



T/CECS G XXX-XX: 2019

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲 性骨架组合法应用技术规程

(征求意见稿)

Technical Specification for Application of Cantilever Pouring and
Stiffening Skeleton Combination Method of Reinforced Concrete
Arch Bridge

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

(空白)

征求意见稿

中国工程建设协会标准

钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法 应用技术规程

Technical Specification for Application of Cantilever Pouring and Stiffening
Skeleton Combination Method of Reinforced Concrete Arch Bridge

T/CECS G: XXX-XX-2019

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司
中国建筑第六工程局有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

实施日期：2019 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

前 言

根据中国工程建设标准化协会公路分会“中建标公路[2016]26号”文关于《关于开展2016年第二批工程建设协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》的要求，招商局重庆交通科研设计院有限公司承担《钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法应用技术规程》的制订工作。

编写组在总结国外、国内钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法的设计与施工应用技术经验和相关科研成果的基础上，以完善和提升钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法应用技术为核心，完成了本标准的编写工作。

本标准分为9章，主要内容包括总则、术语和符号、基本规定、材料、结构设计与构造要求、结构分析验算、施工技术、施工监控、质量验收。

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由招商局重庆交通科研设计院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路8号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或王鹏 18008377507，wangpeng@cmhk.com，邮寄地址：招商局重庆交通科研设计院有限公司，重庆市南岸区学府大道33号动力楼405，400067，以便修订时参考。

主 编 单 位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

中国建筑第六工程局有限公司

参 编 单 位：重庆交通大学

中铁八局集团第一工程有限公司

重庆交通规划勘察设计院

贵州路桥集团有限公司

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

参 加 人 员：

征求意见稿

目 次

1 总则 - 1 -

2 术语和符号 - 2 -

 2.1 术语 - 2 -

 2.2 符号 - 2 -

3 基本规定 - 5 -

4 材料 - 6 -

 4.1 混凝土 - 6 -

 4.2 钢筋与钢材 - 6 -

5 结构设计与构造要求 - 7 -

 5.1 一般规定 - 7 -

 5.2 基本结构形式 - 7 -

 5.3 拱圈 - 7 -

 5.4 拱上建筑 - 11 -

 5.5 组合法劲性骨架 - 12 -

 5.6 拱座 - 13 -

 5.7 钢筋构造要求 - 13 -

 5.8 耐久性设计 - 14 -

6 结构分析验算 - 16 -

 6.1 一般计算规定 - 16 -

 6.2 持久状况承载能力极限状态计算 - 17 -

 6.3 持久状况正常使用极限状态计算 - 18 -

 6.4 持久状况和短暂状况的应力计算 - 19 -

7 施工技术 - 21 -

 7.1 一般规定 - 21 -

 7.2 临时结构 - 21 -

 7.3 拱圈悬臂浇筑 - 22 -

 7.4 组合法劲性骨架段安装 - 23 -

 7.5 劲性骨架段混凝土浇筑 - 24 -

 7.6 拱上建筑施工 - 24 -

8 施工监控 - 26 -

 8.1 一般规定 - 26 -

 8.2 施工监控要点 - 26 -

9 质量验收 - 28 -

附录 A 钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法施工工艺流程 - 29 -

本规范用词用语说明 - 32 -

1 总则

1.0.1 为使钢筋混凝土拱桥采用悬臂浇筑法、悬臂浇筑与劲性骨架组合法（简称组合法）时的设计符合安全、耐久、适用、环保、经济和美观的要求，同时提高施工标准化和技术水平，确保工程质量和安全，特制订本规程。

1.0.2 本规程规定了钢筋混凝土拱桥采用悬臂浇筑法、组合法时的术语、材料、结构与构造要求、结构分析验算、施工技术、施工监控和质量验收。

1.0.3 本规程适用于采用悬臂浇筑法、组合法，跨径在 350m 及以下钢筋混凝土拱桥的设计、施工、监测与质量验收。

条文说明

钢筋混凝土拱桥具有一定的适用条件，对于地形、地质条件均有一定的要求。目前悬臂浇筑钢筋混凝土拱桥国内最大跨径为沙陀特大桥，其跨径为240m；世界最大跨径为西班牙阿尔蒙特大桥，其跨径为384m。本规程主要适用于350m及以下采用悬臂浇筑法、组合法的钢筋混凝土拱桥。

1.0.4 在保证质量和安全的前提下，钢筋混凝土拱桥设计与施工应积极推广使用新技术、新工艺、新材料、新设备。

1.0.5 本规程采用以概率理论为基础、按分项系数表达的极限状态设计方法进行设计。

1.0.6 采用本规程进行设计时除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准或规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 悬臂浇筑法 cantilever casting method

钢筋混凝土拱桥施工中,采用斜拉扣挂体系,采用可移动挂篮对称、均衡浇筑拱圈节段混凝土,待其强度形成后,移动挂篮、增加扣索浇筑下一节段拱圈,通过斜拉扣索控制已成拱圈悬臂段,直至拱圈合龙的施工方法。

2.1.2 悬臂浇筑与劲性骨架组合法 method combined with cantilever casting and stiff skeleton (CCSS)

拱圈施工采用悬臂浇筑及劲性骨架两种方法组合进行,拱圈的拱脚至接近拱顶段采用悬臂浇筑法施工,在跨中区段设置劲性骨架,采用悬臂浇筑或劲性骨架法施工。该组合工法充分利用两种工法的优点。简称组合法。

2.1.3 劲性骨架 stiff skeleton

根据拱轴线型制作,由钢管或型钢作为上下弦杆形成的桁架结构,可作为拱圈浇筑外包混凝土的支架,拱圈形成后,劲性骨架作为拱圈整体结构的一部分参与受力。

2.1.4 斜拉扣挂体系 diagonal hanging system

钢筋混凝土拱桥施工中,采用锚碇、扣塔、锚索、扣索控制未合龙拱圈悬臂区段位置、受力和变形,形成临时性稳定结构,以逐段浇筑或接长施工,实现拱圈合龙和合理成拱线形的一种辅助施工临时设施。

2.1.5 扣索 stay cable 或 buckle cable

临时施工用设置在扣塔上的下拉索,用于扣拉拱圈悬臂段,可随着悬臂长度的增长不断增加,扣索的数量、张拉力可根据拱圈悬臂区段的高程、受力和变形要求做调整。

2.1.6 悬浇斜爬挂篮 hanging diagonal climbing basket

钢筋混凝土拱桥悬浇挂篮需满足拱圈曲线要求,具有承担拱圈节段混凝土湿重和斜向移动功能,通过逐节浇筑,实现拱圈线形。挂篮应由承重系统、行走系统、支反力系统、止退系统、工作平台及防护系统等组成。

2.2 符号

a_d ——几何参数设计值;

b ——拱圈顶板、底板的宽度;

e_0 ——拱圈计算截面的最大偏心距;

E_c ——混凝土弹性模量;

- f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值；
- f_{cdm} ——拱圈混凝土抗压强度设计修正值；
- f'_{ck} ——施工阶段的混凝土轴心抗压标准值；
- f'_{tk} ——施工阶段的混凝土轴心抗拉标准值；
- f_d ——材料强度设计值；
- h ——拱圈高度；
- i ——拱圈截面的回转半径；
- i_{min} ——拱圈截面最小回转半径；
- K_s ——劲性骨架段预拱度非线性修正系数；
- K_c ——钢筋混凝土拱圈的预拱度非线性修正系数；
- L ——拱圈计算跨径；
- L_0 ——拱圈净跨径；
- L_s ——劲性骨架段的水平投影长度；
- L_a ——拱圈拱轴线的弧长；
- M_{max} 、 N ——拱圈计算截面的最大弯矩及其对应的轴力；
- M 、 N_{min} ——拱圈计算截面的最小轴力及其对应的弯矩；
- R ——构件承载力设计值；
- $R(\cdot)$ ——构件的承载力函数；
- S ——作用（其中汽车荷载应计入冲击系数）效应的组合设计值；
- S_0 ——拱圈的计算长度；
- t ——拱圈顶板、底板和腹板的厚度；
- α ——混凝土强度等级修正系数；
- Δ ——为拱圈截面高度修正值；
- γ_0 ——桥梁结构重要性系数；
- φ ——轴压构件稳定系数；
- λ ——受压构件长细比；
- Δ_d ——劲性骨架段的设计实际预拱度；

δ_s —劲性骨架段的计算预拱度；

δ_c —钢筋混凝土拱圈的计算预拱度。

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 钢筋混凝土拱桥应根据桥位环境条件、不同种类的作用及其影响，按以下四种设计状况，进行极限状态设计：

1 持久状况：桥梁使用过程中承受自重、汽车荷载等持续时间很长的作用时的状况。该状况下应作承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。

2 短暂状况：桥梁施工过程中承受临时性作用及维修时的情况等。该状况下应作承载能力极限状态设计，可根据需要进行正常使用极限状态设计。

3 偶然状况：在桥梁使用过程中可能偶然出现的如撞击等情况。该状况下仅作承载能力极限状态设计。

4 地震状况：在桥梁使用过程中遭受地震时的情况，在抗震设防地区必须考虑地震状况，应作承载能力极限状态设计。

3.0.2 钢筋混凝土拱桥结构按承载能力极限状态设计时，对持久设计状况和短暂设计状况应采用作用的基本组合，对偶然设计状况应采用作用的偶然组合，对地震设计状况应采用作用的地震组合。

3.0.3 钢筋混凝土拱桥结构按正常使用极限状态设计时，应根据不同的设计要求，采用作用的频遇组合或准永久组合。

3.0.4 作用及作用组合应按现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 规定执行。

3.0.5 设计应提出详细的施工步骤和成拱体系转换要求。

条文说明

拱圈的施工方法、步骤、成拱体系转换工艺影响到拱桥总体布局、构造设计、施工与使用安全，因此设计时必须考虑施工关键技术及其影响与对策。

3.0.6 对于处于地震烈度较高地区的特大跨径拱桥应对拱圈、拱上结构等连接处进行结构抗震优化设计。

3.0.7 应按照设计使用年限和环境条件进行耐久性设计。

3.0.8 应采用全寿命设计理念，并考虑养护需要，在确保安全运营的前提下，满足可检、可修、可更换的要求。

3.0.9 应按相关规定进行设计和施工阶段安全风险评估。

3.0.10 宜根据桥梁功能和规模，设置必要的结构监测设施。

4 材料

4.1 混凝土

4.1.1 混凝土强度等级、标准值、设计值、弹性模量、剪切模量应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定选用。

4.1.2 拱圈宜采用高性能混凝土，混凝土强度等级不宜低于 C50。

4.1.3 采用组合法时，合龙段劲性骨架外包混凝土的配合比需通过试验确定，外包混凝土应具有流动性好、缓凝时间长、抗裂性、与劲性骨架的粘结协同效应好的性能特点，必要时可适当掺加聚丙烯纤维等短纤维材料。

4.2 钢筋与钢材

4.2.1 普通钢筋、预应力钢筋类别、标准强度、设计强度和弹性模量应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定取用。

4.2.2 组合法合龙段劲性骨架中主要受力杆件宜采用 Q355 及以上钢材。

4.2.3 劲性骨架所采用的钢材类别、标准强度、设计强度和弹性模量，按《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定取用。

5 结构设计及构造要求

5.1 一般规定

5.1.1 设计采用悬臂浇筑法时，应考虑桥址地形、地质条件、结构布置合理性、施工可行性。

5.1.2 设计采用组合法时，还应考虑桥位处合龙段劲性骨架悬拼或浮吊的施工可行性。

5.1.3 两岸地质、地形应具备合理设置临时锚碇的条件，必要时可利用桥台等永久构件作为临时锚碇。

5.2 基本结构形式

5.2.1 设计宜采用单孔、上承式、无铰拱结构体系。

5.2.2 采用组合法时，劲性骨架与钢筋混凝土拱圈结合段构造应构造简单、传力明确、整体性好、安全可靠和方便施工。

5.2.3 拱座根据桥位地质情况拱座可采用扩大基础或承台与群桩基础组合形式，拱圈拱脚与拱座必须有效连接，形成一体。

5.2.4 拱圈应采用箱型断面设计。拱圈宽度和高度根据桥面系横向宽度、承载能力和刚度、结构整体横向稳定性要求确定。

5.3 拱圈

5.3.1 拱圈矢跨比可取 $1/4 \sim 1/7$ 。

条文说明

矢跨比一般采用 $1/5 \sim 1/6$ 。若矢跨比不受桥下净空限制，可采用较大矢跨比，以提高桥梁稳定性能，减小拱圈宽度。

5.3.2 拱圈拱轴线宜采用悬链线，拱轴系数可采用最小弯矩能量法进行优化计算确定，一般取 $1.3 \sim 2.5$ 。拱轴系数优化时应考虑拱桥自重、混凝土收缩徐变、升温与降温、 $1/2$ 车辆活载，其组合可按如下规定执行：

- 1 拱桥自重；
- 2 拱桥自重+混凝土收缩徐变；
- 3 拱桥自重+混凝土收缩徐变+ $1/2$ 车辆活载；
- 4 拱桥自重+升温与降温+ $1/2$ 车辆活载。

5.3.3 拱圈截面尺寸总体方案可参考如下规定设计：

- 1 拱桥跨径在 240m 及以下时，拱圈可采用等高、等宽设计；
- 2 拱桥跨径大于 240m 时，拱圈可采用等宽、变高的变截面设计；
- 3 跨径在 300m 及以上时，拱圈可采用变高、变宽设计，拱脚区段加宽，跨中约 $1/8 \sim 7/8$ 跨径长度区段采用等宽设计。

5.3.4 拱圈高度主要取决于拱圈跨径和混凝土强度等级，应结合拱轴系数优化确定。可参考如下规定初步拟定拱圈高度：

1 拱圈采用等高设计时，拱圈高度可取跨径的1/50~1/80，并按如下公式（5.3.4）估算：

$$h = \frac{L_0}{100} + \alpha \Delta \quad (5.3.4)$$

式中：h——拱圈高度，m；

L_0 ——拱圈净跨径，m；

Δ ——拱圈截面高度修正值，取值为2.0~2.5m；

α ——混凝土强度等级修正系数取0.6~1.0，混凝土强度等级低时取大值，强度等级高时取小值。

2 拱圈采用变高设计时，拱顶截面高可取跨径的1/60~1/90，拱脚截面高可取拱顶截面高的1.2~1.7倍。

5.3.5 拱圈宽跨比宜取 1/15~1/25。当桥面较宽时，可采用如下方式设计：

- 1 采用分幅式断面布置；
- 2 采用单箱三室箱型截面设计；
- 3 采用悬挑桥面，桥面悬出拱圈边缘一侧的翼板宽度可取2.0~4.5m；
- 4 拱圈采用设置足够横向连接构造的箱型肋拱结构设计。

5.3.6 拱圈顶板、底板及腹板尺寸根据受力和构造要求确定，可参考如下规定设计：

- 1 顶、底板厚度宜取拱圈高度的1/9~1/15，腹板较顶、底板可适当加厚，一般均不低于30cm；
- 2 拱脚段应增加顶、底、腹板厚度，并设置过渡段；
- 3 拱圈宽度b（或高度h）与拱圈顶板、底板、腹板的厚度t之间的最大宽厚比（或高厚比）关系应满足式（5.3.6-1）要求。

$$\frac{b}{t} \leq 0.62 \sqrt{\frac{E_c}{f_{cd} \varphi}} \quad (5.3.6-1)$$

$$\varphi = -0.000019\lambda^2 - 0.010064\lambda + 1.359777 \quad (5.3.6-2)$$

式中：

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值；

E_c ——混凝土弹性模量；

λ ——受压构件长细比， $\lambda = \frac{S_0}{i}$ ；

S_0 ——拱桥等效压杆自由长度，对无铰拱， $S_0 = 0.36L_a$ ， L_a 为拱圈弧长；

i ——拱圈截面的回转半径。

对于常见的混凝土箱型拱桥，可直接查错误!未找到引用源。。

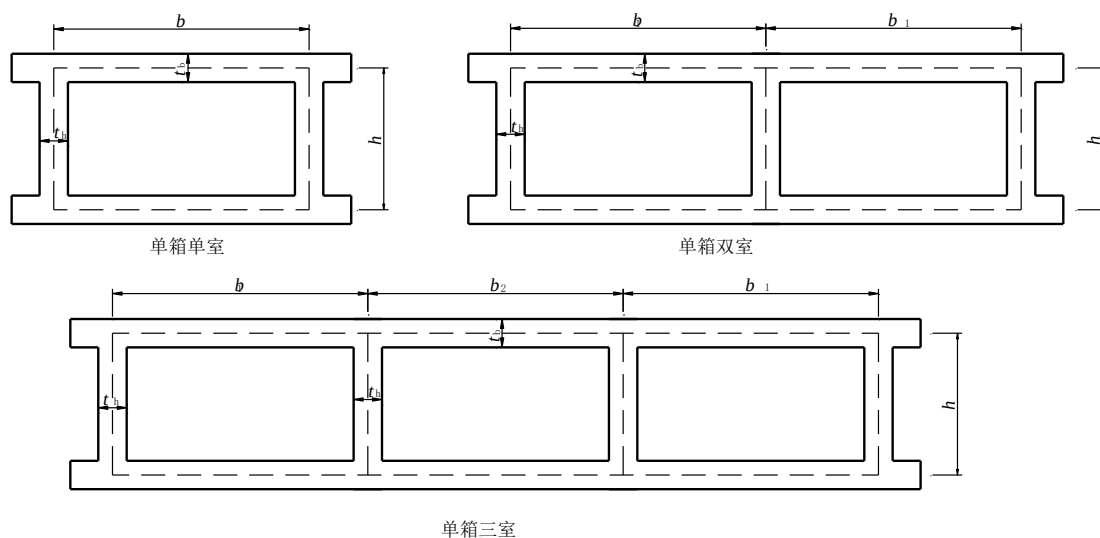


图 5.3.6 薄壁箱型截面拱桥宽厚比（高厚比）定义

表 5.3.6 箱型拱桥壁板局部稳定最大容许宽厚比或高厚比

混凝土强度等级	E_c (MPa)	f_{cd} (MPa)	b/t 限值
C50	3.45×10^4	22.4	$24.33/\sqrt{\varphi}$
C55	3.55×10^4	24.4	$23.65/\sqrt{\varphi}$
C60	3.60×10^4	26.5	$22.85/\sqrt{\varphi}$
C65	3.65×10^4	28.5	$22.19/\sqrt{\varphi}$
C70	3.70×10^4	30.5	$21.59/\sqrt{\varphi}$
C75	3.75×10^4	32.4	$21.09/\sqrt{\varphi}$
C80	3.80×10^4	34.6	$20.55/\sqrt{\varphi}$

条文说明

拱桥是一个以受压为主的压弯结构，不仅拱桥自身有稳定性要求，对于由薄板构成的拱圈，还应确保在拱桥整体失稳前其顶底板和腹板不能首先发生局部屈曲。随着高强度材料的不断应用，拱圈壁厚趋于减小，其局部屈曲更为突出，因此限定其最大壁厚比是有必要的。

钢筋混凝土拱圈箱型截面顶板与腹板厚度与其宽度和高度之比的最大限值可根据四边简支板承受均布压力的屈曲导出。

根据弹性薄板理论，板翘屈后的板中面挠曲方程为：

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + p_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{附 5.3.6-1})$$

式中， $D = \frac{E_c t^3}{12(1-\nu^2)}$ 为拱圈截面顶板、底板、腹板的抗弯刚度， E 、 ν 为弹性模量和泊松比。

四边简支薄板弹性屈曲临界应力：

$$\sigma_{cre} = \frac{4\pi^2 E_c}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{附 5.3.6-2})$$

弹性支承板的临界应力，与弹性支承相关。《钢结构设计标准》GB 50017 提出在简支临界应力之外考虑弹性嵌固提高系数 1.3，偏安全地采用简支状态临界应力。混凝土薄壁结构的屈曲一般为弹塑性

屈曲，其弹塑性屈曲临界应力：

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\lambda_1} \frac{4\pi^2 \sqrt{\varphi_t} E_c}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{附 5.3.6-3})$$

式中： λ_1 ——稳定安全系数，根据实验统计确定，粗略取 4 或 7，与拱箱壁板屈曲方式有关，当仅发生顶底板或腹板屈曲时取 4，当顶底板与腹板同时屈曲时取 7；

φ_t ——弹塑性切线模量与弹性模量的比值，可以参考混凝土受压应力-应变全曲线进行计算，取值 0.5。

ν ——泊松比，取 0.2；

t ——板件厚度；

b ——板件宽度。

箱型拱圈的稳定可基于壁板局部稳定理论，通过限制边长与壁厚的比值，使局部屈曲容许应力高于材料容许强度来得到保证。由实际临界屈曲应力大于混凝土容许压应力 $\sigma_{cr} \geq f_c$ ，得：

$$\frac{b}{t} \leq \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\lambda_1 f_c}{4\pi^2 \sqrt{\varphi_t} E_c}} \quad (\text{附 5.3.6-4})$$

由于拱圈是曲线结构，不能直接运用上述公式，为此，引入等效压杆的方法，将拱等效为直杆。对于无铰拱，等效直杆的自由长度为 0.36 倍的拱弧长。

根据《公路钢筋混凝土结构及预应力桥涵设计规范》JTG 3362，钢筋混凝土受压构件正截面受压承载力计算公式为：

$$\gamma_0 N \leq 0.9\varphi(f_{cd}A + f'_{sd}A'_s) \quad (\text{附 5.3.6-5})$$

式中： N ——轴向压力设计值；

γ_0 ——结构重要性系数，取值为 0.9~1.1，统一取 1。

φ ——钢筋混凝土构件稳定系数；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；

A ——构件截面面积；

f'_{sd} ——纵向普通钢筋抗压强度设计值；

A'_s ——纵向普通钢筋截面面积。

若不计钢筋作用，上式可以简化为

$$N \leq 0.9\varphi f_{cd} A \quad (\text{附 5.3.6-6})$$

即：

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq 0.9\varphi f_{cd} \quad (\text{附 5.3.6-7})$$

式中： σ ——构件截面容许应力。

利用式(附 5.3.6-5)和式(附 5.3.6-7)，实际临界屈曲应力高于构件截面容许应力 $\sigma_{cr} \geq \sigma$ ，

$$\frac{1}{\lambda_1} \frac{4\pi^2 \sqrt{\varphi_t} E_c}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \geq 0.9\varphi f_{cd} \quad (\text{附 5.3.6-8})$$

$$\frac{b}{t} \leq \sqrt{\frac{4\pi^2 \sqrt{\varphi_t} E_c}{12(1-\nu^2)\lambda_1 \times 0.9\varphi f_{cd}}} \quad (\text{附 5.3.6-9})$$

化简得，控制不发生顶底板或腹板屈曲时 ($\lambda_1=4$)：

$$\frac{b}{t} \leq \sqrt{\frac{4\pi^2 \sqrt{\varphi_t} E_c}{12(1-\nu^2)\lambda_1 \times 0.9\varphi f_{cd}}} = 0.82 \sqrt{\frac{E_c}{f_{cd}\varphi}} \quad (\text{附 5.3.6-10})$$

控制顶底板和腹板不同时发生屈曲时 ($\lambda_1=7$)：

$$\frac{b}{t} \leq \sqrt{\frac{4\pi^2 \sqrt{\varphi_t} E_c}{12(1-\nu^2) \lambda_1 \times 0.9 \varphi f_{cd}}} = 0.62 \sqrt{\frac{E_c}{f_{cd} \varphi}} \quad (\text{附 } 5.3.6-11)$$

钢筋混凝土构件稳定系数 φ 与构件长细比 λ 有关**错误!未找到引用源。**。以木蓬大桥为例采用有限元方法对以上计算方法进行了验证。

5.3.7 拱圈顶、底板宜在边腹板处向外侧悬出 40~50cm，并在边缘底面设置滴水槽。

5.3.8 箱型拱圈内对应拱上立柱、临时扣索位置应设置横隔板，横隔板厚度可根据拱圈高度确定，一般不低于 30cm。

条文说明

横隔板的间距与拱上立柱位置及拱圈悬臂浇筑长度有关。由于拱上立柱位置处集中力大，为扩散拱圈顶板的局部应力，应设置横隔板。此外，在拱圈悬臂浇筑阶段，在临时锚固扣索的位置也需设置横隔板。

5.3.9 为控制施工过程中拱脚区段拉应力，拱脚区段可采用预应力设计，拱圈合龙后解除预应力。

5.3.10 拱圈构造设计应结合施工要求确定：

- 1 拱圈上的临时扣索锚点应设置在腹板和横隔板的交叉点一侧。
- 2 应根据拱圈截面尺寸、扣挂体系与挂篮承载能力和变形要求确定拱圈分段长度，悬臂浇筑长度宜控制在 5.0~8.0m。

条文说明

悬浇长度影响到挂篮构造、横隔板布置及数量、截面应力与线形控制、建设工期等。根据对国内外已建悬浇混凝土拱桥的统计，其悬臂浇筑长度多控制在 5.0m~8.0m。

5.3.11 箱型拱圈应在底板设排水孔，腹板顶部设通气孔。

5.4 拱上建筑

5.4.1 拱上腹孔布置宜按如下规定执行：

- 1 设计宜采用梁式腹孔，构造宜统一，腹孔跨径宜为拱圈净跨径的 1/6~1/19；
- 2 腹孔跨数宜采用奇数跨，当拱桥跨径较大时，可将桥道梁在拱顶区段与拱圈结合成整体，此时腹孔应采用偶数跨。

5.4.2 拱上立柱设计宜按如下规定执行：

- 1 立柱与拱圈间应沿横桥向通长设置垫梁，其中心高度不宜小于立柱净距的 1/5，也不宜大于 2.0m；
- 2 高立柱可根据需要设置横系梁；
- 3 立柱与拱圈之间应设置可靠的连接构造。

5.4.3 拱上桥道梁设计宜采用预应力混凝土、钢或钢-混组合材料的简支梁、连续梁、连续刚架等轻型结构。

条文说明

实践表明，拱上桥道梁采用空心板等简支结构时，存在问题较多；采用连续梁或连续刚架可减轻自重、增加桥梁的整体受力性能，同时提高行车的舒适性和拱上建筑的通透性，从而提升桥梁的整体美感。

5.4.4 桥面系构造应符合下列要求：

- 1 当桥道梁为简支结构时，宜采用桥面连续构造；

- 2 当桥道梁采用连续梁或连续刚架结构时，应在分联、交界墩处设置伸缩缝；
- 3 应根据防撞等级要求设计防撞护栏。

5.5 组合法劲性骨架

5.5.1 组合法劲性骨架宜采用型钢或钢管混凝土制作的桁架结构，由上弦杆、下弦杆、腹杆、平联等组成。

5.5.2 型钢劲性骨架的纵向上、下弦杆可采用热轧 H 型钢或工字钢；其他弦杆可采用工字钢、角钢或槽钢。

5.5.3 劲性骨架段水平投影长度宜取拱圈跨径的 0.3~0.6 倍。

条文说明

日本多座钢筋混凝土拱桥采用悬臂浇筑与劲性骨架相结合的设计与施工方法，见附表 1。拱顶区段采用劲性骨架可以缩短拱圈悬臂浇筑长度，降低锚固系统的要求，另一方面可以实现提前合龙，增强拱桥的稳定性能。

附表 5.5.3 组合施工法混凝土拱桥一览表

桥名	跨径 L (m)	悬浇段长度 (m)	劲性骨架长度 L _s (m)	L _s /L	建成年份
法国米勒桥	602	171×2	260	0.432	未施工
日本 600m 试设计拱桥	600	150×2	300	0.500	未施工
日本帝释川桥	145	34×2	90	0.621	1978
日本立山大桥	188	54.5×2	95	0.505	
日本别府大桥	235		80	0.340	
日本青叶大桥	180	61×2	57	0.317	1997
日本立山大桥	188	44×2	89.5	0.476	1999
日本宇佐川桥	204	50×2	100	0.490	1982
日本头岛大桥	218	42×2	130.4	0.596	1996
日本高松大桥	260	85.5×2	78.5	0.302	2000
重庆涪陵乌江大桥	220	94×2	60	0.272	2018

影响劲性骨架长度的因素很多，归结起来有以下四个方面：

1) 经济性影响

悬臂浇筑长度越长，扣索力和锚索力势必增大，从而增加临时措施费。拱顶区段采用劲性骨架，就可降低施工措施费。此外，劲性骨架长度过长，虽然降低了悬浇拱圈的费用，但因用钢量增大，也会增大工程造价。

2) 拱圈自身受力特点

大跨径混凝土拱桥拱圈截面主要承受自重荷载，而拱圈在自重、弹性压缩、混凝土徐变、收缩等作用下拱顶截面承受正弯矩，拱脚截面承受负弯矩，L/4 截面位置刚好是正负弯矩交变区，弯矩值较小，是设置劲性骨架接头比较理想的位置，日本建造的几座钢筋混凝土拱桥，分界点位置基本放在 L/4 截面。

3) 悬臂浇筑期间的扣索力以及劲性骨架安装对悬浇拱圈扣索力的影响

拱圈悬臂浇筑段越长，一方面增大了扣索力和临时扣锚系统要求，施工过程中的截面应力和变形控制难度相应增大，尤其是拱圈扣索锚点位置的集中应力非常大，给拱圈构造设计增大了难度。另一方面，过短的劲性骨架长度，不能发挥劲性骨架应有的作用。

4) 现场施工条件

施工条件主要受地形条件所限制，对于跨越深谷和无预制场地的桥梁，可以采用缆索吊装悬拼劲性骨架的方法；对于地势平坦和具有浮运吊装能力的桥梁，可以采用整体提升劲性骨架的架设方法。通过对贵州夜郎湖大桥劲性骨架接头位置的精细化分析表明，劲性骨架在拱圈混凝土接头位置的滑移影响在 0.8m 范围内，考虑到施工与设计的差异以及其他因素影响，规定了劲性骨架埋入混凝土拱圈长度

不应小于 3.0m。

5.5.4 应重视劲性骨架与悬臂现浇段接头处置,控制埋入精度,完善连接构造措施。宜按如下规定执行:

1 劲性骨架段埋入拱圈悬臂段混凝土中的长度应不小于前一悬臂浇筑节段长和拱圈截面高度中的较小值,且不应小于3.0m;

2 劲性骨架预埋件的上下弦杆重心应在对应腹板与顶、底板中心线交点处设置。

5.5.5 劲性骨段混凝土拱圈宜采用与悬臂浇筑段相同的截面形式和尺寸。

5.5.6 劲性骨架可根据现场施工条件确定安装方案及设计形式:

1 采用缆索吊装分段或分片安装,此时应分段设计;

2 通过浮吊整体吊装,与已浇筑混凝土拱圈先铰接,合龙后再固结,此时应整体设计。

5.5.7 当采用整体吊装方法时,应与现浇段预埋钢构件先铰接合龙,再刚接,合理控制完成接头位置由铰接到刚接的转变,保证劲性骨架与悬臂现浇段的有效连接。

5.5.8 型钢劲性骨架弦杆与腹杆的节点构造应确保传力明确、构造简单、整体性好、安全可靠。并应符合下列规定:

1 腹杆与上、下弦杆应直接焊接,腹杆不得穿入弦杆;

2 相邻的腹杆端部净距不得小于50mm;

3 腹杆轴线宜交于节点中心,当不能满足时,允许腹杆轴线不交于弦杆轴线,但偏心距 e_0 不得大于弦杆对应边长的1/4。同时,任意两杆之间的夹角不得小于30°。

5.5.9 劲性骨架其他未明确事项应按《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 等的有关规定执行。

5.6 拱座

5.6.1 拱座应置于地基完整、地质良好的地段。

5.6.2 拱座尺寸应满足拱圈、过渡墩的设置及连接构造要求,一般应采用实体结构,必要时可采用箱型结构。

5.6.3 拱座可结合地质条件与拱座竖向、水平向承载力要求,设置竖桩或斜桩。

5.6.4 拱座地基与基础的验算中,应考虑基础背面地基的支撑影响,按变形协调的计算方法验算;必要时可采用有限元三维实体模型仿真分析进行验算。

条文说明:

传统的地基基础基底应力计算方法,不考虑基础背面地基的影响。认为水平荷载由基底摩阻力平衡,适用于背面没有支挡物的情况。但由于拱座承受的水平力较大,若忽略基础背面地基的支撑影响,基底摩阻力往往难以满足要求,这种情况下上述传统方法已不适用。所谓变形协调的计算方法,是指假设基础为刚体,在力的作用下,拱座的底面和背面转角相同,据此计算出拱座底面及背面的应力、偏心距。当出现拉应力时,应考虑基底的应力重分布。

采用上述变形协调或有限元分析方法时,由于导致基础倾覆与滑移的荷载均已被地基地面和背面的反力平衡,所以基础的抗倾覆和抗滑移等稳定性不必另行验算。

5.7 钢筋构造要求

5.7.1 为改善拱座的局部受力状况,在拱座内拱脚截面下应设置 4 层~6 层分布钢筋网。

5.7.2 无铰拱的拱圈的主筋应伸入拱座内锚固，锚固除应满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的最小锚固长度规定外，且不小于拱脚截面高度。

5.7.3 钢筋混凝土立柱主钢筋按结构受力要求配置，向下伸入拱圈至拱轴线以下，并应具有足够的锚固长度，钢筋截面积不应小于立柱混凝土计算截面积的 0.4%。

5.7.4 钢筋混凝土拱上立柱的横系梁四角应设置不小于 16mm 的纵向钢筋，并设置直径不小于 8mm 的箍筋，其间距不应大于横系梁的短边尺寸或 20cm。

5.7.5 劲性骨架埋入段钢筋的构造可根据劲性骨架适当调整，宜将普通钢筋骨架与劲性骨架形成 PBL 剪力键。

5.8 耐久性设计

5.8.1 结构混凝土耐久性设计应符合《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476、《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07-01、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 要求，必要时掺加短纤维、配置防裂钢筋网；

5.8.2 不同环境作用下钢筋主筋、箍筋和分布筋，其混凝土保护层厚度应满足钢筋防锈、耐火以及与混凝土之间粘结力传递的要求。

条文说明：

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362-2018规定，混凝土保护层厚度应满足下列要求：

- 1) 普通钢筋保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离，不应小于钢筋公称直径；当钢筋为束筋时，保护层厚度不应小于束筋的等效直径。
- 2) 最外侧钢筋的混凝土保护层厚度应不小于附表5.8.2的规定值。

附表5.8.2 混凝土保护层最小厚度 (mm)

构件类别	拱圈、梁、板	柱、墩台身	拱座、基础
I 类-一般环境	20	25	40
II 类-冻融环境	30	35	45
III 类-近海或海洋氯化物环境	35	45	65
IV 类-除冰盐等其他氯化物环境	30	35	45
V 类-盐结晶环境	30	40	45
VI 类-化学腐蚀环境	35	40	60
VII 类-磨蚀环境	35	45	65

注：

- 1 表中数值是针对各环境类别的最低作用等级、按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362-2018第4.5.3条要求的最低混凝土强度等级、以及钢筋和混凝土无特殊防腐措施规定的。
- 2 表中承台和基础的保护层最小厚度，是针对基坑底无垫层或侧面无模板的情况规定的；对于有垫层或有模板的情况，保护层最小厚度可将表中相应数值减少20mm，但不得小于30mm。

3 混凝土保护层厚度也不宜过大。当保护层很厚时，应采取有效措施减少其厚度或对厚保护层混凝土进行拉结，防止混凝土开裂剥落、下坠。通常为保护层采用纤维混凝土或加配钢筋网片。为保证防裂钢筋网片不致成为引导锈蚀的通道，应对其采取有效的绝缘和定位措施，此时网片钢筋的保护层厚度可适当减小。当纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度大于50mm时，宜对保护层采取有效的构造措施。当在保护层内配置防裂、防剥落的钢筋网片时，钢筋直径不小于6mm、间距不大于100mm，钢筋网片的混凝土保护层厚度不宜小于25mm。

5.8.3 伸缩缝处的桥面系及栏杆、防撞护栏处应设置防水和排水装置；

5.8.4 桥面排水应引至桥下沉淀池，不得污染和腐蚀桥梁结构，并符合环保要求。

5.8.5 拱圈、拱上立柱及桥面梁宜设置检查通道。

征求意见稿

6 结构分析验算

6.1 一般计算规定

6.1.1 钢筋混凝土拱桥应进行强度、刚度、稳定验算和动力性能分析，应按如下规定执行：

- 1 整体稳定性及动力特性应采用有限元程序进行全桥空间结构模型进行分析；
- 2 静力计算采用简化平面结构体系时，应计入汽车荷载横向偏载影响。

6.1.2 当拱圈净跨径大于 200m 时，应计入材料非线性、几何非线性影响。

- 1 采用混凝土抗压强度设计修正值，拱圈抗压强度设计修正值应按式（6.1.2-1）计算。

$$f_{cdm} = 0.85 f_{cd} \quad (6.1.2-1)$$

式中： f_{cd} ——混凝土的抗压强度设计值（MPa）；

f_{cdm} ——拱圈混凝土抗压强度设计修正值（MPa）。

- 2 应计入拱圈的初始缺陷影响，拱圈最大横向偏位值应符合式（6.1.2-2）的要求。

$$\delta = \frac{L_0}{5000} \quad (6.1.2-2)$$

式中： δ ——拱圈最大横向偏位值（cm）；

L_0 ——拱圈净跨径（cm）。

6.1.3 拱圈计算应考虑活载的横向不均匀分布，可按如下规定简化计算：

- 1 箱型拱荷载横向分配系数应采用刚性横梁法计算，对于肋拱应采用杠杆法计算；
- 2 拱上建筑为墙式墩、箱型拱时，当活载横桥向布置不超过拱圈以外时，活载可按均匀分布于拱圈全宽计算。

条文说明

上承式肋式拱桥活载可通过拱上排架墩的盖梁和立柱分配于拱肋，偏载作用下，各立柱分配的活载不同，因此，应考虑活载的横向不均匀分布。

6.1.4 钢筋混凝土拱桥的计算需根据拱上建筑的结构形式，确定是否考虑拱上建筑与拱圈的联合作用。对于拱上建筑采用分联连续梁或连续刚构形式的，结构分析时需考虑拱上建筑的联合作用。

6.1.5 无铰拱拱圈的等效计算长度应按公式（6.1.5）规定采用：

$$S_0 = 0.36 L_a \quad (6.1.5)$$

式中： S_0 ——拱圈拱轴线的等效计算长度；

L_a ——拱圈拱轴线的弧长。

6.1.6 钢筋混凝土拱桥结构计算分析应考虑拱轴线偏离结构重力压力线引起的偏离弯矩。拱圈偏心距应符合式（6.1.6-1）的要求。

$$e_0 \leq \frac{2i^2}{H} \quad (6.1.6-1)$$

式中： e_0 ——拱圈计算截面的最大偏心距，其值应按式（6.1.6-2）计算；

$$e_0 = \max \left\{ \frac{M_{\max}}{N}, \frac{M}{N_{\min}} \right\} \quad (6.1.6-2)$$

式中： $M_{\max}$ 、 N ——拱圈计算截面的最大弯矩及其对应的轴力；

M 、 $N_{\min}$ ——拱圈计算截面的最小轴力及其对应的弯矩；

H ——拱圈截面高度；

i ——拱圈截面的回转半径。

条文说明

拱圈宜为小偏心受压构件。钢筋混凝土悬臂浇筑拱桥应优选拱轴线，使拱在各种作用组合作用下，在各个受力阶段，轴向力偏心较小。若某些截面的结构自重压力线与拱轴线偏离过大，或在结构重力及所引起的弹性压缩和温度下降、混凝土收缩等作用下轴向力偏心距较大时，应作适当调整。

6.1.7 拱轴线优选应与悬臂浇筑法、组合法施工方法相配合，满足各施工阶段的受力要求。

6.1.8 在施工阶段及成拱过程中，应验算各阶段的拱圈截面应力、变形和稳定性。

6.1.9 拱圈悬臂浇筑计算中，应计入扣挂体系的变形对拱圈成拱过程应力、变形和稳定性的影响。

6.1.10 组合法采用劲性骨架法成拱的跨中区段计算中可不计入劲性骨架对拱圈强度、刚度的影响。

6.1.11 当箱型拱的宽度小于计算跨径的 1/20 时，应验算拱圈的横向稳定。

6.1.12 钢筋混凝土拱桥整体稳定系数按弹性理论计算时不小于 4.0，考虑材料和几何非线性后的稳定系数不小于 2.0。

6.1.13 大跨径拱桥应验算拱顶、拱跨 3/8、拱跨 1/4 和拱脚四个截面；特大跨径拱桥，除应验算拱顶、拱跨 3/8、拱跨 1/4 和拱脚四个截面外，需视截面位置、尺寸及配筋情况，选择控制截面进行验算。

6.1.14 拱上立柱与拱圈连接部位等应力扰动区可按照拉压杆模型、实体有限元模型或特殊受力情形的简化公式进行计算。

6.2 持久状况承载能力极限状态计算

6.2.1 持久状况设计应按承载能力极限状态的要求，对构件进行承载力及稳定计算，必要时尚应对结构进行倾覆和滑移的验算。

6.2.2 拱桥构件的承载能力极限状态计算，应采用满足公式（6.1.2-1）要求：

$$\gamma_0 S \leq R \quad (6.1.2-1)$$

$$R = R(f_d, a_d) \quad (6.1.2-2)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构重要性系数，对应于设计安全等级为一级、二级、三级分别取 1.1、1.0、0.9，
桥涵结构设计安全等级应符合现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定；

S ——作用（其中汽车荷载应计入冲击系数）效应的组合设计值，应按《公路桥涵设计通用规范》JTG D60或《城市桥梁设计规范》CJJ 11规定计算，对持久设计状况应按照作用基本组合计算；

R ——构件承载力设计值；

$R(\cdot)$ ——构件的承载力函数；

f_d ——材料强度设计值；

α_d ——几何参数设计值，当无可靠数据时，可采用几何参数标准值 α_k ，即设计文件规定值。

6.2.3 拱圈偏心受压验算按如下规定执行：

1 正截面抗压承载力按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362有关规定计算；

2 当拱圈的偏心距值符合8.1.6条的规定时，应按钢筋混凝土小偏心受压构件进行强度验算，否则应按钢筋混凝土大偏心受压构件进行强度验算；

3 组合法强度验算时，偏安全不计劲性骨架对承载力的贡献。

6.2.4 拱圈应按轴心受压构件验算弯矩作用平面外的抗压承载力，此时不考虑弯矩的作用，但应考虑稳定系数 φ 的影响。并按如下规定执行：

1 在施工阶段，拱的弯矩作用平面外抗压承载力验算时的构件自重效应分项系数应取1.2，附加的其他荷载效应分项系数应取1.4；

2 在使用阶段，拱的弯矩作用平面外抗压承载力验算的作用效应的分项系数按《公路桥涵设计通用规范》JTG D60取用；

3 轴压构件稳定系数按表6.2.4采用。

表 6.2.4 受压构件长细比折减系数

$S_0 / i_{\min}$	≤ 28	35	42	48	55	62	69	76	83	90	97
φ	1	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.7	0.65	0.6	0.56
$S_0 / i_{\min}$	104	111	118	125	132	139	146	153	160	167	174
φ	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19

注： S_0 ——拱圈等效计算长度； $i_{\min}$ ——拱圈截面最小回转半径。

6.3 持久状况正常使用极限状态计算

6.3.1 持久状况设计应按正常使用极限状态的要求，采用作用效应频遇组合或准永久组合，对构件的抗裂、裂缝宽度和变形进行验算。

6.3.2 正常使用极限状态下的裂缝宽度应按作用效应频遇组合并考虑作用长期效应的影响进行验算。

6.3.3 拱圈的变形应根据线弹性理论的方法计算；成桥时的恒载变形总量应根据设计成拱方法，由施工各阶段的恒载变形累计得到。

6.3.4 拱圈在汽车荷载的作用下，最大竖向挠度（正负挠度绝对值之和）不应大于拱圈净跨径的 1/1000。

6.3.5 拱圈应设置预拱度，预拱度值应取恒载累计变形、混凝土收缩徐变挠度与 1/2 静活载挠度之和，并应计入非线性影响。

6.3.6 悬臂浇筑时，拱圈线形需考虑预拱度，其设计实际总预拱度可按公式（6.3.6）计算。

$$\Delta_d = K_c \delta_c \quad (6.3.6)$$

式中： Δ_d —劲性骨架段设计实际总预拱度值；

K_c —钢筋混凝土拱圈的预拱度非线性修正系数，与拱圈计算跨径有关；200m< L ≤220m 时，取 1.10；220m< L ≤340m 时，取 1.15； L >340m 时，取 1.20， L 为拱圈计算跨径；

δ_c —钢筋混凝土拱圈的计算预拱度。

6.3.7 采用组合法时，劲性骨架制造线形需考虑预拱度，劲性骨架设计实际总预拱度可按公式（6.3.7）计算。

$$\Delta_d = K_s \delta_s + K_c \delta_c \quad (6.3.7)$$

式中： Δ_d —劲性骨架段设计实际总预拱度值；

K_s —劲性骨架预拱度非线性修正系数，与劲性骨架段水平投影长度有关；50m< L_s ≤100m 时，取 1.10；100m< L_s ≤150m 时，取 1.15， L_s 为劲性骨架段水平投影长度；

δ_s —劲性骨架段的计算预拱度；

6.3.8 拱圈变形计算应考虑混凝土徐变、收缩的影响，按 JTG 336 附录提供的公式计算。

6.3.9 拱桥中的钢筋混凝土或预应力混凝土构件的应力限值、裂缝宽度限值和挠度限值等本规程未明确处，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 有关规定执行。

6.3.10 拱圈跨径大于 200m 或宽跨比小于 1/20 的钢筋混凝土拱桥，应计算桥梁动力特性。当设有行人道时，应使结构频率避开人感频率范围 2.5~3.5Hz。

6.4 持久状况和短暂状况的应力计算

6.4.1 拱圈应计算其使用阶段正截面的混凝土法向压应力和受拉区钢筋拉应力，并不得超过本节规定的限值。计算时作用取其标准值，汽车荷载应考虑冲击系数。

6.4.2 拱圈使用阶段正截面混凝土的压应力应符合公式（6.4.2）要求：

$$\sigma_{cc} \leq 0.5 f_{ck} \quad (6.4.2)$$

式中, f_{ck} ——混凝土轴心抗压标准值;

6.4.3 短暂状况计算实为施工过程控制,进行短暂状况计算时,必须计入施工中可能出现的实际荷载,包括扣索力、拱圈自重、施工挂篮、施工机具和材料、施工人群以及风载、温差效应和施工临时荷载等。计算时作用取标准值,不计分项系数。

6.4.4 短暂状况应按拱圈成拱和拱上加载两个主要阶段进行拱圈施工阶段计算,一般应包括如下内容:

- 1 拱圈节段悬臂浇筑、劲性骨架架设及其混凝土浇筑、拱上建筑施工的应力、变形和稳定计算;
- 2 与拱圈形成有关的附属结构(如扣索锚固点、悬臂浇筑及劲性骨架施工接头处等)的计算;
- 3 拱上结构或桥面系的加载程序设计与相应阶段的结构应力、变形和稳定计算;

6.4.5 施工阶段应按弹性理论,采用应力叠加原则进行结构计算,并做应力控制。

6.4.6 施工阶段的拱桥力学计算模型及加载程序应与实际情况一致。进行结构分析时,应充分考虑拱肋形成过程中截面几何特性和材料特性的变化。

6.4.7 施工阶段的稳定分析应结合施工阶段和所处环境特点予以验算,其弹性稳定荷载系数应不小于 4.0。

6.4.8 构件在吊装、运输过程中的重力荷载应乘以动力系数 1.2 或 0.85,并视构件的具体情况做适当增减。

条文说明

在吊装过程中计入动力系数的重力荷载,仅限于吊装中的构件本身,不涉及已安装的构件。

6.4.9 劲性骨架段架设及外包混凝土浇筑施工,应对劲性骨架与拱圈悬臂现浇段钢混结合部位受力进行局部分析。

6.4.10 施工阶段混凝土边缘的法向应力应符合下列规定:

$$\text{压应力: } \sigma_{cc} \leq 0.70 f'_{ck}$$

$$\text{拉应力: } \sigma_{ct} \leq 1.15 f'_{tk}, \text{ 且不应大于 } 1.5 \text{MPa}。$$

式中, f'_{ck} ——施工阶段的混凝土轴心抗压标准值;

f'_{tk} ——施工阶段的混凝土轴心抗拉标准值。

7 施工技术

7.1 一般规定

7.1.1 施工前,应结合桥位建设条件,针对悬臂浇筑施工、挂篮前移、锚扣索张拉、线形调整、劲性骨架安装、劲性骨架段混凝土浇筑等关键工序,详细地编制施工组织设计,报主管单位审查和批准,并严格按照批准的文件开展施工。施工组织设计包括但不限于以下内容:

- 1 施工现场的总体规划和布置;
- 2 施工总体方案的比较和论证,其中应包括关键施工工序的计算比较和论证;
- 3 施工进度流程的规划和资源调配;
- 4 根据施工过程存在的安全风险,制订安全操作细则。

7.1.2 在通航水域进行施工作业时,应在桥梁上下游适当范围设置警戒线。当需封闭航道时,应和水运管理部门联系,采取措施确保安全。

7.1.3 构件选用材料应按如下规定执行:

- 1 拱座、拱圈等构件的混凝土应进行最佳配合比的设计与试验,制定质量控制标准和检测方法;
- 2 钢材、扣索、锚具都必须按设计技术指标进行采购,按有关检验标准严格检验,按相关技术规范和要求施工。

7.1.4 拱圈悬臂浇筑、合龙段劲性骨架架设及混凝土浇筑、拱上建筑的施工加载程序应对称、同步、均衡,成拱前应采取措施避免因施工等原因造成较大的振动。

7.1.5 施工过程中,特别是拱圈合龙前后,应掌握桥址处历史气象资料和近期的天气预报资料,避开可能突发的灾害性天气,并采取必要的预防措施确保施工临时结构及桥梁结构安全。

7.1.6 拱脚第一节段宜采用支架法浇筑,应采取延长混凝土初凝时间、掺加纤维、设置防裂钢筋网、控制水化热和养护等措施防止混凝土开裂,必要时可设置临时预应力,拱圈合龙后割除。

7.2 临时结构

7.2.1 临时结构由施工单位根据施工情况自行设计,并报监理和业主审批后实施。

7.2.2 拱脚段采用支架现浇时,支架设计、施工、拆除应参照《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 规定,符合如下要求:

- 1 应对支架进行专项设计,支架整体、杆配件、节点、地基、基础和其他支撑物应进行强度和稳定验算。
- 2 应对支架地基进行加强处理,防止因不均匀沉降产生裂缝;
- 3 浇筑前支架应进行预压,预压重量宜采用拱圈节段总重的1.1~1.2倍。

7.2.3 拱圈悬臂浇筑宜采用斜拉扣挂体系,调控拱圈悬臂浇筑区段的高程、受力和变形,实现合理的成拱线形。

7.2.4 扣塔设计宜按如下规定执行:

- 1 设计应考虑结构自重、锚扣索力、风载等荷载作用;

- 2 扣塔可采用格构型钢管、万能杆件、型钢构件组拼，条件适宜时也可采用混凝土结构；
- 3 当需要在扣塔上设置缆索吊装系统时，应根据吊重大小确定吊、扣塔系统的布置；
- 4 宜利用拱桥交接墩作为扣塔底座；
- 5 地形条件适宜时，可将扣塔设置在拱圈1/8跨位置左右，支撑拱脚现浇段并调控拱圈悬臂浇筑段；
- 6 扣塔结构应有足够的刚度和自身稳定性，在3%扣索张拉力的不平衡拉力作用下，塔顶纵向偏位不超过扣塔总高度的1/3000；

7 应设置风缆、扣锚索的张拉平台与交换梁联接装置、上下爬梯及安全防护等附属设施。

7.2.5 根据地质条件和桥梁结构设计特点，扣挂、吊装体系可选择预应力岩锚、桩锚、重力锚和已施工完成的桥台、桥墩、拱座等作为临时锚碇。

7.2.6 临时扣索在拱圈上的扣点宜按如下规定设置：

- 1 临时扣索扣点应结合拱圈构造特点设计，设置在每个节段横隔板与腹板交接位置或腹板侧；
- 2 扣点应设计钢筋混凝土齿块、钢锚箱等锚固构造，钢筋混凝土齿块应设置预留孔道与拱圈节段一同浇筑成形；
- 3 组合法劲性骨架段扣点应设置在桁架节点处，扣点钢锚箱应与劲性骨架一道在工厂制造完成。

7.2.7 扣、锚索设置、安装宜按如下规定执行：

- 1 扣、锚索应采用低松弛钢绞线、高强平行钢丝成品索；
- 2 扣、锚索张拉端应设在扣塔上，锚索固定端设置在临时锚碇上，扣索固定端设置在拱圈扣点处；
- 3 扣索和锚索宜按扇式布置或星式布置，扣索最小倾角不宜小于 20° ；
- 4 挂索前应对相关预埋构件、锚箱进行检查，清理干净，并检查索管有无变形；
- 5 扣、锚索与扣塔、拱圈、交接墩等接口部位应做好密封防水、排水处理。

7.2.8 施工前，应对悬臂浇筑中采用的斜拉扣挂体扣索、锚索、扣塔、锚碇体系、挂篮等构件在各施工阶段的强度、刚度和稳定性进行验算。并按如下规定执行：

- 1 扣、锚索在任何情况下的安全系数应不低于2.5；
- 2 锚碇抗拔、抗滑安全系数应大于2.0。

7.2.9 拱圈悬浇挂篮设计宜按如下规定执行：

- 1 挂篮应由承重系统、行走系统、支反力系统、止退系统、工作平台及防护系统等构成；
- 2 挂篮应满足拱圈曲线要求，具备足够的强度和平面尺寸，具有承担拱圈节段混凝土湿重和斜向移动功能；
- 3 挂篮设计应考虑抗风及承载的刚度要求；
- 4 挂篮重量与节段混凝土的重量比值控制不宜超过0.5，挂篮前进端变形不宜超过20mm；
- 5 施工时及行走时的抗倾覆安全系数、自锚固系统的安全系数、限位系统安全系数均不小于2.0。

7.3 拱圈悬臂浇筑

7.3.1 拱圈应进行混凝土配合比专项设计，并按如下规定执行：

- 1 应选用洁净、级配良好的骨料；
- 2 应选用低水化热、含碱量低、品质稳定的硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥；
- 3 应选用品质稳定的矿物掺和料、高效外加剂。

7.3.2 拱圈应设计封闭的模板系统，模板应具有足够的强度和刚度。

7.3.3 拱圈坐标放样时，应计入设计预抬值和挂篮变形值。

7.3.4 拱圈悬浇挂篮施工应按下列规定执行：

- 1 挂篮全部构件制作后均应进行检验和试拼，合格后再于现场整体组装检验；
- 2 挂篮按拱圈节段总重的1.2倍进行预压，检查加工和安装质量，测定挂篮的弹性挠度、调整高程性能及其他技术性能，并为施工监控与调整提供所需的准确数据。

7.3.5 拱圈悬臂浇筑施工锚扣体系设计应符合下列规定：

- 1 扣索和锚索之间宜通过置于扣塔上的交换梁相连接；
- 2 应考虑扣、锚索风致振动对结构安全的影响，并采取必要的抑振措施。

7.3.6 拱圈悬臂浇筑施工过程中，扣、锚索张拉宜按如下规定执行：

- 1 扣、锚索的张拉时间应选择在水温相对稳定时期，否则需对标高、索力进行温度修正。
- 2 用千斤顶张拉扣索时应分级进行，并同时监测结构应力及挠度观测；
- 3 拱圈一个截面横向设置多个扣点时，扣、锚索张拉时应对称同步进行；
- 4 应根据拱圈前一节段悬臂浇筑混凝土强度、龄期要求，确定后续扣索和对应的锚索张拉时间；
- 5 应根据施工过程中拱圈的拉应力，放松部分扣索和锚索；
- 6 扣、锚索索力应进行检测，其允许偏差为 $\pm 3\%$ 。

7.3.7 拱圈悬臂浇筑施工过程中，混凝土浇筑宜按如下规定执行：

- 1 应根据混凝土方量、初凝时间、容许拉应力及扣索控制张拉力，采用分次浇筑或一次浇筑。
- 2 在拱圈节段混凝土浇筑前，应对挂篮、模板、钢筋、预埋件、混凝土材料、配合比、机械设备、混凝土接缝处理情况进行全面检查，经签认后方准浇筑混凝土；
- 3 悬臂浇筑段前端顶、底板标高，应根据挂篮前端的垂直变形及预拱度设置，施工过程中要对实际高程进行监测，如与设计值有较大出入时，应会同监理单位、设计单位和监理单位查明原因进行调整；
- 4 炎热天气应注意挡风、遮阳，冬季注意保温蓄热，并加强保湿养护等措施。

7.3.8 拱圈施工过程中，应以拱圈坐标、应力控制为主，兼顾扣、锚索索力，在充分考虑温度影响，进行必要的温度修正后，均应控制在允许的范围内。

7.4 组合法劲性骨架段安装

7.4.1 劲性骨架可视桥位施工条件采用整体吊装或节段悬臂拼装方法施工。

7.4.2 骨架制造线形应计入施工预拱度，加工完成后应在工厂进行预组装。

7.4.3 骨架焊接材料和工艺的选择应保证焊接接头的强度与韧性指标。

7.4.4 劲性骨架预埋段混凝土浇筑宜按如下规定执行：

- 1 预埋件宜采取与拱圈节段钢筋焊接等方法进行固定；
- 2 混凝土浇筑前和振捣过程中应安排专人检查预埋件的位置；
- 3 预埋段混凝土宜保温、保湿养护7天以上。

7.4.5 劲性骨架采用整体吊装合龙或节段悬臂拼装合龙段施工前，宜按如下规定执行：

- 1 按设计要求复测拱圈线形和索力，必要时进行调索；
- 2 观测合龙前连续2~3天的昼夜温度场变化与悬臂段端口坐标变化的关系，选定一天中温度较低、相对稳定的时段作为劲性骨架合龙时间。

7.4.6 劲性骨架在节段吊装或整体吊装、拼接应按如下规定执行：

1 梁体吊装前应做好专项方案，安装前应对吊机起吊能力、劲性骨架结构在不同受力状态下的强度、刚度及稳定性进行验算；

2 劲性骨架可采用缆索吊或浮吊安装，吊装过程应严格遵守高空作业及水上作业的安全规定。

3 吊具的刚度应满足吊装需要，吊点应均匀布置，避免劲性骨架发生扭转、翘曲和倾斜；

4 吊点应设置在劲性骨架节点位置，吊点以4个为宜；吊点位置应予加强，以能保证较大集中荷载的传递；

5 悬拼设备应安全可靠，应具备节段平面位置、高程、倾角的调整功能；

6 劲性骨架安装到位后，应临时定位固定。

7.4.7 组合法劲性骨架定位安装精度宜按如下规定执行：

1 骨架预埋件、端口弦杆与节段腹板、顶底板中心线交点检查线重合的允许偏差宜为 $\pm 3.0\text{mm}$ ；

2 应严格控制骨架平面位置和高程，骨架与理论位置的允许偏差应为 $\pm 5.0\text{mm}$

7.4.8 劲性骨架组安装过程中应避免型钢与普通钢筋位置发生冲突，必要时可调整普通钢筋位置。

7.5 劲性骨架段混凝土浇筑

7.5.1 应综合考虑施工工期、施工设备、现场环境以及结构稳定性等因素，制定合理可行的劲性骨架段混凝土浇筑的施工方案。

7.5.2 应保证混凝土填充密实并与劲性骨架杆件良好接触，对受混凝土收缩影响的部位宜采用微膨胀混凝土，必要时可掺入纤维提高其抗裂性能，

7.5.3 配置混凝土的粗集料宜采用 5~20mm 连续级配碎石，集料最大粒径不宜超过 25mm；混凝土应有良好的工作性、和易性和流功性。

7.5.4 用斜拉扣挂分环连续浇筑拱圈劲性骨架段混凝土时，应采用操作方便和可靠的扣索系统，确定扣索的索力、位移和张拉程序，有效地控制连续浇筑混凝土过程中拱圈的变形。

7.5.5 采用悬臂浇筑法浇筑拱圈劲性骨架段混凝土时，宜按如下规定执行：

1 宜按先按节段依次浇筑节段的底板、腹板和顶板，前一节段浇筑完成强度形成后再浇筑下一节段，直到合龙；

2 应严格控制每一浇筑阶段骨架及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等应符合有关要求。

7.5.6 劲性骨架段浇筑混凝土时，宜在劲性骨架段的 1/6 截面附近设置扣索，索力随浇筑过程调节，降低劲性骨架和先浇混凝土在劲性骨架与悬臂现浇段接头处的应力。

7.5.7 劲性骨架段混凝土合龙段浇筑时，应观测合龙前连续 2~3 天的昼夜温度场变化与合龙口坐标变化的关系，选定一天中温度最低、变化幅度最小的时段作为合龙时间。

7.5.8 拱圈合龙后，扣、锚索卸除宜按如下规定执行：

1 扣、锚索卸除宜在拱顶合龙段混凝土达到100%、设计强度且龄期超过7天后进行；

2 应按对称均衡原则，从拱脚向拱顶分级放松、卸除扣、锚索；

3 在卸除扣索过程中，应监测扣索内力、拱轴线和高程；

4 卸除扣索后，应对拱圈上的扣点索孔注浆填充。

7.6 拱上建筑施工

- 7.6.1 应在合龙段混凝土达到设计强度后，再进行拱上建筑的施工。
- 7.6.2 拱上立柱、桥面系的施工应在拱顶两侧均衡对称实施，保证拱圈线形对称均衡变化。
- 7.6.3 施工前应对拱上立柱位置和高程复测检查,如超过允许偏差应予以调整。拱上立柱应设置预抬高值。

征求意见稿

8 施工监控

8.1 一般规定

8.1.1 采用悬臂浇筑与劲性骨架组合法施工的钢筋混凝土拱桥，应对拱圈、塔架及拱上加载等关键施工工序开展全过程施工监控。

8.1.2 施工监控单位进场前应制定详细的监控实施方案，包括监控目标、监控内容、监控方法、预警值等。

8.1.3 拱圈线形与应力、扣塔应力与偏位、扣索力必须进行监控，其他监控项可根据工程特点，由监控方自行确定。

8.1.4 根据混凝土拱圈的配合比，完成 7d、14d、28d 混凝土强度和弹性模量试验，获取真实的混凝土力学参数。

8.1.5 施工监控单位应建立独立的施工监控网，应在墩或岸上设置永久四等水准点，作为施工控制和永久性观测的水准点。

8.1.6 拱圈高程监测应根据断面确定，但不得少于 3 点。

8.1.7 施工过程中应严格控制的结构几何尺寸、预拱度、扣索张拉力，并通过分析评价和适时调整，使其严格控制在设计确定的目标范围之内。

8.2 施工监控要点

8.2.1 拱圈线形控制应按以下规定执行：

- 1 拱圈悬臂浇筑、劲性骨架预制加工、安装的线形应为拱圈设计线形与预抬高之和；
- 2 节段安装线形调整值应以拱圈成拱理论线形为控制目标，根据悬臂浇筑或安装过程中拱圈线形的变化量进行拟合迭代计算确定；
- 3 应尽量减少扣索、锚索的索力调整次数。

8.2.2 拱圈混凝土浇筑前，应复测立模标高。

8.2.3 混凝土浇筑、扣索张拉后，应及时测量拱圈节段坐标、应力和扣、锚索力。

8.2.4 测点布置宜按如下规定执行：

- 1 应对拱圈拱脚、1/4、3/8、拱顶截面的顶、底和腹板等部位进行应力测试，每个应力测量截面须布置若干个测点；
- 2 拱圈坐标监测应根据断面确定，但不得少于3点；
- 3 每根扣、锚索索力均需监测。

8.2.5 拱圈施工采用拱圈坐标、应力和扣、锚索力控制，以拱圈坐标、应力控制为主，兼顾扣、锚索力。

8.2.6 除对拱圈坐标、应力和索力进行测量外，还应对拱圈、索和塔架进行温度测试，并根据温度检测情况分析温度的影响，复核计算拱圈应力变化。

8.2.7 通过应力测试、误差分析，与理论应力的比较，反映出施工过程中拱圈结构的应力状况。应根据测量结果对扣索力及下一节段拱圈坐标进行修正。

8.2.8 悬臂浇筑过程中，除常规观测外，每隔 2~3 个节段应进行一次全天 24 小时的精密观测。

8.2.9 应根据设计合龙温度、施工组织设计、环境监测及实际施工进度情况，预测拱圈合龙时间段和合理的合理温度区间，进行拱圈悬臂浇筑、劲性骨架段加工制造和安装等过程中的温度修正。

征求意见稿

9 质量验收

9.0.1 采用悬臂浇筑及组合法施工的钢筋混凝土拱桥，其施工阶段及成桥的质量验收应符合现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 和现行《公路工程质量检验评定标准》JTG F80/1 的规定。

9.0.2 拱圈悬臂浇筑的质量标准见下表 9.0.2:

表 9.0.2 拱圈悬臂浇筑质量检测标准

检查项目		规定值或允许偏差 (mm)
混凝土强度 (MPa)		符合设计要求
轴线横向偏位		± 10
拱圈高程		$L/5000$
断面尺寸	高度	$+5, -10$
	顶宽	± 30
	顶底腹板厚	$+10, -0$
同跨对称点高程差		$L/5000$

9.0.3 劲性骨架段线形应符合设计要求，劲性骨架段的加工、安装标准参见表 9.0.2。

表 9.0.3 劲性骨架段制作与安装质量检测标准

检查项目	规定值或允许偏差 (mm)
焊缝质量	符合设计要求
轴线横向偏位	± 5
接缝错边	0.1 杆件壁厚, 且 ≤ 1
拱圈高程	符合设计要求

9.1.4 劲性骨架段混凝土浇筑应无麻面、空洞和露筋现象，其质量检测标准见表 9.0.2。

附录 A 钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法施工工艺流程

A.0.1 钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑与劲性骨架组合法施工工艺流程可参照如下步骤执行：

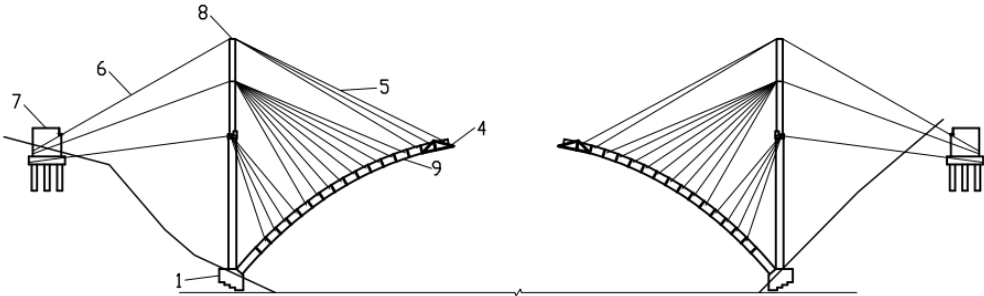
- 1 拱座基坑开挖及混凝土浇筑施工；
- 2 采用支架现浇法浇筑拱圈拱脚段，扣挂支架现浇段，拆除支架，安装挂篮并进行预压；



注：1-拱座；2-支架；3-拱脚段；4-悬浇挂篮；5-扣索；6-锚索；7-锚碇（桥台）；8-扣塔

图A.0.1 拱座及拱圈拱脚段施工

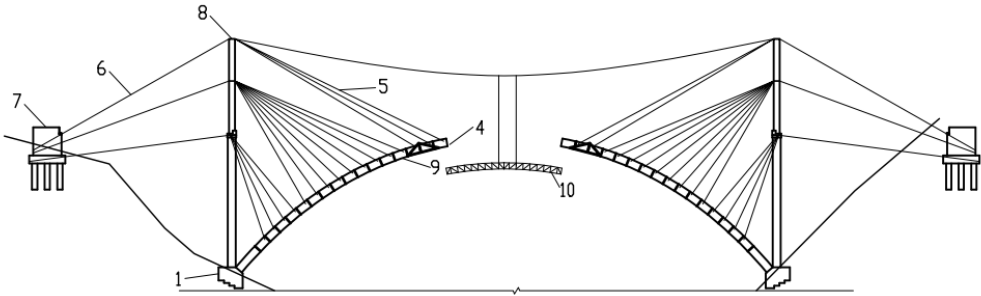
- 3 施工第一个悬臂现浇节段并完成扣挂，待前一拱圈节段强度形成后，安装张拉该节段的扣索，挂篮前移就位，浇筑下一节段；
- 4 重复上述步骤3，逐段浇筑施工，完成拱圈悬臂浇筑段；



注：4-悬浇挂篮；5-扣索；6-锚索；7-锚碇；9-悬臂浇筑节段

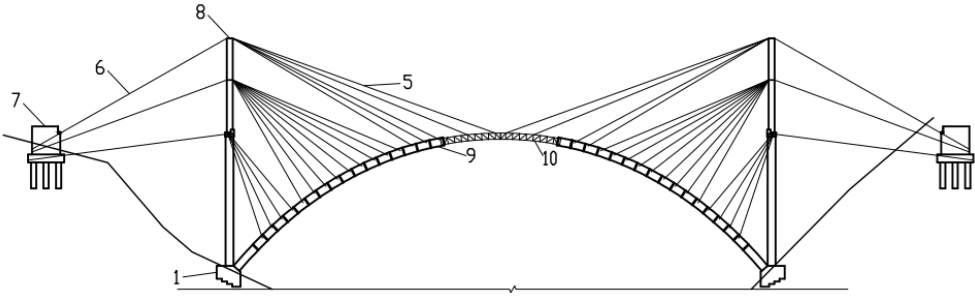
图A.0.2 拱圈悬臂浇筑施工

- 5 采用整体吊装方法或悬臂拼装方法安装劲性骨架段，拼接合龙，形成混凝土-劲性骨架组合结构拱圈；



注：4-悬浇挂篮；5-扣索；6-锚索；7-锚碇；9-悬臂浇筑节段；10-劲性骨架

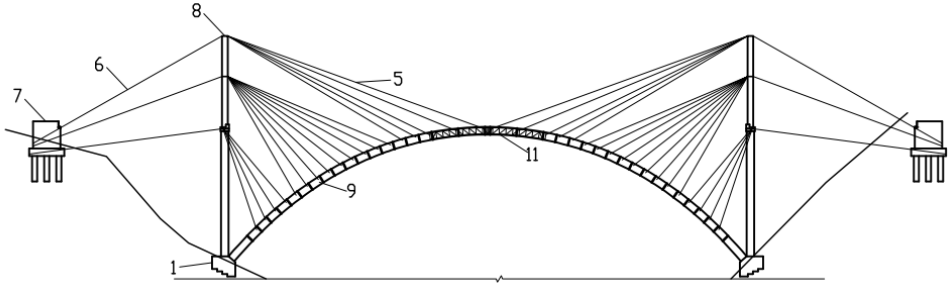
图A.0.4 合龙段劲性骨架吊装



注：5-扣索；6-锚索；7-锚碇；9-悬臂浇筑节段；10-劲性骨架

图A.0.5 合龙段劲性骨架安装施工

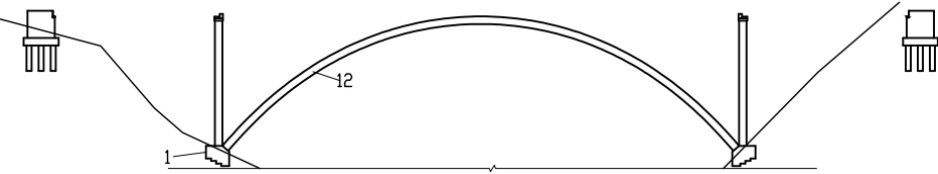
6 采用分环分段浇筑劲性骨架段混凝土，或悬臂浇筑法分节段浇筑劲性骨架段混凝土。



注：5-扣索；6-锚索；7-锚碇；9-悬臂浇筑节段；10-劲性骨架；11-劲性骨架现浇段；

图A.0.6 合龙段劲性骨架混凝土浇筑施工

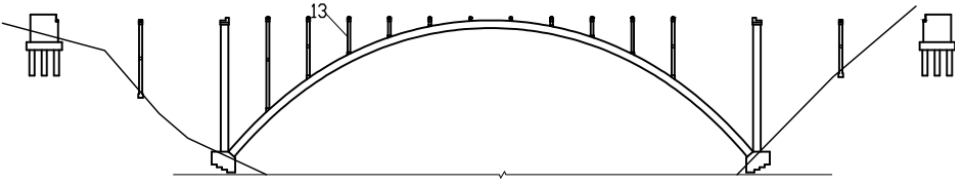
7 拆除悬浇挂篮，由拱顶向拱脚逐级放松扣、锚索，直至扣、锚索全部放松并拆除，拆除扣塔。钢筋混凝土拱圈形成。



注：1-拱座；12-拱圈

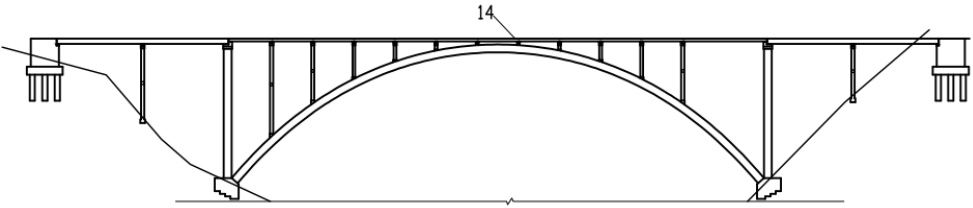
图A.0.7 主拱圈形成

8 立柱及桥道系施工。



注：13-立柱

图A.0.8 立柱施工



注：13-立柱；14-桥道梁
图A.0.9 桥道梁施工

征求意见稿

本规范用词用语说明

1 本规范执行严格程度的用词，采取下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”或“可”，反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《×××××××》（×××）的有关规定”。
- 3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”、“应符合本规范第×.×节的有关规定”、“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。