜在其后方设置控制其滑动的装置或在滑道上设置止动装置；前移就位后，应立即将后锚固点锁定，防止倾覆。

⑤ 每一节段悬臂浇筑施工完成后，除应进行质量检验外，尚应对预应力孔道进行检查、清理，防止杂物堵塞孔道。

⑥ 悬臂浇筑时，应对桥面上的各种临时施工荷载进行控制。

⑦ 悬臂浇筑跨越铁路、公路、航道及其他建筑物时，应采取有效的安全施工防护措施。

(6) 悬臂浇筑时预应力张拉除应符合“3.3.3 预应力混凝土工程施工”的规定外，尚应符合下列规定：

① 对纵向预应力长钢束的张拉，宜通过必要的试验确定其张拉程序和各项参数。张拉持荷时间宜增加1倍；当钢束的伸长值不能满足要求时，可采取补张拉或多次张拉的措施，但张拉应力不得超过设计规定的最大控制应力。横向预应力采用一端张拉时，其张拉端宜在梁两侧交错设置。竖向预应力宜采取多次张拉的方式进行，多次张拉的次数应以钢束的伸长值是否达到要求且是否可靠锚固而定。

② 对钢束施加预应力时，不得随意将锚具附近的普通钢筋切断；当该处的钢筋影响到张拉操作不能进行正常作业时，应会同设计人员协商处理。

③ 对竖向预应力孔道，压浆时应从下端的压浆孔压入，压力宜为0.3~0.4MPa，且压入的速度不宜过快。

### 5) 混凝土梁的合龙和体系转换应符合的规定

(1) 合龙程序和顺序应符合设计规定，边跨、中跨合龙段施工可参照如下流程进行：

① 悬臂浇筑边跨合龙流程图：施工准备及模架安装→设置平衡重→普通钢筋及预应力管道安装→合龙锁定→浇筑合龙段混凝土→预应力施工→拆模、落架。

② 悬臂浇筑中跨合龙流程图：吊架及模板安装→设置平衡重→普通钢筋及预应力管道安装→合龙锁定→解除连续梁墩顶临时固结，完成体系转换→浇筑合龙段混凝土→预应力施工→拆除模板及吊架。

(2) 合龙前应对两端悬臂梁段的轴线、高程和梁长受温度影响的偏移值进行观测，并根据实际观测值确定准确的合龙温度、合龙时间及合龙程序。

(3) 对连续刚构两端的悬臂梁段采用施加水平推力的方式调整梁体的内力时，千斤顶的施力应对称、均衡。

(4) 合龙时，宜采取措施将合龙口两侧的悬臂端予以临时刚性连接后，再浇筑合龙段混凝土。宜在合龙口两侧的梁体顶面设置等重压载水箱，并在浇筑合龙段混凝土时同步卸载。

(5) 合龙段混凝土宜在一天中气温最低且稳定的时段内浇筑，浇筑后应及时覆盖洒水养护，养护时间宜不少于14d。

(6) 合龙时在桥面上设置的全部临时施工荷载应符合施工控制的要求。对预应力混凝土连续梁，合龙后应在规定的时间内尽快拆除墩梁临时固结装置，按设计规定的程序完成体系转换和支座反力调整。

我们只做自己高分通过的考试，需要考试资料和指导请找卡哥团队！认准VX：kagezhukao666

## 6) 悬臂浇筑监控应符合的规定

(1) 施工前应编制施工监控方案，进行结构分析复核，确定主梁施工监控目标高程和应力控制标准，建立指令、监测数据等信息传递和反馈的控制流程。施工监控方案应依据批准的图纸和实施性施工组织设计编制，结构分析的参数和结果应经设计认可。

(2) 施工监控应考虑环境温度、桥上施工设备及临时荷载的影响；监控测量应考虑日照温差、季节性温差、大风等因素的影响；施工荷载应不超出规定的限值。

(3) 每节段混凝土浇筑后、预应力张拉后、挂篮前移就位后等阶段，及时测量梁段的高程并据此预测，确定下一梁段的立模高程。应力监测应按预定的频次实施，不得随意改变。

(4) 当需要改变施工顺序、进度和作业条件时，应复核施工监控的可行性，并制定措施保证桥梁线形和应力符合设计要求。如果施工顺序、进度或作业条件发生了重大偏差，应重新进行施工监控结构分析，确定目标高程和应力控制标准。

## 5. 悬臂拼装施工

### 1) 概述

悬臂拼装施工包括块件的预制、运输、拼装及合龙。它与悬浇施工具有相同的优点，不同之处在于悬拼以吊机将预制好的梁段逐段拼装。此外还具备以下优点：

(1) 梁体预制可与桥梁下部构造施工同时进行，平行作业缩短了建桥周期。

(2) 预制梁混凝土龄期比悬浇法的长，从而减少了悬拼成梁后混凝土的收缩和徐变。

(3) 预制场或工厂化的梁段预制生产利于整体施工的质量控制。

同时，悬臂拼装也存在以下缺点：

(1) 悬臂拼装采用梁段间的接缝、预应力束的穿束连接张拉，使结构整体性相对差一些。

(2) 因梁段已完成预制，能调整的余地相对较小，再加上施工中有许多不确定因素，造成施工变形控制难度较大。

(3) 悬臂拼装需要起吊大块预制梁段，对预制场地、设备等配置要求高，致使造价偏高。

### 2) 悬拼梁段预制

梁段预制方法分为长线法及短线法。

(1) 长线法：组成梁体的所有梁段均在固定台座上的活动模板内浇筑且相邻段的拼合面应相互贴合浇筑，缝面浇筑前涂抹隔离剂，以利脱模。优点是由于台座固定可靠，成桥后梁体线性较好；缺点是占地较大，地基要求坚实，混凝土的浇筑和养护移动分散。

长线法梁段预制工序：预制台座建造→台座立面、平面线形调整→外模安装→刷隔离剂，堵缝→安装底腹板普通钢筋及预应力管道→内模安装→安装普通钢筋及预应力管道→混凝土浇筑及养护→拆除模板→台座立面、平面线形调整→预制下一节段。

(2) 短线法：梁段在固定台座能纵移的模内浇筑。待浇梁段一端设固定模架，另一端为已浇梁段（配筑梁段），浇筑完毕达到强度后运出原配筑梁段，达到强度要求梁段为下一待浇梁段配筑。如此周而复始，台座仅需3个梁段长。优点是场地较小，浇筑

模板及设备基本不需要移机，可调的底、侧模便于平整曲线梁段的预制；缺点是精度要求高，施工要求严，施工周期相对较长。

短线法梁段预制工序：台车及模板系统加工→端模、底模及外侧模安装→匹配梁段定位→钢筋骨架吊装→内模就位→固定端模复测→混凝土浇筑及养护→拆除模板→匹配梁段转运存放→新浇筑梁段移至匹配梁位置→匹配梁段定位→下一块段施工。

### 3) 梁段的拼接

(1) 0号块：为了确保连续梁分段悬拼施工的平衡和稳定，常与悬浇方法相同，将构件支座临时固结，必要时在墩两侧加设临时支架，以满足悬拼的施工需要。

(2) 1号块：1号块是紧邻0号块两侧的第一箱梁节段，也是悬拼构件的基准梁段，是全跨安装质量的关键，一般采用湿接缝连接。湿接缝拼装梁段施工程序包括：吊机就位→提升、起吊1号梁段→安装波纹管→中线测量→丈量湿接缝的宽度→调整波纹管→高程测量→检查中线→固定1号梁段→安装湿接缝的模板→浇筑湿接缝混凝土→湿接缝养护、拆模→张拉预应力筋→压浆→下一梁段拼装。

### (3) 其他梁段拼装

① 移动式导梁架桥机施工悬臂节段拼装工艺流程图：架桥机安装及调试→运梁就位→架桥机落钩起吊箱梁至桥面→节段胶结层涂抹→临时预应力张拉→胶结层养护至固化→悬拼预应力钢束张拉→架桥机解钩，前移至下一个节段施工。

整跨拼装工艺流程图：架桥机安装及调试→运梁就位→梁段吊装及调整→节段胶结层涂抹→临时预应力张拉→胶结层养护至固化→整孔预应力张拉→整孔落梁就位→架桥机纵移过孔，吊钩前移至下一个节段施工。

② 悬拼吊机法节段拼装工艺流程图：吊机安装及调试→梁端就位→起吊梁段、试拼→节段胶结层涂抹→临时预应力张拉→胶结层养护至固化→悬拼预应力钢束张拉→吊机解钩，前移至下一个节段施工。

③ 浮吊悬拼工艺流程图：浮吊船移动就位→梁预制节段驳船运输到位→移动浮吊挂钩，固定缆风绳，起吊→浮吊调整梁段起吊高度，停钩靠近待吊墩位→稳住浮吊，起钩→就位停钩，稳住浮吊，梁段调正→调整梁段，浮吊落钩→摘钩，移船。

### 4) 悬臂拼装应注意的要点

(1) 预制场地的布置应便于节段的预制、移运、存放及装车（船）出运；预制台座应稳定、坚固，在荷载作用下，其顶面的沉降应控制在2mm以内。梁段的存放场地应平整，承载力应满足要求，支垫位置应与吊点一致。

(2) 节段预制前，应在预制场地建立精密测量的平面控制网和高程控制网，设置测量控制点、测量塔及靶标。测量控制点应设在远离热源和震动源的位置，且具有良好的通视条件，必要时应设置备用的测量控制点。

(3) 节段预制时，应对其预制线形进行控制，使成桥后的线形符合设计要求。节段预制的测量控制宜采用专用线形控制软件进行。

(4) 节段预制宜采用专门设计的钢模板，钢模板及其支撑除应满足强度、刚度和稳定性的要求外，尚应满足多次重复使用不变形及保证节段预制精度的要求。采用长线法预制节段时，同一连续匹配浇筑的梁段应在同一长线台座上制作；采用短线法时，应在台座上匹配预制，并应符合下列规定：

- ① 内模系统应可调整且宜安装在可移动的台车支架上。
- ② 端模应垂直、牢固，外侧模与底模应能适应节段的线形变化要求。
- ③ 模板与匹配节段的连接应紧密，不漏浆。

(5) 节段钢筋宜在专用胎架上制成整体骨架后吊入模板内安装；吊装整体骨架时应设置吊架，吊点的布置应合理，且宜采用多点起吊，防止变形。对预埋件的安装和预留孔的设置，应采用定位钢筋将其准确固定；当有体外预应力钢束转向器时，其安装必须准确、可靠。

(6) 节段预制混凝土的性能及要求除应符合“3.3.2 混凝土工程施工”的规定外，尚应符合设计对其弹性模量、收缩和徐变等性能的要求。节段预制混凝土的浇筑应根据环境温度、水泥品种、外加剂、施工进度及对混凝土性能的要求等制定养护方案，总体养护时间宜不少于14d，对节段的外立面混凝土宜采用喷湿或其他适宜的方式进行养护。

(7) 节段的脱模时间应符合设计规定；设计未规定时，应在混凝土强度达到设计强度的75%后方可脱模并拆除。在脱模、拆除或移动节段时，应采取措施防止损伤节段混凝土的棱角和剪力键。

(8) 模板拆除后应及时对节段进行检查验收，测量其外形尺寸，并标出梁高及纵横轴线。

(9) 节段的起吊、搬运、存放应符合下列规定：

- ① 节段从预制台座起吊时，混凝土的强度应符合设计规定。
- ② 节段搬运应满足运输安全和施工安全的要求并采取措施防止对节段产生冲击或碰撞。

③ 节段存放台座及其地基的承载力需提前验算，台座上叠放节段层数宜不超过两层，节段支点的位置应符合设计规定，且宜采用垫木或橡胶板等弹性支撑物进行支承。

④ 节段存放时间应符合设计要求；设计未要求时，宜不少于90d。对未达到养护时间的节段，应在存放时继续养护。

(10) 连续梁墩顶的梁段与墩之间应按设计要求进行临时固结，并进行必要的施工验算，且临时固结的结构和材料应满足方便、快速拆除的要求。

(11) 悬臂拼装应符合下列规定：

① 节段拼装前，应对预制节段的匹配面进行必要的处理并确定接缝施工工艺。拼装过程中，应跟踪监测各节段梁体的挠度变化情况，控制其中轴线及高程；当实测梁体线形与设计值有偏差时，应及时调整。

② 施工前应按施工荷载对起吊设备进行强度、刚度和稳定性验算，其安全系数应不小于2。节段安装前应对起吊设备进行全面的安全技术验收，并分别进行1.25倍设计荷载的静载和1.1倍设计荷载的动载试验。

③ 墩顶节段安装前，应在每一联梁中建立其独立的三维坐标系，对该联各墩顶节段安装的平面位置和高程进行测量放样。 $X$ 、 $Y$ 两个方向的放样精度宜不大于1mm， $Z$ 方向的放样精度宜不大于2mm。安装时，应对其安装精度进行严格控制。

④ 墩顶梁段采用现浇方式施工时，对与其相邻的拼装起始节段的放样精度控制应符合本条第(3)款的规定。

⑤ 悬臂拼装时，桥墩两侧的节段应对称起吊，且保证桥墩两侧平衡受力，最大不

平衡力应符合设计规定。

(12) 接缝处理应符合下列规定：

① 采用胶接缝的节段，涂胶前应进行试拼。胶粘剂进场后应进行力学性能及作业性能的抽检，其各项性能应满足结构设计与节段拼装的要求。节段的匹配面应平整，尘土、油脂等污染物及松散混凝土和浮浆应清除干净。涂胶前的匹配面应进行干燥处理。

② 胶粘剂宜采用机械拌和，使用过程中应连续搅拌并保持其均匀性。胶粘剂应涂抹均匀，覆盖整个匹配面，涂抹厚度宜不超过3mm。胶接缝施加临时预应力时，挤压宜为0.2MPa，胶粘剂应在梁体的全断面被挤出，且胶接缝的挤压应在3h以内完成；施工时间超过明露时间的70%时，在固化前应清除被挤出的胶结料。涂抹和挤压时胶粘剂应采取措施对预应力孔道的端口处进行防护，防止胶粘剂进入孔道内。

(13) 节段拼装的预应力施工除应符合“3.3.3 预应力混凝土工程施工”的规定外，尚应符合下列规定：

① 采用胶接缝的节段，拼装工作结束并经检查符合要求后，应立即施加预应力对接缝进行挤压；采用湿接缝的节段，应在接缝混凝土强度达到设计强度的80%以上时方可对其施加预应力。

② 临时预应力钢束的布置和张拉控制应力应符合设计规定，并满足多次重复张拉的作业要求；临时预应力钢束在结构永久预应力施工完成后方可拆除。

③ 节段拼装完成并施加预应力后方可放松起吊吊钩，再立即对预应力孔道进行压浆和封锚。

④ 梁顶面明槽内已张拉的预应力钢束应加以保护，严禁在其上堆放物体或抛物撞击。

## 5) 悬臂拼装合龙段施工

悬臂拼装合龙段施工工艺流程图：合龙段起吊就位→合龙段临时锁定→湿接缝预应力管道连接→穿合龙预应力束→安装湿接缝模板→现浇湿接缝，养护，脱模→张拉预应力束→解除临时锁定。

## 6. 顶推施工

### 1) 概述

顶推法多应用于预应力钢筋混凝土等截面连续梁桥和斜拉桥梁的施工。顶推施工是在桥台后方的引道或引桥上设置预制施工场地，分节段浇筑梁体，用纵向预应力筋将浇筑节段与已完成的梁体连成整体，在梁体前端安装钢导梁，用千斤顶纵向顶推，使梁体通过各墩顶的临时滑动支座面就位，这样分段预制，逐段顶推，待全部顶推就位后，落梁、结构体系转换、更换正式支座，完成桥梁施工。

顶推施工的方法可分为单点顶推和多点顶推。顶推施工主要临时设施及机具设备有：起重机、顶推平台（预制台座）、混凝土拌合楼、混凝土输送泵、导梁（鼻梁）、横向导向（纠偏装置）、辅助墩（临时墩）、顶推设备（顶推千斤顶）、滑动装置等。

### (1) 顶推法施工特点

① 节省施工用地，工厂化制作，结构整体性好，能保证构件质量。桥梁节段固定在一个场地预制，便于施工管理改善施工条件，避免高空作业；节约劳力，施工安全。

② 机具设备简便，模板、机具设备可多次周转使用，施工平稳、无噪声；无需大

我们只做自己高分通过的考试，需要考试资料和指导请找卡哥团队！认准VX：kagezhukao668

型起吊设备、大量的施工脚手架，可不中断交通或通航。可在深谷和宽深河道上的桥梁、高架桥以及等曲率曲线桥、带有曲线的桥和坡桥上采用。

③ 连续梁的顶推跨径  $30\sim50m$  最为经济有利。如果跨径大于此值，则需要临时墩等辅助手段。逐段顶推施工宜在等截面的预应力混凝土连续梁桥中使用，也可在组合梁、斜拉桥和拱桥的主梁上使用。

④ 不适应多跨变高梁，曲率变化的曲线桥和竖向曲率大的桥梁，受顶推悬臂弯矩的限制，顶推跨径大于  $70\sim80m$  不经济。顶推过程中需承受反复的应力变化，使梁高取值大、临时束多，张拉工序繁琐。随着桥长的增大，施工进度较慢。

### (2) 顶推施工分类

- ① 按顶推动力装置的多少分为单点顶推和多点顶推。
- ② 按动力装置的类别可分为步距式顶推和连续顶推。
- ③ 按施加水平力的方法可分为水平+竖向千斤顶法和拉杆千斤顶法。
- ④ 按支承系统可分为临时滑道支承装置顶推施工和永久支承装置顶推施工。
- ⑤ 按顶推方向可分为单向顶推和双向（相对）顶推。
- ⑥ 按箱梁节段的成形方式可分为分段顶推（预制组装、分段顶推）和阶段顶推（逐段制梁、逐段顶推）。

### (3) 顶推法施工工序

顶推法施工工序：预制场建设→制作模板与安装钢导梁→顶推设备安装→预制节段→张拉预应力筋→顶推预制节段→管道压浆（循环前述第4~7工序）→顶推就位→放松临时预应力筋及拆除辅助设备→张拉后期预应力筋→管道压浆→落梁及更换支座→桥面工程→验收。

## 2) 顶推施工要点

### (1) 预制场地

① 宜在预制场地上搭设固定或活动的作业棚，使梁段施工不受天气影响，便于混凝土养护。预制场地长度应考虑梁段悬出时反压段的长度、梁段底板与腹（顶）板预制长度、导梁拼装长度和机具设备材料进入预制作业线的长度；宽度应考虑梁段两侧施工作业的需要。

② 在桥头路基上或引桥上设置预制台座时，预制场必须将地基先碾压密实、平整，保证其强度、刚度和稳定性满足顶推施工要求，并采取排水措施，使其不沉陷、不积水。如地基承载不足时，宜选用桩基础。在荷载作用下，台座顶面的沉降变形应不大于  $2mm$ 。在平整、密实的地基浇筑混凝土台座，混凝土基础台座尺寸必须满足强度、刚度、稳定性的要求。在引桥上的预制台座、临时墩的基础、装配式大梁、横梁、纵梁均应进行设计计算，使台座的强度、刚度（挠度及基础的沉降）和稳定性均符合顶推施工要求。

③ 台座轴线应与桥梁轴线的延长线重合，台座纵坡应与桥梁纵坡一致，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  $2mm$ 。

④ 模板宜采用钢模板。底模与底架宜连成一体且可升降；侧模宜采用旋转式整体

模板；内模宜采用可移动台车加升降旋转式整体模板。模板应保证刚度，制作精度应符合“3.3.2 混凝土工程施工”的规定。

⑤ 混凝土梁体在支座位置处的横隔板，宜在整联梁顶推到位并完成解联后再浇筑，振捣时应避免振动器碰撞预应力管道和预埋件等。梁段的工作缝表面应凿毛并清洗干净。若工作缝为多联连续梁的解联断面，宜设为干接缝并采用临时预应力束张拉使其连接紧密。干接缝的断面尺寸应准确，表面应平整，解联时应分开方便。对与顶推导梁连接的梁体端部的混凝土，应保证其振捣密实，不得出现空洞等缺陷。

### （2）导梁和临时墩施工

① 导梁的长度宜为顶推跨径的0.6~0.8倍，刚度宜为主梁的1/15~1/9，导梁与主梁梁体连接处的刚度应协调，预埋件的连接强度应满足梁体顶推时的受力要求，导梁前端的最大挠度应不大于设计规定。

② 导梁全部节间的拼装应平整，其中线的允许偏差应不大于5mm，纵、横向底面高程的允许偏差应为±5mm。

③ 钢梁顶推施工时，导梁与钢梁之间宜采用焊接连接或采用螺栓连接。对钢梁结构的支点和顶推施力点处宜适当加固，并应采取措施防止结构在顶推过程中产生变形。

④ 对于跨径大于50m的梁桥宜应综合桥下交通、通航、工程量、施工难易程度、拆除方案等情况设置临时墩。

⑤ 临时墩应能承受顶推过程中最大的竖直荷载且不发生沉陷。

⑥ 临时墩在顶推时不得因纵向摩阻力而发生偏斜（必要时，可在墩顶设临时支撑）。为加强临时墩的抗推能力，可用斜拉索或水平拉索锚于永久墩下部或其墩帽。当墩距较小时，可用专用桁架、型钢或钢管相连。

⑦ 临时墩墩基可采用混凝土浅基础、打入桩或钻孔灌注桩，墩身一般设计成能够重复使用的构件，可采用钢结构、装配式钢筋混凝土结构或现浇钢筋混凝土结构，使其易于装拆。由于钢结构临时墩在荷载作用和温度变化下变形较大，一般较少采用，更多地采用滑升模板浇筑的混凝土薄壁空心墩、混凝土预制板、预制板拼砌的空心墩或混凝土板和轻便钢架组成的框架临时墩。

⑧ 临时墩一般只设置滑道而不设顶推装置。若必须加设顶推装置，应通过计算确定。

⑨ 主航道中临时墩的设计应考虑拆除、清理航道的方案，水下钢管可由潜水员在水下氧割或拆除法兰盘。

⑩ 各联主梁顶推作业完成并落梁到正式支座上以后，应将临时墩拆除。

### （3）梁段顶推

① 宜根据梁体长度、顶推跨度、桥墩所能承受的水平推力等条件，选择适宜的顶推方式。

② 采用单点或多点水平千斤顶方式顶推时，顶推滑道长度应大于水平千斤顶行程加滑块的长度，宽度应为滑板宽度的1.2~1.5倍；相邻墩滑道顶面高程的允许偏差宜为±2mm，同墩两滑道高程的允许偏差宜为±1mm；滑动装置的摩擦系数宜经试验确定。水平—竖向千斤顶顶推方式的滑动装置，一般应由摩擦垫、滑块（支承块）、滑板和滑道组成。

③采用单点或多点水平千斤顶方式顶推时，实际总顶推力应不小于计算顶推力的2倍；采用单点或多点拉杆方式顶拉时，拉杆的截面积和根数应满足顶拉力的要求，拉锚器的锚固和放松应方便、快速，设置在各墩顶的反力台应牢固且应满足顶拉反力的要求。多点顶推（拉）时，各点的水平千斤顶应同步运行。

④宜在墩台上设置导向装置，防止梁体在顶推过程中产生偏移。顶推过程中应对梁体的轴线位置、墩台的变形、主梁及导梁控制截面的挠度和应力变化等进行施工监测；发生异常情况时，应停止顶推，查明原因，妥善处理后方可继续施工。

⑤顶推时至少应在两个墩上设置保险千斤顶。如遇顶推故障需采用竖向千斤顶将梁顶高时，最大顶升高度不得超过设计规定或不得大于10mm，起顶的反力值不得大于计算反力的1.1倍。

⑥平曲线连续梁顶推施工时，预制台座的平面及梁体均应按设计线形设置成圆弧形；导梁宜设置成直线形，但与主梁连接处应偏转一定角度，使导梁前端的中心落在设计线形的中线上。顶推应使梁体沿圆弧曲线前进。

⑦竖曲线连续梁顶推施工时，预制台座的底模板顶面应符合设计竖曲线的曲率；所需水平顶推力的大小，应考虑正负纵坡的影响。

⑧采用步履式顶推时，垫梁应有足够的长度和刚度，且应与梁体底部完全接触（垫50mm厚橡胶垫），保证梁体腹板可靠受力。顶推过程中竖向顶升和水平顶推各墩的同步精度应控制在5mm以内，同墩两侧的同步精度应控制在4mm以内。

#### （4）落梁

①落梁前应按设计规定的顺序，对预应力钢束进行张拉、锚固、压浆。拆除全部临时预应力钢束。拆除墩台上的滑动装置时，梁体的各支点应均匀顶起，其顶力应按设计支点反力的大小控制，顶起时相邻墩各顶点的高差不得大于5mm，同墩两侧梁底顶起时高差不得大于1mm。

②落梁应根据设计规定的顺序和每次下落量进行，同一墩台的千斤顶应同步运行；落梁反力的允许偏差为±10%设计反力。

③永久支座应在落梁前安装。

### 7. 钢箱梁安装

#### 1) 钢桥施工概述

按照力学体系分类，钢桥有梁、拱、索三大基本体系和组合体系桥；按照主梁结构形式，可分为钢板梁、钢箱梁、钢桁梁和结合梁；按照截面沿跨度方向有无变化，可分为等截面钢梁和变截面钢梁；按照连接方式，可分为铆接、焊接、栓接以及栓焊连接。若钢桥构件在工厂焊接后运到工地，再全部用焊接组装成钢桥，称为工地全焊连接；若在工地部分构件用高强度螺栓连接，另一部分用焊缝焊接组装成钢桥，则称为合用连接。

根据钢桥基本构件结构外形和构造的不同，钢桥制造可分为杆系、板系、管系结构。三种构件的制造在单元体的划分、下料切割、节段组装焊接、拼装等方面有很大的不同。杆系结构一般由H形断面和矩形断面的杆件组成的桁梁桥的基本构件，通常在工厂焊接成构件，在工地用高强度螺栓连成整梁，结构的整体几何线形主要由栓孔尺寸线控制。板系结构由带纵横加劲肋的板单元件组成的箱梁，一般用于悬索桥和斜拉桥的主梁，通常在工厂焊接成带肋的板单元件，组装成箱梁节段，再运至桥位吊装连成桥梁。

整体，桥梁几何线形和焊接变形影响较大。管系结构是指钢管拱桥，通常在工厂制成管状拱肋节段安装，跨中合龙；或者在桥位岸侧拼装成半跨，转体就位、跨中合龙，合龙精度常受拱肋制造精度和焊接变形的影响。钢结构在制造前，制造厂应对设计图进行工艺性审查，且应绘制加工图，编制制造工艺；当需要修改设计时，应取得原设计单位的同意，并签署设计变更文件。

钢结构的制造应按确定的加工图和制造工艺进行。制造及验收应使用经检定合格的计量器具，并按有关规定操作。

## 2) 钢桥的主要特点

(1) 钢材材质均匀，工作可靠度高，其抗拉、抗压和抗剪强度都较高，因而相对同跨度的桥梁，钢桥自重轻，便于运输和架设安装，适合修建大跨度桥和特大跨度桥。

(2) 钢材塑性和韧性好，抗冲击和振动能力高，不易突然断裂破坏。

(3) 钢桥的构件适合于工业化生产制造，便于运输，工地安装速度快，效率高，质量好，工期短。

(4) 钢桥在受到破坏后，易于修复和更换，适宜于战备和灾害恢复的快速抢修。

(5) 钢桥易被腐蚀，需要经常检查和定期喷涂防腐涂料，因此钢桥与其他桥梁相比，养护费用较高。

## 3) 钢桥架设

### (1) 主要方法

① 自行吊机整孔架设法：适用于架设短跨径的钢板梁。

② 门架吊机整孔架设法：适用于地面或河床无水、少水，现场能修建低路堤、栈桥、上铺轨道的条件。

③ 浮吊架设法：适用于河水较深、备有大吨位浮吊的条件。

④ 支架架设法：适用于桥下净空不高、水深较浅的条件，可用于架设各种跨径、各种类型的钢桥。

⑤ 缆索吊机拼装架设法：适用于各种地形、地质、水文条件，可架设各类梁桥、拱桥、刚构桥和加劲钢梁等。

⑥ 转体架设法：适用于地形相宜、桥下有交通通行的条件，可用于中等跨径的梁桥。

⑦ 顶推滑移架设法：适用于桥头路基或引桥上能够拼装钢梁的条件，宜于短距离纵向桥梁或横移法架梁以及横移更换旧梁，可架设单孔或多孔梁桥。

⑧ 拖拉架设法：适用于河滩无水或水深较浅、易于建立支墩、桥头路基或引桥上能够拼装钢梁及平移梁的条件。

⑨ 浮运架设法：适用于深水河流或滨海河流处，可架设各类大跨径钢桥。

⑩ 浮运拖拉与浮运平转架设法：适用于深水河流或滨海河流处，可架设各类大跨径钢桥。

⑪ 悬臂拼装架设法：适用于各类地形、水文、通航、墩高等条件，是架设钢桥的主要方法之一。

### (2) 基本作业程序

钢桥架设基本作业程序包括杆件预拼、杆件拼装、高强度螺栓栓接、工地焊接、

我们只做自己高分通过的考试，需要考试资料和指导请找卡哥团队！认准VX：kagezhukao668

顶落钢梁、墩面移梁与临时支座及其转换、钢梁定位与支座安装等工序。

#### 4) 大节段钢箱梁架设

(1) 安装大节段钢箱梁应制定专项施工方案，应根据大节段构件的构造特点、重力、作业环境条件和起重能力等因素综合考虑选择安装方法。

(2) 安装前，应对施工中使用的各种临时设施、受力装置和临时受力结构，以及吊架、吊具和索具等进行专门设计和受力分析的计算验算。

(3) 运输大节段钢箱梁的船舶，应按装载和运输条件下的各种工况，对船舶的强度进行核算和加固计算，并对船体进行必要的加固处理，同时应对船舶的稳定性进行安全验算。

(4) 水上运输应符合相关规范规定，根据大节段钢箱梁的构造特点，在装载、固定、航行和抛锚定位等环节采取可靠措施保证水上运输的安全。

(5) 施工前应对拟安装孔跨跨径、墩台顶面高程和纵横向轴线、支座安装情况等进行复核测量，确认各项误差在允许偏差范围内，且墩台满足规定的质量标准后方可进行安装。

(6) 大节段钢箱梁的架设除应满足《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020中的相关要求外，尚应符合下列规定：

① 安装前，应在详细了解施工水域的水深、流速、潮位、水下管线和障碍物、河(海)床地质等情况的基础上，制定相应的施工应急预案，保证安装施工能顺利进行。

② 起重船的吊重、吊高和吊幅等技术性能应能满足大节段钢箱梁架设的要求。

③ 大节段钢箱梁的起吊应采用专门制作的吊架和吊具，保证大节段钢箱梁纵横方向水平倾斜度的调整灵活、方便。

④ 安装前宜进行船舶抛锚定位、运输船舶出位、起重船移动以及各船舶在统一指挥下协同作业的模拟吊装试验，获取相应的施工参数，用于指导正式安装。

⑤ 起重船和运输船的锚泊系统应可靠，应保证其在进行正式安装时不产生移位。

⑥ 正式起吊前应进行试吊，检验起重船、吊架、吊具、索具以及相应的装置、设施是否满足施工要求。

⑦ 安装应在风力小于6级时进行，起重船的移位和大节段钢箱梁的就位宜在高、低平潮时进行。

⑧ 采用双起重船抬吊大节段钢箱梁时，分配给单起重船的重力不得超过其允许起重力的80%，大节段钢箱梁的总重力不得高于两起重船额定起重量之和的75%。抬吊应统一指挥，协调作业，各起重船的运转速度宜基本一致。

⑨ 安装时应对大节段钢箱梁的倾角和钢丝绳的拉力进行实时监测，如超出预定的范围，应及时调整。

⑩ 大节段钢箱梁的安装定位应按初定位和精确定位两个步骤进行。初定位时宜设置导向装置，使大节段钢箱梁在导向装置的引导下较为准确地就位；精确定位时宜采用三维调节装置，对大节段钢箱梁的平面位置和高程进行反复精确调整，使其达到设计要求的安装精度。

⑪ 顺桥向相邻大节段钢箱梁构件的连接施工应符合“3.3.4 钢结构与钢混组合结构工程施工”关于工地连接的规定，并应采取有效措施保证其连接可靠。

### 3.5.2 拱桥施工

#### 1. 拱（支）架上现浇混凝土拱圈

跨径较小的拱圈或拱肋，应按拱圈的全宽从两端拱脚向拱顶对称地连续浇筑混凝土，并在拱脚混凝土初凝前全部完成。跨径较大的拱圈或拱肋，应沿拱跨方向分段对称浇筑，分段的位置应以拱架受力对称、均匀和变形小为原则，且宜设置在拱顶、 $L/4$  部位、拱脚及拱架节点等处；各段的接缝面应与拱轴线垂直，各分段点应预留间隔槽，其宽度宜为 0.5~1.0m。槽内有钢筋接头时，其宽度尚应满足钢筋接头的需要。

浇筑拱圈混凝土应严格按照预先制定的浇筑程序对称于拱顶进行，并控制好两端的浇筑速度，避免产生过大的偏差。分段浇筑的混凝土宜一次连续浇筑完成，因故中断时，应浇筑成垂直于拱轴线的施工缝；如已浇筑成斜面，应凿成垂直于拱轴线的平面或台阶式结合面。

采用在拱架上组装部分预制部件然后现浇混凝土的方法施工大跨径钢筋混凝土箱形拱圈，组装和现浇均应从两拱脚向拱顶对称进行。箱形拱圈的底板施工应按拱架的变形情况设置间隔缝，缝内混凝土应在底板合龙时浇筑；拱圈的底、腹板混凝土强度达到设计强度的 85% 后方可安装盖板，布设钢筋，现浇顶板混凝土。

拱圈浇筑过程中，应随时监测拱架的变形，如变形量超过计算值，应停止浇筑，及时查明原因，采取加固拱架或调整加载顺序等措施后再继续浇筑，保证施工安全。

#### 2. 无支架和少支架预制安装

(1) 采用无支架和少支架方法施工时，拱圈的预制应符合下列规定：

① 拱肋宜采用立式方法预制，先在样台上放出拱肋大样，然后制作样板，再将横隔板、吊孔、接头位置准确放出。

② 箱形拱预制可先预制横隔板、腹板并在拱胎上进行组装，再浇筑底、顶板和接头混凝土。混凝土强度达到设计强度的 85% 后，方可起吊运输到存放场地存放。

(2) 采用无支架方法安装拱圈时，宜根据桥梁规模、构件重力、施工环境条件等，选用适宜的吊装方式和吊装机具。施工前应对吊装所采用非定型产品的特殊设施和机具进行专门设计，对跨径、起拱线高程、预制拱圈节段长度等进行复核；安装后形成的拱圈基肋应进行稳定性验算。

(3) 缆索吊装法进行拱桥无支架安装

① 缆索吊装法

在峡谷或水深流急的河段上，或在通航的河流上需要满足船只正常通行时可选用缆索吊装施工。缆索吊装由于具有跨越能力大、水平和垂直运输机动灵活、适应性广、施工比较稳妥方便等优点，在拱桥施工中被广泛采用。主要施工设备包括缆索吊机塔架、缆索吊机主索（承重索）、起重索、牵引索、扣索、工作索、风缆、横移索、跑车（天车、骑马滑车）、索鞍和锚碇等。

② 主施工工序

采用缆索吊装法进行拱桥无支架安装的主要施工工序为：在预制场预制拱肋（箱）和拱上结构→将预制拱肋和拱上结构通过平车等运输设备移运至缆索吊装位置→将分段预制的拱肋吊运至安装位置→利用扣索对分段拱肋进行临时固定→吊装合龙段拱肋→对

各段拱肋进行轴线调整→主拱圈合龙→拱上结构安装。

**③ 缆索吊装法进行拱桥无支架安装的施工要点**

**A. 缆索吊装系统应符合下列规定：**

a. 主塔和扣塔宜采用常备式定型钢构件在墩、台顶上拼装，其基础应牢固、可靠，周围应设置防排水设施；塔的纵、横向宜设置风缆，且风缆的安全系数应不小于2；当塔自身能满足横向受力及抗风要求时，可不设横向风缆；塔顶部应设置可靠的避雷装置。

b. 塔顶分配梁应与塔身结构可靠连接；主索鞍在横向应设支撑装置，防止倾倒；如需移动索鞍，应做专项设计，采取有效措施后方可进行。扣塔上索鞍顶面的高程应高于拱肋扣点高程。

c. 主缆宜采用钢丝绳，其直径和数量应根据吊装构件的重量通过计算确定，安全系数应不小于3，且每根主缆应受力均匀；抗风钢丝绳的安全系数应不小于2；起吊绳的安全系数应不小于5；牵引绳的安全系数应不小于3；钢丝绳扣索的安全系数应不小于3，钢绞线扣索的安全系数应大于2。地锚的设置应满足主缆可靠锚固的要求，抗拔安全系数应不小于2，抗滑、抗倾安全系数应不小于1.4，主缆与地锚连接处的水平夹角宜为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 。

d. 设计缆索吊装系统时，应对可能出现的各种工况进行强度、刚度和稳定性验算；吊装前应对吊装系统进行检查验收，并按设计荷载进行试吊，检验其安全性和可靠性，检验合格后方可用于正式吊装。

e. 吊装施工时，对投影面垂直的拱肋，各扣索的位置应与所吊挂的拱肋在同一竖直面内；对内倾或外倾的拱肋，各扣索的位置与所吊挂的拱肋可不在同一竖直面内，但应对扣塔、扣索和拱肋的强度、刚度和稳定性进行专门验算。主塔塔顶的最大偏位宜根据索塔的强度和稳定性经验算确定，塔底为固接时，其塔顶的最大偏位宜不大于塔高的 $1/400$ ；塔底为铰接时，其塔顶的最大偏位宜不大于塔高的 $1/150$ 。扣塔塔顶的最大偏位应根据扣塔和拱肋的强度、刚度和稳定性等经验算确定。

f. 缆索吊装系统的安装、使用和拆除均应制定专项施工方案，保证施工安全。

B. 固定风缆应待全孔合龙、横向连接构件混凝土的强度满足设计要求后方可撤除。

C. 拱桥的拱圈采取单肋吊装或单肋合龙时，单肋的横向稳定必须满足安全验算的要求，且其稳定安全系数应不小于4；当不能满足时，应采用双肋合龙松索成拱的方式施工，且在双肋合龙后采取有效的横向连接措施，增强其稳定性，使其形成基肋后再安装其他肋段。

D. 拱肋安装时，各段拱肋的高程和线形应根据施工控制的要求确定，且宜从拱脚段开始，依次向拱顶分段吊装就位。扣索的扣挂应稳妥可靠，应使拱肋断面不产生扭斜，且各段拱肋的上端头均应通过扣索的调整使其略高于设计高程。多跨拱桥安装时，应根据桥墩承受不平衡水平推力的能力，经计算确定相邻孔拱肋的安装顺序。

E. 各段拱肋在松索过程中，应符合下列规定：

a. 松索的流程应根据施工控制的要求经计算确定，松索前应校正拱轴线位置及各接头高程，使其符合要求。松索应按拱脚段扣索、次拱脚段扣索、起重索的先后顺序，按比例定长、对称、均匀地松卸。

b. 每次松索时均应采用仪器观测并控制各接头、拱顶及 $1/4$ 跨处的高程，防止拱

肋接头发生非对称变形而导致拱肋失稳或开裂。每次的松索量宜小，各接头高程变化宜不超过10mm，松索压紧接头缝后应普遍旋紧接头螺栓一次。

c. 大跨径拱桥分多节段吊装合龙成拱后，根据拱肋接头密合情况及拱肋的稳定度，可保留起重索和扣索部分受力，待拱肋接头的连接工序基本完成后全部松索。

(4) 拱肋接头的焊接作业应在调整完轴线偏差、嵌塞并压紧接头缝钢板后且全部松索成拱前进行。焊接拱肋接头部件时，应采用分层、间断、交错的方法施焊，并采取措施避免损伤周围的混凝土。

(5) 采用少支架方法安装拱圈时，应符合下列规定：

① 支架及地基的要求应符合规范相关规定。设于河中的支架，应验算基础的冲刷深度，并有可靠防冲刷和防漂浮物影响的措施。支架基础不得设置在有冻胀影响的地层。

② 吊装构件应结合实际情况和设备条件，采用适宜的起吊设备和起吊方式。拱肋分段吊装到支架上后，其接头的连接处理应符合设计规定。

(6) 少支架施工时支架安装和拆卸的技术要求，除应符合“3.2 常用模板、支架和拱架设计与施工”的规定外，尚应符合下列规定：

① 卸架前应对主拱圈的混凝土质量、拱轴线的坐标尺寸、卸架设备、气温引起拱圈变化及台后填土等情况进行全面检查。

② 当拱肋接头混凝土及拱肋横向联结构件混凝土的强度符合设计规定或达到设计强度的85%时，方可开始卸架。卸架宜在主拱圈安装完成后，分次缓慢卸落，使拱圈及墩、台逐渐成拱受力，卸架时应监测拱圈挠度和墩、台变位等情况，避免拱圈发生较大变形。

③ 在严寒地区，主拱圈不宜在支架上过冬，支架宜在冰冻前拆除。

### 3. 转体施工

#### 1) 概述

上部结构转体施工是跨越深谷、急流、铁路和公路等特殊条件下的有效施工方法，具有不干扰运输、不中断交通、不需要复杂的悬臂拼装设备和技术等优点。转体施工分为平转法、竖转法和平竖结合法。

平转法是将桥体上部结构整跨或从跨中分成两个半跨，利用两岸地形搭设排架（土胎模）预制，在桥台处设置转盘，将预制的整跨或半跨悬臂桥体置于其上，待混凝土达到设计强度后脱架，以桥台和锚碇体系或锚固桥体重力平衡，再用牵引系统牵引转盘，待桥体上部结构平转至对岸成跨中合龙，而后浇灌合龙段接头混凝土，待其达到设计强度后封固转盘，完成全桥施工。

平转法分为有平衡重转体施工和无平衡重转体施工两种方法，平转施工主要适用于刚构梁式桥、斜拉桥、钢筋混凝土拱桥及钢管拱桥。

竖转法主要适用于转体重量不大的拱桥或某些桥梁预制部件（塔、斜腿、劲性骨架）。其转动系统由转动铰、提升体系（动、定滑轮组，牵引绳等）、锚固体系（锚索、锚碇顶）等组成。

#### 2) 桥体预制及拼装

桥体的预制及拼装，应按照设计规定的位置、高程，并视两岸地形情况，设计适

当的支架和模板（或土胎）。预制时应符合下列规定：

- (1) 充分利用地形，合理布置桥体预制场地，使支架稳固、工料节省、易于施工。
- (2) 严格掌握结构的预制尺寸和重量，其允许偏差为±5mm，质量偏差不得超过±2%，桥体轴线平面允许偏差为预制长度的±1/5000，轴线立面允许偏差为±10mm。环道转盘应平整，球面转盘应圆顺，其允许偏差为±1mm；环道基座应水平，3m长度内平整度不大于±1mm，环道径向对称点高差不大于环道直径的1/5000。

### 3) 平转法施工

#### (1) 有平衡重转体

有平衡重转体施工的特点是转体重量大。要将转动体系顺利、稳妥地转到设计位置，主要依靠以下措施实现：正确的转体设计；制作灵活、可靠的转体装置，布设牵引驱动装置。

① 对跨径较大、转动体系重心较高的拱桥，宜采用环道与中心支承相结合的转盘结构；对中、小跨径的拱桥，可采用中心支承的转盘结构。平衡重宜视情况利用桥台或设置临时配重。转体前，应核对平衡体的重量和转动体系的重心；如采用临时配重，应保证锚固设施安全、可靠。

② 拱圈混凝土达到设计规定的强度后，方可分批、分级张拉扣索，对扣索的索力应进行检测，其允许偏差应为±3%。张拉达到设计控制应力时，拱圈应脱离支架成为以转盘为支点的悬臂平衡状态，且应根据合龙高程（考虑合龙温度）的要求精调张拉扣索。

③ 采用内、外锚扣体系时，扣索宜采用钢绞线或带镦头锚的高强度钢丝等高强度材料，其安全系数应大于2。扣点应设在拱顶点附近，当大跨径拱桥单点扣索力太大或因其他原因需采用多扣点时，应控制好扣索的同步张拉，使拱圈的截面应力处于允许的受力状态。

④ 扣索和锚索之间宜通过置于扣、锚支承（桥台或立柱）的顶部交换梁相连接。扣索的锚点高程不宜低于扣点，宜与通过锚点的水平线形成0°~5°的角度。采用千斤顶张拉扣索时应分级进行，并同时对结构内力及挠度进行监测，直至拱圈脱架。

⑤ 扣索张拉到位、拱圈卸架后，应有24h的观测阶段，检验锚固、支承体系的可靠程度，同时应观测拱结构的变形状态及随气温变化的规律，确定转体前拱顶的高程。

⑥ 转体的牵引索可采用钢绞线或高强度钢丝束，其一端引出，另一端绕固于上转盘上，牵引动力可采用连续作业液压千斤顶等。转动时宜控制速度，角速度宜不大于0.01~0.02rad/min或拱圈悬臂端的线速度宜不大于1.5~2.0m/min。采用钢绳牵引转动时，应在千斤顶直接顶推启动后再进行。

⑦ 转体牵引力应有一定的富余，转体牵引力可按式(3.5-1)计算：

$$T = \frac{2fGR}{3D} \quad (3.5-1)$$

式中  $T$ ——牵引力(kN)；

$G$ ——转体总重力(kN)；

$R$ ——铰柱半径(m)；

$D$ ——牵引力偶臂(m)；

$f$ ——摩擦系数，无试验数据时，可取静摩擦系数为0.1~0.12，动摩擦系数为0.06~0.09。

⑧ 转体合龙应在当日最低温度时进行，宜采取先打入钢楔的快速合龙措施，然后施焊接头钢筋、浇筑接头混凝土、封固转盘。合龙应严格控制拱肋的高程和轴线，合龙接口的高程允许偏差应为±10mm，轴线允许偏差应为±5mm。当合龙温度与设计计算温度相差较大时，应考虑温度差带来的影响，修正合龙高程；合龙段混凝土达到设计强度后，应分批、分级松扣，拆除扣、锚索。

#### (2) 无平衡重转体

无平衡重转体主要适用于大跨度拱桥施工，是把有平衡重转体施工中的拱圈扣索拉力通过设置在两岸岩体中的锚碇平衡，包括转动体系施工、锚碇系统施工、转体施工、合龙卸扣施工等。

① 转体系统宜由锚固、转动和位控三大体系组成。在尾索张拉、扣索张拉、拱体平转、合龙卸扣等工序施工时应进行索力、轴线、高程等监测。

② 张拉尾索时，两组尾索应按上下左右对称、均衡的原则，对桥轴向和斜向的尾索进行分次、分组交叉张拉，并使各尾索的内力均衡。张拉达到设计规定的荷载后，应对其内力进行量测；不符合要求时，应重新进行张拉，使其达到设计内力且均衡。

③ 张拉扣索前，应在桥轴向和斜轴向支撑以及拱顶， $3/8$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 跨径处设立平面位置和高程监测点，并全面检查支撑、锚梁、轴套、拱铰、拱体和锚碇等的质量，经分析确认安全后，方可开始张拉。扣索分级张拉时，应对称于拱体按由下向上的次序进行，张拉过程中应随时进行监测，各索内力的相对偏差应控制在5kN以内。

④ 转体前应对全桥各部位进行检查，符合要求后方可正式转动；转体不能自行起动时，宜采用千斤顶在拱顶处施力使拱体起动，并以风缆控制拱体的转速，风缆的走速在起动和就位阶段宜控制在0.5~0.6mm/min，中间阶段宜控制在0.8~1.0mm/min。当拱体采用双拱肋在同一岸上下游预制并进行平转达到一定角度后，上下游拱体宜同步对称，向桥轴线旋转。

⑤ 两岸拱体平转至桥轴线位置就位后，应对其高程和轴线进行测量，不符合设计应及时调整，且按设计要求的合龙温度或修正后的合龙温度进行施工。

⑥ 合龙口混凝土符合设计规定的强度或达到设计强度的85%后，应按对称、均衡的原则，分级卸除扣索，卸除过程中应对拱体的拱轴线和高程以及扣索的内力进行监测；全部扣索卸除后，应测量拱体的最终轴线位置和高程。

### 4) 坚转法施工

(1) 地形及施工条件适合时，混凝土肋拱、刚架拱、钢管混凝土拱可选择竖转法施工。

(2) 待转桥体在桥轴线的河床上设架或拼装，根据提升能力确定转动单元为单肋或双肋，宜采用横向连接为整体的双肋为一个转动单元。

(3) 扣索宜选用钢丝绳或钢绞线，扣索的锚碇宜采用钢筋混凝土结构。扣索系统应经计算确定，钢丝绳安全系数应不小于6；钢绞线安全系数应不小于2；锚碇抗拔、抗滑安全系数应不小于2。

(4) 索塔设计应充分考虑偏载、荷载变化和风力等不利影响，应保证其强度、刚

度及稳定性满足拱肋竖转的要求。

(5) 转动铰宜根据推力大小选用钢制的轴销铰、钢板包裹混凝土的弧形柱面铰或球面铰；转动铰应转动灵活，接触面应满足局部承压的要求。

(6) 转动前应进行试转，检验转动系统的可靠性。竖转速度宜控制在 0.005~0.01rad/min 范围内，提升或下放重力大者宜采用较低的转速，转动过程中应保持平稳。

#### 4. 劲性骨架拱

(1) 劲性骨架宜采用无支架或少支架法进行节段拼装，拱轴线及桥轴线的控制标准可按钢管混凝土拱的要求执行。

(2) 劲性骨架拱圈的浇筑应符合下列规定：

① 应在分析计算劲性骨架或劲性骨架与混凝土组合结构受力工况的基础上，进行混凝土浇筑程序设计；施工过程中应对结构的应力和变形进行监控。

② 采用分环多工作面均衡浇筑法施工时，各工作面的工作段长度可根据模板长度划分，且浇筑进度差宜不超过一个工作段。

③ 采用水箱压载分环浇筑法施工时，应严格控制 1/4 跨截面附近劲性骨架的变形，预防混凝土开裂；必要时可在浇筑该处第一层（环）混凝土时设置约 200mm 的变形缝，待浇完第一层（环）后再采用混凝土填实。

④ 采用斜拉扣挂分环连续浇筑法施工时，应选用可靠且操作方便的扣索系统，并应确定扣索的索力、位移和张拉程序，控制连续浇筑混凝土过程中拱圈（拱肋）的变形。

⑤ 分阶段浇筑拱圈时，应严格控制每一施工阶段劲性骨架及劲性骨架与混凝土形成组合结构的变形形态、位置、拱圈高程和轴线横向偏位，其变形值、高差和偏位等应符合设计要求，否则应采取纠正措施。

#### 5. 钢管混凝土拱

(1) 钢管拱肋的制造加工除应符合本书“3.3.4 钢结构与钢混组合结构工程施工”的相关要求外，尚应符合下列规定：

① 用于制造加工的各种材料应符合设计及相关标准的规定。

② 钢管拱肋的制造应在工厂内进行。应提前根据设计文件编制制造工艺，绘制加工图和拼装图等。公差范围应考虑加工误差和焊接变形的影响合理确定，并进行焊接工艺评定；制造完成后，应在厂内进行不少于三个安装节段的试拼装。

③ 拱肋的分段长度应根据材料、工艺、运输和吊装等因素确定，并按不少于三个安装节段的长度进行 1:1 精确放样，其拱轴线应符合设计规定。合龙节段的尺寸应计入制造误差、温度及焊接变形等影响。

④ 制造加工时，钢管对接的端头宜校圆，其失圆度宜不大于钢管外径的 3/1000，在钢管的端口处宜适当加设内支撑，减少运输、安装过程中端口的失圆变形。钢管环向对接接头应采用有衬管的单面坡口或无衬管的双面坡口熔透焊缝。环向焊缝的间距应符合设计规定。设计未规定时，直缝接管应不小于管的直径，螺旋接管应不小于 3m；纵向焊接时，其焊缝应错开 1/4 圆周。钢管对接的径向偏差应不超过管壁厚的 0.2 倍。

⑤ 拱肋节段的对接接头宜与母材等强度焊接。所有焊缝均应进行外观检查，焊缝内部质量应达到Ⅱ级以上标准，熔透焊缝应进行 100% 的超声波探伤。

⑥ 主管与腹管采用相贯焊接时，腹管的相贯线及坡口制作应采用全自动相贯线切割机完成。相贯焊接接头中焊接材料和焊接工艺的选择，应在满足强度的原则下保证接头的韧性；受疲劳控制的相贯焊缝应按设计要求对焊接处进行焊后修磨处理。

⑦ 焊缝超声波探伤质量检验应符合相关规定。

⑧ 钢管拱肋加工时，应设置泵送混凝土压注孔、防倒流截止阀、排气孔及吊点、扣点、节点板等。对压注混凝土过程中易产生局部变形的部位（如腹箱）应设置内拉杆。

⑨ 钢管拱肋的外表面应按设计规定进行长效防腐处理。

#### （2）钢管拱肋安装应符合下列规定：

① 钢管拱肋在成拱过程中，宜同时安装横向连结系，未安装连结系的拱肋不得超过一个节段，否则应采取临时横向稳定的措施。特殊情况下采用单肋合龙的安装方案时，应设置可靠的节段连接装置和足够的横向抗风缆，保证单拱肋的横向稳定。

② 拱肋节段间的焊接宜按安装顺序同步进行，且宜对称施焊。施焊前应保证节段间有可靠的临时连接，并有效地控制焊缝间隙；施焊时结构应处于无应力状态。合龙口的焊接或栓接作业应选择环境温度相对稳定的时段内尽快完成。

③ 采用斜拉扣挂悬拼法施工时，拱肋上的扣挂节点应进行专门设计，并在工厂制造时设置。扣索宜采用多根钢绞线或高强度钢丝束，并根据使用环境设防腐护套，扣索的强度安全系数应大于2；对钢绞线扣索，应有防止扣索松弛以及减少风致振动影响的可靠措施。

#### （3）混凝土施工应符合下列规定：

① 混凝土应采用泵送顶升压注施工，混凝土输送泵的性能应能满足顶升压注施工的需要；混凝土应具有低含气量、大流动性、收缩补偿、延后初凝和早强等性能，其配合比应经试验确定。

② 压注前应先清洗内管，润湿管壁并泵入适量水泥浆，然后再正式压注混凝土。

③ 应由拱脚至拱顶对称、均衡地压注混凝土，有腹箱的断面应先管后腹，除拱顶外不宜在拱肋内的其他部位设置横隔板。压注应连续进行，不得中断，直至拱顶端端的溢流管排出正常混凝土时方可停止，溢流管的高度应为1.5~2.0m。压注时尚应考虑上、下游拱肋的对称性和均衡性，并将施工时间控制在混凝土初凝时间内。混凝土压注完成后应及时关闭设于压注口的倒流截止阀。

④ 缆板间的混凝土不宜采用压注施工。

⑤ 大跨径钢管混凝土拱桥宜采用多级泵送工艺，其混凝土配合比和泵送工艺，应在试验室试验的基础上，根据需要进行模拟压注试验。

⑥ 管壁与混凝土应结合紧密，管内混凝土应密实，其质量检验可按《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21：2000的规定执行。

#### （4）吊索和系杆索的安装应符合下列规定：

① 吊索和系杆索应采用符合设计规定的产品。安装应顺直、无扭转；防护层应完整、无破损。

② 纵横梁安装完成后，按高程和内力双控制的原则对吊索进行调整，在完善上、下锚头处细部构造的防腐处理后，方可进行桥面系的施工。

③ 系杆索的张拉值应符合设计规定，并与加载工况相对应，上、下游应对称张拉。除应对系杆索进行内力和伸长量的双控外，还应监测结构关键部位的变形，使其控制在设计允许范围内。

④ 吊索和系杆索的上、下锚头应按设计要求采取防排水、防腐蚀及防老化的措施。

## 6. 悬臂浇筑

(1) 拱圈的首段可采用支架法或其他适宜的方法浇筑，然后在其上拼装挂篮。

(2) 悬臂浇筑拱圈的挂篮除应符合“3.5.1 梁式桥施工”中的“4. 悬臂浇筑施工”的规定外，尚应符合下列规定：

① 挂篮应具有可靠的稳定性和良好的调节性能，应能适应各拱段倾斜角度的变化。

② 挂篮行走轨道应与拱圈弧度相适应，并与拱圈可靠连接，避免行走时下滑。

③ 挂篮应设置可伸缩的抗剪装置，抵抗浇筑拱圈混凝土时产生的下滑力，且不应影响挂篮的正常行走。

④ 底模宜设计成可调节式的弧形模板，满足拱圈弧度不断变化的要求。

⑤ 后锚系统应稳固可靠，且应适应拱圈的弧度变化，后支点宜反顶在拱圈上。

⑥ 对拱圈的两个半拱，应各配备一套挂篮，按从拱脚至拱顶的施工顺序，对称浇筑拱圈混凝土。两个半拱的施工进度应保持基本对称同步，且符合设计的规定。

(3) 悬臂浇筑拱圈的扣索和锚索应采用钢绞线或带镦头锚的高强度钢丝束，其安全系数应大于2；锚碇可采用钢筋混凝土桩锚、重力式锚或岩锚等，锚碇的抗拔、抗滑安全系数应不小于2；扣塔应具有足够的强度、刚度和稳定性，除应满足相关规范规定外，塔顶的最大偏位宜不大于50mm。

(4) 悬臂浇筑拱圈的过程中，应对扣索和锚索系统、拱圈的应力和变形等进行监控，并确定适当的扣索张拉次数，保证拱圈混凝土在悬臂施工过程中不出现拉应力。大跨度拱桥悬浇拱圈时，应对拱肋在悬臂状态下的控制工况进行压屈分析计算，其压屈稳定系数应大于4。

(5) 对支架浇筑的首段和悬臂浇筑段的拱圈，均应严格控制其尺寸、轴线平面及立面的精度。各节段允许偏差应为±2%或符合设计规定。

(6) 悬臂浇筑拱圈应选择在当天温度最低且温度场较为稳定的时段合龙，且宜先焊接劲性骨架，达到受力状态下的合龙；然后绑扎钢筋，浇筑合龙段混凝土，完成结构状态的合龙。

(7) 扣索和锚索应在合龙段混凝土符合设计规定的强度或达到设计强度的85%后方可拆除。所有拆除工作均应按施工设计规定的程序分步、对称进行，采取措施保证施工安全。

## 7. 钢拱桥

(1) 钢拱肋的制造线形应满足设计和监控的要求。钢拱肋制造加工完成后应在厂内进行试拼装。

(2) 钢拱桥的安装程序应符合设计规定，宜采用无支架或少支架的安装方法施工。采用拱上悬臂吊机安装构件时，除应具有足够的安全系数外，拱上悬臂吊机的行走系统尚应适应拱顶坡度和形状的变化；采用缆索系统吊装构件时，应符合本节第2点“3) 缆索吊装法进行拱桥无支架安装”的规定；采用起重船安装施工时，起重船的性能应满

足构件吊装的要求。

(3) 钢拱桥可单构件安装或拼装成节段安装。拼装成节段安装应防止节段在施工过程中产生过大的变形，必要时应采取临时加固措施增加其刚度。

(4) 拱肋节段间的安装应对称进行。拱肋的端头应设临时连接装置，安装时应先临时连接后再进行正式连接，并对称施焊或栓接。

(5) 钢拱桥合龙应符合设计规定并采取相应的辅助措施；设计未规定时，宜对钢桁拱采用单构件安装合龙；对钢箱拱应提前设置临时刚性连接再进行合龙钢构件的焊接或栓接。

## 8. 石拱桥

(1) 用于砌筑拱圈的拱石应采用粗料石或块石按拱圈放样尺寸加工成楔形。拱石的厚度应不小于200mm，加工成楔形时其较薄端的厚度应符合设计要求的尺寸或按施工放样的要求确定，其高度应为最小厚度的1.2~2.0倍，长度应为最小厚度的2.5~4.0倍。拱石应按立纹破料，岩层面应与拱轴线垂直，各排拱石沿拱圈内弧的厚度应一致。

(2) 拱圈及拱上结构施工时应按设计要求留置施工预拱度。砌筑前应先详细检查拱架和模板，符合要求后方可开始砌筑。拱圈辐射缝应垂直于拱轴线，辐射缝两侧相邻两行拱石的砌缝应互相错开，错开距离不小于100mm，同一行内上下层砌缝可不错开。浆砌粗料石和混凝土预制块拱圈的砌缝宽度应为10~20mm，块石拱圈砌缝宽度应不大于30mm；用小石子混凝土砌块石时，砌缝宽度应不大于50mm。

(3) 拱圈砌筑程序应符合下列规定：

① 应根据拱圈的跨径、矢高、厚度及拱架等情况，提前设计并确定拱圈砌筑的程序。砌筑时，应在适当的位置设置变形观测缝，随时监测拱架的变形情况，必要时应对砌筑程序进行调整，控制拱圈的变形。

② 跨径小于10m的拱圈，当采用满布式拱架砌筑时，可从两端拱脚起顺序向拱顶方向对称、均衡地砌筑，最后砌拱顶石；当采用拱式拱架砌筑时，宜分段、对称地先砌筑拱脚和拱顶段，后砌1/4跨径段。

③ 跨径10~20m的拱圈，不论采用何种拱架，每半跨均应分成三段砌筑，先砌拱脚段和拱顶段，后砌1/4跨径段，且两半跨应同时对称地进行。对分段砌筑的拱段，当其倾斜角大于砌块与模板间的摩擦角时，应在拱段下部设置临时支撑，避免拱段滑移。

④ 跨径大于20m的拱圈，其砌筑程序应符合设计规定；设计未规定时，宜采用分段砌筑或分环分段相结合的方法砌筑，必要时应对拱架预加一定的压力。分环砌筑时，应待下环砌筑合龙、砌缝砂浆强度达到设计强度的85%以上后，再砌筑上环。

⑤ 多孔连续拱桥拱圈的砌筑，应考虑连拱的影响，并专门制定相应的砌筑程序。

(4) 砌筑拱圈时，应在拱脚、拱顶石两侧和分段点等部位临时设置空缝；小跨径拱圈不分段砌筑时，应在拱脚附近临时设置空缝。

(5) 采用小石子混凝土砌筑拱圈时，靠拱模一面应选用底面较大且较平整的石块，必要时应稍加修整，拱背面应大致平顺；砌筑施工设置空缝时，在空缝的两侧应选用较大且较平整的石块。砌缝中的小石子混凝土应饱满、密实；对较宽的竖缝，可在填塞小石子混凝土的同时，填塞一部分小石块，将砌缝挤满。砌缝宽度应不大于50mm。

## 9. 拱上建筑

(1) 主拱圈混凝土达到设计规定强度后，方可进行拱上结构的施工。施工前应对拱上结构立柱、横墙等基座的位置和高程进行复测检查，如超过允许偏差应予以调整。基座与主拱的连结应牢固，同时应解除拱架、扣索等约束。

(2) 大跨径拱桥的拱上结构施工时应严格按设计加载程序进行，设计未提供加载程序时，应根据施工验算由拱脚至拱顶均衡、对称加载。施工中应对主拱圈进行监测和控制。

### 3.5.3 斜拉桥施工

斜拉桥由梁、塔、索三种基本构件组成桥梁结构体系。

斜拉桥又称斜张桥，是将主梁用斜拉索直接锚固在索塔上的一种桥梁，是由承压的塔、受拉的索和承弯的梁组合起来的一种结构体系，可看作是用拉索代替支墩的多跨弹性支承连续梁。这种布置形式可使梁体内弯矩减少，降低建筑高度，减轻结构自重，节省材料。斜拉桥作为一种拉索体系，比梁式桥的跨越能力更大，是大跨度桥梁的主要桥型。

斜拉桥按主梁的受力状态分为漂浮体系、支承体系、塔梁固结体系和刚构体系。

漂浮体系为塔墩固结、塔梁分离，主梁除两端有支承外，其余全部为拉索悬吊的多点弹性支承的单跨梁。

支承体系为塔墩固结、塔梁分离，主梁在墩、塔处均设有支座，为具有多点弹性支承的三跨连续梁，所有墩上支座均不约束纵向位移的称为半漂浮体系。

塔梁固结体系为塔梁固结并支承在墩上，梁的内力和挠度同主梁与塔柱的弯曲刚度比值有关，这种体系的连续支座至少有一个为纵向固定。

刚构体系为梁塔墩互为固结，形成跨度内具有多点弹性支承的刚构。另外，还有边跨斜拉索锚固在地锚上的地锚体系和在斜拉桥主跨跨中设置挂孔或剪力较形成的T构体系。

按主梁材料分为钢斜拉桥、混凝土斜拉桥、结合梁斜拉桥、混合梁斜拉桥和钢管混凝土斜拉桥。

按拉索的特征分为双索面、单索面、稀索体系、密索体系以及无背索体系斜拉桥。

按拉索的锚固体系分为自锚、地锚及部分地锚斜拉桥。

按塔形分为门形、独柱形、钻石形、A形、H形、倒V形、倒Y形等，还有斜塔、矮塔、折线塔和曲线形塔等。

斜拉桥施工主要包括主塔、主梁、拉索的施工等。斜拉桥的索塔施工时，应对其平面位置、倾斜度、应力和线形等进行监测和控制；上部结构施工时，应对其施工过程中的索力、高程以及索塔偏位等参数进行监测和控制。

#### 1. 索塔施工

索塔的构造材料主要有钢结构、混凝土结构、预应力混凝土结构等。

##### 1) 索塔施工方法及主要设备

(1) 索塔可视其结构、体形、材料、设备和设计综合考虑选用合适的施工方法。裸塔宜用爬模法施工，横梁较多的高塔宜用劲性骨架挂模提升法施工。

裸塔现浇施工主要采用翻模、滑模、爬模等方法。

① 翻模：应用较早，施工简单，能保证结构几何尺寸（包括复杂断面），外观整洁。但模板高空翻转，操作危险，沿海地区不宜用此法。

② 滑模：施工速度快，劳动强度小，但技术要求高，施工控制复杂，外观质量较差，易污染。一般倾斜度较大，预留孔道及埋件多的索塔不宜用此法。

③ 爬模：爬模兼有滑模和翻模的优势，适用于斜拉桥一般索塔的施工。施工安全，质量可靠，修补方便。国内外大多采用此法。

（2）索塔施工机械设备一般包括起重设备、施工电梯和安全通道，还有混凝土浇筑设备、供水设备及混凝土养护设备等。塔式起重机可安装在两柱中间。混凝土的垂直运输一般采用泵送。泵管宜设在施工电梯旁，便于接管、拆管和采取降温或保温措施，或处理堵管等。

## 2) 索塔施工要点

（1）施工混凝土索塔应符合下列规定：

① 塔柱节段施工长度的划分，宜根据索塔结构形式、钢筋定尺长度和施工条件等因素确定；塔柱模板系统应具有足够的强度、刚度和稳定性，并进行抗风稳定性验算。

② 塔座及塔柱实心段施工时，除应控制好模板的平面位置和倾斜度外，尚应对混凝土采取降低水化热和温度控制的措施；同时宜采取适当措施缩短塔座与承台、塔柱与塔座之间浇筑混凝土的间隔时间，间歇期宜不大于 15d。

③ 索塔与主梁不宜同时交叉施工，必须交叉施工时应采取保证质量和施工安全的措施。索塔塔柱施工时宜设置劲性骨架以保证钢筋架立、模板安装和拉索预埋导管空间定位的精度；劲性骨架宜采用型钢制作。

④ 横梁施工应设置经专门设计且可靠的支架系统，其强度、刚度和稳定性应满足使用要求，同时应考虑变形和日照温差等因素的不利影响。体积过大的横梁可沿高度方向分次浇筑，但分次浇筑的间隔时间宜不超过 15d，并采取措施防止施工接缝处产生收缩裂缝；分次浇筑时支架系统的设计宜考虑横梁的全部自重。

⑤ 塔柱和横梁可同步施工或异步施工，异步施工时塔柱与横梁之间浇筑混凝土的间隔时间应不超过 30d，并采取措施使塔梁之间的接缝可靠连接，不得产生收缩裂缝。倾斜塔柱施工应对各塔柱段落的强度和变形进行验算，分高度设置主动横撑或拉杆，使其线形、内力和倾斜度满足设计要求并保证施工期结构的安全。

⑥ 具备起吊条件时，塔柱节段的钢筋可整体制作成骨架并整体安装；但起吊时应对钢筋骨架采取适当的临时加固措施，增加其刚度，防止变形。

⑦ 应根据索塔的高度及混凝土供应能力选择适宜的混凝土输送方式，采用输送泵时宜一泵到底；当采用接力方式泵送混凝土时，上、下泵的输送能力应相互匹配，且对设置接力泵位置的结构进行承载能力的验算，必要时应采取加固措施。浇筑混凝土时应均匀分层布料，应控制混凝土的自由倾落高度不超过 2m，保证混凝土不产生离析，采取有效措施避免上部塔体施工时对下部已完成塔体的表面造成污染。混凝土浇筑完成后应及时养护，养护方法和措施应根据结构特点、气温、环境条件等因素综合确定，每一节段现浇混凝土的养护时间应不少于 7d。

⑧ 索塔横梁和拉索锚固区的预应力施工，应符合本书“3.3.3 预应力混凝土工程施工”有关规定。

工”的相关规定。对拉索锚固区曲率半径较小的环向预应力钢束，宜按设计要求进行模型试验，取得经验数据后方可正式施工。

⑨ 拉索预埋导管的安装，应在施工前认真复核施工图中拉索的垂度修正值；定位安装时宜利用劲性骨架控制导管进出口处的中心坐标，并采取其他辅助措施进行调整和固定；预埋导管不宜有接头。

⑩ 支承钢锚梁的牛腿施工时应采取有效措施控制其顶面高程，其偏差宜为±2mm；对索塔的边跨侧与中跨侧，两侧牛腿预埋钢板顶面的相对高差应不大于2mm，预埋钢板中心线的相对差值应不大于2mm。

(2) 钢锚梁的制造加工应符合本书“3.3.4 钢结构与钢混组合结构工程施工”的规定；对分节段制造、安装、现场连接的钢锚梁，应在厂内试拼装。钢锚梁的安装应符合下列规定：

① 安装前应编制专项施工方案，确定起吊安装的方法、机具设备和安全措施。主要包括：起重设备的起重能力应能满足吊重的要求；对起重设备、吊架、吊具和索具等进行必要的受力验算和安全技术验收，保证其能满足起吊安装的各项要求。

② 应进行试吊，确认安全后方可正式开始起吊安装作业；提前复测索塔内牛腿的顶面高程和支承位置，确认符合设计要求后方可进行安装。

③ 钢锚梁宜选择在6级风以下且气候条件较好的条件下进行安装。

④ 安装方式宜结合其构造特点、起重设备的能力及现场的实际情况综合确定。

⑤ 采用在索塔施工完成后再安装钢锚梁的方式时，安装前宜通过计算机模拟钢锚梁在塔内狭窄空间中的就位状况，保证钢锚梁能实现顺利安装和就位，起吊安装过程中应采取有效措施，避免钢锚梁与索塔塔壁之间产生碰撞。分节段安装钢锚梁时，应设置必要的支架对其连接处附近进行临时支承。

⑥ 采用随索塔塔柱节段施工同步安装的方式时，钢锚梁可整根起吊就位，其两端头附近塔柱内壁的模板接缝应封堵严密、不漏浆。浇筑塔柱节段混凝土时，应采用适宜的材料对钢锚梁进行包裹防护。

⑦ 不论采用何种安装方式，在安装上层钢锚梁时，均应设置作业平台，并对下层已安装完成的钢锚梁进行必要的防护，防止损伤其表面的防腐涂层。

⑧ 钢锚梁就位后，应采用三维调节装置对其纵横桥向的平面位置和锚固点位置进行精确调整定位，各平面位置的偏差应控制在±5mm以内，锚固点高程的偏差应控制在±2mm以内。

(3) 钢索塔施工应符合下列规定：

① 索塔的钢构件在工厂制造时应进行试拼装，合格后方可启运，并根据不同的运输方式对钢构件进行必要的临时加固和保护。节段钢构件安装的吊点、导向件及临时匹配件宜在厂内制造时设置。

② 应根据高空作业的特点提前制定专项施工方案，编制详细的节段钢构件吊装施工工艺，并核对各节段构件的编号和起吊重力。吊装前应对节段钢构件起吊的稳定性进行验算，并对各关键部位进行临时加固后试吊，确认无误方可正式起吊安装。

③ 钢索塔节段的起吊安装应充分考虑气候对安装施工的影响，宜选择在6级风以下且天气条件较好的条件下进行，保证施工安全。

④ 安装倾斜索塔时，应验算索塔内力，控制成塔线形，分高度设置水平横撑或拉杆。安装过程中应按设计要求分阶段对已完成的索塔采取必要的抑振措施，保证后续施工中永久结构和临时结构的安全性，以及施工操作人员的舒适性。

⑤ 对钢索塔节段安装的精确定位控制测量，宜选择在日落后4h至日出前2h，且温度场较为稳定的时段进行。

## 2. 主梁施工

### 1) 混凝土主梁的特点及施工方法

由于斜拉桥主梁的支承形式为多点连续支承，而且支承间距小，与梁式桥相比，斜拉桥的主梁梁体高跨比较小，主梁跨越能力大、建筑高度小，且主梁需承受斜拉索索力的水平分力传递的轴力。主梁施工方法与梁式桥基本相同，大体分四种：悬臂法（悬臂拼装、悬臂浇筑）、支架法（临时支墩拼装、支架上现浇）、顶推法、平转法。

### 2) 混凝土主梁施工要点

(1) 应严格按照预定的程序、方法和措施施工主梁。对飘浮或半飘浮体系的斜拉桥，主梁施工期间应使塔梁临时固结。悬臂施工主梁应保持两端施工荷载对称平衡，其最大不平衡荷载不得超过设计允许范围，并严格控制桥面上的各种临时施工荷载。

(2) 采用悬臂浇筑法施工主梁时，除应符合本书“3.5.1 梁式桥施工”的“4. 悬臂浇筑施工”有关规定外，尚应符合下列规定：

① 浇筑主梁0号及相邻梁段时，应设置经专门设计的可靠支架系统，其强度、刚度和稳定性应满足使用要求，同时应考虑变形、地基的不均匀沉降和日照温差等因素对支架系统的不利影响；施加在支架上的临时施工荷载应包括挂篮的重力。辅助跨梁段的现浇支架也应符合上述规定。

② 挂篮应经专门设计，确保满足使用期的强度和稳定性要求，同时应考虑主梁在浇筑混凝土时抗风振的刚度要求。挂篮的全部构件制作完成后应进行检验和试拼，合格后再运至现场整体组装，并应按设计荷载及技术要求进行预压。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。

(3) 主梁采用悬臂拼装法施工时，除应符合本书“3.5.1 梁式桥施工”的“5. 节段预制拼装施工”有关规定外，尚应符合下列规定：

① 梁段预制可采用长线法或短线法台座。预制台座的设计应考虑主梁成桥线形的影响，并保证预制梁段的截面尺寸能满足拼装的精度要求。预制梁段的混凝土端面应密实、饱满，不得随意修补。

② 用于梁段拼装的非定型桥面悬臂吊机或其他起吊设备，应进行专门设计并宜委托具有相应资质的专业单位加工制造，加工完成后应进行出厂质量验收。起吊设备在现场组装后应进行试吊，确认安全后方可用于正式施工。

③ 现浇0号及其相邻的梁段时，在现浇梁段和第一节预制安装梁段间宜设湿接头，湿接头结合面的梁段混凝土应凿毛并清洗干净。湿接头混凝土宜采用微膨胀低收缩混凝土。设计有规定时，应从其规定。

### (4) 钢主梁施工应符合下列规定：

① 钢梁制造完成后应在工厂内进行试拼装和涂装，经质量检验合格后方可运至工地现场。钢构件上的吊点、导向件及临时匹配件宜按设计要求在工厂加工制造时设置。

② 钢梁的钢构件或梁段在运输过程中，应采取可靠的临时加固措施，避免受到损伤。在工地临时存放时，应对存放场地进行规划，存放场地应平整、稳固、排水良好，存放的钢构件或梁段应支离地面一定高度，基础应具有足够的强度，并应防止地基的不均匀沉降；同时应采取必要的防护措施，防止钢梁积水锈蚀和栓接板面损坏、污染。

③ 钢梁架设安装采用的桥面悬臂吊机的前支点和后锚固点应严格按设计要求可靠设置，保证架设安装期的起吊安全。

④ 钢梁安装施工前应编制详细的梁段吊装的施工工艺，并制定梁段间连接的工艺标准、焊接或栓接的工艺检验标准以及施工的安全技术规程。吊装前应核对各钢构件或梁段的起吊重量、验算钢构件或梁段起吊的稳定性，经试吊确认无误后方可正式起吊安装。

⑤ 在支架上进行索塔附近无索区梁段安装时，应设置可调节梁段空间位置的装置，保证梁体在安装时的精确定位。

⑥ 应采取必要措施减少钢箱梁安装时的接缝偏差，内、外腹板位置，高度方向和宽度方向的拼接错口宜不大于2mm。

#### (5) 钢主梁合龙施工应符合下列规定：

① 主梁合龙应按设计和施工控制的要求进行，应提前确定施工程序并进行相关计算，制定详细的施工工艺及各项保障措施。

② 合龙前最后若干个悬臂施工梁段的高程、线形、轴线偏差及索力应严格控制，使合龙口两侧主梁的自然相对偏差满足合龙的误差要求。

③ 混凝土主梁和全焊钢主梁在合龙时，应按设计要求设置临时刚性连接，控制合龙口长度及主梁轴线与高程的变化；栓接钢主梁合龙时，应提前调整合龙口两侧钢主梁的姿态，并应对两侧钢主梁螺栓孔之间的间距进行控制。

④ 主梁合龙施工期间，应严格控制桥面上的临时施工荷载，不得随意施加除合龙施工需要的其他附加荷载。

⑤ 主梁中跨合龙后，应按设计要求的程序在规定时间内拆除塔梁临时固结装置，保证结构体系的安全转换。边跨合龙应根据主梁的结构特点，按本条的相关要求施工。

⑥ 多塔斜拉桥主梁的合龙顺序应符合设计的规定。

### 3. 拉索施工

#### 1) 拉索制作与防护

##### (1) 拉索制作

斜拉索使用高强度钢筋、钢丝或钢绞线制作，按材料和制作方式的不同可分为平行钢丝索、半平行钢丝索、钢绞线索、半平行钢绞线索、封装式钢缆等主要类型。目前应用较多的主要有平行钢丝和钢绞线两种拉索体系。

##### (2) 拉索防护

斜拉索是斜拉桥的主要受力构件，其防护质量决定整个桥梁的安全和使用寿命。拉索全部布置在梁体外部，且处于高应力状态，对锈蚀比较敏感，而锈蚀是斜拉索劣化的起因。因此拉索防护很重要。斜拉索防护可分为临时防护和永久防护两种。防护类型主要有：封闭索防护、平行索用塑料罩套保护、套管压浆法、预应力混凝土索套防护、

直接挤压护套法等。

## 2) 拉索安装

(1) 拉索及其附件应符合设计规定，进场后应进行质量验收。成品拉索在出厂前应做放索试验，同时应做1.2~1.4倍设计索力的超张拉检验，检验后冷铸锚板的内缩值宜不大于5mm。成品拉索和钢绞线应缠绕成盘进行运输，在起吊、运输和存放时应采取措施防止其破损、变形或腐蚀。

(2) 拉索安装前应按设计要求及拉索结构的不同制定相应的专项施工方案和施工工艺，并全面检查预埋拉索导管的位置是否准确，发现问题应及时采取措施予以处理，同时应将导管内可能有的杂物清理干净。

(3) 拉索安装应按设计和施工控制的要求进行，在安装和张拉拉索时应采用专门设计制作的施工平台及其他辅助设施进行操作，保证施工安全。张拉拉索用的千斤顶、油泵等机具及测力设备应按《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020第7章的要求进行配套校验；其能力应大于最大拉索所需要的张拉力。

(4) 拉索可在塔端或梁端进行单端张拉，张拉时应按索塔的顺桥向两侧及横桥向两侧对称同步进行。同步张拉时不同步索力之间的差值不得超出设计和施工控制的规定；两侧不对称或设计拉力不同的拉索，应按设计规定的索力分级同步张拉，各千斤顶同步之差不得大于油表读数的最小分格。拉索张拉的顺序、级次数和量值应符合设计和施工控制的规定；张拉宜以测定的索力或油压表量值为准，以延伸值作为校核；对大跨度斜拉桥，宜采用无应力索长和索力双控的方法，且宜以索长控制为主，以索力作为校核。

(5) 平行钢丝拉索的安装和张拉应符合下列规定：

① 应根据索长、索重、斜度和风力等因素，计算拉索在安装时锚头距索管口不同距离以及满足锚环支承时的牵引力；张拉杆、连接套和软牵引等施工辅助设施应经专门设计，并在正式使用前进行1.2倍设计牵引力的对拉试验。

② 吊装时不宜使用起重钩或容易对索体产生集中应力的吊具直接挂扣拉索，宜采用带胶垫的管形夹具和尼龙吊带并设置多吊点进行起吊。放索时索体应在柔软的滚轮或皮带输送机上拖拉，并控制索盘的转速，防止转速过快，导致索盘倾覆。

③ 安装时不得挤压、弯折索体，不得损伤索体的保护层和索端的锚头及螺纹；应在索管管口处设置对中控制的装置或限位器进行调控，防止锚头和索体在穿入索管时偏位而产生摩擦受损。当拉索的索体防护层和锚头已发生不影响使用的损伤时，应及时进行修复并记录在案，施工结束后对损伤部位尚应进行跟踪维护。

④ 拉索的内置式减振圈和外置式抑振器未安装前，应采取有效措施，保证塔、梁两端的索管和锚头不受到水或其他介质的污染和腐蚀。

(6) 钢绞线拉索的安装应符合下列规定：

① 安装前，应在桥面上的适当位置设置钢绞线的放线架、导向轮和切割工作平台，以及切割和镦头的相关设备，并在塔柱外的顺桥向两侧附近安装操作平台和起吊设备。

② 拉索外套管的连接接长采用热熔焊接接头时，焊接温度应符合外套管材料的要求。移动外套管时，不得将其在未加支垫保护的桥面上拖拽；起吊过程中，其下方严禁站人。与外套管有连接关系或承套关系的所有部件均应与其临时固定，临时固定时宜在塔、梁两端各留出1m左右的空间。

③ 钢绞线的下料长度应计人牵引、张拉时的工作长度；下料时对钢绞线的切割应采用砂轮锯，不得采用电弧焊或氧乙炔进行切断。

④ 牵引安装钢绞线时，其牵引装置必须安全、可靠，牵引过程中钢绞线不得产生弯折。转向时应通过导向轮实现。每根钢绞线安装就位后，均应及时采用夹片锁定。

#### （7）钢绞线拉索张拉应符合下列规定：

① 钢绞线拉索宜采用单根安装，单根张拉，最后再整体张拉的施工方法。单根钢绞线的张拉应按分级、等值的原则进行，整体张拉时应以控制所有钢绞线的延伸量相同为原则。拉索整体张拉完成后，宜对各个锚固单元进行顶压，并安装防松装置。

② 在一根斜拉索中，单根张拉后各钢绞线索力的离散误差宜不超过±2%；整体张拉完成后，各钢绞线索力的离散误差宜不超过±1%。

③ 拉索张拉全部完成后，应及时对塔、梁两端的锚固区进行最后的组装以及抗震防护与防腐处理。

④ 拉索索力实测值与设计值的偏差宜为±5%，超过时宜进行调整。调整索力时应对索塔和相应的主梁梁段进行变形和应力的监测，并做记录。

⑤ 拉索安装施工期间，应及时将索塔内张拉工作面处的油污和各种杂物清理干净，并有可靠的防火措施。

### 3.5.4 悬索桥施工

悬索桥是利用主缆和吊索作为加劲梁的悬吊体系，将荷载作用传递到索塔和锚碇的桥梁，具有跨越能力大、受力合理、能最大限度发挥材料强度、造价经济等特点，是跨越千米以上障碍物最理想的桥型。悬索桥主要结构由主缆、索塔、锚碇、吊索和加劲梁组成。

#### 1. 悬索桥分类及施工内容

##### 1) 悬索桥分类

按主缆锚固方式分为地锚式和自锚式悬索桥。大多数悬索桥采用地锚式，主缆通过锚碇将拉力传给地基，是大跨度悬索桥最佳受力模式，锚碇处要求地基承载力大。自锚式悬索桥将主缆直接锚固在加劲梁两端，无需设置锚碇结构，加劲梁直接承受主缆传来的水平分力，适用于两岸地基承载力较差，特别是软土地区的桥位，自锚式跨度不宜太大。

按主缆线形分为双链式和单链式悬索桥。双链式是在一个吊杆平面内设有两根主缆，两根主缆具有不同的线形，为克服半跨有荷载作用时加劲梁产生的S形变形，应用双链式结构具有较大的刚度，对非对称荷载的适用性强，但构造复杂，常作为景观桥建造。单链式是在一个吊杆平面内仅设单一线形的悬索主缆，整个悬索桥设两根平行主缆。现代大跨径悬索桥一般采用单链式结构。

按悬吊跨数分为单跨、两跨、三跨和多塔多跨悬索桥。单跨悬索桥适合于边跨地面较高、采用桥墩支承边跨的结构；两跨悬索桥是一个边跨与主跨的加劲梁采用悬吊，另一个边跨的梁体由桥墩支承的结构；三跨悬索桥结构受力合理，线形流畅、对称。

按悬吊方式分为竖直吊索、三角斜吊索、竖直和斜吊索混合式、悬吊-斜拉组合体系悬索桥。

按加劲梁的支承结构分为单跨两铰、三跨两铰和三跨连续悬索桥。

按加劲梁材料类型分为钢箱梁、钢桁梁和预应力混凝土加劲梁悬索桥。

## 2) 悬索桥的施工内容

悬索桥下部工程包括锚碇基础、锚体和塔柱基础等施工，上部工程包括主塔、主缆、吊索和加劲梁的施工。

(1) 悬索桥施工一般包括以下四大步骤：

① 索塔、锚碇的基础工程施工，同时加工制造上部结构所需构件。

② 索塔、锚碇施工及上部施工准备。包括塔身及锚体施工、上部施工技术准备、机具和物资准备、预埋件等上部施工准备工作。

③ 上部结构安装。即缆索系统安装，包括主、散索鞍安装，先导索施工，猫道架设，主缆架设，紧缆，索夹安装，吊索安装，主缆缠丝防护等。

④ 桥面系施工。即加劲梁和桥面系施工，包括加劲梁节段安装、工地连接、桥面铺装、桥面系及附属工程施工、机电工程等。

悬索桥施工主要工序包括：基础施工→塔柱和锚碇施工→先导索跨越工程→牵引系统和猫道系统→猫道面层和抗风缆架设→索股架设→索夹和吊索安装→加劲梁架设和桥面铺装。

## (2) 悬索桥主要施工机具设备

① 下部结构施工主要机具设备：起重设备、混凝土拌和及输送设备、钢筋加工设备、模板、测量及试验仪器设备等。

② 上部结构施工主要机具设备：常用机具设备、牵引系统专用设备及机具、紧缆机、缠丝机、索股架设小型机具、加劲梁吊装设备等。其中常用机具设备包括塔式起重机、电梯、卷扬机、千斤顶、交通船、驳船、手拉葫芦、滑车组、卸扣、测量及试验仪器等。

## 2. 锚碇施工

锚碇是悬索桥的主要承重构件，主要抵抗来自主缆的拉力并传递给地基基础。按受力形式的不同可分为重力式锚碇、隧道式锚碇和岩锚等。

重力式锚碇依靠自身巨大的重力抵抗主缆拉力。重力式锚碇由基础、锚体及锚固系统三部分组成，锚碇基础形式通常有明挖基础、沉井基础、地下连续墙基础、箱形基础、矩形排桩基础等。锚体结构一般由锚块、散索鞍支墩、后锚室、前锚室侧墙和顶板、后浇段等组成。

锚碇基础基坑开挖、支护、大体积混凝土浇筑和加固施工等可参照本书相关章节。

隧道式锚碇的锚体嵌入地基基岩内，借助基岩抵抗主缆拉力，隧道式锚碇主要构造有锚塞体、散索鞍支墩、隧洞支护构造、前锚室、后锚室等。按传力机理，可分为普通隧道锚和复合式隧道锚。隧道式锚碇只适合在基岩坚实完整的地区，其他情况大多采用重力式锚碇或自锚式悬索桥。

岩锚是通过锚固钢绞线或锚杆直接锚固于岩体，将荷载传递至基岩，岩锚与隧道锚的主要区别在于：隧道锚是将主缆索股通过锚固系统集中在一个隧洞内锚固，隧洞内浇筑混凝土形成锚塞体；而岩锚则将锚固系统的预应力筋分散设置在单个岩孔中锚固，不需要浇筑混凝土锚塞体，高质量的岩体替代了锚塞体，从而节省大量混凝土锚体材料。

## 1) 主缆锚固体系

锚固系统是主缆索股与锚碇的连接构造，也是主缆的传力系统，主缆索股锚固系统按使用材料、结构构造和传力机理，可分为型钢锚固系统和预应力锚固系统两种类型。

### (1) 型钢锚固系统

型钢锚固系统一般由锚杆、锚梁及支撑架三部分组成，前部有设锚梁和不设锚梁两种形式。根据锚块前部有无锚梁，可分为前锚梁式型钢锚固系统和拉杆式型钢锚固系统。

施工程序如下：锚杆、锚梁制作→现场拼装锚支架（部分）→安装后锚梁→安装锚杆于锚支架→安装前锚梁→精确定位→浇筑锚体混凝土。

### (2) 预应力锚固系统

一般由预应力束、锚具、预埋管道和防护帽组成；锚具由锚头、夹片、锚下垫板、螺旋筋及密封圈等组成。根据材料不同，分为预应力钢绞线锚固系统和预应力粗钢筋锚固系统。预应力钢绞线系统包括有粘结不可更换式锚固系统和无粘结可更换式锚固系统，其中不可更换式一般采取预应力束张拉压浆方式，可更换式一般采取张拉预应力束注油方式。

预应力锚固系统施工程序如下：基础施工→安装预应力管道→浇筑锚体混凝土→穿预应力筋→安装锚固连接器→预应力筋张拉→预应力管道压浆→安装与张拉索股。

## 2) 锚碇施工

(1) 重力式锚碇基坑开挖应沿等高线自上而下分层进行，在坑外和坑底应分别设置截水沟和排水沟，并防止地面水流流入坑内引起塌方或破坏基底土层。采用机械开挖时，应在基底高程以上预留150~300mm土层采用人工清理，且不得破坏基底岩土的原状结构；采用爆破方法施工时，宜使用预裂光面爆破等小型爆破法，避免对边坡造成破坏。对深大基坑，应采取边开挖、边支护的措施，保证其边坡稳定。

(2) 地下连续墙基础基坑开挖前需对基底的基岩裂隙进行压浆封闭，减少地下水向基坑渗透。采用“逆作法”进行基坑开挖时必须进行施工监测，监测内容宜包括环境监测、水工监测、地下连续墙体监测、土工监测及内衬监测等。

(3) 隧道锚洞室和岩锚的开挖除应符合现行《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660—2020的有关规定外，尚应符合下列规定：

① 开挖前，宜根据两侧洞室的开挖方法和步骤，对围岩的侧壁收敛、拱顶下沉和底部隆起等变形进行模拟仿真计算，根据计算结果分析提出施工中变形量控制的标准。

② 开挖前应进行地表排水系统和工作坑的设计，确定防止洞外地表水流人开挖作业面的有效措施。地下水较丰富时，宜在隧洞的侧墙处设排水沟，在开挖作业面的底部设集水坑，并采取必要的措施将水引出洞外；在衬砌混凝土的施工缝处应沿隧洞轴线方向预埋止水板。

③ 条件许可时，宜在附近选取一地质相似的地方进行爆破监控试验，对爆破施工方案的各种参数进行试验和修正，据此正式确定爆破方案。开挖宜采用光面控制爆破方式，并严格控制爆破量，减少对围岩的扰动。

④ 洞口处宜设置护拱，采取有效措施防止落石等物体进入洞内。

⑤ 洞室开挖时，宜对水平净空收敛、地表及边坡位移、拱顶下沉、底板隆起等进行监控量测，监控量测的断面布置和频率宜根据实际情况确定。

⑥ 岩锚施工时的钻孔宜采用破碎法施工，成孔过程中应对钻孔深度和孔空间轴线位置进行检查和记录；达到设计深度后，应采用洁净高压水冲洗孔道并采取有效方法将钻渣掏出。锚索下料时宜采用砂轮机切割，穿束时应设置定位环，保证锚索在孔中位于对中位置，同时应避免锚索扭转。锚索安装完成后应及时对孔道进行压浆。

⑷ 型钢锚固体施工时，锚杆、锚梁在制造时应进行抛丸除锈、表面防腐涂装和无损检测等工作；出厂前应对构件连接进行试拼装，包括锚杆拼装、锚杆与锚梁连接、锚支架及其连接系平面试装。当锚杆为无粘结预应力时，应使其与锚体混凝土隔离，并可自由伸缩。

⑸ 预应力锚固系统施工时，锚具应安装防护套，并注入保护性油脂，对加工件进行超声波和磁粉探伤检查。

⑹ 隧道式锚碇混凝土施工时，锚体混凝土应与岩体结合良好，且宜采用自密实微膨胀混凝土，保证混凝土与拱顶基岩紧密粘结；浇筑混凝土时洞内应具备排水和通风条件，且宜在锚塞体混凝土的水平施工缝与洞壁交界处设置消除水压力的盲管，并使盲管与锚室的排水管道联通，形成系统。

### 3. 索塔施工

索塔按材料划分包括钢索塔、钢筋混凝土索塔和钢—混凝土组合索塔，一般由基础、塔柱、横梁等组成。

根据索塔外形不同，索塔横向结构形式可分为门形框架式、桁架式、混合形式，纵向结构形式可采用单柱式、A形、倒Y形。小跨径单缆悬索桥中，还可以采用独柱式和倒V形或菱形索塔。

索塔施工过程中应对其施工状况进行监测和控制。施工完成后，应测定裸塔的倾斜度、塔顶高程及塔的中心线里程，并做好沉降、变位观测点标记。

#### 1) 塔身施工

国内大跨度悬索桥塔身主要采用钢筋混凝土塔，国外主要采用钢塔。钢塔施工主要有浮式起重机、塔式起重机和爬升式吊机等架设方法。钢塔架制作工艺程序主要包括：放样尺寸→冲孔→拼装→焊接→定中线→切削试拼。

混凝土塔柱施工工艺与斜拉桥塔身基本相同，施工用的模板工艺主要有滑模、爬模和翻模等类型，塔柱竖向主钢筋的接长可采用冷压套管连接、电渣焊、气压焊等方法。混凝土运送方式应考虑设备能力采用泵送或吊罐浇筑。施工至塔顶时，应注意索鞍钢框架支座螺栓和塔顶吊架、施工锚道的预埋件的施工。

#### 2) 索鞍施工

(1) 主索鞍施工程序，包括安装塔顶门架→钢框架安装→吊装上下支承板→吊装鞍体等。

(2) 索鞍应由专业单位加工制造。制造完成后应在厂内进行试装配和防腐涂装，并对各部件的相对位置作出永久性定位标记，经检验合格后方可运至工地现场安装。

(3) 索鞍安装前，应根据鞍体的形状和重力、施工环境条件、起吊高度等因素选用吊装设备；设置在塔顶的起重支架及附属起重装置等应进行专门设计，其强度、刚度

和稳定性应满足使用的要求，并有足够的安全系数。

(4) 起重安装的所有准备工作完成后，应对起重设备和设施进行全面检查。索鞍在正式起吊前，应先将鞍体吊离地面0.1~0.2m并持荷10min以上，检验起重设备和设施各部位的受力和变形状况，并在离地面1~3m范围内将鞍体提升起降两次，检验提升系统的性能。经上述检验并确认起重设备和设施的各部位均正常后方可进行正式起吊作业。

(5) 起吊安装索鞍时，吊点和吊具的设置应满足各点均匀受力的要求，应避免索鞍在起吊安装过程中发生扭转、侧倾或碰撞，并采取有效措施保证索鞍的涂装不受到损伤。

(6) 主索鞍在起吊安装时应缓慢、平稳，就位时应保证其位置准确；散索鞍在安装前应通过计算或模拟起吊试验确定其重心位置和吊点位置。正式起吊安装时，应使其始终保持平稳状态，且在导向装置的引导下能顺利就位，就位后应尽快将其临时固定。

(7) 主索鞍底座钢格栅和散索鞍底座安装调整完成后，应进行全桥联测检查，确认无误后方可灌注底座下的混凝土。

(8) 索鞍安装时应根据设计规定的预偏量进行就位和固定，且在主缆加载过程中根据监控数据分次顶推到设计位置。顶推前应确认滑动面的摩阻系数，严格控制顶推量。

#### 4. 主缆施工

主缆架设工程包括准备工作、主缆架设、防护和收尾工作等，主缆施工难度大、工序多，其主要施工程序如下：

##### 1) 牵引系统

牵引系统是架设于两锚碇之间，跨越索塔用于空中拽拉的牵引设备，主要承担猫道架设、主缆架设以及部分牵引吊运工作，常用的牵引系统有循环式和往复式两种。

牵引系统的架设以简单经济、尽量少占用航道为原则。通常方法是先将先导索跨越（水系或沟壑），再利用先导索将牵引索由空中架设。

索股牵引应符合下列规定：

(1) 牵引过程中应对索股施加反拉力。

(2) 牵引最初几根时，宜压低牵引速度，注意检查牵引系统运转情况，对关键部位进行调整后方能转入正常架设。

(3) 牵引过程中发现绑扎带连续两处被切断时，应停机进行修补，监视索股中的着色丝，一旦发生扭转，须采取措施予以纠正。

(4) 牵引到对岸，卸下锚头前须将索股临时固定，防止滑移，索股后端宜施加反拉力。

(5) 索股两端的锚头引入锚固系统前，须将索股理顺，对鼓丝段进行梳理，不许将其留在锚跨内。

(6) 索股横移时，须将索股从猫道滚筒上提起，确认全跨径的索股已离开猫道滚筒后，才能横向移到索鞍的正上方，横移时拽拉量不宜过大，任何人不允许站在索股下方。

##### 2) 猫道

(1) 猫道应根据悬索桥的跨径、主缆线形、施工环境条件等因素进行专门设计，其

结构形式及各部尺寸应满足主缆工程施工的需要。猫道设计应符合下列规定：

① 猫道线形宜与主缆空载时的线形基本平行，猫道对索塔产生的纵桥向变位应小于索塔高度的1/5000。猫道面层宜由阻风面积小的两层大、小方格钢丝网组成，面层顶部与主缆下沿的净距宜为1.3~1.5m；猫道的净宽宜为3~4m，扶手高宜为1.5m。猫道在桥纵向应左右对称于主缆中心线布置，猫道间宜设置若干条横向人行通道。

② 设计承重索时应充分考虑猫道的恒载及可能作用于其上的其他荷载。对承重索进行强度计算时，其荷载组合及安全系数应符合表3.5-2的规定。承重索的锚固系统应有足够的调整范围，每端宜设±2m以上的调节长度。

表3.5-2 猫道承重索强度计算的荷载组合与安全系数

荷载组合		安全系数	备注
静力结构强度验算	恒载	≥3.2	—
	恒载+施工荷载	≥2.7	—
	恒载+施工荷载+温度荷载	≥2.7	温度荷载按温降15℃考虑
风荷载组合结构强度验算	恒载+施工荷载+施工阶段风荷载组合	≥2.7	按6级风考虑
	恒载+最大阵风荷载组合	≥2.5	—

③ 设计时宜根据桥位处的施工环境条件和当地的气象条件对猫道进行抗风稳定性验算；对特大跨径悬索桥，必要时可通过猫道风洞试验，获得试验参数后对猫道进行结构动力分析及抗风稳定性验算。可采取适当增加猫道间横向连结的措施，增强其抗风稳定性。

④ 猫道的门架绳在其锚固系统可靠的情况下，可与猫道承重绳共同受力。

(2) 猫道钢构件的制作要求可参照《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020的相关规定，面层和承重索的材料均应符合相应产品的质量要求。承重索和抗风缆采用钢丝绳时，架设前应对钢丝绳进行预张拉处理，消除其非弹性变形，预张拉的荷载应不小于其破断荷载的0.5倍，且应持荷60min，并进行两次；预张拉时的测长和标记宜在温度较稳定的夜间进行。采用旧钢丝绳时，应按《钢丝绳 安全 使用和维护》GB/T 29086—2012的规定进行检验，并对其承载能力予以折减。承重索端部的锚头应垂直于承重索，并对锚头部位进行静载检验，符合受力要求后方可使用。

(3) 猫道架设应按横桥向对称、顺桥向边跨和中跨平衡的原则进行，且将裸塔塔顶的变位及扭转控制在设计允许的范围内。架设应符合下列规定：

① 先导索的架设方法宜根据桥跨跨径、地形等条件综合确定，减少对通航的影响。

② 承重索架设时，在横桥向，两侧应保持基本同步，数量差不宜超过1根；在顺桥向，边跨与中跨应连续架设，且中跨的承重索宜采用托架法架设。架设后，应对其线形进行调整，各根索在跨中的高程相对误差宜控制在±30mm以内。

③ 面层及横向通道宜从索塔塔顶开始，同时向跨中和锚碇方向对称、平衡地进行架设安装，并设置牵引及反拉系统，控制面层铺设时可能产生的下滑等现象，保证施工安全；中跨、边跨猫道面层的架设进度，应以索塔两侧的水平力差异不超过设计要求为准进行控制。猫道面层在架设过程中应对索塔塔顶的偏移和承重索的垂度进行监测。

(4) 主缆架设完成、加劲梁安装前，应将猫道改挂于主缆上，改挂前应拆除横向通道。改挂宜分段进行，并分次逐步放松承重索的锚固系统，最终放松至承重索设计要求的放松量。改挂后的悬挂点应设在猫道的底梁处，在桥纵向的间距宜不超过24m。

(5) 主缆的防护工程及检修道安装完成后，可进行猫道的拆除工作。拆除前应利用锚固调节系统适当收紧承重索，减小猫道改挂绳的受力；猫道拆除时，宜分节段拆除其面层和底梁，拆除宜按中跨从塔顶向跨中方向、边跨从塔顶向锚碇方向的顺序进行；拆除过程中，应采取措施保证改挂绳的受力在允许范围内，并采取适当措施保护主缆、吊索和桥面附属设施等已施工完成的结构。

### 3) 主缆架设

锚碇和索塔工程完成、主索鞍和散索鞍安装就位、牵引系统架设完成后，即可进行主缆架设。主缆架设方法主要有空中纺丝法（AS法）和预制平行索股法（PPWS法）。

(1) 主缆采用预制平行钢丝索股时，宜在工厂内将对应索鞍位置的索股六角形截面调整为四边形截面，并作出相应标记。

(2) 预制平行钢丝索股的架设应符合下列规定：

① 索股牵引系统宜结合工程特点、施工安全、工艺水平及环境条件等因素综合确定。索股滚筒的间距宜为8m左右，索鞍或坡度变化较大的位置应适当加密。

② 索股放索工艺应与索股包装工艺相匹配，并采取适当措施防止索股在索盘上突然释放。放索牵引过程中应有专人跟踪牵引锚头，且宜在沿线设观测点监测索股的运行状况，发现问题应及时采取措施加以纠正。

③ 架设时对前3根索股宜低速牵引，对牵引系统进行试运转，保证运转正常后方可进行正式的索股架设。索股在牵引架设时应在其后端施加反拉力；牵引过程中如绑扎带有连续两处被绷断，应停机进行修补。索股锚头牵引到位后，卸下锚头前应将索股临时固定，防止滑移；索股架设过程中如出现鼓丝现象，入锚前应进行梳理，不得将其留在锚跨内。

④ 索股在现场整形入鞍时，应在该段索股处于无应力状态下采用整形器完成。整形时应保持钢丝平顺，不得交叉、扭转或损伤钢丝。索股横移时，应将索股从猫道滚筒上提起，确认全跨径的索股已脱离滚筒后，方可移至索鞍的正上方；横移时拽拉量不宜过大，操作人员不得处于索股下方。

⑤ 索股锚头入锚后应进行临时锚固。跨中位置应对索股设定200~300mm的抬高量，并做好编号标志。

(3) 采用空中纺丝法架设主缆时，应符合下列规定：

① 钢丝接头的性能必须通过试验确定。梨形蹄铁处或索鞍座附近不得存在工厂钢丝接头。

② 编缆前应先挂一根基准钢丝作为参照，以便确定第一条编织索股的正确高程。

③ 完成一条索股的纺丝后应对丝股进行梳理。对不符合线形要求的钢丝，必要时应进行接长或截短处理。

④ 一条丝股抖开、梳理、裁切完成后，应采用手动液压千斤顶将其挤压成圆形，采用纤维强力带每3m一道包扎定型。

⑤ 空中纺丝完成一条索股后，后续工序可按预制平行钢丝索股的要求施工。

(4) 索股线形调整应符合下列规定：

① 索股线形的垂度调整应在夜间温度稳定时进行。温度稳定的条件为：长度方向索股的温差  $\Delta t$  应不大于  $2^{\circ}\text{C}$ ，横截面索股的温差  $\Delta T$  应不大于  $1^{\circ}\text{C}$ 。

② 基准索股的线形应采用绝对垂度进行调整。调整完成后，应连续数天对其线形进行观测。观测宜在风力小于 5 级的夜间且温度稳定时进行，记录对应的跨中高程、气温、索股温度及索鞍 IP 点的偏量；对基准索股的线形，尚宜考虑索股非弹性变形滞后的影响，在进行垂度控制时适当进行预抬高，并在确认基准索股的线形稳定后方可进行其他索股的架设。其他索股的线形应以基准索股为准调整相对垂度。调整好的索股在索鞍位置应临时压紧固定，不得使其在鞍槽内滑移。

③ 索股线形进行垂度调整时，其精度宜以索股高程的允许误差控制：索股中跨跨中为  $\pm L/20000$  ( $L$  为相邻主索鞍 IP 点间距)；边跨跨中为  $\pm L_1/10000$  ( $L_1$  为散索鞍与主索鞍 IP 点间距)；上下游基准索股的高差应不大于  $10\text{mm}$ ，一般索股（相对于基准索股）为  $(-5\text{mm}, +10\text{mm})$ 。

④ 三塔或多塔悬索桥的索股线形调整可按双塔悬索桥的标准进行控制。

(5) 主缆索力的调整应以设计和施工控制提供的数据为依据，调整量应根据调整装置中测力计的读数和锚头移动量双控确定。其精度要求为：实际拉力与设计值之间的允许误差为设计锚固力的 3%。

(6) 主缆紧缆应分为预紧缆和正式紧缆两阶段进行，并应符合下列规定：

① 预紧缆应在温度稳定的夜间且将主缆全长分为若干区段分别进行。预紧缆完成处应采用不锈钢带捆紧，并保持主缆的形状，不锈钢带的间距可为  $5\sim 6\text{m}$ ，外缘索股上的绑扎带宜边紧缆、边拆除。预紧缆的目标空隙率宜为  $26\%\sim 28\%$ 。

② 正式紧缆时，应采用紧缆机将主缆挤压整形成圆形，其作业可在白天进行。紧缆的顺序宜从跨中向两侧方向进行，紧缆挤压点的间距宜为  $1\text{m}$ ；紧缆的空隙率应符合设计规定，其允许误差为  $(0, +3\%)$ ，不圆度宜不超过主缆设计直径的 5%。紧缆点空隙率达到要求后，应在靠近紧缆机的压蹄两侧打上两道钢带，带扣宜设在主缆的侧下方，其间距宜为  $100\text{mm}$ 。

(7) 主缆缠丝工作宜在二期恒载完成后进行，并应符合下列规定：

- ① 缠丝的总体方向宜由高处向低处进行，两个索夹之间则应自低到高进行。
- ② 缠丝始端应嵌入索夹内不少于 2 圈或符合设计规定，并宜施加固结焊。
- ③ 钢丝的缠绕应密贴，缠绕张力应符合设计规定，设计未规定时宜为  $2\text{kN}$ 。缠绕钢丝的接头宜采用碰接焊工艺。

④ 节间缠丝每间隔  $1\sim 1.5\text{m}$  宜进行一次并接焊，并焊部位应在主缆上表面  $30^{\circ}$  圆心角所对应的圆弧范围内。

(8) 主缆的防护涂装应符合设计或《悬索桥主缆系统防腐涂装技术条件》JT/T 694—2007 的规定，且宜在桥面铺装完成后进行。防护前应清除主缆表面的灰尘、油和水分等污物并临时覆盖，进行防护涂装等作业时方可将覆盖物分段揭开。

#### 4) 索夹与吊索施工

(1) 索夹安装应符合下列规定：

① 安装前应测定主缆的空缆线形，对设计规定的索夹位置确认后，方可于温度稳

定时在空缆上放样定出各索夹的具体位置并编号。安装前尚应清除索夹内表面及索夹位置处主缆表面的油污及灰尘，涂上防锈漆。

② 索夹在场内运输和安装过程中应注意保护，防止损坏其表面。

③ 索夹在主缆上精确定位后，应立即紧固螺栓。在紧固同一索夹的螺栓时，应保证各螺栓的受力均匀。索夹安装位置的纵向误差应不大于10mm。

④ 索夹螺栓的紧固应按安装时、加劲梁吊装后、全部二期恒载完成后三个荷载阶段分步进行，对每次紧固的数据应进行记录并存档。

⑤ 工程交工验收前宜对索夹的位置是否滑移做专项检查，且对索夹的螺栓进行紧固。

(2) 吊索的性能和质量应符合《公路悬索桥吊索》JT/T 449—2021的规定，运输和安装过程中应保证其不受到任何损伤。

## 5. 加劲梁施工

加劲梁分为钢桁架梁、钢箱梁和预应力混凝土箱梁等形式，钢桁架一般采用工厂焊接、工地高强度螺栓连接施工。

### 1) 一般要求

(1) 加劲梁安装前应制定专项施工方案，对特大跨径或处于风环境恶劣地区的悬索桥，应就加劲梁安装的方法、程序和工艺进行专门研究。

(2) 钢加劲梁应由专业单位加工制造，制造完成后应在厂内进行试拼装和防腐涂装。

### 2) 钢箱梁安装

(1) 安装钢箱梁的非定型吊机应进行专门设计并进行试吊，检验其安全性和可靠性。

(2) 钢箱梁的运输方式应满足安装要求。水上运输应保证安装时船舶定位的精度，必要时宜进行现场驳船定位试验；陆上运输应使钢箱梁能到达吊机起吊位置的正下方。

(3) 安装顺序应符合设计规定。从吊装第二节段开始，应与相邻节段间预偏0.5~0.8m的工作间隙，吊至高程后再牵拉连接，避免吊装过程中与相邻节段发生碰撞。安装合龙段前，应根据实际的合龙长度，对合龙段长度进行修正。

(4) 安装过程中应监测索塔的变位情况，并根据设计要求和实测塔顶位移量分阶段调整索鞍偏移量。

(5) 钢箱梁工地接头的焊接连接和高强度螺栓连接施工应符合“3.3.4 钢结构与钢混组合工程施工”的相关规定。采用焊接连接时，应先将待连接钢箱梁的节段与已安装节段临时刚性连接，接头焊缝的施焊宜从桥面中轴线向两侧对称进行；接头焊缝形成并具有足够的强度和刚度时，方可解除临时刚性连接。

(6) 对三塔悬索桥，两个主跨的钢箱梁应对称安装，且两个主跨安装时的梁段差宜不大于两个节段。

### 3) 钢桁架梁安装

(1) 钢桁架梁的架设方法宜根据钢桁架的结构特点、施工安全、设备和现场环境条件等因素综合确定。

(2) 采取单构件方式安装时，宜根据钢桁架梁和吊索的受力情况及桥位的气候条

件，选择全铰接法或逐次固结法。架设顺序可从索塔处开始，向中跨跨中及边跨的端部方向进行。

(3) 采用全铰接法架设时，在钢桁架梁逐渐接近设计线形后，可对部分铰接点逐次固结；采用无铰逐次固结法架设时，宜采用接长杆牵引吊索与钢桁架梁连接，且宜在不同架设阶段采用千斤顶调整吊索张力，直至最后拆除接长杆入锚。架设过程中应逐一一对钢桁架梁及吊索的内力及变形进行分析，并将桁架梁斜杆及吊索的最大应力控制在允许范围内。

(4) 应对缆索吊机、桥面吊机、铰接设备、吊索牵引机具、片架运输台车、行走轨道铰点过渡梁和移动操作平台等设备作专项设计、加工和试验。桥面吊机应满足拼装过程中顺桥向坡度变化的要求，底盘应设止滑保险装置。

(5) 在短吊索区，单片主桁不宜直接架设，宜采用临时吊索并对吊具进行改装后进行架设。合龙段宜采用单根杆件架设。

## 6. “先梁后缆”方法施工的自锚式悬索桥

(1) 自锚式悬索桥各部位的施工除应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 的相关规定外，尚应根据其结构特点和受力特性，制定针对其特殊部位的施工方案、施工工艺和控制方法。

(2) 加劲梁为钢箱梁且采用大节段现场起吊时，应对其施工工艺进行专项设计。

(3) 加劲梁为钢箱梁且采用顶推工艺安装时，应符合下列规定：

① 拼装平台的长度宜不小于 3 节钢箱的节段长度，两侧滑道应对称设置在钢箱纵隔板位置。顶推导梁应具有足够的强度和刚度，其长度宜为最大顶推跨径的 0.75 倍左右。

② 施工前应制定钢箱节段在拼装平台上进行接口拼装、焊接的工艺细则。接口处的中线和高程误差应不大于 2mm；接口的焊接均应符合 I 级焊缝的要求，并进行无损检测。

(4) 加劲梁为预应力混凝土箱梁时，宜采用分段现浇的方式施工，其施工技术要求应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 第 17 章的相关规定。

(5) 不论采用何种方法安装不同类型的加劲梁，对其支架的结构均应进行专项设计。支架的设计荷载除应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 第 5 章的相关规定外，尚应考虑主缆架设、索夹和吊索安装施工时的临时荷载。支架顶部应预留高程调整的操作空间和位置，且应使支承点与加劲梁的加劲位置相对应。

(6) 加劲梁的线形控制应充分考虑支架沉降和变形、体系转换及二期恒载等因素的影响，预拱度设置应满足施工过程中的荷载变化及受力体系转换顺序的要求。支架顶面高程应按“设计高程 + 预拱度”设置，当加劲梁为钢箱梁时，宜略低于该高程；当加劲梁为预应力混凝土箱梁时，宜等于该高程。

(7) 主缆锚固系统的施工应符合下列规定：

① 钢锚导管应与锚垫板先组焊后再安装，组焊时导管的轴线应与钢垫板平面成正交，误差应不大于 0.5°，管的内壁应进行防腐处理；钢锚导管的安装位置应符合设计三维坐标的要求，其误差应不大于 3mm。

② 索股锚固体导管密集区的混凝土应进行专门的配合比设计，浇筑时应保证其密

实性。钢锚导管的支架应稳固，应保证其在绑扎钢筋和浇筑混凝土时不移位。

(3) 散索套宜根据其构造特点进行安装。宜先安装临时套，待主缆索股架设完成后，拆除临时套，再正式安装散索套和施拧高强度螺栓。

(8) 主缆的架设方法宜根据结构特点和施工环境条件等因素综合确定。安装过程中为铅垂线形的空间线形主缆，其安装要求与铅垂线形主缆相同；安装过程中及成桥状态均为空间线形的主缆，其猫道的宽度应满足索股牵引及入锚的要求，索股应先入鞍后入锚。

(9) 索夹制作与安装除应符合上述“4) 索夹与吊索施工”的规定外，尚应符合下列规定：

① 索夹应经过厂内工艺试验确定其与主缆间的摩阻力、握裹力满足设计要求。索夹的紧固力宜通过滑移试验确定。

② 中跨索夹安装顺序宜从跨中向塔顶进行，边跨宜从锚固点附近向塔顶进行。对空间线形主缆，索夹安装时应注意偏角的变化。

(10) 吊索张拉及体系转换应符合下列规定：

① 吊索张拉前应确定施工方案，明确张拉顺序、步骤和方法；应制定鞍座顶推步骤，确定分次顶推的时机和顶推量；同时应配备接长杆、千斤顶、作业台架等施工机具。

② 吊索宜分2~3次进行张拉，逐步到位。张拉顺序宜从索塔向跨中进行，张拉时应同步、分级、均匀施力，且以拉力和拉伸长度进行双控，并以拉力为主；同时在张拉过程中应根据吊索张拉实施步骤，适时顶推鞍座，并对索塔的倾斜度、主缆和加劲梁的线形进行严密的监测和控制。

③ 张拉吊索使加劲梁脱离临时支墩后，主梁、主缆的线形应符合设计要求；体系转换后吊索的拉力误差应控制在±2%以内。

(11) 桥面铺装等二期恒载施工时，应对其施工顺序进行重点控制，应遵循均衡加载保证吊索受力平衡的原则；对预应力混凝土箱梁，尚应控制其结构变形，防止开裂。

## 7. 防腐涂装

悬索桥防腐涂装是一项技术性、专业性、工艺性要求很强的工程，为确保质量，应委托专门从事防腐工程的技术部门进行设计；选用质量优良的涂料及过硬的施工队伍，施工中必须聘请有涂装专业技术的人员进行严格监理。

悬索桥主缆防护措施主要有：主缆腻子钢丝缠绕涂层法；合成护套防护法；主缆内部通干燥空气除湿法等。

防护与涂装要点：

(1) 主缆防护应按涂装设计在桥面铺装完成后进行；防护前必须清除主缆表面灰尘、油污和水分等并做好临时覆盖，待对该处进行涂装及缠丝时再揭开。

(2) 缠丝宜在二期恒载作用于主缆后进行，缠丝材料以选用软质镀锌钢丝为宜，缠丝工作应由电动缠丝机完成。

(3) 工地焊接后应及时按防腐设计要求进行表面处理。

(4) 工地焊接的表面补涂油漆应在表面除锈24h内进行，分层补涂底漆和面漆，并达到设计的漆膜总厚度。

(5) 根据技术文件的要求，工地焊接完成后，应按涂装工艺文件的要求涂箱外装饰面漆。

### B. 施工控制

(1) 悬索桥上部构造施工时应做好监控，保证各关键结构的应力、应变在施工全过程始终处于安全可控范围内，成桥后主缆和加劲梁的线形应符合设计要求。

(2) 悬索桥上部构造施工应对下列部位或项目进行监测和控制：

① 索塔、锚碇的沉降和位移。

② 主索鞍的钢格栅定位前，应对索塔裸塔进行36h连续变形观测；主缆架设安装前，应进行索塔和锚碇的联测。

③ 主缆架设过程中，对基准索股的连续监测应不少于3d，对索塔和锚碇的沉降及位移监测应不少于3次。

④ 索夹安装前，对主缆的线形及两侧主缆的相对误差，应进行不少于3d的连续观测。

⑤ 每一节段加劲梁吊装后，均应对索塔和锚碇的沉降及变位、主缆的线形、加劲梁的线形等进行监测。

## 3.5.5 桥梁施工监控

### 1. 桥梁监测

桥梁监测是通过对桥梁结构状态的监控与评估，为桥梁在特殊气候交通条件下或桥梁运营状况严重异常时触发预警信号，为桥梁维护、维修与管理决策提供依据和指导。监测系统对以下几个方面进行监控：桥梁结构在正常环境与交通条件下运营的物理与力学状态；桥梁重要非结构构件（如支座）和附属设施（如振动控制元件）的工作状态；结构构件耐久性；桥梁所处环境条件等。

#### 1) 监测范围

(1) 敏感部位监测。一般只在桥梁内力、应变、位移变化和裂纹产生对桥梁影响至关重要的敏感部位进行监测。

(2) 总体监测。特大桥梁构造复杂，难以作地毯式人工监测。为便于适时得到桥梁正常工作的总体状况，通过对可能取得的桥梁工作参数，采用不同的方法进行“识别”，找到桥梁异常的一个或几个可能部位，再由配备检测设备的专业人员到可能异常部位检测。

#### 2) 监测方式

(1) 人工监测：配备简单的仪器，用人工作地毯式监测，用模糊分级描述桥梁状况，一般可作为定期监测、突发性事件后的特别监测。

(2) 自动监测：用固定在桥梁上的专用设备，实时地监测桥梁的工作参数；由专用设备和软件对工作参数进行识别加工，得到能反映桥梁工作状态的信息；再用特定的方法分析这些状态信息与桥梁的健康档案相比较，给出桥梁的健康状况或损伤状况。一般适用于特大的或重要的桥梁在线监测。这种方法自动化程度高，是当前的研究热点与发展方向。

(3) 联合监测：考虑到前两种方法的实际情况，用各种小型的自动化程度较高的

仪器，配合人工监测，是一个比较可行的方案。

### 3) 监测的状态

(1) 静态：监测桥梁结构的静态几何和力学参数，用以分析桥梁结构的工作状态。静态监测比较困难，一般都是加载检测。但是静态参数比较直观地反映了桥梁的工作状态。

(2) 动态：监测桥梁结构的动态几何和力学参数，用以分析桥梁结构的工作状态。动态监测适用于运营监测。

### 4) 常规监测的工作参数及桥梁监测系统与手段

#### (1) 常规监测的工作参数

① 位移：包括绝对位移和相对位移、静位移和动位移。

② 变形：如静动挠度、静动应变等。

③ 力：如索的张拉力。

④ 动力参数：如速度、加速度，可转换成频率、振形，再转换成张力、位移。

⑤ 外观和完整率：如气蚀、磨损、裂缝、剥落。

⑥ 物理化学现象：如混凝土碱集料反应、混凝土中性化（碳化、酸雨、氯蚀）、钢材锈蚀。

⑦ 环境：如风速（向）、空气（或桥体）温度、地震、交通量（和荷载）。

#### (2) 桥梁监测系统与手段

桥梁监测系统由传感器（包括倾角传感器、加速度传感器、应力传感器、拉力传感器、压力传感器、位移传感器、温度传感器、湿度传感器等）、信号调理模块、信号传输模块、数据采集存储系统、健康监测模型、健康预警模块等组成。桥梁健康监测模型如图 3.5-1 所示。主要仪器包括位移（量程）计、倾斜仪、（高程、方位、距离）测量设备、GPS、数字成像机；位移传感器、电阻应变仪、压电式应变仪、振弦应变仪、分布式光纤应变计；压力环、磁弹性张力计、油压计、剪力销等；速度计；刻度放大镜、数字成像机、超声探测仪、地面雷达等；钢筋锈蚀仪；风向（速）计、空气（或埋入式）温度计、交通量观测仪、埋入（或移动）式称重仪、摄像机。

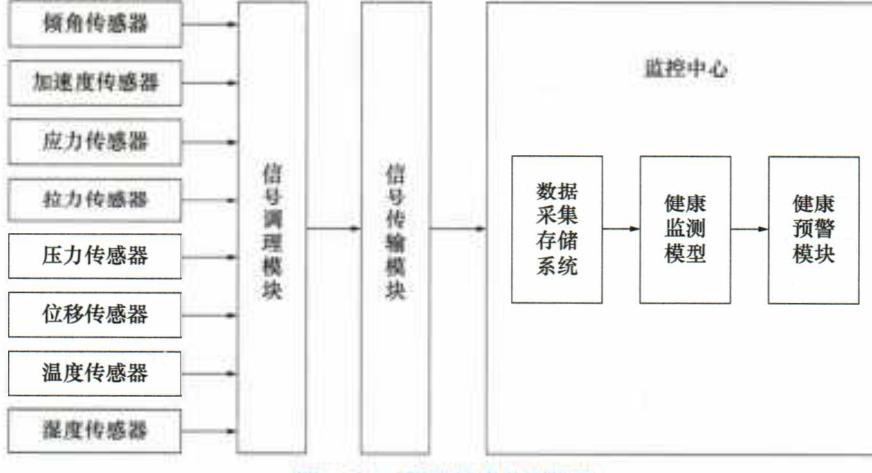


图 3.5-1 桥梁健康监测模型

首先各种传感器采集桥梁运行过程中的各种形态变化，经过信号调理后，通过传输模块传输回总控监测室，总控中心有大型的数据采集系统针对桥梁总体的各种信号进行采集，将采集到的信息记录并由健康监测模型分析，当桥梁变形超差、振动超差、位移超差、应力超差时，启动预警模块，为桥梁维护人员提供维修维护信息，避免桥梁因在非健康状态下使用而导致垮塌等引起的财产损失。

## 2. 桥梁施工控制

桥梁施工控制技术，就是把现代控制理论应用在桥梁施工中，确保施工过程中桥梁结构的内力、变形一直处于允许的安全范围内，确保最终的实际桥梁变形和内力符合设计理想的变形和内力要求。主要包括变形控制、应力控制、稳定控制和安全控制，而桥梁施工安全是变形控制、应力控制、稳定控制的综合体现。

### 1) 桥梁施工控制方法

桥梁施工控制方法可分为事后控制法、预测控制法、自适应控制法和最大宽容度控制法几种。

(1) 事后控制法是指在施工中，当已成结构状态与设计要求不符时，可通过一定手段对其进行调整，使其达到要求，这种方法现已应用不多。

(2) 预测控制法是考虑施工方案和影响桥梁状态的诸因素而确定桥梁的应变和应力的理想状态后（称控制理想状态），针对施工过程中实际情况和假定诸因素之间不一致而产生误差（这些误差值由监测测试系统反馈后），在调试系统中进行修正，再给定下一步的数据，对结构的每一个施工阶段形成的前后状态进行预测，使施工实际沿着预定的理想状态进行的控制方法。这种方法是采取纠偏终点控制的方法，即施工过程中，对产生主梁线形偏差的因素跟踪控制，随时纠偏，最终达到理想线形。这种方法常用卡尔曼（Kalman）滤波法和灰色理论等。

(3) 自适应控制法也称为参数识别修正法，是指在控制开始时，控制系统的某些设计参数与实际情况不完全相符，系统不能按设计要求得到符合实际的输出结果，但是在系统的运行过程中，通过系统识别或参数估算，不断修正参数，使设计输出与实际输出相符，从而得到控制。这种方法是应用现代控制理论中的自适应控制方法，即对施工过程中的标高和内力的实测值与预计值进行比较，对桥梁结构的主要基本设计参数进行识别，找出产生实测值与预计值（设计值）产生偏差的原因，从而对参数进行修正，达到双控的目的。

(4) 最大宽容度控制法是误差的容许值法，即在设计时给予主梁标高和内力最大的宽容度，这种做法减少了控制的难度。影响桥梁施工控制的因素主要有结构参数、施工误差因素、监测因素和结构分析计算模型、温度变化与材料收缩影响、徐变因素等。结构参数包括材料密度、结构部件截面尺寸、材料弹性模量、材料的热膨胀系数、施工荷载及预加应力或索力等，监测包括温度、应力和变形监测等内容。

### 2) 各种桥梁的施工控制特点

施工控制最基本的要求是保证施工中的安全和结构恒载内力及结构线形符合设计要求。由于桥梁结构形式和施工方法有许多，对于具体某一座桥梁的施工控制又有它的侧重点。

(1) 斜拉桥施工时，主梁悬臂浇筑或悬臂拼装过程中，确保主梁线形和顺、正确

是第一位的，施工中以标高控制为主。二期恒载施工时，为了保证结构的内力和变形处于理想状态，拉索再次张拉时以索力控制为主。所谓以标高控制为主，并非只控制主梁的标高，而不顾及拉索索力的偏差。施工中应根据结构本身的特性和施工方法的不同，采取相应的控制策略。若主梁刚度较小，斜拉索索力的微小变化将引起悬臂端挠度的较大变化，斜拉索张拉时应以高程测量为主进行控制，但索力张拉吨位不应超过容许范围，确保施工安全。若主梁刚度较大，斜拉索索力变化了很多，而悬臂端挠度的变化却非常有限，施工中应以拉索张拉吨位进行控制，然后根据标高的实测情况，对索力作适当的调整。此时标高、线形的控制主要是通过混凝土浇筑前底模标高的调整（悬臂浇筑方法）或预制块件接缝转角的调整（悬臂拼装方法）来实现。

（2）主索是悬索桥的主要承重结构，也是施工过程中吊装工序的主要承重结构，主索一经架好，它的长度和线形调整甚小，为了确保悬索内力和线形符合设计要求，主索的无应力长度（下料长度）要严格加以控制，尤其对基准束的尺寸要更加重视。对于加劲梁的拼装，为保证符合设计线形，吊杆的下料长度（无应力长度）是控制重点。可以看出，为了使在无应力状态下结构各部分的尺寸准确无误，要有一个符合结构实际的计算程序。施工过程中，除了主索和加劲梁外，对桥塔受力、索鞍偏移、吊杆和主索索股受力均匀性等应严加跟踪控制，保证应力和线形的双控实现。

（3）大跨度混凝土拱桥同样按安全、线形和恒载内力的要求进行施工控制。由于大跨度混凝土拱桥拱肋截面多采用底板、侧板、顶板分次浇筑完成的组合截面，必然造成结构挠度和内力的重分布，为确保拱肋应力和变形符合设计要求，要严格进行双控，但拱肋的形成一般要靠劲性骨架进行浇筑，其拱肋各段是在工厂放样加工制作的（无应力长度），骨架一经合龙，今后无法进行大的调整，所以大跨度混凝土拱桥的施工控制，首先要把好骨架无应力长度控制这一关，然后，做好拱肋混凝土浇筑的跟踪施工、控制，确保拱肋应力和标高符合要求。拱桥是以受压为主的结构，要重点关注施工过程中结构的稳定性。

（4）预应力混凝土连续梁或连续刚构相对斜拉桥而言，没有斜拉索，其施工控制与斜拉桥主梁相同。

凡是以悬臂浇筑或悬臂拼装施工的桥梁，都是逐节段向前推进的，施工控制中常采用逐节段跟踪控制的方法。

## 3.6 桥面及附属工程

### 3.6.1 支座与伸缩装置施工

#### 1. 支座施工

（1）支座的规格、性能应符合设计要求，并符合相应产品标准的规定。板式橡胶支座应符合现行《公路桥梁板式橡胶支座》JT/T 4—2019 的规定，盆式支座应符合现行《公路桥梁盆式支座》JT/T 391—2019 的规定，球型支座应符合现行《桥梁球型支座》GB/T 17955—2009 的规定。

（2）支座进场后，应对其规格、数量、产品合格证等进行检查，不符合设计要求的不得用于工程中。对有包装箱保护的支座，应开箱对其规格、部件数量及装箱单等进

行核对，无误后应将支座重新装入包装箱内，安装时方可再开箱；对活动支座进行开箱检查时，应注意对改性聚四氟乙烯板和不锈钢冷轧钢板的保护，防止划伤其表面，同时应检查硅脂是否注满。支座在开箱检查及安装前均不得随意拆卸其上的固定件。

(3) 支座应存放在干燥通风的库房内，不得直接置于地面，应垫高堆放整齐，保持清洁；支座不得与酸、碱、油类和有机溶剂等相接触，且应距热源至少1m以上。

(4) 支座在场内运输和装卸时，应采取有效措施，防止对其产生碰撞或其他机械损伤。

(5) 支座安装前，应对支座垫石的混凝土强度、平面位置、顶面高程、预留地脚螺栓孔和预埋钢垫板等进行复核检查，确认符合设计要求后方可进行安装。支座垫石的顶面高程应准确，表面应平整、清洁；对先安装后填灌浆料的支座，其垫石顶面应预留下足够的灌浆料层厚度。

(6) 支座安装时，应分别在垫石和支座上标出纵、横向的中心十字线，就位后两者的中心十字线应对准，并采取有效措施，保证支座处于水平状态且支座的顶面高程符合设计要求。调整支座的顶面高程时，应采用钢垫片对支座进行支垫，支垫处在支座安装完成后留下的空隙应采用环氧树脂砂浆填实。

(7) 安装双向活动或单向活动支座时，应保证支座滑板的主要滑移方向符合设计要求。安装活动支座的顶板时，宜考虑安装温度与设计要求不符时对位移的影响，必要时宜通过计算在顺桥向设置预偏量；对跨数较多、连续长度较长的连续梁，宜考虑温度、预应力、混凝土收缩与徐变等因素影响导致的梁长方向的位移变化。位移量较大时宜将支座顶板顺桥向的尺寸适当加长，保证支座能正常工作。

(8) 支座安装完成后，其顺桥方向的中心线应与梁顺桥方向的中心线水平投影重合或相平行，且支座应保持水平，不得有偏斜、不均匀受力和脱空等现象。安装完成后，应及时拆除支座上的各种临时固定构件和装置，并全面核对检查支座的形式、规格和安装方向等是否符合设计要求，如有误应及时调整。

(9) 当桥梁体系转换需要切割临时锚固装置，或施工过程中需要在支座附近进行焊接作业时，应在支座周围采取有效的隔热措施，避免损伤支座部件。

(10) 板式橡胶支座的安装应符合下列规定：

① 支座安装时，应对其顶面和底面进行检查核对，避免反置。对矩形滑板支座，应按产品表面顺桥向和横桥向的方向标注进行安装。

② 支座垫石顶面高程应准确无误。平坡情况下，一片梁（板）中两端的垫石和同一墩（台）上的垫石，其顶面高程应一致，相对高差应不超过 $\pm 1.5\text{mm}$ ，同一垫石上的四角高差应小于 $0.5\text{mm}$ ；当顺桥向有纵坡导致两相邻墩（台）的垫石顶面高程不同时，高程的控制应符合设计规定，且同一片梁（板）在考虑坡度后其相邻墩垫石顶面高程的相对误差应不超过 $3\text{mm}$ 。

③ 梁、板吊装应采取有效措施防止对支座产生偏压或过大的初始剪切变形。梁、板的就位应准确且其底面应与支座顶面密贴，否则应将梁、板吊起，对支座进行重新调整安装；梁、板安装时不得采用撬棍移动梁、板的方式进行就位。

(11) 盆式支座的安装施工应符合下列规定：

① 梁、板底面和垫石顶面的钢垫板应埋置稳固。垫板与支座间应平整密贴，支座

四周不得有0.3mm以上的缝隙，并应保持清洁。

②活动支座的改性聚四氟乙烯板和不锈钢冷轧钢板不得有刮伤、撞伤。改性聚四氟乙烯板应密封在钢盆内，应排除空气，保持紧密。

③活动支座安装前应采用适宜的清洁剂擦洗各相对滑移面，擦净后应在四氟滑板的储油槽内注满硅脂类润滑剂。

④盆式支座的顶板和底板可采用焊接或锚固螺栓栓接在梁体底面和垫石顶面的预埋钢板上。采用焊接时，应对称、间断焊接，防止温度过高对改性聚四氟乙烯板和不锈钢冷轧钢板以及对周边混凝土的影响；安装锚固螺栓时外露螺杆的高度不得大于螺母的厚度。锚固螺栓和焊接部位均应作防腐处理。

#### (12) 球型支座安装应符合下列规定：

①支座安装高度应符合设计要求，安装时应保证支座平面的水平，支座支承面的四角高差应不大于2mm。

②安装支座板及地脚螺栓时，下支座板四周宜采用钢楔块进行调整，使支座水平。支座安装过程中不得松开上顶板与下底盘的连接固定板。

③灌浆料应采用质量可靠的专用产品，灌浆应饱满、密实。灌浆料硬化并达到规定强度后，应及时拆除支座四角的临时钢楔块，楔块抽出的位置应采用相同的灌浆料填塞密实。

④梁体安装完毕或现浇混凝土梁体形成整体并达到设计要求强度后，张拉梁体预应力前，应拆除支座上顶板与下底盘的连接固定板，解除约束使梁体能正常转动和位移。

⑤拆除连接固定板后，应对支座进行清洁，检查无误后灌注硅脂，及时安装支座外防尘罩。

⑥支座采用焊接连接时，应在支座准确定位后，采用对称、间断的方式焊接。焊接时应采取适当措施，防止损伤支座的钢构件、聚四氟乙烯板、硅脂以及周边的混凝土等；焊接后应对焊接部位作防腐处理。

(13) 拉力支座、防腐支座、竖向和横向限位支座、减隔震支座等具有特殊功能和规格的支座，除应符合本节的规定外，尚宜按相应产品推荐的方法进行安装。

## 2. 伸缩装置施工

(1) 伸缩装置的规格、性能应符合设计要求，并符合现行《公路桥梁伸缩装置通用技术条件》JT/T 327—2016 的规定。

(2) 伸缩装置的钢构件外观应光洁、平整，不得扭曲变形，且应进行有效的防腐处理。伸缩装置应在工厂进行组装，出厂时应附有效的产品质量合格证明文件；吊装位置应采用明显颜色标明；运输和存放过程中应避免阳光直接暴晒或雨淋雪浸，保持清洁，防止变形。

(3) 伸缩装置安装预留槽口的尺寸应符合设计规定，锚固钢筋的位置应准确。伸缩装置安装前应对预留槽口的混凝土凿毛并清理干净。

(4) 伸缩装置宜在桥面铺装施工完成后，采用反开槽的方式进行安装；当采用先安装再铺装桥面的方式时，应采取有效措施对安装好的伸缩装置进行妥善保护。

(5) 伸缩装置安装前，应按现场的实际气温调整其安装定位值。

(6) 伸缩装置吊装时，应按制造工厂标明的吊点位置进行起吊。安装就位时，应使其中心线与桥梁的中心线相重合；在桥面的横坡方向，应按每米一点的间距进行其顶面高程的测量控制和调整。伸缩装置的安装位置和高程经检查确认符合设计要求后，应对其进行临时固定，并设置横向水平连接钢筋，将其与槽口的预埋钢筋焊接固定。

(7) 伸缩装置安装固定后应在能自由伸缩的开放状态下进行两侧过渡段混凝土的浇筑，过渡段宜采用环氧树脂混凝土或纤维混凝土。浇筑时应采取措施，防止已定位固定的构件移位，并防止混凝土渗入伸缩装置位移控制箱内或洒落在密封橡胶带缝中及表面。如发生此现象，应立即清除；对溢入桥台台帽和桥墩盖梁顶部的混凝土亦应及时清理干净。混凝土浇筑完成后应及时覆盖并洒水养护，养护时间应不少于7d。过渡段混凝土在未达到设计要求的强度前，不得开放交通。

(8) 梳齿板式伸缩装置安装时，应采取措施防止产生梳齿不平、扭曲和变形等现象，并应对梳齿间隙的偏差进行控制。在气温最高时，梳齿的横向间隙应不小于5mm，齿板的间隙应不小于15mm。

(9) 橡胶伸缩装置的安装应符合下列规定：

① 安装前应检查桥面端部预留槽口的尺寸及钢筋，确认无误后方可进行安装。采用后嵌式橡胶伸缩体时，应在桥面混凝土干燥收缩完成且徐变也大部分完成后再进行安装。

② 安装前应将预留槽口的混凝土表面清理干净，并涂防水胶粘材料。应根据气温和缝宽进行必要的调整后，再将伸缩装置安装就位并使其处于受压状态。

③ 应根据安装时的环境温度计算并设置伸缩装置的模板宽度与螺栓间距。加强钢筋与螺栓焊接就位后，再浇筑过渡段混凝土。

④ 向伸缩装置螺栓孔内灌注防蚀剂后，应及时安装盖帽。

(10) 模数式伸缩装置的安装应符合下列规定：

① 安装时宜采用专用卡具将其固定，其平面位置和顶面高程应符合设计要求；绑扎其他钢筋和铺设防裂钢筋网等工作，应在按桥面横坡定位、焊接固定后进行。

② 浇筑过渡段混凝土前应将所有间隙填塞紧密，浇筑完成后应将填塞物及时取出。

(11) 其他特殊形式和特殊规格的伸缩装置，宜按产品推荐的方法进行安装。

### 3.6.2 桥面铺装与防排水施工

#### 1. 桥面铺装

##### 1) 混凝土桥面铺装

(1) 沥青混凝土桥面铺装应符合下列规定：

① 铺装层数和厚度应符合设计规定，铺装前应对桥面进行检查，桥面应平整、粗糙、干燥、整洁。

② 沥青混凝土桥面铺筑前应洒布粘层沥青。

③ 沥青混凝土的配合比设计、铺筑及碾压等施工，应符合现行《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40—2004 的有关规定。

(2) 水泥混凝土桥面铺装应符合下列规定：

① 铺装厚度、材料、铺装层结构、混凝土强度、防水层设置等均应符合设计规定。

② 桥面铺装应在梁体的横向连接钢板焊接工作或湿接缝浇筑完成后，方可进行。

③ 铺装前应使梁、板顶面粗糙，清洗干净，并按设计要求铺设纵向接缝钢筋和桥面钢筋网。

④ 水泥混凝土桥面铺装做面应采取防滑措施，做面宜分两次进行。第二次抹平后，应沿横坡方向拉毛或采用机具压槽。拉毛或压槽的深度应符合现行《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30—2014 的有关规定。

⑤ 水泥混凝土桥面铺装如设计为防水混凝土，施工时应按相关规定执行。

⑥ 纤维水泥混凝土桥面铺装可按现行《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38：2004 的规定执行。

## 2) 钢桥面铺装

(1) 钢桥面铺装的结构层、厚度、材料等应符合设计的规定。

(2) 钢桥面铺装施工前应制定专项施工方案，并应做好人员培训、材料的调查试验以及机具设备的检查维护等准备工作。

(3) 钢梁顶面在出厂时应按设计要求涂防锈漆，桥面铺装前应喷丸或抛丸除锈并作防锈处理。

(4) 铺装前宜做试验段，试验段的铺设应包括钢桥面铺装的全部工序。

(5) 铺装应连续进行；上一层铺装前，其下层应保持干燥、整洁，不得有尘土、杂物、油污或损坏，不符合要求时应予处理。完工后的铺装层应规定严禁车辆通行的时限。

(6) 钢桥面铺装宜避开雨期施工，一旦遇雨应立即停工。只有消除雨水所带来的危害后，方可重新施工。钢桥面铺装亦不宜在夜间施工。

(7) 应采用无损检测法检测钢桥面沥青混凝土铺装质量，不得采用钻孔法。

## 2. 桥面防排水施工

(1) 桥面防水层数和采用材料应符合设计要求，材料性能和质量应符合产品相应标准的规定。

(2) 铺设桥面防水层时应符合下列规定：

① 铺设防水材料前应清除桥面的浮浆和各类杂物。

② 防水层在横桥向应闭合铺设，底层表面应平顺、干燥、干净。防水层不宜在雨天或低温下铺设。

③ 防水层通过伸缩缝或沉降缝时，应按设计规定铺设。

④ 水泥混凝土桥面铺装层当采用织物与沥青黏合的防水层时，应设置隔断缝。

⑤ 防水层施工完成但未达到规定的时间，不得开放交通。

(3) 泄水孔顶面不宜高于水泥混凝土调平层顶面，在泄水孔的边缘宜设渗水盲沟，使桥面上的积水能顺利排出。泄水管的安装应符合设计规定，并合理设置泄水口的位置，使排水不会冲刷墩台基础。

## 3.6.3 桥面防护设施与桥头搭板施工

### 1. 桥面防护设施

(1) 混凝土防撞护栏施工应符合下列规定：

① 防撞护栏应在桥面两侧对称施工；结构重心位于梁体以外的悬臂式防撞护栏，应在与主梁横向连接或拱上结构完成后方可施工。

② 就地现浇的防撞护栏宜在顺桥向每间隔5~8m设一道断缝或假缝；温差较大的地区，断缝或假缝的设置间距宜再适当减小。

③ 防撞护栏的钢筋应与梁体的预留钢筋可靠连接。

④ 模板宜采用钢模，支模时宜在其顶部和底部各设一道对拉螺杆，或采用其他固定模板的可靠装置。

⑤ 宜采用坍落度较低的干硬性混凝土，浇筑时应分层进行，分层厚度宜不超过200mm；振捣时应采取适当措施使模板表面的气泡逸出。

⑥ 搬运和安装预制的防撞护栏时，应采取适当的保护措施，防止损伤棱角处的混凝土。连接钢板的焊接质量应符合设计要求和规范的相关规定。

⑦ 防撞护栏施工完成后的顶面高程和位置应准确，位于弯道上的护栏线形应平顺。

(2) 小型构件宜在振动台上振动浇筑。混凝土砌块、小型盖板、路缘石和栏杆等小型构件，可在移动式底模上浇筑。

(3) 栏杆构件应在人行道板铺设完毕后方可安装。安装栏杆柱时，应全桥对直、校平，弯桥、坡桥应平顺。

(4) 人行道安装应符合下列规定：

① 悬臂式人行道构件应在与主梁横向连接或拱上结构完成后方可安装。

② 人行道梁应采用M20稠水泥砂浆坐浆安装，并使人行道顶面形成设计规定的横向排水坡。

③ 人行道板应在人行道梁锚固后方可铺设，设计无锚固的人行道梁、人行道板，应按由里向外的次序铺设。

④ 安装有锚固的人行道梁时，其焊接质量应符合本书3.3.1的规定。

(5) 桥面安全带和缘石的安装应符合下列规定：

① 悬臂式安全带构件应在与主梁横向连接或拱上结构完成后方可安装。

② 安全带梁应采用M20稠水泥砂浆坐浆安装且应使顶面形成设计规定的横向排水坡。

③ 桥面上的缘石宜采用混凝土现浇施工。当缘石为混凝土预制块或石材时，应采用M20稠水泥砂浆坐浆安装。

## 2. 桥头搭板施工

(1) 桥头搭板下台后填土的填料宜以透水性材料为主，并应分层填筑、压实。

(2) 台后地基如为软土，应按设计要求对地基进行处理并对台后填土进行预压，预压应在搭板施工前完成。

(3) 钢筋混凝土桥头搭板施工应符合下列规定：

① 钢筋混凝土搭板及枕梁宜采用就地浇筑的方式施工。

② 搭板钢筋与其下垫层间宜设置交错布置的垫块。在上、下两层钢筋之间应设置支撑，保证其位置准确。

③ 浇筑搭板混凝土时应按搭板的坡度由低处向高处进行，振捣时应避免碰撞钢筋、模板。

## 3.7 桥梁工程质量通病及防治措施

### 3.7.1 钻孔灌注桩断桩防治

#### 1. 原因分析

(1) 集料级配差,混凝土和易性差而造成离析卡管;混凝土坍落度小;石料粒径过大,导管直径较小(导管内径一般为200~350mm),混凝土灌注过程中堵塞导管,且混凝土初凝前未能疏通好,中断施工,形成断桩。

(2) 由于测量及计算错误,致使导管底口距孔底距离较大,首批灌注的混凝土不能埋住导管,从而形成断桩。

(3) 提拔导管时,由于测量或计算错误,或用力过量,使导管拔出混凝土面,或使导管口处于泥浆或泥浆与混凝土的混合层中,形成断桩。

(4) 提拔导管时,钢筋笼卡住导管,在混凝土初凝前无法提起,造成混凝土灌注中断,形成断桩。

(5) 导管接口渗漏致使泥浆进入导管内,在混凝土内形成夹层,造成断桩。

(6) 导管埋置深度过深,无法提起或将导管拔断,灌注中断造成断桩。

(7) 由于其他意外原因(如机械故障、停电、塌孔、材料供应不足等)造成混凝土不能连续灌注,中断间歇时间过长超过混凝土初凝时间,致使导管内混凝土初凝堵管或孔内顶面混凝土初凝不能被新灌注混凝土顶升而被顶破,从而形成断桩。

#### 2. 防治措施

(1) 关键设备(混凝土搅拌设备、发电机、运输车辆)要有备用,材料(砂、石、水泥等)要准备充足,以保证混凝土能连续灌注。

(2) 混凝土要求和易性好,坍落度要控制在180~220mm。对混凝土数量大、浇筑时间长的大直径长桩,混凝土配合比中宜掺加缓凝剂,防止先期灌注的混凝土初凝,堵塞导管。

(3) 钢筋笼制作时要采用对焊,以保证焊口平顺。采用搭接焊时,要保证焊缝不要在钢筋笼内形成错台,以防止钢筋笼卡住导管。

(4) 导管直径应根据桩径和石料的最大粒径确定,尽量采用大直径导管;对每节导管进行组装编号,导管安装完毕后要建立复核和检验制度。导管使用前,要对导管进行检漏和抗拉力试验,以防导管渗漏。

(5) 认真测量和计算孔深与导管长度,下导管时,其底口距孔底的距离控制在250~400mm(注意导管口不能埋入沉淀的回淤泥渣中),要能保证首批混凝土灌注后能埋住导管至少1.0m。随后的灌注过程中,导管埋置深度一般控制在2.0~6.0m范围内。

(6) 提拔导管时要通过测量混凝土的灌注深度及已拆下导管的长度,认真计算提拔导管的长度,严禁不经测量和计算而盲目提拔导管。

(7) 当混凝土堵塞导管时,可采用拔插抖动导管(注意不可将导管口拔出混凝土面)疏通;当所堵塞的导管长度较短时,也可以用型钢插入导管内来疏通,也可以在导管上固定附着式振捣器进行振动来疏通导管内的混凝土。

(8) 当钢筋笼卡住导管时，可设法转动导管，使其脱离钢筋笼。

### 3.7.2 钢筋混凝土梁桥预拱度偏差防治

#### 1. 原因分析

(1) 现浇梁：由于支架形式多样，地基在荷载作用下的沉陷、支架弹性变形和混凝土梁挠度的计算所依据的一些参数均是建立在经验值上的，因此计算预拱度往往与实际发生的有一定差距。

(2) 预制梁：一方面，由于混凝土强度的差异、混凝土弹性模量不稳定导致梁的起拱值不稳定、施加预应力时间差异、架梁时间不一致，从而使预拱度计算时各种假定条件与实际情况不一致，造成预拱度的偏差。另一方面，理论计算公式建立在一些试验数据的基础上，理论计算与实际本身存在偏差。如用标准养护的混凝土试块弹性模量作为施加张拉条件，当标准养护的试块强度达到设计的张拉强度时，由于梁板养护条件不同，其弹性模量可能尚未达到设计值，导致梁的起拱值大；当计算所采用的钢绞线的弹性模量值大于实际钢绞线的弹性模量值时，则计算伸长量偏小，这样造成实际预应力不够；当计算所采用的钢绞线的弹性模量值小于实际钢绞线的弹性模量值时，则计算伸长量偏大，将造成超张拉；实际预应力超过设计预应力易引起大梁的起拱值大，且出现裂缝。第三方面，施工工艺如波纹管竖向偏位过大，造成零弯矩轴偏位，则最大正弯矩发生变化较大导致梁的起拱值过大或过小。

#### 2. 防治措施

(1) 保证支架基础、支架及模板的施工质量，并按要求进行预压，确保模板的标高偏差在允许范围内。按要求设置支架预拱度，使上部构造在支架拆除后能达到设计规定的外形。

(2) 加强施工控制，及时调整预拱度误差。

(3) 严格控制张拉时的混凝土强度，控制张拉的试块应与梁板同条件养护，对于预制梁还需控制混凝土的弹性模量。

(4) 严格控制预应力筋在结构中的位置，波纹管定位应准确；控制张拉时的应力值，并按要求的时间持荷。

(5) 钢绞线伸长值计算应采用同批钢绞线弹性模量的实测值。

(6) 预制梁存梁时间不宜过长。

### 3.7.3 箱梁两侧腹板混凝土厚度不均防治

#### 1. 原因分析

(1) 箱梁模板设计不合理。

(2) 模板强度不足，或箱梁内模没有固定牢固，使内模与外模相对水平位置发生偏差。

(3) 箱梁内模由于刚度不够，在浇筑混凝土过程中发生变形。

(4) 混凝土没有对称浇筑，导致单侧压力过大，使内模偏向另一侧。

#### 2. 防治措施

(1) 内模要坚固，刚度符合相关施工规范的要求。

- (2) 将箱梁内模牢固固定，使其上下左右均不能移动。
- (3) 内模与外模在两侧腹板部位设置支撑。
- (4) 浇筑腹板混凝土时，两侧应对称进行。

### 3.7.4 钢筋混凝土结构构造裂缝防治

#### 1. 原因分析

钢筋混凝土结构的构造裂缝是指由于结构非荷载原因产生的混凝土表面裂缝，影响因素有：

##### 1) 材料原因

- (1) 水泥质量不好，如水泥安定性不合格等，浇筑后导致产生不规则的裂缝。
- (2) 集料含泥量过大，随着混凝土干燥、收缩，出现不规则的花纹状裂缝。
- (3) 集料风化严重，将形成以集料为中心的锥形剥落。

##### 2) 施工原因

- (1) 混凝土搅拌时间和运输时间过长，导致整个结构产生细裂缝。
- (2) 模板移动鼓出将使浇筑后不久的混凝土产生与模板移动方向平行的裂缝。
- (3) 基础与支架的强度、刚度、稳定性不够引起支架下沉，这种不均匀下沉或脱模过早，会导致混凝土产生裂缝，这种裂缝宽度一般较大。
- (4) 接头处理不当，导致施工缝变成裂缝。
- (5) 养护问题，塑性收缩状态将会在混凝土表面发生方向不定的收缩裂缝，这类裂缝尤以大风、干燥天气最为明显。
- (6) 混凝土高度突变以及钢筋保护层较薄部位，由于振捣或析水过多造成沿钢筋方向的裂缝。
- (7) 大体积混凝土未采用缓凝和降低水泥水化热的措施、使用了早强水泥的混凝土，受水化热的影响浇筑后2~3d导致结构中产生裂缝；同一结构物的不同位置温差大，导致混凝土凝固时因收缩所产生的应力超过混凝土极限抗拉强度或内外温差大导致表面抗拉应力超过混凝土极限抗拉强度而产生裂缝。
- (8) 水胶比大的混凝土，由于干燥收缩，会在龄期2~3个月内产生裂缝。

#### 2. 防治措施

- (1) 选用优质的水泥及集料。
- (2) 合理设计混凝土配合比，改善集料级配、降低水胶比、掺加粉煤灰及缓凝剂等；尽可能采用较小水胶比及较低坍落度的混凝土。
- (3) 避免混凝土搅拌很长时间后才浇筑。
- (4) 保证模板质量及安装效果，避免出现模板移动、鼓出等问题。
- (5) 基础与支架应有较好的强度、刚度、稳定性并采用预压措施；避免出现支架下沉或模板的不均匀沉降，不得脱模过早。
- (6) 混凝土浇筑时要振捣充分，混凝土浇筑后要及时养护并保证养护效果。
- (7) 大体积混凝土应优选矿渣水泥等低水化热水泥；采用遮阳凉棚降温或布置冷却水管等措施，以降低混凝土水化热，推迟水化热峰值的出现；同一结构物的不同位置温差应满足设计及规范要求。

### 3.7.5 悬臂浇筑钢筋混凝土箱梁施工（挠度）控制

悬臂浇筑施工（挠度）控制是桥梁施工中的一个难点，控制不好，两端悬臂浇筑至合龙时，梁底高程误差会大大超出允许范围，既对结构不利，又影响美观。

#### 1. 原因分析

悬臂浇筑钢筋混凝土箱梁桥的施工合龙标高误差是由于梁体采用节段悬臂浇筑施工，施工过程中立模标高计算采用的参数与实际有差异，计算公式为经验公式造成的，影响因素有：

- (1) 混凝土重力密度的变化、截面尺寸的变化。
- (2) 混凝土弹性模量随时间的变化。
- (3) 混凝土的收缩徐变规律与环境的影响。
- (4) 日照及温度差异引起挠度的变化。
- (5) 张拉有效预应力的大小。
- (6) 结构体系转换以及桥墩变位也会对挠度产生影响。
- (7) 施工临时荷载对挠度的影响。

#### 2. 防治措施

(1) 对挂篮进行加载试验，消除非弹性变形，向监测人员提供非弹性变形值及挂篮荷载-弹性变形曲线。

(2) 在0号块箱梁顶面建立相对坐标系，以此相对坐标控制立模标高值；施工过程中及时采集观测断面标高值并提供给监控人员。

(3) 温度控制：在梁体上布置温度观测点进行观测，掌握箱梁截面内外温差和温度在界面上的分布情况，以获得较准确的温度变化规律。

(4) 挠度观测：在箱梁的顶底板布置测点，在一天中温度变化相对小的时间，测立模时、混凝土浇筑前、混凝土浇筑后、预应力束张拉前、预应力束张拉后的标高。

(5) 应力观测：在梁体合理布置测试断面和测点，施工过程中测试截面的应力变化与应力分布情况，验证各施工阶段被测梁段的应力值和仿真分析的吻合情况。

- (6) 严格控制施工过程中不平衡荷载的分布及大小。

### 3.7.6 桥面铺装病害防治

#### 1. 原因分析

桥面铺装病害形成原因：梁体预拱度过大，桥面铺装设计厚度难以满足施工允许误差；施工质量控制不严，桥面铺装混凝土质量差；桥头跳车和伸缩缝破坏引起的连锁破坏；桥梁结构的大变形引起沥青混凝土铺装层的破坏；水害引起沥青混凝土铺装的破坏；铺装防水层破损导致桥面铺装的破坏等。桥面铺装常规性破坏与一般路面破坏原理相同。

#### 2. 防治措施

- (1) 常规破坏同路面通病防治。
- (2) 加强对主梁的施工质量控制，避免出现预拱度过大。
- (3) 加强桥面铺装施工质量控制，严格控制钢筋网的安装。

(4) 提高桥面防水混凝土的强度，避免出现防水混凝土层的破坏。

(5) 桥梁应加强桥面排水的设计和必要的水量计算；优化桥面铺装的混凝土配合比设计，选用优质集料，提高桥面铺装的施工和养护质量。

### 3.7.7 桥梁伸缩缝病害防治

#### 1. 原因分析

桥梁伸缩缝是使车辆平稳通过桥面并且满足桥梁结构变形的一整套装置，由于它是桥梁结构之间或桥台过渡到路基的可伸缩连接装置，一方面要满足桥梁结构伸缩功能，另一方面要满足车辆通行的承载需要。桥梁伸缩缝受力复杂，是结构中的薄弱环节，经常出现竣工不久即发生损坏。导致损坏的因素有：

(1) 交通流量增大，超载车辆增多，超出了设计。

(2) 设计因素：将伸缩缝的预埋钢筋锚固于刚度薄弱的桥面板中；伸缩设计量不足，伸缩缝选型不当；设计对伸缩装置两侧的填充混凝土、锚固钢筋设置、质量标准未做出明确的规定；大跨径桥梁伸缩缝结构设计技术不成熟、锚固件胶结材料选择不当等，导致金属结构锚件锈蚀，最终损坏伸缩缝装置。

(3) 施工因素：工艺缺陷；锚件焊接质量差；赶工期忽视质量检查；伸缩装置两侧填充混凝土强度、养护时间、粘结性和平整度未能达到设计标准；伸缩缝安装不合格。

(4) 管理维护因素：通行期间，填充到伸缩缝内的外来物未能及时清除，限制伸缩缝功能导致额外内力形成；轻微的损害未能及时维修，会加速伸缩缝的破坏；超重车辆上桥行驶，给伸缩缝的耐久性带来威胁。

#### 2. 防治措施

(1) 精心设计，选择合理的伸缩装置。

(2) 严格按既定施工工序和工艺标准的要求施工。

(3) 提高锚固件的焊接质量。

(4) 提高后浇筑混凝土或填缝料的施工质量，加强填缝混凝土的振捣密实，确保混凝土达到设计强度标准，及时养护，无空隙、空洞。

(5) 避免伸缩装置两侧的混凝土与桥面系的相邻部位结合不紧密。

### 3.7.8 桥头跳车防治

#### 1. 原因分析

桥头跳车是由于桥台为刚性体，桥头路基为塑性体，在车辆长期通过的影响及路基填土自然固结沉降下，桥台与桥头路基形成高差导致桥头跳车。主要影响因素有：

(1) 台后地基强度与桥台地基强度不同，台后填料自然固结压缩。

(2) 桥头路堤及堆坡范围内地基填筑处理不彻底。

(3) 台后压实度达不到标准，高填土引道路堤本身出现压缩变形。

(4) 路面水渗入路基，使路基土软化，水土流失造成桥头路基引道下沉；回填不及时或积水引起桥头回填土压实度不够。

(5) 台后沉降大于设计容许值。

(6) 台后填土材料不当，或填土含水量过大。

(7) 软基路段台前预压长度不足，软基路段桥头堆载预压卸载过早，软基路段桥头处软基处理深度不到位，质量不符合设计要求。

## 2. 防治措施

(1) 选用合适的压实机具，采用先进的台后填土施工工艺，确保台后及时回填，回填压实度达到要求。

(2) 改善地基性能，提高地基承载力，减少差异沉降。保证足够的台前预压长度。连续进行沉降观测，保证桥头沉降速率达到规定范围内再卸载。确保桥头软基处理深度符合要求，严格控制软基处理质量。

(3) 有针对性地选择台后填料，提高桥头路基压实度。如采用砂石料等固结性好、变形小且透水的填筑材料处理桥头填土。

(4) 做好桥头路堤的排水、防水工程，设置桥头搭板。

(5) 优化设计方案，采用新工艺加固路堤。

## 3.8 桥梁工程改（扩）建

### 3.8.1 桥梁工程改（扩）建要求

影响桥梁改扩建的制约因素很多，从整体上看，桥梁拼接要求和受制约的条件主要有：桥梁扩建期间不允许因桥梁的施工而中断交通，至少要保持单幅双向（单车道）通行；桥梁拼接后必须形成一座整体桥梁，保证原结构与新建结构之间的变形协调和共同受力；桥梁扩建必须与路基、路面拼接、互通，附属设施改造同步完成，不能滞后，保证总工期目标的实现。因此，在进行桥梁改扩建设计施工时应注意以下要求：

#### (1) 准备工作

① 应收集既有桥梁的设计图纸、竣工文件及相关资料，或进行必要的勘测和调研，了解既有桥梁的结构形式和现状。

② 应对桥位处地下管线和隐蔽物等的位置、尺寸进行调查，并采取保护、避让及处理措施。

③ 应根据现场的具体情况，制定专项施工方案，确定施工顺序和施工工艺，合理配备施工机具设备。

④ 应在对交通流量调查的基础上，提出交通导流和安全防护的方案，保证施工期间的施工安全和交通安全。

(2) 桥梁改建时应充分考虑原桥的技术状况、沿线的地质条件、合理的横向连接方式、新旧桥梁结构的变形协调、新旧结构合理的控制拼接时间以及在不中断原桥交通时的新桥施工方法等。

(3) 采用改扩建后的荷载标准对原有桥梁、涵洞进行结构验算的主要结论；新建桥涵与原有桥涵连接（含原有桥涵之间的相互连接）方案的比选与论证；原有桥涵维修加固方案的比选与论证。

(4) 为保证新旧桥梁的拼接质量，扩建桥梁与相应原桥孔径应相同或相近，但对于斜交跨越等级航道或等级道路的连续梁桥，受桥下通行净空的限制，拓宽桥梁的孔径应进行方案论证后确定。

(5) 考虑到公路扩建后拓宽桥梁因桥面横坡的延续对桥下净空的影响，维持等级航道和等级道路通行净空标准不变，对于拼宽部分上部结构为T梁或箱梁的情况应采取降低通行孔上部结构建筑高度的措施予以保证；对于拼宽部分上部结构为板梁的应采取降低地方道路标高等措施解决。

(6) 病害严重经加固又能利用但又不易拼接或拼接难度大而技术上又较难克服的特大桥不做横向拼接方案，宜采用线位分离方案建新桥。

(7) 桥梁拓宽上部结构形式应与旧桥上部结构形式相同或相近，这样可以保持上部结构受力的一致性；保证新旧桥梁上部结构的受力和温度作用变形协调。

(8) 下部结构形式也应与旧桥下部结构协调一致；新旧桥台也应采用匹配一致的形式。

(9) 新旧桥基础沉降差应控制在计算值5mm以内，拓宽桥梁基础宜采用桩基础形式。

### 3.8.2 桥梁工程改（扩）建施工

#### 1. 桥梁改扩建方案

目前公路桥梁改建加宽按位置可分为单侧加宽和双侧加宽两种方案。按上部结构与下部结构的连接处理主要有以下三种方案：新旧桥梁的上部结构与下部结构互不连接；新旧桥梁的上部结构和下部结构相互连接；新旧桥梁的上部结构连接而下部结构分离。

##### 1) 新旧桥梁的上部结构与下部结构互不连接方式

桥梁加宽部分与原桥的上部结构与下部结构互不连接，新旧结构之间留工作缝，桥面沥青混凝土铺装层采用连续铺装。由于旧桥混凝土收缩和徐变均已绝大部分完成，桥梁基础的沉降也大部分完成或处于稳定状态，而新桥混凝土收缩、徐变以及基础沉降都处于发展期，如果新旧桥梁的上部结构与下部结构互不连接，实际上是新旧桥结构各自受力、互不影响。这样新拓宽桥梁的设计、施工均为独立，也比较简单，但要求桥梁拓宽后桥面必须完整，就要采取在新旧桥上部结构相接处设置构造工作缝，桥面沥青混凝土铺装层连续摊铺的措施。特点是加宽桥与原桥各自受力、互不影响，简化了施工程序。但在汽车荷载作用下，两桥主梁产生不均匀挠度以及加宽桥大于原桥的后期沉降，可能会造成连接部位桥面铺装破坏形成纵向裂缝和横向错台，影响行车舒适性、安全性和桥面外观，增加后期的养护维修费用。

在具体构造方面，主要采用两种处理形式：一种是用纵向伸缩装置连接；另一种形式是在新旧结构间留一条纵缝，或用钢板包边。采用刚性路面，可以解决啃边问题，但不能解决新旧桥挠度差的问题，且高速行车时容易打滑，降低了行车的安全性。这种连接方式一般要求桥梁结构跨径较小，相对挠度差较小，否则桥面容易开裂。

##### 2) 新旧桥梁的上部结构和下部结构相互连接方式

为使加宽桥与原桥形成完整的整体，避免各种荷载（包括基础不均匀沉降、汽车荷载、温度荷载等）作用下新旧桥连接处产生过大的变形，减少桥梁上、下结构某些部位的内力，将加宽桥梁的上部构造与原桥对应部位横向通过植筋、加设钢筋骨架，然后浇筑湿接缝连接起来，同时新拓宽桥梁的下部结构（墩台）的帽梁及系梁也通过植筋技

术及加设钢筋骨架，浇筑混凝土连接件与旧桥下部结构形成整体结构。将新旧桥梁连为一体。优点是将加宽桥、原桥之间连系成为整体，拼接后桥梁整体性较好。主要缺点是由于加宽桥基础沉降大于老桥基础沉降，由此产生的附加内力较大，可能会使下部构造帽梁、系梁、桥台连接处产生裂缝；上部构造连接处也可能产生裂缝，导致使用功能下降，维修困难，外观不雅。此外，下部构造需采用植筋连接技术，工程成本高。因此该连接方案有一定的适用条件，需要采用相应技术措施。采取的技术措施有：

(1) 加强新拓宽桥梁基础，减少新旧桥梁基础的不均匀沉降差。旧桥为扩大基础的，新桥同类型基础下土层较薄、岩层埋深较浅时，采用换填或直接将基础置于岩层上的方案；当基底土层较厚，岩层埋置较深，基础条件不好时，虽然地基允许承载力满足要求，但应采取加强措施，例如加大基础成整体筏形基础、粉喷桩、碎石桩处理地基等。

(2) 为尽量减小新旧桥梁的基础沉降差及尽量缩短施工工期，控制新拓宽桥梁预制梁（板）的安装龄期，先施工拓宽部分桥梁的基础、墩（台）身及台帽（盖梁），并安装部分预制梁（板），在封闭高速公路交通后再进行下部结构拼接。

(3) 新拓宽桥梁的梁（板）安装至桥上后宜放置一段时间，再与旧桥上部结构拼接。新旧桥梁上、下部结构相互连接的方式适宜于桥梁基础较好的条件下，否则必须进行基础加固。另外这种方式也可用于独柱墩的桥梁拓宽场合，以增强下部结构的稳定性。

### 3 新旧桥梁的上部结构连接而下部结构分离方式

将加宽桥与原桥上部构造横向相互连接而下部构造不连接，形成第三种横向拼接形式。主要优点是下部构造不连接，加宽桥梁与旧桥在下部结构之间没有结构上的相互影响，上部构造连接对下部构造产生的内力影响很小。而上部结构连接可以满足桥面铺装的整体化，新桥上部结构可以协助旧桥上部结构工作。与新旧桥梁上、下部结构采用相互连接方式相比，可以减少混凝土结构连接施工工程量，加快进度，与新旧桥梁上、下部结构采用互不连接方式相比，也可以提高公路桥梁工程的适用性和耐久性要求。

由于上部构造连接后新旧桥梁材料特性的差异将产生附加内力，基础沉降等原因产生的附加内力也使连接部位内力增大。这种新旧桥梁连接的方式仍要注意新旧桥梁基础之间沉降差的影响，若沉降差较大仍会在整体上部结构中产生横桥向的较大拉应力，进而导致上部结构混凝土开裂和桥面铺装开裂。为减小加宽桥基础沉降量，加宽桥应尽可能采用桩基，并通过加强地基处理、增加桩长或桩径等措施尽可能减小基础沉降。施工中严格控制桩基施工时的沉淀层厚度，减少钻孔灌注桩的沉降；尽可能推迟湿接缝混凝土浇筑施工，以使新桥桩基的大部分沉降能在新旧桥上部结构拼接前完成。原桥采用扩大基础时要注意新旧基础间的协调性，必要时对原有基础进行加固。另外针对上部结构自身产生的较大附加内力，可通过连接部位增大配筋并改善连接构造形式来解决。

### 2. 新旧桥梁上部结构拼接的构造要求

刚性连接和铰接连接是新旧桥梁上部结构拼接的两种连接方式。在新旧桥梁上部结构拼接处采用哪一种连接，最重要的问题是在全部作用效应组合下，连接部位混凝土不得开裂。根据桥梁形式的不同，分别为板桥、梁桥及箱梁桥选择合理的上部结构横向

拼接形式。横向拼接构造的选用受许多因素的影响，如原有桥梁的承载力和耐久性评价结果、基础沉降规律、上部构造的变形协调要求、桥梁荷载的影响以及施工难易程度等。综合这些因素，依据桥梁的类型决定新旧桥梁的拼接结构。根据桥梁上部结构不同类型，一般采用以下的拼接连接方式：

(1) 钢筋混凝土实心板和预应力混凝土空心板桥，新旧板梁拼接之间宜采用铰接或近似于铰接连接。

(2) 预应力混凝土T形梁或组合T形梁桥，新旧T形梁之间拼接宜采用刚性连接。

(3) 连续箱梁桥，新旧箱梁之间拼接宜采用铰接连接。

### 3. 桥梁拓宽改建拼接施工

#### 1) 拓宽改建拼接施工的一般要求

部分凿除或拆除既有桥梁时，应采取措施防止对拟保留的部分造成损伤或破坏。拆除过程中不宜将大型施工机具置于既有桥梁上进行作业。必须置于其上作业时，应对既有桥梁的承载能力进行验算，验算通过后方可实施。施工时应采取临时封闭交通等措施，保证安全，并对既有桥梁的沉降及裂缝等情况进行监测，发现异常应及时采取措施进行处理。

#### 2) 新旧混凝土结合面的处理和拼接施工

(1) 旧混凝土结合面的凿毛应凿至完全露出新鲜密实混凝土的粗集料，并清洗干净；对较大体积的结构混凝土结合面，应将其凿成台阶式，且阶长宜为阶高的2倍。对结合面处外露钢筋表面的锈皮、浮浆等，应采用适宜的工具刷净。

(2) 拼接连接方式应符合设计规定。设计未规定时，对竖向结合面的接缝，可采用新设接头钢筋再浇筑混凝土的方式进行拼接，接头钢筋的直径宜为6~10mm，其所需截面面积宜为梁、板截面面积的0.2%~0.3%，插入长度新旧混凝土均为30倍钢筋直径，且在新混凝土的一端宜设弯钩；或在既有桥梁的梁、板上按一定的间距钻孔并植入抗剪钢筋，植入的钢筋应采用环氧树脂将其孔洞灌注密实。

(3) 浇筑新混凝土前，应采用清水冲洗旧混凝土的表面使其保持湿润。需要在旧混凝土的结合面上涂刷界面剂时，应符合设计规定；设计未规定时，宜通过试验确定。

(4) 新浇筑混凝土应符合本书“3.3.2 混凝土工程施工”的规定。

#### 3) 桥梁拓宽改建桥面铺装施工

拓宽拼接主体工程结构完成后，应先将既有桥梁的桥面铺装层全部凿除并清理干净，再进行全桥桥面铺装层施工。施工应符合下列规定：

(1) 对既有桥梁原铺装层的结合面应进行处理，凿除原结构表面的浮浆，使集料外露，形成4~6mm自然凹凸粗糙面或采用机械刻槽形成糙面，并清洗干净；凿除和清理施工时不得损坏原结构混凝土，且不应有局部光滑结合面。

(2) 凿除既有桥梁铺装层后，对存在缺陷的部位，应进行修补。对空洞和破损处，应在凿除疏松部分混凝土后，采用高一级强度的细石混凝土填筑密实；当有钢筋锈蚀引起混凝土胀裂时，应先剔除松动开裂的混凝土，再进行钢筋表面的除锈和防护等处理。

(3) 桥面铺装新浇筑混凝土前，对原结构的结合面应充分湿润，但不应有明水。桥面铺装的施工技术要求应符合“3.6 桥面及附属工程施工”的规定，混凝土的养护时间宜不少于14d。

## 第4章 隧道工程

### 4.1 隧道围岩分级与隧道构造

#### 4.1.1 隧道围岩分级

##### 1. 围岩分级

隧道围岩分级是设计、施工的基础。施工方法的选择、衬砌结构类型及尺寸的确定、隧道施工劳动定额、材料消耗标准的制定都要以围岩分级作为主要依据。隧道围岩分级见表 4.1-1。



第4章  
看本章精讲课  
配套章节自测

表 4.1-1 隧道围岩分级表

围岩级别	围岩岩体或土体主要定性特征	岩体基本质量指标 $BQ$ 或岩体修正质量指标 $[BQ]$
I	坚硬岩, 岩体完整	$> 550$
II	坚硬岩, 岩体较完整 较坚硬岩, 岩体完整	550~451
III	坚硬岩, 岩体较破碎 较坚硬岩, 岩体较完整 较软岩, 岩体完整, 整体状或巨厚层状结构	450~351
IV	坚硬岩, 岩体破碎 较坚硬岩, 岩体较破碎~破碎 较软岩, 岩体较完整~较破碎 软岩, 岩体完整~较完整	350~251
	土体: 1. 压密或成岩作用的黏性土及砂性土; 2. 黄土 ( $Q_1$ 、 $Q_2$ ); 3. 一般钙质、铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土	—
V	较软岩, 岩体破碎 软岩, 岩体较破碎~破碎 全部极软岩和全部极破碎岩 一般第四系的半干硬至硬塑的黏性土及稍湿至潮湿的碎石土、卵石土、砾砾土及黄土 ( $Q_1$ 、 $Q_2$ )，非黏性土呈松散结构，黏性土及黄土呈松软结构	$\leq 250$
VI	软塑状黏性土及潮湿、饱和粉细砂层、软土等	—

注: 本表不适用于特殊条件的围岩分级, 如膨胀性围岩、多年冻土等。

##### 2. 判定围岩级别的方法

(1) 隧道围岩级别的综合评判宜采用两步:

① 根据岩石的坚硬程度和岩体完整程度两个定性特征和定量的岩体基本质量指标  $BQ$ , 进行初步分级。

② 在岩体基本质量分级基础上, 考虑修正因素的影响, 修正岩体基本质量指标值, 得出基本质量指标修正值  $[BQ]$ , 再结合岩体的定性特征进行综合评判, 确定围岩的分级。

(2) 围岩分级中岩石坚硬程度、岩体完整程度的定性划分, 可按《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1—2018 中的有关规定确定。

(3) 岩质围岩细化定级时, 应根据地下水、主要软弱结构面、初始应力状态的影响程度, 对岩体基本质量指标  $BQ$  进行修正, 修正可按《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1—2018 中的相关公式进行计算。

(4) 现场实践中, 多以工程类比法或经验法判定围岩级别。

## 4.1.2 隧道构造

隧道结构构造, 由主体构造物和附属构造物两大类组成。主体构造物通常指洞身衬砌和洞门构造物, 附属构造物是主体构造物以外的其他建筑, 是为了运营管理、维修养护、给水排水、供蓄发电、通风、照明、通信、安全等而修建的构造物。隧道洞门应适当进行美化, 并注意环保要求。洞门可拦截、汇集地下水, 沿排水渠道排离洞门进入道路两侧的排水沟, 防止地表水沿洞门漫流。

### 1. 隧道的分类

#### 1) 按跨度分类

可分为小跨度隧道、一般跨度隧道、中等跨度隧道和大跨度隧道四类, 具体分类标准见表 4.1-2。

表 4.1-2 隧道按跨度分类

按跨度分类	开挖宽度 $B$ (m)	说明
小跨度隧道	$B < 9$	平行导洞、服务隧道、车行横洞、人行横洞、风道及施工通道
一般跨度隧道	$9 \leq B < 14$	单洞两车道隧道
中等跨度隧道	$14 \leq B < 18$	单洞三车道隧道、单洞双车道+紧急停车带隧道
大跨度隧道	$B \geq 18$	单洞四车道隧道、单洞三车道+紧急停车带隧道、其他跨度大于等于 18m 的隧道

#### 2) 按长度分类

可分为特长隧道、长隧道、中隧道和短隧道四类, 具体分类标准见表 4.1-3。

表 4.1-3 隧道按长度分类

隧道分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
隧道长度 $L$ (m)	$L > 3000$	$1000 < L \leq 3000$	$500 < L \leq 1000$	$L \leq 500$

### 2. 洞门类型及构造

#### 1) 洞门类型

洞门是隧道唯一的外露部分, 也是联系洞内衬砌与洞外路基的结构; 是隧道结构的重要组成部分, 也是标志隧道的建筑物。隧道洞门的作用是支撑洞门正面仰坡和路堑边坡, 拦截仰坡上方少量剥落、掉块, 维护边坡、仰坡的稳定, 并将坡面汇水引离隧道。

公路隧道的洞门形式主要有两类, 即: 端墙式洞门和明洞式洞门。

端墙式洞门包括：墙式洞门、翼墙式洞门、台阶式洞门、柱式洞门、拱墙式洞门。一般垂直于隧道轴线设置；翼墙式隧道洞口平行于路线的路基边坡支挡结构，与洞门端墙相连。

明洞式洞门包括：直削式洞门、削竹式洞门、倒削式洞门、喇叭口式洞门、棚洞式洞门和框架式洞门。明洞式洞门（除棚洞式明洞和框架式洞门外）是隧道洞门段衬砌突出于山体坡面的结构。在仰坡、边坡较高，易发生碎落的洞口采用棚洞式洞门；在隧道上方覆盖层较薄，又有公路从上方跨越或有其他建筑物在隧道上方时，采用框架式洞门。

## 2) 洞门构造

(1) 洞门端墙和翼墙应具有抵抗来自仰坡、边坡土压力的能力。洞门墙墙身最小厚度不应小于0.5m，翼墙墙身厚度不应小于0.3m。

(2) 洞顶仰坡与回填顶面的交线至洞门端墙墙背的水平距离不宜小于1.5m；洞顶排水沟沟底至拱顶衬砌外缘的最小厚度不应小于1.0m；洞门端墙墙顶应高出墙背回填面0.5m。

(3) 洞门端墙应根据需要设置伸缩缝、沉降缝和泄水孔。

(4) 洞门端墙基础应置于稳固地基上，并埋入地面下一定深度。嵌入岩石地基的深度不应小于0.2m；埋入土质地基的深度不应小于1.0m。基底埋置深度应大于靠墙设置的各种沟、槽底的埋置深度。地基为冻胀土层时，基底高程应在最大冻结深度以下不小于0.25m。

(5) 地基承载力不足时，应进行加固处理。

(6) 洞门结构应满足抗震要求。

明洞式洞门构造应符合下列规定：

(1) 洞口段衬砌应采用钢筋混凝土结构。

(2) 洞口段衬砌应伸出原山坡坡面或设计回填坡面不小于500mm。

(3) 洞口段衬砌端面可呈直削、削竹、倒削竹或喇叭形。

(4) 采用削竹式洞门时，削竹面仰斜坡率应陡于或等于原山坡坡率或设计回填坡面坡率。

(5) 设计回填坡面宜按自然山坡坡度回填。采用土石回填时，坡率不宜陡于1:1，表面宜植草覆盖。

(6) 边、仰坡较陡时，为避免落石，可适当延长明洞长度。

## 3. 明洞类型及构造

### 1) 明洞类型

以明挖法修建的隧道称为明洞。洞顶覆盖层薄，不宜大开挖修建路堑且难于用暗挖法建隧道时；路基或隧道洞口或路堑地段受塌方、岩堆、落石、泥石流等不良地质危害时；修建路堑会危及附近重要建（构）筑物安全时；公路、铁路、沟渠和其他人工构造物在隧道上方通过，不宜采用暗挖施工或立交桥跨越时；为减少洞口开挖、保护洞口自然景观，需延伸隧道长度时，宜设置明洞。明洞结构类型分为拱形明洞和矩形明洞。明洞结构类型的选择应根据地形、地质、施工条件，考虑结构安全、经济实用、美观等因素进行选择。洞顶回填土层较厚或一次塌方量大、落石较多时，宜采用拱形明洞；明

洞需要克服来自仰坡方向滑坡推力时，宜采用拱形明洞；高度受到限制的地段，可采用矩形明洞。

## 2) 明洞构造

- (1) 明洞应采用钢筋混凝土结构。
- (2) 半路堑拱形明洞应考虑偏压，拱形明洞外侧边墙宜适当加厚。地形条件允许时，可采用反压回填或设置反压墙。
- (3) 当拱形明洞侧压力较大或地基承载力不足时，应设仰拱。
- (4) 当明洞作为整治滑坡的措施时，应按挡土工程设计，并采取综合治理措施。
- (5) 在地质条件有明显变化的地段，应设置沉降缝；气温变化较大地区，可根据明洞长度设置伸缩缝。
- (6) 防落石危害的明洞，应验算落石冲击荷载下明洞结构的安全性。

## 4. 隧道衬砌类型及构造

### 1) 隧道衬砌类型

隧道衬砌形式主要有锚喷衬砌、整体式衬砌和复合式衬砌。按隧道断面形状分为曲墙式、直墙式和连拱式等。二级公路隧道应采用复合式衬砌；三级及三级以下公路的隧道洞口段、Ⅳ～Ⅴ级围岩洞身段应采用复合式衬砌或整体式衬砌，Ⅰ～Ⅲ级围岩洞身段可采用喷锚衬砌。隧道衬砌断面形式常用的有曲墙拱形衬砌和直墙拱形衬砌。

### 2) 隧道衬砌构造

- (1) 衬砌断面宜采用曲边墙拱形断面。
- (2) 围岩较差、侧压力较大、地下水丰富的地段可设仰拱，一般Ⅳ～Ⅵ级围岩地段设仰拱。路面与仰拱之间可采用混凝土或片石混凝土填充。隧底围岩较好、边墙基底承载力和稳定性满足要求时，可不设仰拱。
- (3) 洞口段应设加强衬砌，两车道隧道不应小于10m。
- (4) 围岩较差地段衬砌应向围岩较好地段延伸5～10m。
- (5) 偏压衬砌段应向一般衬砌段延伸，延伸长度应根据偏压情况确定，不宜小于10m。
- (6) 净宽大于3.0m的横通道与主洞的交叉段，主洞与横通道衬砌均应加强。加强段衬砌应向各交叉洞延伸，主洞延伸长度不应小于5.0m，横通道延伸长度不应小于3.0m。延伸长度范围内不宜设变形缝。

## 4.2 隧道地质超前预报和监控量测技术

### 4.2.1 隧道地质超前预报

隧道施工常规地段应实施跟踪地质调查，不良地质地段应进行地质超前预报。地质预测预报应作为必备工序纳入施工组织管理。

#### 1. 隧道地质超前预报的目的

- (1) 在施工前期地质勘察成果的基础上，进一步查明掌子面前方一定范围内围岩的地质条件，进而预测前方的不良地质以及隐伏的重大地质问题。
- (2) 为信息化设计和施工提供依据。

(3) 为降低地质灾害发生风险提供预警。

(4) 为编制交竣工文件提供地质资料。

## 2. 隧道地质超前预报的内容

(1) 地层岩性预报，特别是对软弱夹层、破碎地层、煤层及特殊岩土的岩性预报。

(2) 地质构造预报，特别是对断层、节理裂隙密集带、褶皱等影响岩体完整性的构造发育情况的预报。

(3) 不良地质预报，特别是对岩溶、人为坑洞、瓦斯等发育情况的预报。

(4) 地下水预报，特别是对岩溶管道水以及富水断层、富水褶皱轴及富水地层中的裂隙水等发育情况的预报。

## 3. 隧道地质超前预报方法

隧道地质超前预报方法主要有：地质调查法、超前钻探法、物理勘探法（TSP 法、TGP 法和 TRT 法）、超前导洞法、水力联系观测。

(1) 地质调查法是隧道施工超前地质预报的基础，适用于各种地质条件隧道，调查内容应包括隧道地表补充地质调查和隧道内地质素描。

(2) 物理勘探法适用于长、特长隧道或地质条件复杂隧道的地质超前预报，主要包括弹性波反射法、地质雷达法、陆地声呐法、红外探测法、瞬变电磁法、高分辨直流电法。

(3) TSP 法适用于各种地质条件，对断层、软硬接触面等面状结构反射信号较为明显，每次预报的距离宜为 100~150m，连续预报时，前后两次应重叠 10m 以上。

(4) 地质雷达法适用于岩溶、采空区探测，也可用于探测断层破碎带、软弱夹层等不均匀地体质。岩溶不发育地段每次预报距离宜为 10~20m，岩溶发育地段预报长度可根据电磁波波形确定。连续预报时，前后两次重叠不应小于 5m。

(5) 超前水平钻探每循环钻孔长度应不低于 30m。连续预报时，前后两循环孔应重叠 5~8m；可能发生突泥涌水的地段，超前钻探应设孔口管和出水装置，防止高压水突出；富含瓦斯的煤系地层或富含石油天然气地层应采用长短结合的钻孔方式进行探测。

(6) 富水构造破碎带、富水岩溶发育地段、煤系或油气地层、瓦斯发育区、采空区以及重大物探异常地段等地质复杂隧道和水下隧道必须采用超前钻探法预报，评价前方地质情况。

(7) 超前导洞法可采用平行超前导洞法和隧道内超前导洞法，两座并行隧道可根据先行开挖的隧道预测后开挖隧道的地质条件。

(8) 当隧道排水或突涌水对地下水水源或周围建（构）筑物产生重大影响时，应进行水力联系观测。

## 4. 隧道地质超前预报的分级与分类

### 1) 地质超前预报的分级

根据地质复杂程度，包括岩溶发育程度、涌水涌泥程度、断层稳定程度、地应力影响程度和瓦斯影响程度，地质预测预报分为 A、B、C 和 D 四个等级。

A 级地质超前预报方法采用地质分析法、弹性波反射法（地震波法、水平声波剖面法、陆地声呐法）、地质雷达法、高分辨直流电法、超前水平钻探法等进行综合预报。

B 级地质超前预报方法采用地质分析法、弹性波反射法（地震波法、水平声波剖面法、陆地声呐法），辅以高分辨直流电法、地质雷达法，必要时进行超前水平钻孔。

C 级超前地质预报方法以地质分析法为主。对重要地质层界面、断层或物探异常地段宜采用弹性波反射法（地震波法、水平声波剖面法、陆地声呐法）进行探测，必要时采用超前水平钻孔。

D 级超前地质预报方法采用地质分析法，必要时补充其他方法。

## 2) 地质超前预报的分类

地质超前预报按预报长度可以分为以下三类：

短距离预报，预报长度小于 30m，可采用地质调查法、地质雷达法及超前钻探法。

中距离预报，预报长度大于等于 30m，小于 100m，可采用地质调查法、弹性波反射法及超前钻探法等。

长距离预报，预报长度大于等于 100m，可采用地质调查法、弹性波反射法及超前钻探法等。

## 4.2.2 隧道施工监控量测技术

隧道开工前，应根据设计要求，结合隧道规模、地形地质条件、施工方法、支护类型和参数、工期安排等编制施工全过程监控量测方案。编制内容应包括：量测项目、量测仪器选择、测点布置、量测频率、数据处理、信息反馈、组织机构、管理体系等。量测计划应与施工进度计划相适应。

### 1. 监控量测的目的

监控量测的主要目的是掌握围岩和支护工作状态、判断围岩稳定性、支护结构的合理性和隧道整体安全性，确定二次衬砌合理的施作时间，为在施工中调整围岩级别、变更设计方案及参数、优化施工方案及为施工工艺提供依据，直接为设计和施工管理服务。监控量测应纳入施工工艺管理，并达到下列目的：

- (1) 掌握围岩和支护的动态信息并及时反馈，指导施工作业。
- (2) 通过对围岩和支护的变形、应力量测，为修改设计提供依据。

### 2. 量测内容与方法

(1) 现场量测分为必测项目和选测项目两大类，分别见表 4.2-1、表 4.2-2。必测项目是为了在施工中保证安全，通过量测信息判断围岩稳定性来指导设计、施工的经常性量测。选测项目是对一些有特殊意义和具有代表性意义的区段以及试验区段进行补充量测，以求更深入地掌握围岩的稳定状态与喷锚支护效果，具有指导未开挖区的设计与施工的作用。

(2) 复合式衬砌和喷锚衬砌隧道施工时必须进行必测项目的量测。应根据设计要求、隧道横断面形状和断面大小、埋设、围岩条件、周边环境条件、支护类型和参数、施工方法等综合确定选测项目。

(3) 洞内必测项目，各测点宜在靠近掌子面、不受爆破影响范围内尽快安设，初读数应在每次开挖后 12h 内、下一循环开挖前取得，最迟不得超过 24h。选测项目测点埋设时间宜根据实际需要确定。

表 4.2-1 隧道现场监控量测必测项目

序号	项目名称	方法及工具	布置	测试精度	量测间隔时间			
					1~15d	16d~1个月	1~3个月	>3个月
1	洞内、外观察	现场观测、地质罗盘	开挖及初期支护后进行	—	—	—	—	—
2	周边位移	各种类型收敛计、全站仪或其他非接触量测仪器	每 5~100m 1 个断面, 每断面 2~3 对测点	0.5mm (预留变形量不大于 30mm 时); 1mm (预留变形量大于 30mm 时)	1~2 次 /d	1 次 /2d	1~2 次 / 周	1~3 次 / 月
3	拱顶下沉	水准仪、钢尺、全站仪	每 5~100m 1 个断面	每 5~100m 1 个断面	1~2 次 /d	1 次 /2d	1~2 次 / 周	1~3 次 / 月
4	地表下沉	水准测量的方法, 水准仪、铟钢尺等	洞口段、浅埋段 ( $h \leq 2.5b$ ), 布置不少于 2 个断面, 每断面不少于 3 个测点	0.5mm	开挖面距量测断面前后 $< 2.5b$ 时, 1~2 次 /d; 开挖面距量测断面前后 $< 5b$ 时, 1 次 /2~3d; 开挖面距量测断面前后 $\geq 5b$ 时, 1 次 /3~7d			
5	拱脚下沉	水准仪、铟钢尺、全站仪	富水软弱破碎围岩、流沙、软岩大变形、含水黄土、膨胀岩土等不良地质和特殊岩土段	0.5mm	仰拱施工前, 1~2 次 /d			

注:  $b$ —隧道开挖宽度;  $h$ —隧道埋深。

表 4.2-2 隧道现场监控量测选测项目

序号	项目名称	方法及工具	布置	测试精度	量测间隔时间			
					1~15d	16d~1个月	1~3个月	>3个月
1	钢架内力及外力	支柱压力计或其他测力计	每代表性地段 1~2 个断面, 每断面钢架内力 3~7 个测点, 或外力 1 对测力计	0.1MPa	1~2 次 /d	1 次 /2d	1~2 次 / 周	1~3 次 / 月
2	围岩内部位移(洞内设点)	洞内钻孔中安设单点、多点杆式或钢丝式位移计	每代表性地段 1~2 个断面, 每断面 3~7 个钻孔	0.1mm	1~2 次 /d	1 次 /2d	1~2 次 / 周	1~3 次 / 月
3	围岩内部位移(地表设点)	地表钻孔中安设各类位移计	每代表性地段 1~2 个断面, 每断面 3~5 个钻孔	0.1mm	同地表下沉要求			
4	围岩压力	各种类型岩石压力盒	每代表性地段 1~2 个断面, 每断面 3~7 个测点	0.01MPa	1~2 次 /d	1 次 /2d	1~2 次 / 周	1~3 次 / 月

续表

序号	项目名称	方法及工具	布置	测试精度	量测间隔时间			
					1~15d	16d~1个月	1~3个月	>3个月
5	两层支护 间压力	压力盒	每代表性地段1~2个断面，每断面3~7个测点	0.01MPa	1~2次/d	1次/2d	1~2次/周	1~3次/月
6	锚杆 轴力	钢筋计、 锚杆测力计	每代表性地段1~2个断面，每断面3~7个锚杆(索)，每根锚杆2~4个测点	0.01MPa	1~2次/d	1次/2d	1~2次/周	1~3次/月
7	支护、衬砌内应力	各类混凝土内应变计及表现应力解除法	每代表性地段1~2个断面，每断面3~7个测点	0.01MPa	1~2次/d	1次/2d	1~2次/周	1~3次/月
8	围岩弹性波速度	各种声波仪及配套探头	在有代表性地段设置	—	—			
9	爆破震动	测振及配套传感器	邻近建(构)筑物	—	随爆破进行			
10	渗水压力、 水流量	渗压计、 流量计	—	0.01MPa	—			
11	地表下沉	水准量测的方法，水准仪、 钢尺等	有特殊要求段落	0.5mm	开挖面距量测断面前后<2.5b时，1~2次/d； 开挖面距量测断面前后<5b时，1次/2~3d； 开挖面距量测断面前后≥5b时，1次/3~7d			
12	地表水平位移	经纬仪、 全站仪	有可能发生滑移的洞口段高边坡	0.5mm	—			

注：b——隧道开挖宽度。

(4) 测点应牢固、可靠、易于识别，应能真实反映围岩、支护的动态变化信息。洞内必测项目各测点应埋入围岩中，深度不应小于0.2m，不应焊接在钢架上，外露部分应有保护装置。

(5) 各项量测作业均应持续到量测断面开挖支护全部结束，临时支护拆除完成，且变形基本稳定后15~20d。

### 3. 量测数据处理与应用

(1) 应及时对现场量测数据绘制时态曲线(或散点图)和空间关系曲线。

(2) 当位移-时间曲线趋于平缓时，应进行数据处理回归分析，以推算最终位移和掌握位移变化规律。

(3) 当位移-时间曲线出现反弯点时，则表明围岩和支护已呈不稳定状态，此时应密切监视围岩动态，并加强支护，必要时暂停开挖。

(4) 隧道监控量测工作应根据控制基准建立预警机制，可按表4.2-3实行分级管理。

表4.2-3 位移管理等级

管理等级	管理位移 (mm)	施工状态
Ⅲ	$U < (U_0/3)$	可正常施工
Ⅱ	$(U_0/3) \leq U \leq (2U_0/3)$	应加强支护
Ⅰ	$U > (2U_0/3)$	应采取特殊措施

注： $U$ —实测位移值； $U_0$ —设计极限位移值。

遇到下列情况之一时，也应提出预警并分级管理。

- ① 支护结构出现开裂，实行Ⅰ级管理；
- ② 地表出现开裂、坍塌，实行Ⅰ级管理；
- ③ 渗水压力或水流量突然增大，实行Ⅱ级管理；
- ④ 水体颜色或悬着物发生变化，实行Ⅱ级管理。

(5) 二次衬砌应在满足下列要求时进行：

- ① 隧道水平净空变化速度及拱顶或底板垂直位移速度明显下降；
- ② 隧道位移相对值已达到相对位移量的90%以上。

对浅埋、软弱、高地应力围岩等特殊地段应视现场情况确定。

#### 4. 监测管理

隧道现场监控量测应成立专门测量小组，由施工单位或委托其他单位承担量测任务。量测组负责测点埋设、日常量测、数据处理和仪器保养维修工作，并及时将量测信息反馈于施工和设计。现场监控量测应按量测计划认真组织实施，并与其他施工环节紧密配合，不得中断工作。各预埋测点应牢固、可靠，易于识别并妥善保护，不得任意撤换和遭到破坏。

#### 5. 竣工文件中应包括的量测资料

- (1) 现场监控量测计划。
- (2) 实际测点布置图。
- (3) 围岩和支护的位移-时间曲线图、空间关系曲线图以及量测记录汇总表。
- (4) 经量测变更设计和改变施工方法地段的信息反馈记录。
- (5) 现场监控量测说明。

### 4.3 隧道施工

#### 4.3.1 隧道施工准备与施工测量

##### 1. 施工准备

隧道施工前，应熟悉设计文件和地质勘察报告，领会设计意图，做好现场调查和图纸核对工作。编制施工组织设计，做好施工准备和组织落实工作；编制时，应根据隧道长度、跨度、工期、地质和自然条件、重点及难点工程、施工方法、施工进度等因素，配备适宜、充足的施工机械，组织均衡生产，提高劳动生产效率。

隧道开工前，应完成分项工程划分、先期工程施工方案编制及混凝土配合比设计等技术准备工作。合理安排隧道与临近工程的施工顺序，避免后续工序施工影响结构安

全和质量较少互相干扰。

### 1) 施工调查

施工调查前应查阅设计文件和相关资料，制定调查提纲；调查结束后，根据调查情况编写书面的施工调查报告。施工调查应包括下列内容：

- (1) 工程概况：包括工程环境、气候特征、工程地质、水文地质、工程规模和工程特点等。
- (2) 施工条件：包括施工运输、水源、供电、通信、场地布置、弃渣场地及容纳能力、征地拆迁情况等。
- (3) 当地原材料及半成品的品种、质量、价格及供应能力等。
- (4) 当地的交通运输状况，包括运能、运价、装卸费率等。
- (5) 钻爆法施工所需爆破器材的供应情况及供货渠道等。
- (6) 对当地生态、环境保护的一般规定和特殊要求，工程对环境可能造成的近、远期影响等。

### 2) 设计文件核对

- (1) 标准、技术条件、设计原则等。
- (2) 隧道的平面及纵断面。
- (3) 隧道的勘测资料，如地形地貌、工程地质、水文地质、钻探图表等。
- (4) 设计各专业的接口及相互衔接的施工方法和技术措施。
- (5) 隧道穿过不良地质地段的设计方案，隧道施工对环境可能造成影响的预防措施。
- (6) 洞口位置、洞门式样、洞口边坡与仰坡的稳定程度、衬砌类型、辅助坑道的类型和位置。
- (7) 指导性施工组织设计。
- (8) 洞内外排水系统和排水方式等。
- (9) 施工通风方案。
- (10) 弃渣场的设计、位置及渣容量是否能满足施工需要和环保要求。

### 3) 施工场地

施工场地布置应遵循因地制宜、统一规划、安全方便、节地环保的原则，并应符合下列规定：

- (1) 应考虑工程规模、工期、地形特点、弃渣场和水源等情况。
- (2) 应事先规划，以洞口为中心布置并减少与现有道路交叉和干扰。
- (3) 应不影响隧道和其他工程施工。
- (4) 运输便道、场区道路和临时排水设施等，应统一规划、合理布局、形成网络。
- (5) 隧道洞外宜设置机械设备安装、维修和停放的场地。机械设备、附属车间、加工场宜相对集中。
- (6) 砂石料应分仓存放，大宗材料、施工备品及回收材料堆放场地，应满足使用要求。
- (7) 施工场地周边开挖应采取降低开挖高度和面积、挡护等保持边坡稳定措施。
- (8) 施工场地周边应有防治边坡失稳、崩塌、落石危害的措施。

#### 4) 临时工程

临时工程和设施布设应满足安全和施工活动正常开展的需要，并符合下列规定：

(1) 严禁将临时房屋和设施布置在可能受洪水、泥石流、塌方、滑坡及雪崩等自然灾害威胁的地段。

(2) 临时工程应在隧道开工前完成。

(3) 临时工程布置应考虑高边坡、河道等突发性自然灾害的影响，制定相应的应急预案。

(4) 临时工程应适用当地暴雪、暴雨、大风、台风、高温、高寒等极端天气条件，制定预警、预防和应急措施。

(5) 临时工程布置宜考虑永临结合方案。

(6) 应设置对人员、设备进出洞进行管理的设施，配备专人管理。

(7) 风、水、电设施宜靠近洞口布设，并满足隧道施工需要。

(8) 机械、设备安装和管线架设应符合相关规定，并及早实施。

(9) 爆炸物品储存库必须符合现行《小型民用爆炸物品储存库安全规范》GA 838—2009 的规定。

#### 5) 施工便道

(1) 线形、纵坡、宽度、路基及路面结构应满足大型设备、材料及出渣运输的需要。

(2) 应设置必要的安全防护、排水设施和警示、提醒标志。

(3) 使用期间应养护。

#### 6) 施工人员、材料和设备

(1) 应根据工程规模、工期、技术难度等，配备满足工程需要的管理、技术、测量、试验、质检和安全人员。

(2) 隧道施工人员应经过岗前专业培训，接受安全、职业健康等教育。特种作业人员应持证上岗。

(3) 施工前应对施工人员进行技术交底。

(4) 材料进场时应按批次和规定频率进行试验、检测，并满足设计和相关规范、规定要求。

(5) 应根据安全、可靠、经济、适用的原则配置隧道施工机械和设备。

(6) 二次衬砌模板台车宜在隧道开挖进洞前准备到位。

(7) 应配备满足工程需要的检测仪器和设备，并在检校有效期内使用。

#### 7) 风险控制

(1) 应建立健全隧道施工安全质量风险控制体系。

(2) 隧道施工应按相关规定进行安全质量风险辨识、评估以及其他风险控制工作。

(3) 应依据风险评估结论，对风险等级较高的分部分项工程编制专项施工方案。

(4) 应编制应急预案，储备应急物资，开展应急演练。

### 2. 施工测量

隧道施工测量包括控制测量、放样测量、贯通误差测定及调整、交（竣）工测量。

隧道施工测量总体应符合以下规定：

隧道施工测量的平面坐标系和高程系统宜与定测隧道控制网坐标系和高程系统一致。平面控制网的运算及平差计算的基准平面宜与定测控制网一致，或者采用隧道纵断面设计高程的平均高程面。投影分带位置不宜设在隧道处。施工前应建立测量复核体系，并进行测量方案设计。应根据隧道规模和贯通误差要求，综合考虑控制网等级和图形、测量仪器精度和测量方法，估算误差范围，确保测量结果能够满足工程需要。勘测设计用隧道平面和高程控制网桩点，应向施工单位逐桩逐点交付资料，确认桩点，遗失的桩点应补桩，资料与现场不符的应更正。控制测量对隧道相向施工贯通面的贯通误差影响极限值应符合规范规定的要求。地震多发区和影响区应加强特长、长隧道的控制测量工作，震后应复测控制网。当洞内有瓦斯等易燃易爆气体时，测量工作应采取防爆措施。

### 1) 控制测量

(1) 控制测量总体应符合以下规定：

- ① 控制测量桩点应稳固、可靠。
- ② 测量工作中的各项计算，均应由两组独立进行。计算过程中应及时校核，发现问题应及时检查，并找出原因。
- ③ 隧道洞外控制测量应在隧道进洞施工前完成。
- ④ 用于测量的设计图资料应认真核对，确认无误后方可使用，引用数据资料应核对。
- ⑤ 控制网误差调整时，不得将低等级平面和高程控制网的误差传入隧道控制网。
- ⑥ 平面控制测量可采用卫星定位测量、导线测量。洞外平面控制测量宜利用已有的定测控制网。隧道平面控制测量等级应按表 4.3-1 确定。

表 4.3-1 隧道平面控制测量等级

隧道贯通长度 $L$ (m)	测量等级
$L \geq 6000$	二等
$3000 \leq L < 6000$	三等
$1000 \leq L < 3000$	四等
$L < 1000$	一级

(2) 高程控制测量应符合以下规定：

① 隧道高程控制测量等级和误差应符合规范规定，高程控制测量宜采用水准测量，洞外四等高程控制测量也可采用光电测距三角高程测量；光电测距三角高程测量能够满足三等高程测量要求，满足高程贯通误差要求时，亦可在 3~6km 隧道的洞外高程测量中采用光电测距三角高程测量。

② 高程控制点可利用稳固坚硬的基岩刻凿，如无稳固、坚硬的基岩可以利用，应埋设有金属标志的混凝土桩。

③ 高程控制网的竖井联系测量应采用全站仪或光电测距仪传递高程。

(3) 洞内平面控制测量应符合以下规定：

① 洞内平面控制测量宜采用导线测量。

② 洞内导线，应布置成多边形导线环；应根据贯通精度的要求布点，宜选择在施工干扰小、稳固可靠、通视良好的地方。导线边长在直线地段不宜小于200m，在曲线地段不宜小于70m。

③ 挖进长度超过2倍导线边长时，应进行一次洞内导线延伸测量。导线测量视线与障碍物距离不应小于0.2m。

④ 联系洞外和洞内的控制测量，宜选在洞外和洞内观测条件接近的时段进行观测。

⑤ 平面控制测量的竖井联系测量可采用光学垂准仪投点、陀螺仪辅助定向。应根据竖井长度和贯通精度要求选择测量仪器和测量方法，估算贯通误差，确定测量方案。

⑥ 施工时不应损毁导线点。

⑦ 洞外平面控制网和高程控制网应不定期复测，复测周期宜不大于6个月，复测精度应与建网精度相同。沙漠、冻土、软土区、地震多发区和影响区、地面沉降地区、施工期间出现异常地段等特殊地区，复测频率应根据变形规律和控制桩情况分析确定，宜适当缩短复测周期，或临时增加复测。

## 2) 放样测量

放样测量应符合以下规定：

(1) 用导线法进行洞内控制测量的隧道，需要使用施工中线点放样时，应由洞内导线测设施工中线。

(2) 用中线法进行洞内测量的隧道，中线点点位横向偏差不得大于5mm。中线点间距曲线部分不宜小于50m，直线部分不宜小于100m。直线地段宜采用正倒镜延伸直线法。

(3) 开挖前应校核中线点，并在开挖断面上标出设计断面轮廓线。

(4) 供衬砌用的临时中线点的间距宜与模板长度一致。

(5) 防水板施工前，应复核中线位置和高程，检查断面尺寸，确定衬砌施工后的衬砌厚度和净空满足规范和设计要求。衬砌模板立模后应进行检查和校正。

(6) 洞内施工用的水准点，应根据洞外、洞内已设定的水准点，按施工需要加设。为使施工方便，在导坑内拱部、边墙施工地段宜每100m设立一个临时水准点，并定期复核。

(7) 直线段，可使用激光设备导向。

(8) 形成开挖断面后，应及时进行断面测量，根据测量数据修正开挖参数，控制超欠挖。

## 3) 贯通误差测定及调整

(1) 采用导线法测量时，在贯通面附近定一临时点，由两端分别测量该点的坐标，所得的闭合差分别投影至贯通面及其垂直方向，得出实际的横向和纵向贯通误差，再将全站仪置于该临时点测求方位角贯通误差。

(2) 采用中线法测量时，由两端向中间进行测量，在贯通面上分别得出中线点，量出两点的横向和纵向距离，即为该隧道的实际贯通误差。

(3) 由两端向中间进行水准测量，分别测至贯通面附近的同一高程控制点或中线点上，所测得的高程差值即为实际的高程贯通误差。

(4) 隧道贯通后，洞内导线、施工中线及高程的实际贯通误差，应在贯通面两侧未

衬砌段调整。该贯通误差调整段的长度应根据中线形式、贯通误差值、支护和衬砌（包括仰拱）施工情况综合确定，宜大于100m，贯通面两侧对称。该段的后续工序均应以调整后的中线及高程为准进行放样。两端开挖至贯通误差调整地段时，开挖断面宜适当加宽。二次衬砌在贯通前施工时，贯通误差调整地段开挖断面应加宽；加宽值宜不超过贯通极限误差允许值的一半。贯通误差宜符合表4.3-2的规定。

表4.3-2 贯通误差的限值

不同贯通长度L(m)的横向贯通误差限值(mm)			高程中误差(mm)
L < 3000	3000 ≤ L < 6000	L ≥ 6000	
≤ 150	≤ 200	≤ 300	≤ 70

#### 4) 交(竣)工测量

(1) 应在中线复测的基础上埋设永久中线点，永久中线点应用混凝土包埋金属标志；直线上的永久中线点，每200~250m设一个，曲线上应在缓和曲线的起终点各设一个；曲线中部，可根据通视条件适当增加；永久中线点设立后，应在隧道边墙上画出标志。

(2) 应在直线地段每50m、曲线地段每20m及需要加测断面处，测绘以路线中线为准的隧道实际净空，标出拱顶高程、起拱线宽度、路面水平宽度。

(3) 洞内水准点每公里应埋设一个，短于1km的隧道应至少设一个，并在隧道边墙上画出标志。

(4) 应提交贯通测量技术成果书、贯通误差的实测成果和说明、净空断面测量和永久中线点、水准点的实测成果及示意图。

(5) 应提交隧道总体实测项目，并符合表4.3-3规定。

表4.3-3 隧道总体实测项目

序号	检查项目	允许偏差	检验频率	检验方法
1	车行道宽(mm)	±10	每20m(曲线)或40m(直线) 检查一处	尺量、全站仪、激光断面仪
2	净总宽(mm)	不小于设计	每20m(曲线)或40m(直线) 检查一处	尺量、全站仪、激光断面仪
3	隧道净高(mm)	不小于设计	每20m(曲线)或40m(直线) 测一断面，每个断面测拱顶和拱腰3个点	全站仪
4	隧道偏位(mm)	20	每20m(曲线)或40m(直线) 检查一处	全站仪
5	引道中心线与隧道中心线的衔接(mm)	20	—	全站仪。分别将引道中心线和隧道中心线延长至两侧洞口，比较其平面位置
6	边坡、仰坡的坡度	不大于设计	检查10处	尺量

### 4.3.2 隧道洞口、明洞施工

#### 1. 洞口工程

洞口工程是指洞口土石方、边仰坡、洞门及其相邻的翼墙、挡土墙及洞口排水系统等。

洞口开挖和进洞施工宜避开雨季和融雪期。当不能避免时，应采取防止坍塌的安全保证措施。

洞口不稳定的地表土及山坡危石等应清除、防护或加固。洞口边坡、仰坡开挖及地表恢复应符合环境保护规定，做好水土保持。

隧道洞口开挖前，应结合设计文件，遵循“早进晚出”的原则，复核确认明暗分界位置的合理性，控制边仰坡开挖高度。

洞口段围岩破碎、埋深较浅地段，可由暗挖改明挖施工，或上部明挖下部暗挖施工；洞口段存在偏压时，应先采取防偏压措施，再进行洞口段开挖。

洞口段存在偏压时，应采取偏压防治措施。

##### 1) 洞口开挖与防护应符合下列规定：

- (1) 洞口边坡及仰坡应自上而下开挖，不得掏底开挖或上下重叠开挖。
- (2) 宜采用人工配合机械开挖，或者采用控制爆破措施减少对边仰坡及围岩的扰动。
- (3) 对边坡和仰坡以上可能滑塌的表土、灌木及山坡危石等的处理措施，应结合施工和运营阶段的隧道安全和环境保护等因素确定。
- (4) 临时防护应视地质条件、施工季节和施工方法等，及时采取喷锚等措施。
- (5) 应随时检查监测边坡和仰坡的变形状态。

##### 2) 洞口截、排水设施应符合下列规定：

- (1) 结合地形条件设置，具备有效拦截、排水顺畅的能力。
- (2) 不应冲刷路基坡面及桥涵锥坡等设施。
- (3) 洞口截、排水设施应在雨季和融雪期之前完成。
- (4) 截水沟迎水面不得高于原地面，回填应密实，不易被水掏空。
- (5) 截水沟应采取防止渗漏和变形的措施。

##### 3) 洞门墙施工应符合下列规定：

- (1) 洞门墙宜在洞口衬砌施工完成后及时施作。
- (2) 洞门墙基底虚渣、杂物、泥、水等应清除干净，地基承载力应符合设计规定。
- (3) 洞口砌筑两侧端墙砌筑和回填应对称进行。
- (4) 洞门墙背排水设施应与洞门墙同步施工。

#### 2. 明洞工程

明洞地段土石方的开挖方式、边坡和仰坡坡度以及支护施工，应符合设计规定。地形、地质条件、边仰坡稳定程度等与设计有差异时，应提出变更。宜边开挖边支护，并注意监测和检查山坡的稳定情况。

##### 1) 明洞边墙基础施工应符合下列规定：

- (1) 基础开挖应核对地质条件，检测地基承载力。当地基不满足设计要求时，应

及时上报监理、设计单位，并按设计单位提供的处理方案施工。

(2) 偏压和单压明洞外边墙的基底，在垂直路线方向应按设计要求挖成一定坡度的斜坡，提高边墙抗滑力。

(3) 基础混凝土灌注前必须排除坑内积水，边墙基础完成后应及时回填。

#### 2) 明洞回填施工应遵循对称均衡原则，并符合下列规定：

(1) 明洞拱背回填应在外模拆除、防水层和排水盲管施工完成后进行；人工回填时，拱圈混凝土强度应不小于设计强度的 75%。机械回填时，拱圈混凝土强度应不小于设计强度。

(2) 明洞两侧回填水平宽度小于 1.2m 的范围应采用浆砌片石或同级混凝土回填。

(3) 回填材料不宜采用膨胀岩土。

(4) 回填顶面 0.2m 可用耕植土回填。

(5) 明洞土石回填应对称分层夯实，分层厚度不宜大于 0.3m，两侧回填高差不应大于 0.5m。回填到拱顶以上 1.0m 后，方可采用机械碾压。回填土压实度应符合设计规定。

(6) 单侧设有反压墙的明洞回填应在反压墙施工完成后进行。

(7) 回填时不得倾填作业。

(8) 明洞回填时，应采取防止损伤防水层的措施。

(9) 洞门顶排水沟砌筑在填土上时，应在夯实后砌筑。

### 3. 浅埋段工程

浅埋段的开挖施工应遵循“管超前、严注浆、短开挖、强支护、早封闭、勤量测、速反馈、控沉陷”的原则。

围岩自稳能力差的浅埋段，可选择地表降水、地表加固、管棚、超前小导管、预注浆等辅助工程措施。

浅埋隧道应加强初期支护和减小爆破振动，及时施作初期支护，尽早施作二次衬砌。

### 4.3.3 隧道开挖

#### 1. 隧道主要开挖方法及适用范围

##### 1) 开挖方法

公路隧道的开挖方法主要有全断面法、台阶法、环形开挖预留核心土法、中隔壁法、交叉中隔壁法及双侧壁导坑法。应根据隧道长度、跨度、结构形式、掌子面稳定性、地质条件等选择适宜的开挖方法，并根据开挖方法选择配套的机械设备。当岩石强度小于等于 80MPa 时，可采用单臂掘进机开挖；当岩石强度小于等于 40MPa 时，可采用铣挖机开挖。开挖前应核实掌子面的地质情况，结合地质超前预报结果，根据地质变化情况，及时调整开挖方式和支护参数，做好各工序的衔接。

(1) 全断面法：按设计断面一次基本开挖成形的施工方法。

(2) 台阶法：先开挖上半断面，待开挖至一定距离后再同时开挖下半断面，上下半断面同时并进的施工方法。台阶法分为二台阶法、三台阶法。台阶长度一般为 3~5m。

(3) 环形开挖预留核心土法：先开挖上台阶成环形，并进行支护，再分部开挖中