



# 团 体 标 准

T/SDHTS XXXXX-XXXX  
代替 T/SDHTS XXXXX-XXXX

## 钢壳-混凝土组合索塔技术规程

Technical code of practice for steel shell and concrete composite  
bridge pylons

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

山东公路学会 发 布

目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语与定义 ..... 2

4 基本规定 ..... 3

5 材料 ..... 4

    5.1 一般规定 ..... 4

    5.2 钢筋连接接头 ..... 4

    5.3 混凝土 ..... 4

    5.4 钢材 ..... 5

    5.5 涂装材料 ..... 5

6 设计 ..... 5

    6.1 一般规定 ..... 5

    6.2 一般构造 ..... 7

    6.3 承载能力极限状态计算 ..... 9

    6.4 开孔板连接件计算 ..... 11

    6.5 施工期计算 ..... 13

    6.6 稳定分析和动力分析 ..... 14

7 施工 ..... 15

    7.1 一般规定 ..... 15

    7.2 施工准备 ..... 15

    7.3 附筋钢壳加工 ..... 15

    7.4 钢壳节段组装与预拼装 ..... 18

    7.5 钢壳节段现场安装 ..... 20

    7.6 混凝土施工 ..... 23

7.7 施工测量与监控 ..... 23

8 质量检验 ..... 25

8.1 一般规定 ..... 25

8.2 混凝土脱空检验 ..... 25

8.3 焊缝检验 ..... 25

8.4 涂装检验 ..... 26

8.5 安装质量检验 ..... 26

## 前 言

本文件按照《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》（GB/T 1.1—2020）的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省路桥集团有限公司提出。

本文件由山东公路学会归口。

本文件起草单位：山东省路桥集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、青岛理工大学、同济大学。

本文件主要起草人：徐召、苏庆田、臧洪敏、徐常泽、张光桥、王宏博、吴士乾、崔锋、杨国涛、赵洪蛟、林占胜、赵国、尤伟杰、管锡琨、徐晨。

# 钢壳-混凝土组合索塔技术规程

## 1 范围

本文件规定了钢壳混凝土组合桥塔的材料选用、设计、施工和质量检验等内容。

本规程适用于缆索承重体系桥梁钢壳混凝土组合桥塔的设计、制造、安装及质量检验。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50496 大体积混凝土施工标准

GB 50661 钢结构焊接规范

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差

GB/T 714 桥梁用结构钢

GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉

GB/T 11345 焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定

GB/T 50081 普通混凝土力学性能试验方法标准

JTG D60 公路桥涵设计通用规范

JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范

JTG F90 公路工程施工安全技术规范

JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准

JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

JGJ 82 钢结构高强度螺栓连接技术规程

JGJ 107 钢筋机械连接技术规程

JGJ 138 组合结构设计规范

JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件  
JGJ/T 178 补偿收缩混凝土应用技术规程  
JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范  
JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范  
JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范  
JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范  
T/CHCA 005 沉管隧道钢壳混凝土脱空无损检测规范  
T/CHTS 10005 公路桥梁锥套锁紧钢筋接头技术指南

### 3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**钢壳混凝土组合桥塔** steel shell and concrete composite bridge pylons

由内外钢壳壁板、开孔板连接件、圆柱头焊钉连接件、钢筋、桁架及混凝土等构成的协同受力、共同工作的结构。

#### 3.2

**钢壳节段** steel shell segment

按设计要求将组合桥塔钢壳在高度方向划分为若干段，称为钢壳节段，其中第一段钢壳节段称为首节钢壳。

#### 3.3

**附筋** attached reinforcement

在钢壳节段内部安装的竖向钢筋、横向钢筋及拉筋的统称。

#### 3.4

**钢壳** steel shell

内外钢壳壁板及壁板上纵横向开孔板的统称。

#### 3.5

**附筋钢壳** steel shell segment with attached reinforcement

钢壳与钢壳内的钢筋形成的整体结构，总称为附筋钢壳。

#### 3.6

开孔板连接件 perforated rib connector

在内外钢壳壁板纵向和横向的开孔板孔内贯穿钢筋，使混凝土与钢壳壁板共同受力的连接构件。

3.7

桁架 truss

沿内外钢壳壁板水平与高度方向上间隔一定距离设置的钢构件，钢构件与内外钢壳壁板的加劲板焊接连接。

3.8

补偿收缩混凝土 shrinkage compensating concrete

混凝土中掺入适量膨胀剂或用膨胀水泥配制的混凝土。

3.9

预拼装 pre-assembly

在钢壳安装施工前，为保证构件的安装精度进行的连续匹配拼装。

3.10

锥套筒紧钢筋机械接头 tapered sleeve locking-type mechanical splicing

采用带有齿形内表面和圆柱外表面端部为锥面的一副锁片将待接的两根带肋钢筋包裹住，通过套在锁片外侧带有与锁片外锥面相匹配的两个锥套向内夹紧，使锁片沿径向也向内收紧而实现钢筋连接的方法。

锥套筒紧钢筋机械接头结构示意见图 1 所示，适用于直径为 16~50 mm 的带肋钢筋连接。

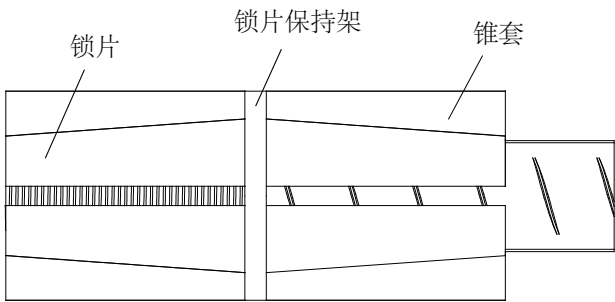


图 1 锥套筒紧钢筋机械接头结构示意图

4 基本规定

4.1 钢壳混凝土组合桥塔的构造设计应满足截面强度、刚度和稳定性等要求，同时应满足施工期受力及变形要求。

- 4.2 钢壳混凝土组合桥塔设计使用年限为 100 年。
- 4.3 在设计使用年限内，钢壳混凝土组合桥塔应符合下列规定：
- a) 桥塔应能承受在正常施工和使用期间可能出现的、设计荷载范围内的各种作用；
  - b) 在正常使用期间，应保障桥塔的预定使用性能，不出现影响正常使用的变形或振动等；
  - c) 在正常使用和正常维护条件下桥塔应满足设计使用年限内的耐久性要求；
  - d) 在极端荷载作用下，桥塔应能在规定的时间内保持承载力和整体稳定性。
- 4.4 钢壳混凝土组合桥塔在设计时需结合工程特点，施工前根据实际情况，宜提前开展相应的结构受力试验、结构安全验证性试验、加工制造和施工方案等专题研究论证。
- 4.5 钢壳混凝土组合桥塔钢构件宜采用工厂化制造，并在施工现场进行装配化施工，以达到快速建造目的。
- 4.6 施工过程中桥塔的倾斜度、塔与塔座结合处等数据应妥善保留，以作为运营期桥塔成桥初始状态资料。
- 4.7 钢壳混凝土组合桥塔内部应保留检验通道，定期对斜拉索等可更换部件进行抽检，保证零部件更换的可行性。

## 5 材料

### 5.1 一般规定

钢筋连接接头、混凝土、钢材、圆柱头焊钉、焊接材料及涂装材料等应符合相应规范的规定。材料应具备质量检验文件，且应按照相应规范规定进行抽样复验，复验合格后方可使用。

### 5.2 钢筋连接接头

钢壳节段主筋连接应选用锥套锁紧钢筋机械接头或直螺纹套筒机械接头，接头的强度不得低于主筋。钢壳节段间钢筋机械连接应符合《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107) 与《公路桥梁锥套锁紧钢筋接头技术指南》(T/CHTS 10005) 的规定。

### 5.3 混凝土

5.3.1 钢壳混凝土组合桥塔使用混凝土的强度不得低于 C50，应采用补偿收缩混凝土，并掺加微膨胀防干缩裂纹掺合料，钢壳内补偿收缩混凝土 28 d 养护条件下，限制膨胀率宜为 0.01%~0.1%。

5.3.2 钢壳混凝土组合桥塔补偿收缩混凝土配合比设计应符合下列规定：

- a) 选择高品质水泥，并按要求进行调配与搅拌，确保其强度和抗裂性能；
- b) 采用大掺量矿物掺合料，降低胶凝材料用量和水泥用量，降低混凝土的绝热温升；



c) 调整粉煤灰和矿粉掺合料组成,改善混凝土的工作性能和耐久性;

d) 适当掺加抗裂剂,减少混凝土收缩,提高体积稳定性,进而提高混凝土自身的抗变形和抗开裂能力;

e) 补偿收缩混凝土中的内含物应尽可能控制在合适的范围内,以防止其对混凝土强度和耐久性造成负面影响。

5.3.3 补偿收缩混凝土的使用还应符合《补偿收缩混凝土应用技术规程》(JGJ/T 178)的规定。

## 5.4 钢材

5.4.1 钢壳结构钢材的选用应符合下列规定:

a) 钢壳混凝土组合桥塔中钢壳所用钢材宜选用 Q355、Q390、Q420、Q460 等低合金高强度结构钢,其质量应符合《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591)的规定,也可采用 Q345q、Q370q、Q420q、Q500q、Q550q、Q620q、Q690q 等桥梁用结构钢,其质量应符合《桥梁用结构钢》(GB/T 714)的规定;

b) 钢板厚度大于或等于 8 mm 时,不得采用卷料及开平板;

c) 钢壳钢板厚度公差宜符合《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》(GB/T 709)中 C 类单轧钢板允许偏差的相关规定。

5.4.2 圆柱头焊钉的外形尺寸及机械性能应符合《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433)的规定。

5.4.3 焊接材料应与母材相匹配,其型号及规格应符合《钢结构焊接规范》(GB 50661)的规定。

## 5.5 涂装材料

涂装材料的选用应符合设计文件与《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722)的规定。

## 6 设计

### 6.1 一般规定

6.1.1 钢壳混凝土组合桥塔的构造应保证具有足够的强度和刚度,同时使内力传递顺畅,减少应力集中,方便施工与养护;应采取合理的钢混界面连接技术,确保附筋钢壳与混凝土形成共同工作的组合截面。

6.1.2 钢壳混凝土组合桥塔锚固区宜采用侧壁直接锚固形式以便于施工,也可采用钢锚梁锚固、交叉锚固、钢锚箱锚固及鞍座式锚固(骑跨式和回转式)等形式。

6.1.3 钢壳混凝土组合桥塔结构设计应兼顾永久结构和施工临时结构的需要,统筹考虑养护管理工

作需求。钢壳混凝土组合桥塔塔内检修平台、爬梯和升降机轨道的使用需兼顾钢壳节段间的环缝焊接和钢壳节段混凝土浇筑施工。钢壳混凝土组合桥塔需分别进行运营期和施工期验算。其中，运营期验算应包含运营期承载力验算、刚度验算、稳定性验算及开孔板连接件验算等；施工期验算应包含桥塔在混凝土浇筑过程中钢壳的受力及变形验算、钢壳吊装验算及索力不平衡验算等。在设计阶段，钢壳混凝土组合桥塔结构的主要分析和计算内容宜包括表 1 内容。

6.1.4 钢壳混凝土组合桥塔应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行验算，作用效应组合应按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 规定计算。

6.1.5 应考虑钢壳混凝土组合桥塔的钢壳与混凝土之间脱空对结构受力的影响，在设计计算时可考虑一定的脱空率，并明确补偿收缩混凝土性能指标。

6.1.6 钢壳混凝土组合桥塔焊接结构设计中不应任意加大焊缝尺寸，应避免焊缝密集交叉。对直接承受动力荷载的普通螺栓受拉连接件应使用双螺母或采取其他防止螺母松动的有效措施。

6.1.7 钢壳混凝土组合桥塔在正常使用极限状态验算中，截面刚度应按组合截面刚度计算。其中混凝土截面刚度计算时需考虑混凝土开裂的影响，应取折减系数 0.85。

表 1 钢壳混凝土组合桥塔设计阶段分析验算内容

项目	分析内容	验算内容
成桥状态 承载力分析	基于设计成桥状态，分析在永久作用和可变作用下钢壳混凝土组合桥塔的最不利内力、应力和变形	验算在设计成桥状态下钢壳混凝土组合桥塔承载力是否满足要求
	在永久作用和可变作用下，钢壳混凝土组合桥塔典型应力扰动区的受力情况	验算钢壳混凝土组合桥塔与横梁连接区、钢壳混凝土组合桥塔与主梁连接区、钢壳混凝土组合桥塔的锚固部位和应力扰动区的承载力是否满足要求
施工阶段 承载力分析	在永久作用和施工荷载作用下，钢壳混凝土组合桥塔及其主要构件的最不利内力和应力	验算钢壳混凝土组合桥塔、斜拉索和支撑连接装置的承载力是否满足要求
	在永久作用和施工荷载作用下，钢壳混凝土组合桥塔典型应力扰动区的受力情况	验算钢壳混凝土组合桥塔应力扰动区的承载力是否满足要求
稳定分析	成桥状态：在永久作用和可变作用下，钢壳混凝土组合桥塔的整体稳定和局部稳定	验算钢壳混凝土组合桥塔的稳定系数是否满足要求
	施工阶段：在永久作用和施工荷载作用下，钢壳混凝土组合桥塔的整体稳定和局部稳定	
成桥状态 动力分析	在地震作用下钢壳混凝土组合桥塔的内力和变形	验算钢壳混凝土组合桥塔的承载力、延性性能和变形性能是否满足要求

	在风荷载作用下钢壳混凝土组合桥塔的静力及动力响应	验算钢壳混凝土组合桥塔的空气动力稳定性、斜拉索的风振性能是否满足要求
	在船舶撞击作用下钢壳混凝土组合桥塔的内力、变形	验算钢壳混凝土组合桥塔承载力是否满足要求

6.2 一般构造

- 6.2.1 钢壳混凝土组合桥塔应根据几何形式、建造过程和受力状态，设置可靠的桁架系统。
- 6.2.2 钢壳混凝土组合桥塔应根据结构形式、抗震等级及节间荷载等情况，控制其长细比和板件宽厚比，设置加劲肋。
- 6.2.3 钢壳混凝土组合桥塔结构中主要包含内外钢壳壁板、横向与纵向开孔板连接件、圆柱头焊钉连接件、横向与竖向钢筋、型钢桁架及混凝土，详见图 2 和图 3。
- 6.2.4 钢壳混凝土组合桥塔的内外钢壳壁板厚度应满足强度和刚度等设计要求，且外钢壳壁板厚度不宜小于 10 mm，内钢壳壁板厚度不宜小于 6 mm。
- 6.2.5 钢壳混凝土组合桥塔的开孔板连接件应符合下列规定：
- a) 开孔板连接件的厚度不宜小于 8 mm；
  - b) 开孔板连接件的开孔孔径应大于两倍粗骨料最大粒径与贯穿钢筋直径之和；
  - c) 开孔板连接件的贯穿钢筋应采用螺纹钢筋且直径不宜小于 12 mm。

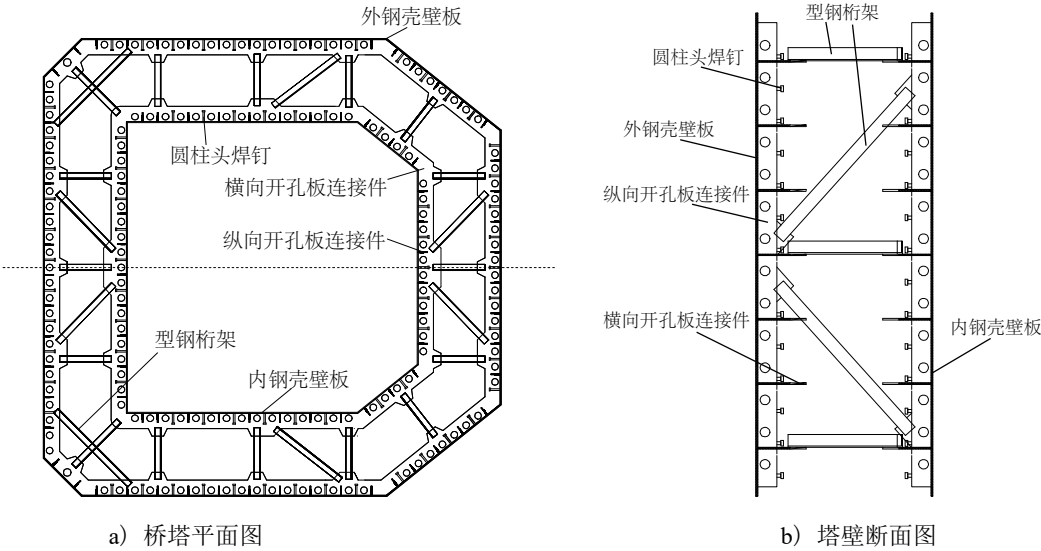


图 2 组合桥塔节段构造示意图

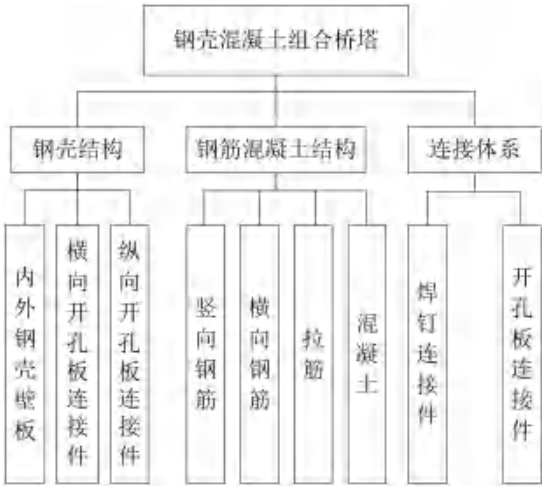


图 3 钢壳混凝土组合桥塔

6.2.6 钢壳混凝土组合桥塔的节段划分应符合下列规定：

a) 钢壳混凝土组合桥塔节段的平面尺寸应按其成桥状态承载力计算确定。钢壳混凝土组合桥塔的节段划分应充分考虑钢壳的制造高度、吊装重量、钢筋长度、浇筑能力、接头数量、节段刚度和稳定性等控制因素，详见图 4；

b) 钢壳混凝土组合桥塔节段高度宜控制在 3~9 m 之间。

6.2.7 钢壳混凝土组合桥塔的节段连接构造应符合下列规定：

- a) 钢壳混凝土组合桥塔节段间的连接包括内外钢壳壁板连接和竖向附筋连接；
- b) 内外钢壳壁板连接应充分考虑其密封性、耐久性及施工便利性，宜采用全熔透焊接，开孔板宜采用高强螺栓连接；
- c) 竖向附筋连接应选用锥套锁紧钢筋机械接头或直螺纹套筒机械接头，并选用可靠的工艺装备进行定位。

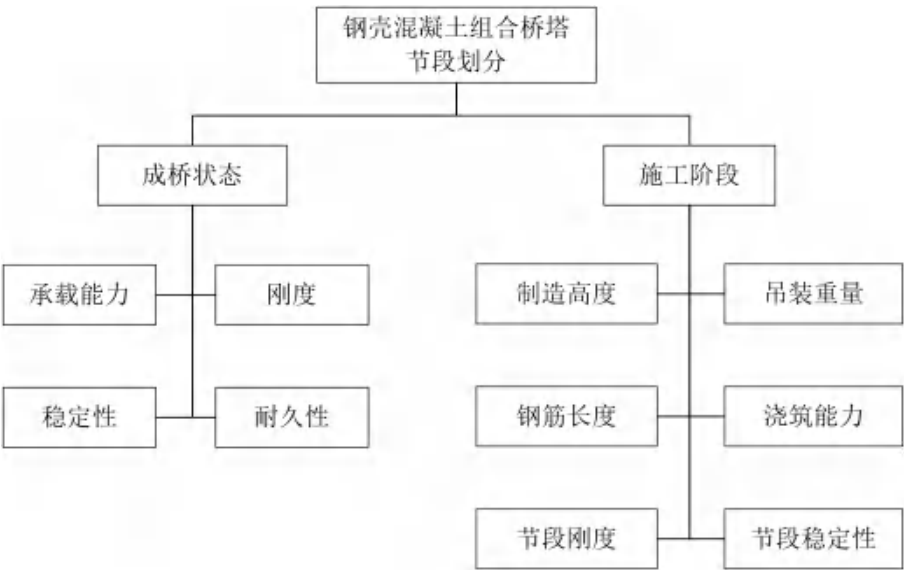


图 4 钢壳混凝土组合桥塔节段划分控制因素

## 6.3 承载能力极限状态计算

6.3.1 钢壳混凝土组合桥塔正截面承载力计算应符合下列基本假定：

- a) 钢壳混凝土组合桥塔截面平均应变应符合平截面假定；
- b) 不考虑截面受拉区混凝土的抗拉强度；
- c) 内外钢壳壁板与混凝土之间的连接件可保证钢混界面协同受力。

6.3.2 钢壳混凝土组合桥塔压弯极限承载力验算应满足下列规定，其计算示意图如图 5 所示：

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd}bx + f'_{sd}A'_s + \eta_{rs}f'_{rd}A'_r - f_{sd}A_s - \eta_{rs}f_{rd}A_r \quad (6.3.2-1)$$

$$\gamma_0 N_d e \leq f_{cd}bx \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd}A'_s (h_0 - a'_s) + \eta_{rs}f'_{rd}A'_r (h_0 - a'_r) \quad (6.3.2-2)$$

$$e = \eta e_0 + \frac{h}{2} - a_s \quad (6.3.2-3)$$

$$e_0 = M_d / N_d \quad (6.3.2-4)$$

式中： $\gamma_0$ ——桥梁结构重要性系数；

$e$ ——轴力作用点至截面受拉侧或受压侧的竖向钢筋和钢壳外壁板合力点的距离；

$e_0$ ——轴力对截面中性轴的偏心距；

$M_d$ ——截面弯矩设计值；

$N_d$ ——截面轴力设计值；

$f_{cd}$ ——混凝土轴心抗压强度设计值；

$f_{sd}$ 、 $f'_{sd}$ ——竖向钢筋抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

$f_{rd}$ 、 $f'_{rd}$ ——纵向开孔板抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

$\eta_{rs}$ ——开孔板承载力系数，根据组合桥塔截面剪力连接度 $\gamma$ 确定， $\gamma \geq 1$ 时， $\eta_{rs}$ 取 1；

$A_s$ 、 $A'_s$ ——受拉区、受压区竖向钢筋截面面积；

$A_r$ 、 $A'_r$ ——受拉区、受压区钢壳及其纵向开孔板截面面积之和；

$b$ ——截面宽度，可随截面高度变化；

$h_0$ ——截面有效高度， $h_0 = h - a_s$ ，此处 $h$ 为截面高度；

$a'_s$ ——受压区竖向钢筋合力点至受压区边缘的距离；

$a'_r$ ——受压区钢壳及其纵向开孔板合力点至受压区边缘的距离；

$\eta$ ——轴力偏心距增大系数；

$x$ ——混凝土受压区高度。

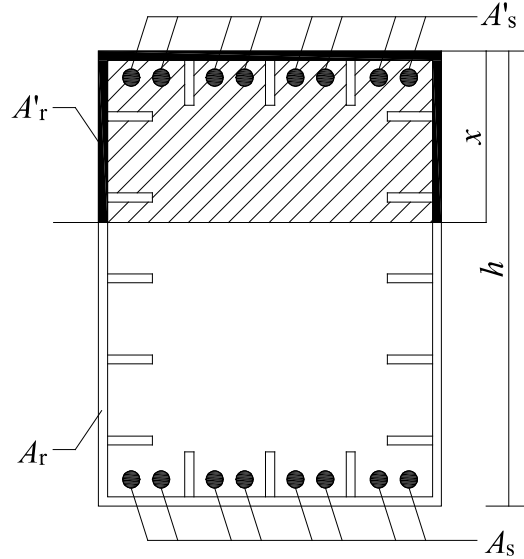


图 5 钢壳混凝土组合桥塔压弯承载力计算示意图

6.3.3 钢壳混凝土组合桥塔的抗剪承载力验算应满足下列规定：

$$\gamma_0 V \leq V_u \quad (6.3.3-1)$$

$$V_u = V_{cs} + V_{ss} \quad (6.3.3-2)$$

$$V_{cs} = 0.45 \times 10^{-3} b h_0 \sqrt{(2 + 60 \rho) \sqrt{f_{cu,k}} \rho_{sv} f_{sv}} \quad (6.3.3-3)$$

$$V_{ss} = 0.6 f_y A_{sw} \quad (6.3.3-4)$$

式中： $V$ ——钢壳混凝土组合桥塔截面的剪力设计值；

$V_u$ ——钢壳混凝土组合桥塔截面的抗剪承载力设计值；

$V_{cs}$ ——钢壳混凝土组合桥塔截面中混凝土的抗剪承载力设计值；

$V_{ss}$ ——钢壳混凝土组合桥塔截面中内外钢壳壁板及连接件的抗剪承载力设计值；

$f_y$ ——钢材的抗拉强度设计值；

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值；

$\rho_{sv}$ ——箍筋配筋率；

$f_{sv}$ ——箍筋抗拉强度设计值；

$\rho$ ——斜截面内纵向受拉钢筋的配筋率，当  $\rho > 2.5\%$  时，按  $\rho = 2.5\%$  计算；

$A_{sw}$ ——钢壳混凝土组合桥塔截面中的钢壳面积。

6.3.4 钢壳混凝土组合桥塔抗弯极限承载力验算应满足下列规定：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \eta_{rs} f'_{rd} A'_r (h_0 - a'_r) \quad (6.3.4-1)$$

其中，混凝土受压区高度  $x$  应按下式计算：

$$f_{sd} A_s + \eta_{rs} f_{rd} A_r \leq f_{cd} b x + f'_{sd} A'_s + \eta_{rs} f'_{rd} A'_r \quad (6.3.4-2)$$

式中： $\gamma_0$ ——桥梁结构重要性系数；

$M_d$ ——钢壳混凝土组合桥塔截面的弯矩设计值；

$f_{cd}$ ——混凝土轴心抗压强度设计值；

$b$ ——截面宽度，可随截面高度变化；

$x$ ——混凝土受压区高度；

$h_0$ ——截面有效高度， $h_0 = h - a_s$ ，此处  $h$  为截面高度；

$f_{sd}$ 、 $f'_{sd}$ ——竖向钢筋抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

$f_{rd}$ 、 $f'_{rd}$ ——纵向开孔板抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

$a'_s$ ——受压区竖向钢筋合力点至受压区边缘的距离；

$A_r$ 、 $A'_r$ ——受拉区、受压区钢壳及其纵向开孔板截面面积之和；

$A_s$ 、 $A'_s$ ——受拉区、受压区竖向钢筋截面面积；

$a'_r$ ——受压区钢壳及其纵向开孔板合力点至受压区边缘的距离；

$\eta_{rs}$ ——开孔板承载力系数，根据组合桥塔截面剪力连接度  $\gamma$  确定， $\gamma \geq 1$  时， $\eta_{rs}$  取 1。

6.3.5 钢壳混凝土组合桥塔的稳定分析应分别对施工阶段和成桥状态的结构整体稳定性进行计算，弹性屈曲稳定安全系数不应小于 4。当不能满足弹性屈曲稳定要求时，应进行非线性稳定计算，其稳定系数不应小于 2。

## 6.4 开孔板连接件计算

6.4.1 钢壳混凝土组合桥塔连接件采用纵、横双向开孔板连接件，其布置间距应满足下列规定（横

向开孔板可适当增大间距)：

$$s_n / t_n \leq 40\varepsilon_k \quad (6.4.1-1)$$

式中： $s_n$ ——开孔板连接件的布置间距；

$t_n$ ——外钢壳壁板的厚度；

$\varepsilon_k$ ——钢号修正系数，取 $\sqrt{345/f_y}$ 。

6.4.2 开孔板连接件抗剪承载力验算需满足下列规定，其计算示意图如图 6 所示：

$$V_n < V_u \quad (6.4.2-1)$$

$$V_n < V_u = V_{\text{dow}} + V_{\text{rib}} \quad (6.4.2-2)$$

$$V_{\text{dow}} = 0.0312d_r A_{\text{dow}} f_{\text{cu}}^{0.57} \quad (6.4.2-3)$$

$$V_{\text{rib}} = 2.1t_r^{0.9} (d_h/2 - 5) f_u + 1.6t_r^{0.9} l_r f_u \quad (6.4.2-4)$$

式中： $V_n$ ——开孔板连接件的剪力设计值；

$V_u$ ——开孔板连接件的抗剪承载力设计值；

$V_{\text{dow}}$ ——开孔板连接件中钢筋混凝土樁的抗剪承载力设计值；

$V_{\text{rib}}$ ——开孔板连接件中钢板的抗剪承载力设计值；

$d_r$ ——横向钢筋的直径；

$d_h$ ——混凝土樁的直径；

$A_{\text{dow}}$ ——混凝土樁的截面面积；

$f_{\text{cu}}$ ——混凝土立方体抗压强度；

$f_u$ ——开孔板连接件的极限抗拉强度设计值；

$t_r$ ——开孔板连接件的厚度；

$l_r$ ——凸起端与开孔边缘的垂直距离。

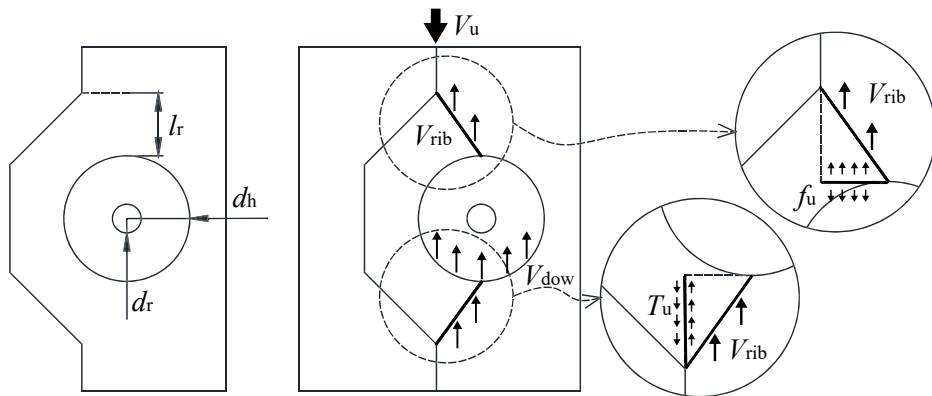


图 6 开孔板连接件抗剪设计示意图

6.4.3 开孔板连接件抗拔承载力验算需满足下列规定，其计算示意图如图 7 所示：



$$T_n < T_u \quad (6.4.3-1)$$

$$T_n < T_u = T_{\text{dow}} + T_{\text{rib}} \quad (6.4.3-2)$$

$$T_{\text{dow}} = 34.77(2.12d_e + d_h)^{1.07} \sqrt{0.8f_{\text{cu}}} \quad (6.4.3-3)$$

$$T_{\text{rib}} = 0.52f_y t_r l_h \quad (6.4.3-4)$$

式中：  $T_{\text{dow}}$  ——开孔板连接件中钢筋混凝土樁的抗拔承载力设计值；

$T_{\text{rib}}$  ——开孔板连接件中钢板的抗拔承载力设计值；

$T_n$  ——开孔板连接件的拉拔力设计值；

$T_u$  ——开孔板连接件的抗拔承载力设计值；

$d_h$  ——混凝土樁的直径；

$d_e$  ——开孔板连接件的嵌入深度；

$f_{\text{cu}}$  ——混凝土立方体抗压强度；

$f_y$  ——开孔板连接件的屈服强度；

$t_r$  ——开孔板连接件的厚度；

$l_h$  ——开孔板连接件的孔底距。

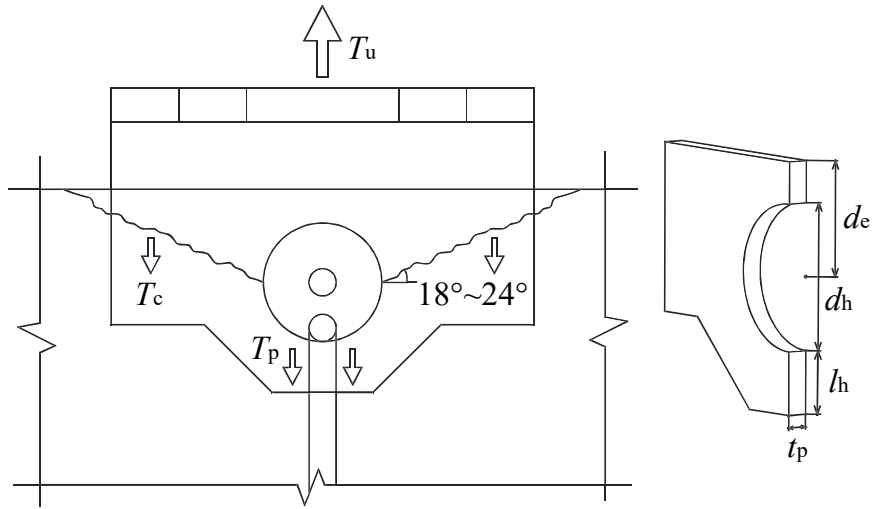


图 7 开孔板连接件抗拔设计示意图

## 6.5 施工期计算

6.5.1 钢壳节段吊装过程中，钢壳壳体应力及变形量应满足下列规定：

a) 钢壳壳体应力  $\sigma$  应满足  $\sigma \leq f_{yb}$ ，其中  $f_{yb}$  为钢壳壁板屈服强度；

b) 内外钢壳变形差  $\delta$  应满足  $\delta \leq \frac{1}{2000}h$ ，其中  $h$  为节段高度。

6.5.2 钢壳混凝土组合桥塔混凝土浇筑过程中内外钢壳壁板变形及应力应满足下列规定：

a) 混凝土浇筑时，由纵横向开孔板形成的内外钢壳壁板区格变形应符合下列规定：

$$\frac{\delta'_{in}}{b} \leq \frac{1}{400} \quad (6.5.2-1)$$

$$\frac{\delta'_{out}}{b} \leq \frac{1}{800} \quad (6.5.2-2)$$

式中： $\delta'_{out}$ ——外钢壳壁板区格内的最大变形；

$\delta'_{in}$ ——内钢壳壁板区格内的最大变形；

$b$ ——钢壳壁板区格的较小边长。

b) 混凝土浇筑时，内外钢壳壁板的最大横向变形应符合下列规定：

$$\frac{\delta_{out}}{h} \leq \frac{1}{2000} \quad (6.5.2-3)$$

$$\frac{\delta_{in}}{h} \leq \frac{1}{1000} \quad (6.5.2-4)$$

式中： $\delta_{out}$ ——外钢壳壁板最大横向变形；

$\delta_{in}$ ——内钢壳壁板最大横向变形；

$h$ ——节段高度。

c) 钢壳混凝土组合桥塔中外钢壳壁板平均应力 $\sigma_{out}$ 应满足 $\sigma_{out} \leq 0.3f_{yb}$ ，其中 $f_{yb}$ 为钢壳壁板屈服强度设计值；

d) 钢壳混凝土组合桥塔中内钢壳壁板最大应力 $\sigma_{in}$ 应满足 $\sigma_{in} \leq f_{vi}$ ，其中 $f_{vi}$ 为钢壳壁板屈服强度设计值；

e) 钢壳混凝土组合桥塔中型钢桁架应力 $\sigma_{truss}$ 应满足 $\sigma_{truss} \leq f_{vt}$ ，其中 $f_{vt}$ 为型钢桁架屈服强度设计值。

## 6.6 稳定分析和动力分析

6.6.1 钢壳混凝土组合桥塔中受压板件的局部稳定分析应符合《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定。

6.6.2 钢壳混凝土组合桥塔抗震分析应符合《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）的规定。

6.6.3 钢壳混凝土组合桥塔抗风分析应符合《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01）的规定。

## 7 施工

### 7.1 一般规定

7.1.1 钢壳混凝土组合桥塔施工应按照《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90）要求，编制专项施工方案。施工方案应涵盖钢壳制作与运输、现场施工、测量监控、大型设备设施的安装与拆除、施工防护和环境保护措施等内容，并对钢壳节段定位安装和混凝土浇筑等施工控制要点予以明确说明。

7.1.2 施工前宜开展钢壳混凝土组合桥塔模型试验，对钢壳节段的加工、匹配和现场连接及混凝土浇筑等环节进行综合验证，并形成标准化施工工艺。

7.1.3 钢壳混凝土组合桥塔施工区应搭设安全通道，安全通道应设防撞设施及限高、限宽和减速标志。

7.1.4 施工前应对相关水域进行充分勘测，制定科学的生态安全施工方案。施工过程中应对废弃物进行合理分类或利用，加强施工场地所涉及的河流和湖泊的保护。施工结束后对施工现场进行清理，并对环境和水质进行检测，收集并记录现场环境资料以供后续工程和后期管理使用。

### 7.2 施工准备

7.2.1 钢结构制造单位应对钢壳设计图纸进行审查，若存在无法制造或制造困难的构造，应及时与设计单位协商。

7.2.2 施工前应对施工现场进行勘探和调查，确定水文地质条件、交通条件和环境条件等，编制现场调查报告。

7.2.3 应根据钢壳混凝土组合桥塔的节段划分情况及各节段重量选取适配的浮吊和塔吊等施工设备，合理布置施工电梯和液压整体自爬升施工平台。

7.2.4 根据设计图纸和施工进度需求，按规定编制材料需求计划，确定备料、仓库和场地堆放所需面积并组织运输。

7.2.5 施工前应合理配置人员并进行岗前培训，加强团队协作，确保施工人员熟悉相关规范和施工标准以保证施工顺利进行。

### 7.3 附筋钢壳加工

7.3.1 钢壳构件加工应符合下列规定：

a) 钢材进场需经材料复验合格后进行辊平、抛丸或喷砂除锈及涂防锈底漆等预处理。预处理后应标记钢板的牌号及规格等信息；

b) 相同构件的制造精度宜达到可互换要求；

- c) 对于形状复杂或在图中不易确定尺寸的构件应作样校对或利用计算机模拟校对；
- d) 放样及号料前应检查钢材的牌号、规格和质量，并由监理工程师确认后记录保存；
- e) 放样及号料时，应根据工厂加工图和加工制造工艺文件要求，预留安装时的焊接收缩余量与切割和边缘加工等加工余量，以及制造和安装误差的配切余量等；
- f) 钢结构零件切割、矫正、弯曲、边缘加工和制孔开槽等应满足表 2、表 3 及《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）和《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》（JTG/T 3651）的要求。

表 2 组合桥塔零件加工允许偏差

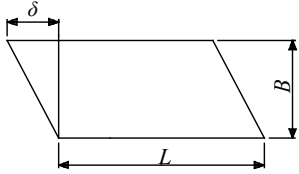
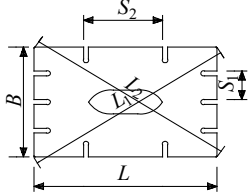
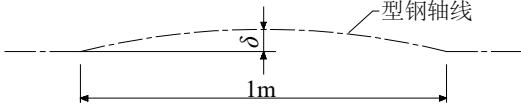
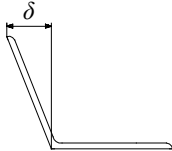
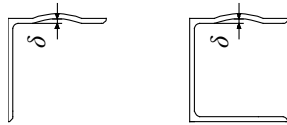

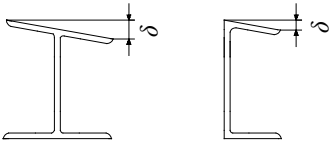
检验项目		允许偏差	简图
壁板	长度 $L$ 、宽度 $B$	$\pm 2\text{ mm}$	
	板边垂直度 $\delta$	$\leq 2\text{ mm}$	
隔板	长度 $L$ 、宽度 $B$	$\pm 1\text{ mm}$	
	槽口中心距 $S_1$ 、 $S_2$	$\pm 1\text{ mm}$	
	对角线长度 $L_1$ 、 $L_2$	$\leq 4\text{ mm}$	
	平面度	$\leq 2/100$	

表 3 型钢零件加工允许偏差

检验项目	允许偏差		简图
直线度	每米范围	$\delta \leq 0.5\text{ mm}$	
角钢肢垂直度	栓接联结部位	$\delta \leq 0.5\text{ mm}$	
	其余部位	$\delta \leq 1\text{ mm}$	
角钢、槽钢肢平面度	栓接联结部位	$\delta \leq 0.5\text{ mm}$	
	其余部位	$\delta \leq 1\text{ mm}$	
工字钢、H 型钢、槽钢腹板平面度	栓接联结部位	$\delta \leq 0.5\text{ mm}$	
	其余部位	$\delta \leq 1\text{ mm}$	
检验项目	允许偏差		简图

工字钢、H 型钢、槽 钢翼缘垂直度	栓接联结部位	$\delta \leq 0.5 \text{ mm}$	
----------------------	--------	------------------------------	--

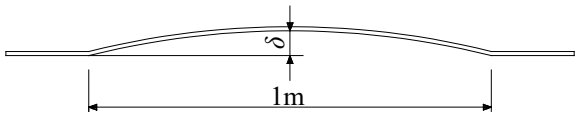
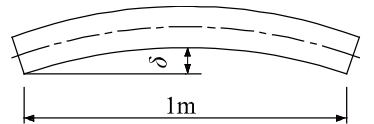
7.3.2 板单元加工应符合下列规定：

- a) 钢壳壁板单元为薄壁密肋结构，宜采取结构自约束、刚性外约束、机械焊或同向对称焊等工艺措施减小焊接变形，提高加工精度；
- b) 钢壳壁板单元及型钢的切割边缘应整齐，无毛刺、反口和缺肉等缺陷。需要进行边缘机加工的钢壳壁板单元尺寸应考虑机加工余量的需求。不进行边缘机加工的板单元，应对切割处进行修平处理，并铲净切割挂渣。板单元切割质量应满足表 4 的要求；
- c) 开孔板的栓接孔，宜采用数控钻等精密设备进行加工以保证成孔精度；
- d) 板单元加工允许偏差应满足表 5 的要求。

表 4 板单元切割质量技术要求

检验项目	允许偏差
板单元尺寸	$\pm 2 \text{ mm}$
板边垂直度	$\leq 0.05t$ ( $t$ 为板厚)，且 $\leq 2 \text{ mm}$
板切割直线度	$\leq L/1000$ ， $L$ 为板的切割长度
型钢长度	$\pm 1 \text{ mm}$
型钢端头垂直度	$\leq 2 \text{ mm}$

表 5 板单元加工允许偏差

检验项目	允许偏差			简图
平面度	每米范围	$\delta \leq 1 \text{ mm}$		
直线度	全长范围	$L \leq 8000 \text{ mm}$	$\delta \leq 2 \text{ mm}$	
		$L > 8000 \text{ mm}$	$\delta \leq 3 \text{ mm}$	

注：L 为板单元长度。

7.3.3 附筋加工应符合下列规定：

- a) 无弯钩或单侧弯钩的附筋，可直接穿入附筋定位孔定位后对剩余端头进行折弯处理。两侧弯钩附筋，宜单侧折弯后再穿入开孔板定位孔，并对剩余端头进行折弯处理；
- b) 为保证钢壳内竖向附筋位置的定位精度，宜采用特制螺母对附筋进行定位，特制螺母定位偏差不宜大于 1 mm，且不应出现转角，附筋定位样板及定位卡座示意图 8。

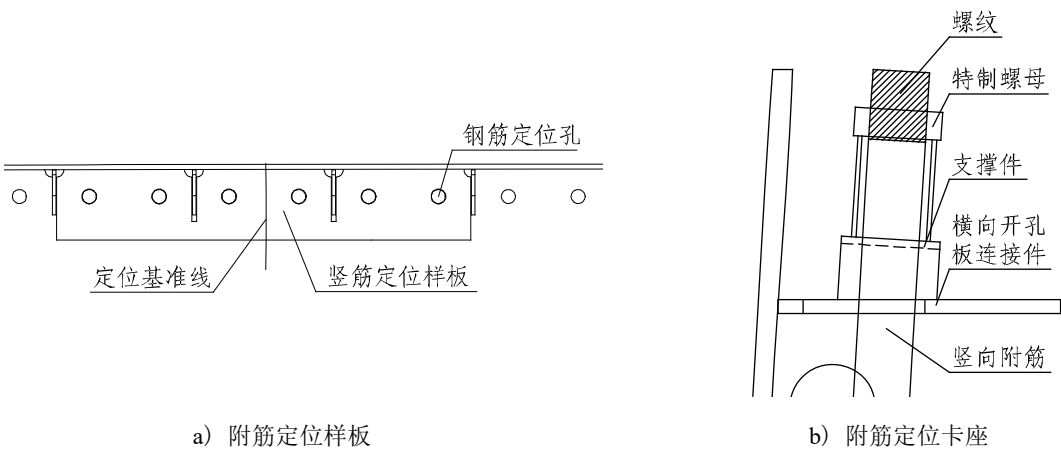


图 8 附筋定位样板及定位卡座示意图

7.4 钢壳节段组装与预拼装

7.4.1 钢壳节段组装应结合桥塔节段的结构特点和外形尺寸，制作可调整定位和支撑内外钢壳壁板的专用组装胎架。

7.4.2 钢壳节段宜采用立式组装，组装过程中控制要点应符合下述规定：

- a) 内外钢壳壁板应利用胎架进行定位，以控制内外钢壳壁板之间的间距及倾斜角度。钢壳内各层水平钢筋机械连接接头应对正，并采用专业施拧设备拧紧；
- b) 钢壳节段拼装焊接应采取对称焊等焊接工艺控制节段焊接变形，保证节段焊后尺寸满足要求。对距离焊缝较近的附筋，应采取防护措施，避免焊接过程对壁板附筋造成烧伤等不利影响；
- c) 钢壳节段组装允许偏差宜满足表 6 的规定。

表 6 组合桥塔钢壳节段组装允许偏差

检验项目	允许偏差
高度	$\pm 2.0\text{ mm}$
截面尺寸	端口： $\pm 2.0\text{ mm}$
	其它： $\pm 4.0\text{ mm}$
内外壁板间距	端口： $\pm 4.0\text{ mm}$
	其它： $\pm 6.0\text{ mm}$
横向及纵向开孔板位置	$\pm 2.0\text{ mm}$
开孔板垂直度（倾斜度）	$\leq 2.0\text{ mm}$
截面对角线偏差	$\leq 5.0\text{ mm}$
吊装锚点位置	$\pm 2.0\text{ mm}$
桁架间距	$\pm 20\text{ mm}$

7.4.3 钢壳节段预拼装应符合下列规定：

- a) 钢壳节段预拼装宜采用立式预拼装法，具体详见图 9；
- b) 钢壳节段预拼装应在专用的预拼装胎架上进行，应在相邻节段接口处设调整装置，进行高度、线形和接口匹配等调整，每次预拼装时应尽量减少偏差累积；
- c) 钢壳节段预拼装检验合格后，拆除钢壳节段间的临时匹配件、导向板及临时吊耳等，并按规定编号；
- d) 组合桥塔钢壳节段预拼装检验标准应满足表 7 的规定。

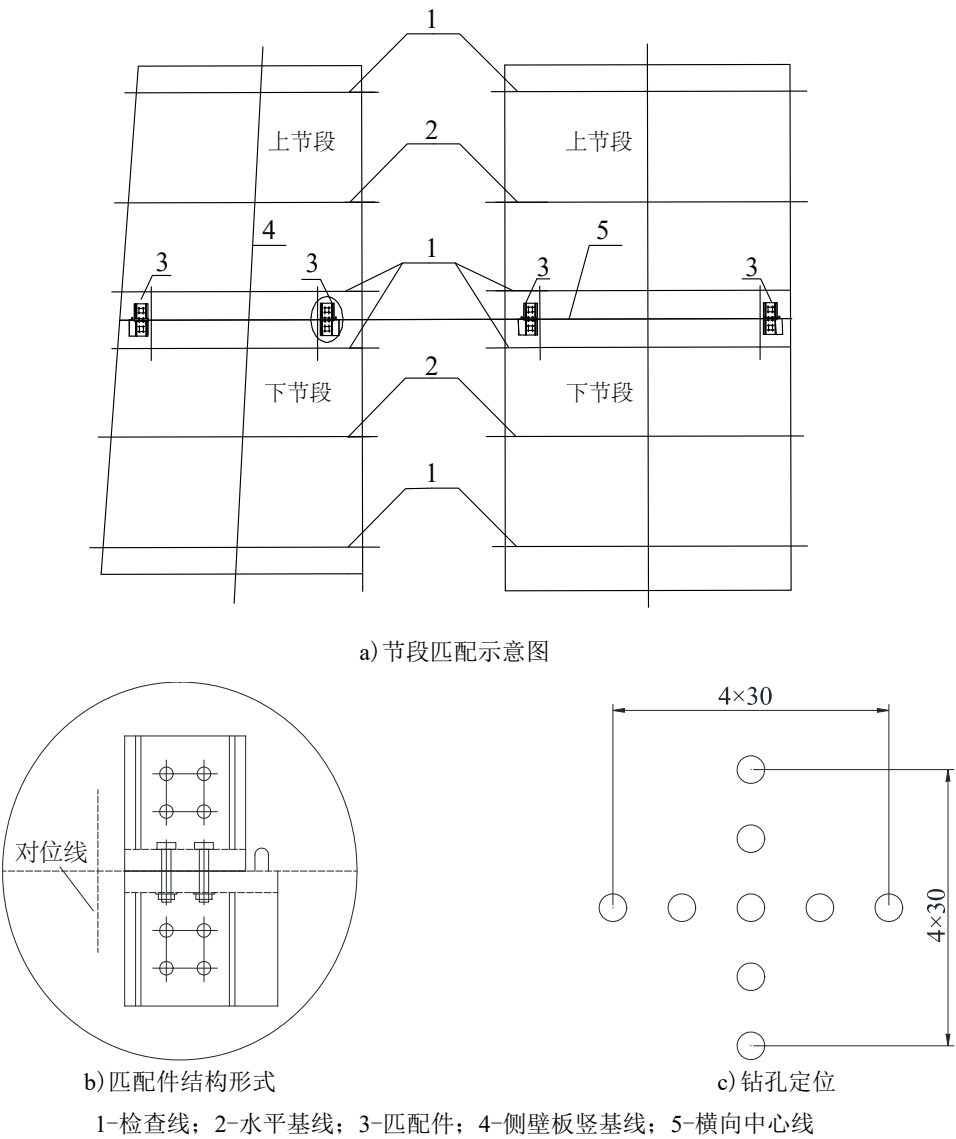


图 9 组合桥塔钢壳节段立式预拼装

表 7 组合桥塔钢壳节段预拼装检验

检验项目	允许偏差	备 注	检验工具
预拼装高度	$\pm 4.0\text{ mm}$	两节段的横基线间距	钢盘尺
轴线错位	$\leq 1.0\text{ mm}$	相邻节段的纵基线偏差	钢板尺

接口错边量	外钢壳壁板外侧 $\leq 0.5$ mm (角部允许最大错边 1.0 mm)	相邻节段的壁板错边偏差	钢板尺
	其余部位 $\leq 2.0$ mm		
轴线偏离度	$\leq L/6000$	预拼装长度 $L$ (m)	钢板尺、钢丝线、紧线器

## 7.5 钢壳节段现场安装

7.5.1 组合桥塔与承台连接宜采用埋入式锚固法，首节钢壳安装时应采取下列措施：

- 应在承台内设置预埋钢筋定位装置，以提高预埋钢筋的定位精度；
- 应在承台内设置首节钢壳定位装置，且定位装置应与首节钢壳在工厂内匹配制造；
- 应根据首节钢壳在承台内的位置确定预埋钢筋的位置及高程，并根据钢壳内预制预装的主筋位置及长度在加工厂内进行复核匹配，在满足精度要求后，最终精确定位承台内预埋钢筋的位置；
- 首节钢壳内竖向钢筋与承台内预埋钢筋宜采用锥套锁紧钢筋机械接头以保证钢筋接头连接质量；
- 为保证首节钢壳的安装精度，宜采用 BIM 技术建模开展钢筋碰撞及定位分析，以保证首节钢壳预埋钢筋的精确定位。

7.5.2 钢壳节段环缝焊接应符合下列规定：

- 焊缝在施焊前，应按照焊接工艺要求将对接板面之间的高差调整至允许偏差范围内；
- 焊缝焊接场地的环境温度、相对湿度、风力、特殊天气和除锈等要求应符合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650) 和《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》(JTG/T 3651) 的规定。

7.5.3 首节钢壳安装时，应采用全站仪和水准仪对轴线平行偏位、顶面高程和相邻定位高程允许偏差等进行检验，允许偏差应满足表 8 的要求。

表 8 首节钢壳安装质量检验

检验项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
轴线平行偏位	横桥向	$\pm 5$ mm	全站仪：每节段 4 处
	纵桥向	$\pm 5$ mm	全站仪：每节段 4 处
横桥向与理论横桥向偏差		$\pm 3$ mm	全站仪：每节段 2 处
检验项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
纵桥向与理论纵桥向偏差		$\pm 2$ mm	全站仪：每节段 2 处
检验项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
顶面高程		$\pm 5$ mm	全站仪：每节段 4 处
相邻两定位高程偏差	横桥向	$\pm 1$ mm	水准仪：每节段 2 处



	纵桥向	$\pm 2.4 \text{ mm}$	水准仪：每节段 2 处
--	-----	----------------------	-------------

7.5.4 标准节段钢壳安装工艺应符合下列规定：

a) 根据钢结构加工厂预拼时所确定的钢壳节段匹配关系，利用钢壳节段上的匹配件和检查线进行现场安装定位；

b) 钢壳节段上的匹配件应与钢壳节段紧密连接，并设置测量检验基准线以校核钢壳节段的匹配效果；

c) 倾斜钢壳混凝土组合桥塔架设时，应对其内力进行验算，通过设置沿桥塔高度方向的水平横撑或拉杆对成塔线形予以控制。在架设安装过程中，应分阶段对已建成的钢壳混凝土组合桥塔采取必要的抑振措施；

d) 钢壳节段现场吊装时，应在匹配件处于半接触状态时进行定位冲钉试打，以保证定位冲钉顺利打入。钢壳节段安装完毕后，相邻节段匹配件应确保相互接触。

7.5.5 钢壳节段竖向钢筋采用直螺纹套筒机械接头进行连接时，应符合下列规定：

a) 钢壳吊装前，应将已安装的钢壳节段竖向钢筋直螺纹套筒机械接头逐一旋拧松动，以便于相邻钢壳节段的主筋连接；

b) 钢壳节段预拼装采用直螺纹套筒机械接头连接竖向钢筋时，应以钢筋端头为基准在 100 mm 处划出标记线，且长丝与短丝侧均应作标记。预拼装时应测量长丝与短丝侧的标记线间距  $L$ ， $L=200+t$ ，其中  $t$  为预拼装时竖向钢筋间的实际间隙， $L \leq 210 \text{ mm}$  即为合格。测量后应将  $L$  值范围记录在钢壳节段移交单上，作为现场安装时的参考依据，具体详见图 10；

c) 钢壳节段现场拼装采用直螺纹套筒机械接头连接竖向钢筋时，应测量长丝与短丝侧的标记线间距  $L_1$ ， $L_1 \leq 210 \text{ mm}$  时即与预拼装时状态一致，具体详见图 11；

d) 直螺纹套筒机械接头连接的其他要求应符合《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107)的规定。

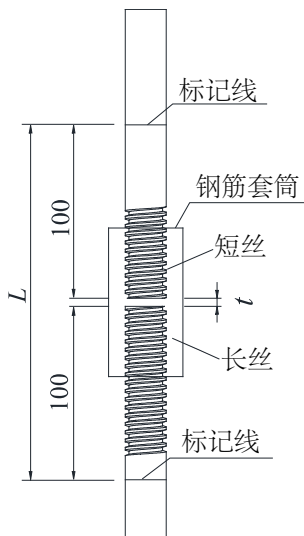


图 10 预拼装钢筋标记线

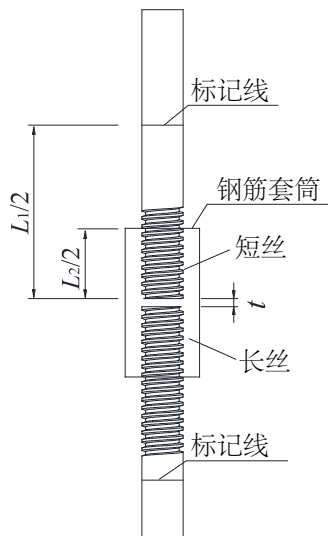


图 11 现场安装钢筋标记线

7.5.6 钢壳节段竖向钢筋采用锥套锁紧钢筋机械接头进行连接时，应符合下列规定：

- a) 锥套锁紧钢筋机械接头的规格应与待连接钢筋的规格保持一致；
- b) 锥套锁紧钢筋机械接头进行锁片安装时，其轴向相对误差不应大于 3 mm；
- c) 锥套锁紧钢筋机械接头连接前，钢筋的径向和轴向允许偏差应满足表 9 要求；

表 9 锥套锁紧钢筋机械接头连接前钢筋位置允许偏差

钢筋强度等级（MPa）	钢筋径向最大允许偏差（mm）	钢筋轴向最大允许偏差（mm）
400	$\pm d$	0~20
500	$\pm d$	0~15

注：d 为钢筋公称直径（mm）。

- d) 锥套锁紧钢筋机械接头连接时，应采用对应的工艺装备，以确保锥套和锁片可进行上下微调；
- e) 锥套锁紧钢筋机械接头连接后，其实际长度与设计长度  $S$  的误差不应大于 2 mm，具体详见图 12；
- f) 锥套锁紧钢筋机械接头连接的其他要求应符合《公路桥梁锥套锁紧钢筋接头技术指南》（T/CHTS 10005）的规定。

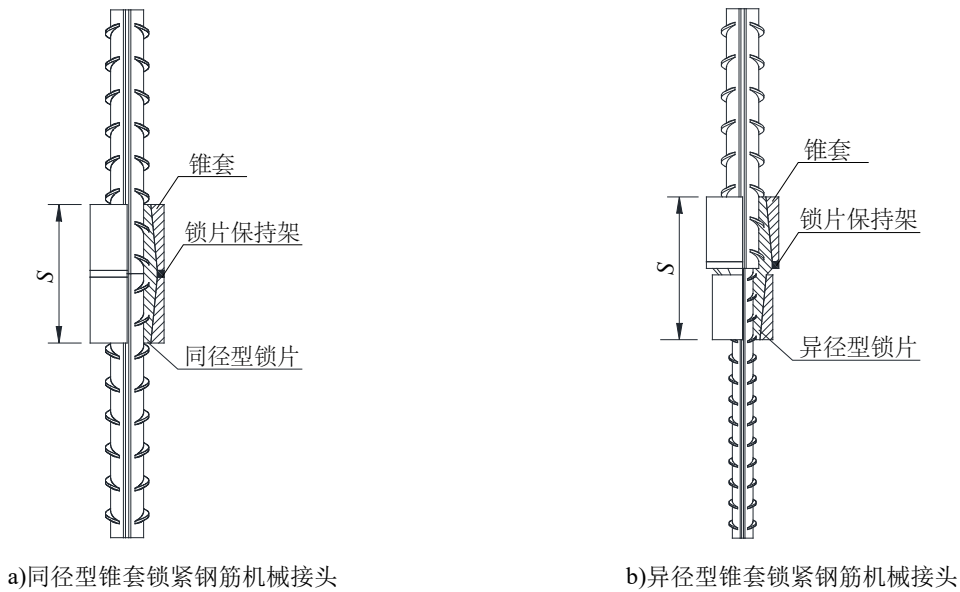


图 12 锥套锁紧钢筋机械接头标准挤压尺寸示意图

## 7.6 混凝土施工

7.6.1 施工前应对补偿收缩混凝土进行强度检验，相关检验标准应按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081）与《补偿收缩混凝土应用技术规程》（JGJ/T 178）的规定进行评估和处理。

7.6.2 为减少混凝土的温度裂缝，应控制混凝土的入模温度和水化热。暑期施工时，入模温度不宜高于 28℃，水泥水化过程中混凝土内部温度不宜高于 65℃，且内外表面温差不宜高于 25℃。

7.6.3 钢壳混凝土组合桥塔下塔柱混凝土宜采用汽车泵进行输送，中上塔柱混凝土宜采用大型塔吊吊装料斗输送混凝土，混凝土坍落度宜控制在 180~200 mm，以保证混凝土的施工性能。

7.6.4 在塔壁横向开孔板上应设置混凝土振捣孔，以便在混凝土浇筑振捣过程中振捣棒插入振捣，从而保证混凝土浇筑施工质量。

7.6.5 混凝土初凝后应对顶面混凝土进行蓄水养护，蓄水深度不宜小于 100 mm，并在拐角处设置集水坑以便后期将养护水抽出，且集水坑尺寸不宜大于 200×200 mm。混凝土终凝 48 小时后，应对混凝土顶面进行凿毛处理，且凿毛深度不宜小于 10 mm，并在凿毛后进行清渣处理。

7.6.6 混凝土施工的其它相关要求应符合《大体积混凝土施工标准》（GB 50496）的规定。

## 7.7 施工测量与监控

7.7.1 钢壳节段预拼装测量应遵循以下流程：

- a) 粗调底节段至水平，并精调底节段主控轴线垂直度至设计要求，测量底节段水平基线，记

录轴线坐标及水平基线高差；

b) 利用临时导向件支撑并调整顶节段水平位置，确保顶底节段主控轴线对位精度满足设计要求。对位精度无法达到上述指标时制造单位应通知监控方，并记录顶底口轴线数值；

c) 精确调平顶节段水平基线，且水平基线任意两点间高差不应大于 5 mm；

d) 检查顶节段轴线的垂直度，记录垂直度偏差，并将主控轴线垂直度调整至设计要求；

e) 根据焊缝宽度要求对连接端面进行修边，并完成钢筋的预拼连接；

f) 在钢壳节段接缝处安装已经匹配好的成套匹配件，同时拆除临时导向件，之后在各匹配件旁的上下壁板刻划竖向间距检查线，并记录检查线的初始间距。

7.7.2 首节钢壳定位座安装测量应遵循以下流程：

a) 应对平面位置、高程、定位座的顶面高差以及相邻定位座的相对高差进行测量，其中定位座为首节钢壳预埋在承台内的定位装置；

b) 平面位置测量宜采用极坐标测量法，平面位置偏差应小于 2 mm；

c) 高程测量宜采用几何水准测量，高程偏差应小于 5 mm；

d) 定位座的顶面高差以及相邻定位座的相对高差测量宜采用几何水准测量，定位座顶面高差及相邻定位座相对高差应小于 1 mm；

e) 所有定位座定位完成后，应采用精密钢尺对其构成的几何图形尺寸进行检验，尺寸偏差应小于 2 mm；

f) 定位座在加固过程中应进行跟踪测量，以保证定位成果准确。

7.7.3 钢壳节段安装测量与控制应遵循以下流程：

a) 钢壳节段安装测量内容包括水平基线点相对高差、轴线点平面位置及高程和匹配件的三维坐标；

b) 钢壳节段安装时的测点应与厂内预拼时的测点保持一致；

c) 轴线点及匹配件的平面位置测量宜采用极坐标测量法，轴线点平面位置偏差应小于 2 mm；

d) 轴线点及匹配件的高程测量宜按照二等水准精度要求施测，可采用精密三角高程法，测量误差不应大于 1 mm；

e) 测量应在温度稳定时段进行，且日出后不得进行测量，测量时应记录风速和温度等气象数据；

f) 施工高度超过 100 m 后，应进行日照变形观测，观测时间不宜小于 24 h。根据观测结果绘制一周日照变化曲线，以便指导施工。

7.7.4 施工中应监测日照温差对主塔线形的影响，掌握温度影响规律，以有效修正温度的影响。温度对现场监控影响的控制措施如下：

a) 钢壳非均匀温度场对节段现场安装会产生较大的影响，且具有较大的随机性，不易予以修正补偿，应在钢壳温度均匀程度为  $2^{\circ}\text{C}$  以内时进行安装测量。温度检测应采用热成像仪；

b) 宜于凌晨进行测量，且尽量延后测量时间。应按预拼线型进行节段安装，当塔顶节段发生较大温度变形时，新节段不得按照轴线误差进行调整。

7.7.5 钢壳混凝土组合桥塔轴线平面误差应控制在  $H/3000$  以内，且不应大于  $30\text{ mm}$ ，其中  $H$  为承台以上塔高。桥塔节段轴线平面误差应控制在  $h/1000$  以内，且不应大于  $8\text{ mm}$ ，其中  $h$  为节段桥塔高。桥塔塔柱底部偏差应控制在  $5\text{ mm}$  内，塔顶高程偏差应控制在  $20\text{ mm}$  内。

## 8 质量检验

### 8.1 一般规定

8.1.1 当钢壳混凝土组合桥塔制造完成后，需要进行工厂验收，检验产品是否满足标准要求。随后还要进行现场安装验收，检验构件的精度及安装质量是否达到设计要求。通过验收后方可交付使用。

8.1.2 钢壳混凝土组合桥塔成塔后，应对其混凝土脱空率、钢壳焊缝、钢壳涂装、塔顶偏位和垂直度等进行检验。

### 8.2 混凝土脱空检验

8.2.1 钢壳混凝土组合桥塔每个节段均应进行混凝土脱空位置、面积及高度的检验。

8.2.2 钢壳混凝土组合桥塔的混凝土脱空无损检验宜在混凝土初凝后的 3~7 天内开展。

8.2.3 钢壳混凝土组合桥塔混凝土脱空无损检验的检验方法、设备选用、测线布置、数据处理及检验结果评价应符合设计文件与《沉管隧道钢壳混凝土脱空无损检测规范》（T/CHCA 005）的规定。

### 8.3 焊缝检验

8.3.1 钢壳混凝土组合桥塔钢壳焊缝检验的一般程序及钢壳焊缝的外观检验应符合《钢结构焊接规范》（GB 50661）的规定。

8.3.2 钢壳混凝土组合桥塔钢壳焊缝宜采用无损检验，检验要求及标准应符合《焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定》（GB/T 11345）的规定。

8.4 涂装检验

钢壳混凝土组合桥塔钢壳涂装检验要求应符合《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的规定。

8.5 安装质量检验

8.5.1 高强螺栓的规格、性能等级和抗滑移系数等应符合设计文件及《钢结构高强度螺栓连接技术规程》（JGJ 82）的规定。

8.5.2 成桥后组合桥塔钢壳节段检验范围及标准应满足表 10 的要求。

8.5.3 应进行高强螺栓连接摩擦面的抗滑移系数检验，检验结果应满足设计要求。

8.5.4 应对锥套锁紧钢筋机械接头和直螺纹套筒机械接头的材料、规格和力学性能等进行检验，检验结果应符合设计文件、《钢筋机械连接技术规程》（JGJ 107）与《公路桥梁锥套锁紧钢筋接头技术指南》（T/CHTS 10005）的规定。

8.5.5 安装质量检验的其他要求应符合《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）8.10.1-1 的规定。

表 10 成桥后桥塔节段安装质量检验

检验项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
垂直度偏差（mm）	纵桥向	$H/3000$	全站仪：每节段 2 处
	横桥向	$H/3000$	全站仪：每节段 2 处
焊缝质量	焊缝尺寸	满足设计要求	检查全部
	焊缝探伤	满足设计要求	检查全部
节段间错台		$\leq 2\text{ mm}$	钢尺检查：每节段 10 处

注：H 为承台以上塔高。

# 钢壳-混凝土组合索塔技术规程 编制说明

## 一、项目概况

### 1.1 任务来源

根据《山东公路学会团体标准管理办法(试行)》要求，经符合性审查、立项评审等环节，《钢壳-混凝土组合索塔技术规程编制说明》列入山东公路学会团体标准编制计划（鲁公学会【2023】6号）。

### 1.2 编制背景

基于当前钢壳混凝土桥塔技术发展的需求上，我们需要充分发挥此类复合结构的高效能，对其技术特点、设计方法、施工要点等进行系统的总结和规范，以便更好地指导工程实践，推动技术的进一步发展和应用。对此标准的制定还可以明确钢壳混凝土组合桥塔的设计原则、计算方法、构造要求等，为工程设计提供统一的技术依据，确保设计质量，最终达到指导包括材料选择、加工制作、安装施工、质量控制等施工过程的效果，提高施工效率和工程质量。而且国家与地方政府也出台了相关政策，鼓励和支持新技术、新工艺的研发和应用，为钢壳-混凝土组合索塔技术规程的制定提供了政策保障。随着建筑行业的快速发展和市场竞争的加剧，企业对于新技术的需求日益迫切。制定本标准有助于提升企业的技术水平和市场竞争力，满足行业发展的需求。上述背景共同推动了钢壳-混凝土组合索塔技术规程的制定。

### 1.3 任务分工

徐召：标准起草负责人，组织标准起草工作，把握标准制定技术方向，组织协调标准制定所需资源。

臧洪敏：标准起草负责人，组织确定标准制定方案，组织推进标准制定程序和进度，组织协调标准制定所需资源。

王宏博、徐常泽：组织讨论确定标准框架、编写思路，组织起草组人员讨论确定标准化对象需要规范的技术要素。

苏庆田、张光桥、林占胜：组织实施标准制定方案，调度起草组成员推进标准制定程序和进度，组织标准审查、报批等工作。

杨国涛、赵国：协助组织讨论确定标准框架、编写思路，协助组织起草组人员讨论确定标准化对象需要规范的技术要素。

赵洪蛟、管锡琨：组织起草组人员进行调研、收集素材，组织起草人员编写标准，参与标准编写，整理标准相关技术文档，组织召开标准研讨会，组织征求意见等。

尤伟杰、崔锋：提供标准编写所需的资料、素材，参与标准编写，协助征求意见等。

吴士乾、徐晨：参与标准调研、标准编写、标准讨论，协助整理标准相关技术文档，参与办理征求意见，办理标准研讨会、标准专家审查会等具体事务等。

## 1.4 起草过程

### （1）立项阶段

2023年1月-3月，标准立项计划下达后，编制组在接到工作任务后第一时间召开了项目工作会议，在会议上成立了标准编制组，并根据相关文件的要求，明确编写大纲及小组成员工作任务并制定了详细的工作计划。

2023年4月-12月，标准编制组开展广泛深入的调研，收集、整理了国内外相关资料及专家的意见和建议，并起草《钢壳-混凝土组合索塔技术规程》。

2024年1月-7月，标准编制组基于标准草稿，征求各参编单位、相关主管部门等专业修改意见，汇总、归纳各方意见并进行修改完善，形成《钢壳-混凝土组合索塔技术规程》（初稿）。

### （2）初稿审查



2024 年 8 月-10 月，为了进一步完善标准，编制组成员在标准初稿完成以后，将邀请相关专家对相关章节进行讨论，并于 2024 年 8 月 2 日了《钢壳-混凝土组合索塔技术规程》初稿审查会，来自高校和科研单位的五位参会专家结合行业特性、应用要求及实际情况出发，在审阅《钢壳-混凝土组合索塔技术规程》（初稿）的过程中，针对以下几个方面，专家们共提出了超过 100 条的修改建议：首先，关于术语的定义与条文的表达是否足够清晰准确；其次，规程中的技术规定是否建立在坚实的试验研究与理论分析基础之上；再者，规程中涉及的计算公式与设计方法是否准确无误、合乎逻辑；最后，规程中的参数范围设定、构造要求等是否充分借鉴了实际工程经验，并确保了其实用性和可行性。会后编制组根据相关专家意见对标准进行修改完善，形成《钢壳-混凝土组合索塔技术规程》（征求意见稿）。

## 二、 标准编制的目的及意义

钢壳-混凝土组合索塔技术规程的编制是现阶段推进山东省桥梁建设的重要措施；编制过程中，集成了最新的科研成果和技术创新，推动了桥梁建设技术的发展，可以为行业内的技术交流与合作提供了平台，有助于推动整个行业的共同进步。

这是落实交通运输部发布的《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》（交公路发〔2016〕115 号）要求，推进钢结构桥梁建设的重要举措。本标准的编制，将有助于推进公路钢结构桥梁建设，落实绿色发展理念，提升钢壳混凝土组合桥塔的建设品质，提高结构安全耐久性，降低全寿命周期成本，促进产业转型升级、提质增效，推进钢壳混凝土桥塔的工业化、标准化、智能化建造，实行现代工程管理人本化、专业化、标准化、信息化、精细化。

## 三、 编制依据

本标准的编制是基于国家、我省关于钢壳混凝土组合桥塔技术的研究基础上，通过进一步查阅分析国内外的相关学术论文、技术报告和专利文献等学术性文本，

遵循科学性、先进性、实用性和可操作性的原则共同形成的。同时，在编制过程中广泛征求相关单位、专家和学者的意见和建议，确保了技术规程的广泛适用性和合理性。

本标准的起草工作组按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》中的规则编写，具有系统性和规范性。在标准的主要内容方面，根据了多年的研究成果并结合现行技术标准，对钢壳混凝土组合桥塔的材料选用、设计、施工、质量检测等内容进行了明确规定，对于缆索承重体系桥梁钢壳混凝土组合桥塔的设计、制造、安装及检验等工作具有很好的指导作用。

## 四、 主要技术内容

### 1 范围

本章对本标准的全部内容进行了简要概括，并明确了本标准的适用范围。

### 2 规范性引用文件

借鉴现有相关的国家、行业标准，列出了本文件引用的主要标准：

GB 50496 大体积混凝土施工标准

GB 50661 钢结构焊接规范

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差

GB/T 714 桥梁用结构钢

GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉

GB/T 11345 焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定

GB/T 50081 普通混凝土力学性能试验方法标准

JTG D60 公路桥涵设计通用规范

JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范

JTG F90 公路工程施工安全技术规范

JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准  
JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范  
JGJ 82 钢结构高强度螺栓连接技术规程  
JGJ 107 钢筋机械连接技术规程  
JGJ 138 组合结构设计规范  
JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件  
JGJ/T 178 补偿收缩混凝土应用技术规程  
JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范  
JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范  
JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范  
JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范  
T/CHCA 005 沉管隧道钢壳混凝土脱空无损检测规范  
T/CHTS 10005 公路桥梁锥套锁紧钢筋接头技术指南

### 3 术语与定义

明确的术语和符号定义，是标准起草者的重要任务之一，是标准使用者能够准确理解和实施标准要求的前提条件。本标准对钢壳混凝土组合桥塔技术中所涉及的“钢壳混凝土组合桥塔”“钢壳节段”、“附筋”“附筋钢壳”“补偿收缩混凝土”等相关概念进行了明确的界定。

### 4 基本规定

基本规定主要从宏观上对钢壳混凝土组合桥塔的设计与制造提出了基本要求。钢壳混凝土组合桥塔在设计时，应综合包括强度、刚度、稳定性等多方面影响考虑其受力与变形特点，还要结合运营阶段和施工阶段分别考虑。规定了设计年限，并对年限内的钢壳混凝土组合桥塔提出了具体的设计要求，以保证钢壳混凝土桥塔的耐久性能，可以正常发挥设计年限内的使用功能。钢壳混凝土组合桥塔钢构件宜采用工厂化制造、现场装配化施工，以达到快速建造目的。施工过程中成塔的各种现场数据都应妥善保管，为后

续工作提高依靠。

## 5 材料

### 5.1 一般规定

钢筋连接接头、混凝土、钢材、圆柱头焊钉、焊接材料及涂装材料等要符合相应规范的规定。材料应具备质量检验文件，且应按照相应规范规定进行抽样复验，复验合格后均可使用。

### 5.2 钢筋连接接头

钢壳节段主筋连接应选用锥套锁紧钢筋机械接头或直螺纹套筒机械接头，接头的强度不得低于主筋。钢壳节段间钢筋机械连接技术标准还需满足《钢筋机械连接技术规程》（JGJ 107）与《公路桥梁锥套锁紧钢筋接头技术指南》（T/CHTS 10005）的规定。

### 5.3 混凝土

钢壳混凝土组合桥塔混凝土应采用补偿收缩混凝土，根据钢壳混凝土组合桥塔工程实践对其强度、限制膨胀率和配合比设计提出了规定，另外，补偿收缩混凝土的使用还需满足《补偿收缩混凝土应用技术规程》（JGJ/T 178）的规定。

### 5.4 钢材

根据《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）与《桥梁用结构钢》（GB/T 714）对节段钢壳用钢种类和技术标准做出了规定。

### 5.5 涂装材料

涂装材料的选用需满足设计文件与《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的规定。

## 6 设计

### 6.1 一般规定

钢壳混凝土组合桥塔的构造应保证结构具有足够的强度和刚度，并考虑斜拉索等可更换部件的维护与更换，预设必要的空间与更换措施，还要采用合理的钢混界面连接技术，确保附筋钢壳与混凝土形成共同工作的组合截面。在设计阶段，对钢壳混凝土组合桥塔的主要分析和计算内容宜包括表 1 的内容。钢壳混凝土组合桥塔构件应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行验算，作用效应组合应按《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）规定计算，施工期验算作用效应组合应按《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）规定计算。

## 6.2 一般构造

钢壳混凝土组合桥塔应根据几何形式、建造过程和受力状态，设置可靠的支撑系统，还应根据结构形式、抗震等级以及节间荷载等情况，控制其长细比、板件宽厚比，设置加劲肋。外钢壳壁板厚度应由强度、刚度等设计条件确定，不宜小于 10 mm，同时钢板不宜过厚，避免构件出现超筋破坏，影响结构延性。钢壳混凝土组合桥塔首节段采用埋入式与塔座承台连接方案时，预埋钢筋应精确定位，可选用锥套锁紧钢筋机械接头或直螺纹套筒机械接头。

## 6.3 承载能力极限状态计算

提出了钢壳混凝土组合桥塔正截面承载力计算基本假定，对钢壳混凝土组合桥塔压弯极限承载力、抗剪承载力以及抗弯极限承载力的详细验算方法进行了规定。稳定性验算应验算组合桥塔施工期和运营期结构整体稳定性，弹性屈曲稳定安全系数不宜小于 4，当不能满足弹性屈曲稳定要求时，应进行非线性稳定验算，其稳定系数不应小于 2。

## 6.4 开孔板连接件计算

对钢壳加劲肋布置间距、开孔板连接件抗剪承载力以及开孔板连接件抗拔承载力的详细验算方法进行了规定。

## 6.5 施工期计算

钢壳混凝土组合桥塔结构施工建造的主要工作包含附筋钢结构加工、钢筋定位与安装、现场钢结构拼装连接、钢筋连接、混凝土浇筑并养护五个部分。

## 6.6 稳定分析和动力分析

钢壳混凝土组合桥塔的受压板件局部稳定验算应符合《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定。钢壳混凝土组合桥塔抗震分析与抗风分析应分别符合《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）与《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01）的规定。

## 7 施工

### 7.1 一般规定

钢壳混凝土组合桥塔施工一般规定强调编制专项施工方案，设计实体模型试验的方式验证工艺效果，以此形成标准化施工工艺，还汇总了众多经过鉴定的新技术、新工艺、新设备，促进施工技术的创新与进步。

### 7.2 施工准备

钢壳混凝土组合桥塔施工按照《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90）的进行施工前准备以及现场准备。

### 7.3 附筋钢壳加工

附筋钢壳的加工包括钢结构零件加工和附筋加工，在实际附筋钢壳加工过程中我们发现并总结了一系列问题，针对加工过程中出现的这些问题，我们对此提出了附筋钢壳零件与板单元加工应满足的规定，并提出加工偏差技术标准。

### 7.4 钢壳节段组装与预拼装

钢壳节段拼装与预拼装宜采用立式组装，提出了钢壳节段预拼装立式预拼装法示意

图，结合实际安装经验提出了组装与预拼装过程控制要点需满足的相关规定，并提出了钢壳节段拼装与预拼装检验标准。

## 7.5 钢壳节段现场安装

组合桥塔与承台连接可采用埋入式或非埋入式。针对首节钢壳的埋入式安装，提出采用高精度预埋钢筋定位装置与钢壳定位装置，以此为后续施工奠定基础。当采用埋入式锚固方案时，首节钢壳安装应按照规定进行。对钢壳节段吊装、标准节段钢壳安装工艺、钢壳节段竖向钢筋连接以及钢壳节段环缝焊接进行了详细规定。钢壳节段竖向钢筋采用直螺纹套筒机械接头与锥套锁紧钢筋机械接头进行连接时，结合实际的施工经验与相关规范提出了各自安装需满足的相关规定与检验标准。

## 7.6 混凝土施工

需对补偿收缩混凝土进行强度检验标准应按照规定《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081）与《补偿收缩混凝土应用技术规程》（JGJ/T 178）的规定进行评估和处理。混凝土施工的一般要求应满足《大体积混凝土施工标准》（GB 50496）的规定。针对实际钢壳混凝土组合桥塔混凝土施工过程中混凝土存在水化热大、振捣不充分及早期易开裂等问题，本节结合实际混凝土施工经验，在混凝土温度控制、浇筑方法以及养护条件方面提出了混凝土施工需满足的规定。

## 7.7 施工测量与监控

总结了组合塔钢壳节段预拼装测量、组合塔首节钢壳定位座安装测量与钢壳节段安装测量方面上技术重点和规定。基于钢壳混凝土组合塔钢壳较柔，易发生变形、存在焊接收缩影响、钢壳混凝土易受日照影响等条件因素，制定施工监控对策，以及根据工程情况采用针对性的检测和控制方法并制定了相应的控制标准。

# 8 质量检验

## 8.1 一般规定

在钢壳组合桥塔的制造与安装过程中，需进行全面质量检验，涵盖原材料、外观、尺寸、强度、探伤、焊缝及防腐层等方面，确保符合标准。建立了从原材料到成品，包括焊接、高强螺栓连接等关键环节的全方位质量检验体系，确保产品质量符合高标准要求

## 8.2 混凝土脱空检验

在实际钢壳混凝土组合桥塔混凝土施工过程中，由于昼夜温差较大，混凝土的热膨胀系数远小于钢材的热膨胀系数，当温度变化较大时，钢材会膨胀得更多，而混凝土则会膨胀得相对较少，这种差异会导致钢材和混凝土之间产生较大的脱空。针对这个问题，本节规定了钢壳混凝土组合桥塔节段混凝土脱空位置、面积及高度的检验标准，建议钢壳混凝土组合桥塔的混凝土脱空无损检验在混凝土初凝后的 3~7 天内开展。混凝土脱空无损检验的检验方法、设备选用、测线布置、数据处理及检验结果评价还应满足设计文件与《沉管隧道钢壳混凝土脱空无损检测规范》（T/CHCA 005）的规定。

## 8.3 焊缝检验

钢壳混凝土组合桥塔钢壳焊缝检验的一般程序及钢壳焊缝的外观检验应满足《钢结构焊接规范》（GB 50661）的规定。钢壳混凝土组合桥塔钢壳焊缝宜采用无损检验，检验要求及标准应满足《焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定》（GB/T 11345）的规定。

## 8.4 涂装检验

钢壳混凝土组合桥塔钢壳涂装检验要求应满足《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的规定。

## 8.5 安装质量检验

提出了高强螺栓、锥套锁紧钢筋机械接头和直螺纹套筒机械接头需要检验的内容与需满足的标准。另外，对组合桥塔钢壳安装检测项目、检测范围及标准进行了详细规定，



精细化要求钢壳混凝土组合桥塔的各方面质量。

## 五、与现行相关法律、行政法规和其他标准的关系

本标准编写规则符合《山东公路学会团体标准管理办法（试行）》的要求；非工程建设标准编写规则应符合《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》（GB/T 1.1）的要求。

与现行标准《钢结构设计标准》（GB 50017）、《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）、《钢结构工程施工质量验收规范》（GB 50205）、《钢结构焊接规范》（GB 50661）、《公路桥涵施工技术规范》（JTG TF50）、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）等在用词统一性、结构安装等技术内容相协调。

本标准符合现行法律法规、政策文件的要求。

## 六、与国家标准、行业标准、地方标准同类标准技术内容的对比情况

与上述国内上位标准和规范相比，本标准在基本满足上位标准、规范强制性条文规定的基础上，在材料及设计指标、设计和施工基本规定、钢壳混凝土组合桥塔总体设计、节点设计、耐久性设计等方面制定更为详细的设计标准和计算准则。由于目前国内外并无指导钢壳混凝土组合桥塔设计与施工的相关技术规程与标准，因此，本标准在充分参考相关国标、行标、地标的有关钢壳混凝土组合桥塔内容下进行编写的，重点突出了钢壳混凝土组合桥塔设计、验算、制造、施工方面相关规定与标准。没有与本标准相关联的强制性国家标准。

## 七、重大分歧意见的处理过程、处理意见及其依据

本标准无重大分歧意见。

## 八、涉及专利情况

本标准不涉及专利情况。

## 九、 预期实施效益分析

从技术效益上看，技术规程为钢壳混凝土组合桥塔的设计、施工、验收等提供了统一的标准和规范，有助于实现施工过程的标准化和规范化，提高工程质量和安全性；从经济效益上看，技术规程中对材料的选择和使用提出了明确要求，有助于减少材料浪费，提高材料利用率；从社会效益上看，技术规程的实施有助于确保钢壳混凝土组合桥塔结构的稳定性和安全性，减少因桥梁结构问题引发的交通事故和安全隐患，提升公共安全水平。从环境效益上看，该技术规程的推广和应用有助于推动桥梁建设向更加环保、可持续的方向发展，符合当前全球可持续发展的趋势和要求。综上所述，钢壳-混凝土组合索塔技术规程的实施在技术、经济、社会和环境等方面都可以带来显著的效益，不仅推动了桥梁建设技术的发展和标准化进程，还提高了工程质量和安全性，降低了施工成本，促进了交通事业的发展和社会进步。