

桁式钢管混凝土结构技术规程

Technical specification for trussed concrete-filled steel tubular structures

(征求意见稿)

2020 年 8 月

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 材 料	8
3.1 钢材.....	8
3.2 混凝土.....	8
3.3 连接材料.....	9
4 基本规定	10
4.1 设计原则.....	10
4.2 设计指标.....	12
5 构件承载力计算	15
5.1 一般规定.....	15
5.2 正截面承载力计算.....	15
5.3 长期荷载作用下的正截面承载力计算.....	28
5.4 斜截面受剪承载力计算.....	28
5.5 抗撞击承载力计算.....	30
6 节点和连接设计	31
6.1 一般规定.....	31
6.2 K形平面节点设计.....	35
6.3 T形、Y形和X形平面节点设计	38
6.4 空间节点设计.....	39
6.5 构件与基础、构件与构件连接节点构造.....	40
6.6 节点抗疲劳设计.....	42
7 抗火设计	48
8 防腐设计	53
9 制作、施工和验收	55
9.1 一般规定.....	55
9.2 钢管制作与安装.....	55
9.3 混凝土施工.....	57
9.4 防火涂料施工.....	59
9.5 验收.....	60
附录 A 桁式钢管混凝土构件的材料本构模型	62
A.1 混凝土.....	62
A.2 钢材.....	65
附录 B 稳定系数 φ 值表	67
附录 C 相贯焊接节点的热点应力集中系数计算	72
本规程用词说明	75
引用标准名录	76

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Materials	8
3.1	Steel	8
3.2	Concrete	8
3.3	Connecting materials	9
4	Basic requirements	10
4.1	Design principle	10
4.2	Design indexes	12
5	Ultimate limit states	15
5.1	General requirements	15
5.2	Resistance of members to compression, bending and combined effects	15
5.3	Resistance of members to long-term loading	28
5.4	Resistance of members to inclined shear	28
5.5	Resistance of members to lateral impact	30
6	Design of joints and connections	31
6.1	General requirements	31
6.2	Design of K-type plane joints	35
6.3	Design of T-, Y- and X-type plane joints	38
6.4	Design of multiple-web space joints	39
6.5	Design of foundation and chord connections	40
6.6	Fatigue design	42
7	Fire resistance design	48
8	Corrosion resistance design	53
9	Manufacture, fabrication and acceptance	55
9.1	General requirements	55
9.2	Manufacture and construction of steel tube	55
9.3	Construction of concrete	57
9.4	Construction of fire proof	59
9.5	Acceptance	60

Appendix A	Constitutive models of steel and concrete	62
Appendix B	Reduction factor (φ) due to flexural buckling	67
Appendix C	Hot spot stress concentration factor of welded joints	72
	Explanation of wording in this specification	75
	List of quoted standards	76

1 总 则

1.0.1 为在采用桁式钢管混凝土结构的工程设计、施工及验收中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、经济合理，确保质量和耐久性，制定本规程。

【条文说明】1.0.1 桁式钢管混凝土是由圆形钢管混凝土弦杆和钢管腹杆混合而成的结构形式，根据弦杆的数量可有二肢、三肢、四肢或六肢等。桁式钢管混凝土可与钢筋混凝土板共同形成桁梁结构体系，也可被用作房屋或高塔的竖向承重结构等。桁式钢管混凝土结构具有承载力高、抗震性能好、施工便捷、经济适用等特点，其性能优势的本源在于受力全过程中各组成构件间协调互补、共同工作的“混合作用”效应。

桁式钢管混凝土结构的工程设计、施工及验收要做到安全适用、技术先进、经济合理，并确保质量和耐久性。桁式钢管混凝土施工过程中，通常先安装空钢管部分，然后浇筑弦杆内核心混凝土，如图 1.0.1 所示。在核心混凝土硬化并与钢管共同组成钢管混凝土之前，由于施工荷载等作用使钢管内产生初始应力。为此，需保证施工阶段钢管结构与使用阶段桁式钢管混凝土结构的安全性。

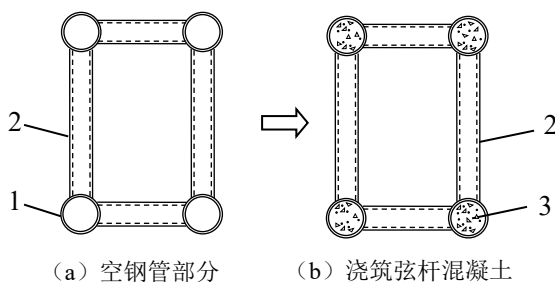


图 1.0.1 桁式钢管混凝土构件形成方式

1—空钢管弦杆；2—钢管腹杆；3—核心混凝土

1.0.2 本规程适用于建筑、桥梁、电力塔架等桁式钢管混凝土结构的设计、施工和验收。

1.0.3 桁式钢管混凝土结构的设计、施工及验收，除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 桁式钢管混凝土构件 trussed concrete-filled steel tubular members

由圆形钢管混凝土弦杆与钢管腹杆混合而成且能共同受力的结构构件。

【条文说明】2.1.1 工程中常见的几种桁式钢管混凝土构件截面如图 2.1.1-1 所示。

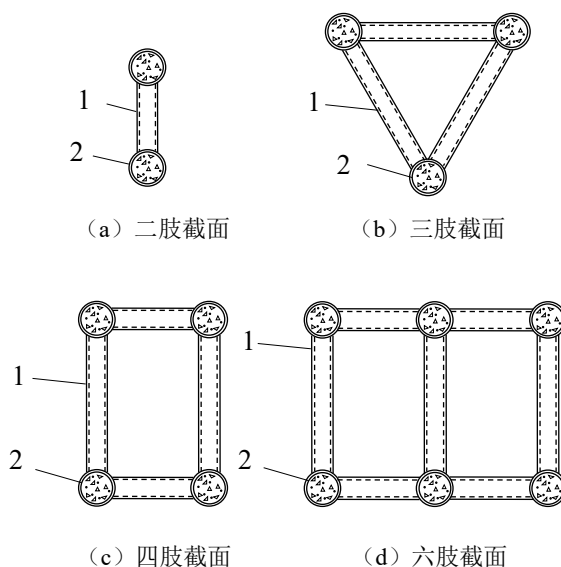


图 2.1.1-1 桁式钢管混凝土构件截面示意图

1—钢管腹杆；2—钢管混凝土弦杆

2.1.2 桁式钢管混凝土结构 trussed concrete-filled steel tubular structures

由桁式钢管混凝土构件作为主要承重构件的结构。

2.1.3 钢管初应力限值 allowable stress in the steel tube

由于施工阶段的荷载作用在钢管弦杆中所产生的初始应力容许值。

2.1.4 核心混凝土脱空容限 allowable void limitation of the core concrete

圆形钢管与其核心混凝土间形成的沿钢管环向的均匀脱空或偏于截面顶部的球冠形脱空容许值。

【条文说明】2.1.4 钢管混凝土的核心混凝土脱空形式包括环形均匀脱空（图 2.1.4-1）和球冠形脱空（图 2.1.4-2）。

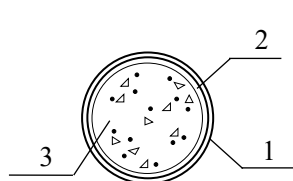


图 2.1.4-1 环形均匀脱空

1—钢管；2—环形脱空；3—核心混凝土

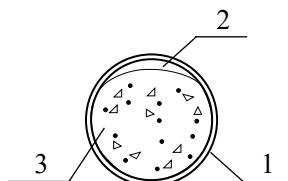


图 2.1.4-2 球冠形脱空

1—钢管；2—球冠形脱空；3—核心混凝土

2.1.5 约束效应系数 confinement factor

反映钢管混凝土弦杆截面几何特征和组成材料物理特性的综合参数，为钢管截面与钢管内核心混凝土截面的名义轴心受压承载力的比值。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应：

- M —— 弯矩设计值；
- M_w —— 平腹杆体系端部单根弦杆弯矩设计值；
- N —— 轴力设计值；
- N_1 —— 曲线形桁式构件中单根受压弦杆受到的轴向压力设计值；
- N_{1t} —— 曲线形桁式构件中压区弦杆受到的总轴向压力设计值；
- N_2 —— 曲线形桁式构件中单根受拉弦杆受到的轴向拉力设计值；
- N_{2t} —— 曲线形桁式构件中拉区弦杆受到的总轴向拉力设计值；
- N_b —— 平腹杆轴力设计值；
- N_w —— 曲线形桁式构件中端部单根弦杆轴力设计值；
- N_d —— 斜腹杆轴力设计值；
- V —— 剪力设计值；
- V_u —— 桁式钢管混凝土构件受剪承载力设计值。

2.2.2 计算指标：

- E_c —— 混凝土的弹性模量；
- E_s —— 钢材的弹性模量；
- E_{sc} —— 钢管混凝土弦杆截面的轴压弹性模量；
- G_c —— 混凝土的剪切变形模量；
- G_s —— 钢材的剪切变形模量；
- G_{sc} —— 钢管混凝土弦杆截面的剪切变形模量；
- M_B —— 承载力 N - M 相关曲线中拉压界限平衡点对应的弯矩；
- M_u —— 钢管混凝土弦杆截面的受弯承载力；
- M_{ud} —— 遭受撞击的桁式钢管混凝土弦杆动力受弯承载力；
- M_{ut} —— 桁式钢管混凝土构件截面的极限弯矩；
- N_B —— 承载力 N - M 相关曲线中拉压界限平衡点对应的轴力；
- N_c —— 钢管混凝土轴心受压弦杆的强度承载力；
- N_{ci} —— 受压腹杆轴心受压承载力；
- N_E —— 欧拉临界力；
- N_t —— 钢管混凝土轴心受拉弦杆的强度承载力；

N_{ti}	——	受拉腹杆轴心受拉承载力；
N_u	——	桁式钢管混凝土轴压构件的强度承载力；
N_{uc}	——	构件总轴压承载力；
N_{uc1} 、 N_{uc2}	——	桁式结构中压区弦杆、拉区弦杆的轴压承载力之和；
N_{ut}	——	构件总抗拉承载力；
N_{uL}	——	轴心受压构件的局压承载力；
N_{LF}	——	作用在节点区钢管混凝土弦杆的侧向局部压力设计值；
N_{uLF}	——	钢管混凝土弦杆的侧向局部受压承载力；
V_{u1}	——	钢管混凝土弦杆的受剪承载力；
N_{ug}	——	考虑脱空影响的钢管混凝土轴心受压构件的强度承载力；
f	——	钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
f_{ck} 、 f_c	——	混凝土轴心抗压强度标准值和设计值；
f'_c	——	混凝土圆柱体抗压强度设计值；
f_{scy} 、 f_{sc}	——	钢管混凝土弦杆截面轴心抗压强度标准值和设计值；
f_y	——	钢材屈服强度；
f_i	——	腹杆钢管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
f_v	——	钢材抗剪强度设计值；
f_{sv}	——	钢管混凝土弦杆截面抗剪强度设计值；
$\sigma_{x,cr}$	——	受压腹杆理想屈曲应力；
σ	——	名义应力；
σ_p	——	峰值拉应力；
σ_{hs}	——	热点应力；
$\sigma_{hs,max}$	——	在应力循环作用中的最大热点拉应力；
$\sigma_{hs,min}$	——	在应力循环作用中的最小热点拉应力；
$\Delta\sigma_{hs}$	——	热点应力幅；
$[\Delta\sigma_{hs}]$	——	常幅疲劳的容许热点应力幅；
$\Delta\sigma$	——	名义应力幅，为计算部位每次应力循环中的最大名义拉应力与最小名义拉应力或名义压应力之差（拉应力取正值，压应力取负值）。

2.2.3 几何参数：

A_b	——	侧向局部受压的计算底面积；
A_c	——	钢管内混凝土的截面面积；
A_l	——	轴向局部受压时的受压面积；
A_s	——	钢管的截面面积；
A'_s	——	受压钢筋的截面总面积；

A_{sc}	——	钢管混凝土截面面积；
A_{se}	——	腐蚀后等效钢管的截面面积；
A_{si}	——	单根弦杆的钢管截面面积；
A_w	——	单根腹杆空钢管的截面面积；
D	——	圆钢管混凝土的钢管外直径；
D_e	——	腐蚀后等效圆形外钢管外直径；
H	——	构件两端截面中心点的直线距离；结构高度；
h	——	弯矩作用平面内的弦杆中心距；
I_c	——	混凝土截面惯性矩；
I_s	——	钢管截面惯性矩；
I_{sc}	——	钢管混凝土弦杆截面惯性矩；
I_w	——	单根腹杆截面惯性矩；
L_o	——	构件的计算长度；
l_0	——	节间长度；
W_{sc}	——	桁式钢管混凝土构件截面的抗弯模量；
W_{sc1}	——	单根钢管混凝土截面的抗弯模量；
$W_{sc,t}$	——	截面扭转抵抗矩；
a	——	桁式钢管混凝土构件上弦杆的数量；
b	——	在弯矩作用平面外的弦杆中心距；
b_e	——	混凝土板的有效宽度；
d	——	传递侧向力的腹杆直径；
$d_1、d_2$	——	分别为受拉区拉力和受压区压力合力中心到截面顶点的距离；
d_j	——	受压腹杆钢管外直径；
d_s	——	球冠形脱空高度；
$d_x、d_y$	——	分别是构件中弦杆中心到虚轴 y-y 和 x-x 的距离；
e	——	荷载偏心距；
h_e	——	有效焊脚尺寸；
h_i	——	构件截面上下弦杆的中心距离；
h_0	——	构件的截面总高度；
h_n	——	构件截面受压区压力合力作用中心到中和轴的距离；
l_1	——	桁式结构中单根弦杆在一个节间的长度；
$l_{oy}、l_{ox}$	——	整个构件绕 y-y 轴和 x-x 轴的计算长度；
$r_c、r_t$	——	桁式结构中截面重心至压区弦杆、拉区弦杆重心轴的距离；
t	——	钢管壁厚；

t_j	——	受压腹杆钢管管壁厚度；
t_e	——	腐蚀后外钢管管壁厚度；
t_R	——	三肢桁式钢管混凝土构件的耐火极限；
u_0	——	初始弯曲度；
Δt	——	外钢管管壁在腐蚀作用下的平均壁厚损失值；
α	——	桁式结构中弦杆平面夹角的一半；
ε	——	钢材的屈服应变；
ε_e	——	钢材达到比例极限时对应的应变；
ε_{cu}	——	混凝土的极限压应变；
ε_p	——	峰值拉应力时的应变；
ε_h	——	历史最大压应变；
ϕ	——	桁式钢管混凝土构件跨中截面曲率；
θ	——	斜腹杆与弦杆的夹角。

2.2.4 计算系数及其他：

D_σ	——	疲劳累积损伤值；
e/r	——	荷载偏心率；
k_p	——	钢管初应力影响系数；
K_d	——	脱空折减系数；
m_d	——	与肢数有关的参数；
n	——	构件弦杆总数；
n_0	——	节间数；
n_1 、 n_2	——	构件中压区、拉区的弦杆数；
n_F	——	火灾荷载比；
n_i	——	在某一热点应力幅下构件或节点的应力循环次数；
N_f	——	节点或连接疲劳失效前经历的荷载循环次数（疲劳寿命）；
N_i	——	在某一热点应力幅下构件或节点的疲劳寿命；
SCF	——	应力集中系数；
V_0	——	撞击物速度；
α_e	——	腐蚀后名义截面含钢率；
α_s	——	截面含钢率（ $\alpha_s = A_s/A_c$ ）；
β_0	——	钢管初应力系数；
β_1	——	侧向局部受压时混凝土强度提高系数；
β_c	——	侧向局部受压时混凝土强度影响系数；
γ	——	构件刚度折减系数；
γ_x	——	截面塑性发展系数；

γ_m	——	截面抗弯塑性发展系数；
γ_{sc}	——	钢管混凝土轴心受压强度分项系数；
γ_t	——	钢管壁厚修正系数；
φ	——	轴心受压构件的稳定系数；
φ_s	——	空钢管的稳定系数；
φ_c	——	受压混凝土板的稳定系数；
φ_{sc}	——	受压钢管混凝土弦杆的稳定系数；
κ	——	考虑长细比、加载状况及几何初始缺陷等影响的折减系数；
λ	——	构件换算长细比；
λ_1	——	单根弦杆一个节间的长细比；
λ_o	——	构件弹塑性失稳的界限长细比；
λ_{ox} 、 λ_{oy}	——	整个构件对 x-x 轴和 y-y 轴的换算长细比；
λ_p	——	构件弹性失稳的界限长细比；
λ_x 、 λ_y	——	整个构件对 x-x 轴和 y-y 轴的长细比；
ξ	——	约束效应系数；
ξ_e	——	腐蚀后名义约束效应系数；
χ	——	球冠形脱空的脱空率。

3 材 料

3.1 钢材

3.1.1 桁式钢管混凝土结构的钢管宜采用 Q355、Q390、Q420、Q460 和 Q345GJ 钢,也可采用 Q235 钢,钢材的质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《建筑结构用钢板》GB/T 19879 和《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

【条文说明】3.1.1 结合工程实际和现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中的有关规定提出了对桁式钢管混凝土结构中钢管材料的要求。应根据结构的重要性、荷载特征、应力状态、钢材厚度、连接方式、工作条件等因素,合理选取钢管材料牌号和等级。现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 中,采用了 Q355 钢代替原 Q345 钢。当采用其他牌号的钢材时,尚应符合国家现行标准的相关规定。

3.1.2 桁式钢管混凝土结构中弦杆的钢材应符合下列规定:

- 1 屈强比不应大于 0.85;
- 2 应有明显的屈服台阶,且伸长率不应小于 20%。

【条文说明】3.1.2 桁式钢管混凝土结构中弦杆的钢材性能要求应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

3.1.3 桁式钢管混凝土结构的钢管宜采用符合现行国家标准《直缝电焊钢管》GB/T 13793 的直缝焊接钢管,焊缝应采用全熔透对接焊缝并应符合一级质量检验标准;也可根据实际情况选用符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB/T 8162 的无缝钢管。

【条文说明】3.1.3 桁式钢管混凝土结构的圆钢管宜采用直缝焊接钢管。直缝焊接钢管应采用对接坡口焊缝,不应采用钢板搭接的角焊缝。焊缝应达到一级质量检验标准,和母材等强度。对于发生锈蚀的钢管,可采用喷射或抛射 Sa1 级除锈、手工和动力工具 St2 级除锈。

3.2 混凝土

3.2.1 桁式钢管混凝土结构用混凝土的水胶比不宜大于 0.45,混凝土强度等级不应低于 C30。

【条文说明】3.2.1 弦杆钢管本身是封闭的,混凝土中多余的水分不能排出,因而混凝土的水胶比不宜过大。同时,为了充分发挥钢管混凝土力学性能优势,核心混凝土的强度等级不宜过低。受压钢管混凝土的核心混凝土强度等级一般不低于 C40;受拉钢管混凝土的核心混凝土强度等级不应低于 C30。

3.2.2 混凝土的强度等级、力学性能和质量标准应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土强度检验评定标准》GB 50107 的有关规定。

【条文说明】3.2.2 桁式钢管混凝土结构中一般采用普通混凝土;当有可靠依据时,也可采用再生混凝土,钢管再生混凝土结构的设计应符合国家现行标准《钢管再生混凝土结构技术规程》T/CECS 625 的有关规定。

3.2.3 桁式钢管混凝土结构中弦杆的混凝土强度等级与钢材牌号的组合关系宜按表 3.2.3 采用。

表3.2.3 混凝土强度等级与钢材牌号的组合关系

钢材牌号	Q235、Q355 和 Q345GJ	Q390、Q420 和 Q460
混凝土强度等级	C30~C60	C60~C90

【条文说明】3.2.3 钢管和混凝土材料间的协同互补及相互作用，可有效避免或延缓钢管发生局部屈曲及混凝土发生脆性破坏。在常用截面含钢率情况下，Q235、Q355 和 Q345GJ 钢宜配 C30~C60 级混凝土；Q390、Q420 和 Q460 钢宜配 C60~C90 级混凝土。

3.3 连接材料

3.3.1 用于桁式钢管混凝土结构的焊接材料应符合下列规定：

1 手工焊接所用的焊条应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117 的有关规定，所选用的焊条型号应与主体金属力学性能相适应；

2 自动焊或半自动焊用焊丝应符合现行国家标准《熔化焊用钢丝》GB/T 14957、《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》GB/T 8110、《碳钢药芯焊丝》GB/T 10045 和《低合金钢药芯焊丝》GB/T 17493 的有关规定；

3 埋弧焊用焊丝和焊剂应符合现行国家标准《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》GB/T 5293 和《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》GB/T 12470 的有关规定。

3.3.2 用于桁式钢管混凝土结构的连接紧固件应符合下列规定：

1 普通螺栓应符合现行国家标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 和《六角头螺栓》GB/T 5782 的有关规定。

2 高强度螺栓应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230、《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632 和《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 的有关规定。

4 基本规定

4.1 设计原则

4.1.1 桁式钢管混凝土结构设计应贯彻国家的方针政策，结合工程特点、材料供应、加工制作、构件运输、安装和施工的具体条件，合理选用结构方案。

【条文说明】4.1.1 桁式钢管混凝土结构因其受力合理、受弯承载力高、空间刚度大、抗变形能力强、稳定性能好、经济美观和抗火性能好等特点显示出良好的综合性能。设计时应结合工程特点、材料供应、加工制作、构件运输、安装和施工的具体条件，合理选用结构方案，充分发挥其结构性能优势。

4.1.2 桁式钢管混凝土结构应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态下的设计，并应符合下列规定：

1 按承载能力极限状态设计时，应考虑荷载效应的基本组合，必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。

2 按正常使用极限状态设计时，应根据不同的设计要求，采用荷载的标准组合、频遇组合或准永久组合。

4.1.3 桁式钢管混凝土结构的荷载取值及荷载组合应符合国家现行标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068、《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《建筑结构荷载规范》GB 50009、《公路桥涵设计通用规范》JTG D60、《铁路桥涵设计基本规范》TB 10002.1 和《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 等的有关规定。

4.1.4 桁式钢管混凝土结构的抗震设计应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《组合结构设计规范》JGJ 138、《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01、《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 和《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 等的有关规定。

4.1.5 桁式钢管混凝土结构的设计应遵循下列原则：

- 1 构件节间长度与构件高度之比宜为 0.5~1.5；
- 2 弦杆与腹杆或两腹杆轴线之间的夹角不宜小于 30°；
- 3 腹杆轴线在弦杆横截面所在平面投影的夹角不应小于 60°，且不应大于 120°；
- 4 弦杆和腹杆之间宜直接焊接或用节点板（球）连接；
- 5 当弦杆与腹杆之间采用直接焊接时，腹杆与弦杆的外直径比、腹杆与弦杆的钢管壁厚比均不应小于 0.2，且不应大于 1.0；
- 6 弦杆和腹杆宜采用相同牌号的钢材。

【条文说明】4.1.5 本条规定了桁式钢管混凝土结构的一般设计要求。

- 1 考虑受力的合理性和施工要求，构件节间长度宜与构件高度相当。
- 2 考虑受力的合理性和施工要求，弦杆与腹杆或两腹杆轴线之间的夹角不宜小于 30°；当采用斜腹杆形式时，宜将弦杆和斜腹杆轴线的夹角限定在 40°~60°的范围内。

3 参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

5 参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

4.1.6 桁式钢管混凝土结构中钢管混凝土弦杆的构造应符合下列规定：

1 钢管混凝土弦杆的钢管截面外直径不宜小于 180mm，壁厚不应小于 4mm，外直径与壁厚之比不应大于 150 ($235/f_y$)；

2 钢管混凝土弦杆的截面含钢率 (α_s) 不应小于 0.06，且不宜大于 0.20。截面含钢率 (α_s) 应按下列式计算：

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_c} \quad (4.1.6-1)$$

式中： A_s 、 A_c —— 分别为钢管和混凝土的截面面积 (mm^2)；

3 钢管混凝土弦杆的约束效应系数 (ξ) 不应小于 0.6，且不应大于 4.0。约束效应系数 (ξ) 应按下列式计算：

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (4.1.6-2)$$

式中： f_y —— 钢材屈服强度 (N/mm^2)；

f_{ck} —— 混凝土轴心抗压强度标准值 (N/mm^2)。

【条文说明】4.1.6 钢管截面最小直径和最小壁厚的规定是为了保证混凝土的浇筑质量和钢管的焊接质量。研究表明，由于存在内填混凝土，钢管混凝土管壁的局部稳定性有所提高，但钢管径厚比不应大于空钢管相应限值的 1.5 倍。

4.1.7 承受偏心压力的桁式钢管混凝土构件宜采用斜腹杆形式；当弦杆间距较小或有使用要求时，可采用平腹杆形式。桁式钢管混凝土构件腹杆的构造要求应符合下列规定：

1 腹杆宜采用空钢管；

2 斜腹杆桁式构件应满足下列要求：

1) 杆件轴线宜交于节点中心；或腹杆轴线交点与弦杆轴线距离不宜大于 $D/4$ ， D 为弦杆圆钢管外直径；

2) 采用间隙 K 形连接节点时，腹杆端部净距不宜小于 50mm；

3 平腹杆桁式构件应满足下列要求：

1) 腹杆中心距离不宜大于弦杆中心距的 4 倍；

2) 腹杆空钢管面积不宜小于单根弦杆钢管面积的 1/3；

3) 腹杆的长细比不宜大于单根弦杆长细比的 1/2；

4 腹杆和弦杆宜焊接连接，腹杆与弦杆的相贯焊缝，应沿全周连续焊接并平滑过渡，且不应将腹杆穿入弦杆内；

5 腹杆端部宜使用相贯线切割机加工，腹杆壁厚小于 6mm 时可不开坡口；

6 腹杆与弦杆连接的其他构造要求、焊缝计算及弦杆在连接处的受拉承载力计算（受压承载力可不计算）按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定执行。

【条文说明】4.1.7 根据工程需求，腹杆钢管中也可以浇筑混凝土。平腹杆桁式构件的构造规定，是为了从构造上保证腹杆有一定的线刚度。

4.1.8 当进行桁式钢管混凝土结构整体分析时，核心混凝土与钢材的材料本构模型宜按本规程附录 A 确定。

【条文说明】4.1.8 本规程附录 A 提供的钢材与核心混凝土的本构模型适用于采用纤维模型法建立的桁式钢管混凝土结构分析模型。当进行三维有限元分析时，则需采用相应的材料本构模型。

4.1.9 桁式钢管混凝土结构的变形限值应符合国家现行标准《组合结构设计规范》JGJ 138、《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231、《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 和《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 等的有关规定。

4.2 设计指标

4.2.1 钢管混凝土截面的轴心抗压强度设计值应按下列公式计算：

$$f_{sc} = \frac{f_{scy}}{\gamma_{sc}} \quad (4.2.1-1)$$

$$f_{scy} = (1.14 + 1.02\xi)f_{ck} \quad (4.2.1-2)$$

式中： f_{scy} —— 钢管混凝土截面轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

ξ —— 约束效应系数；

f_{ck} —— 混凝土轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

γ_{sc} —— 钢管混凝土轴心抗压强度分项系数。

对于安全等级为一级、二级和三级的房屋建筑物结构和电力塔架结构， γ_{sc} 应分别取 1.30、1.20 和 1.15；对于安全等级为一级、二级和三级的铁路桥涵结构， γ_{sc} 宜分别取 1.60、1.50 和 1.40；对于安全等级为一级、二级和三级的公路桥涵结构， γ_{sc} 应分别取 1.50、1.40 和 1.30；对于安全等级为一级、二级和三级的港口工程结构， γ_{sc} 应分别取 1.37、1.25 和 1.17。

【条文说明】4.2.1 以 f_{sc} 作为桁式钢管混凝土结构中钢管混凝土弦杆的轴心抗压强度设计指标时，对其进行了可靠性分析，在整理分析了千余个圆钢管混凝土轴压短试件试验结果的基础上，对不同钢材牌号、混凝土强度等级和含钢率等情况下的计算结果表明，采用本条规定的方法确定的钢管混凝土轴心抗压强度能够满足现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 对延性破坏构件的可靠性要求。对于房屋建筑和塔架结构、铁路桥涵结构、公路桥涵结构和港口工程结构，分别按照《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068、《铁路工程结构可靠性设计统

一标准》GB 50216、《公路工程结构可靠度设计统一标准》GB/T 50283 和《港口工程结构可靠性设计统一标准》GB 50158 中规定的目标可靠度指标，给出了钢管混凝土轴心抗压强度分项系数，其中，对于铁路桥涵结构，暂按一级、二级和三级安全等级下的目标可靠指标分别为 5.2、4.7 和 4.2，确定了该分项系数取值。

桁式钢管混凝土结构处于温度变化的环境时，钢管混凝土弦杆轴心抗压强度将受温度变化的影响。本规程未列入考虑环境温度影响的计算方法。当环境温度变化较大时，钢管混凝土弦杆轴心抗压强度随温度变化的影响不宜忽略，可在本条文基础上，以+20℃为基准温度，通过试验和分析确定轴心抗压强度设计指标的下降率。

4.2.2 钢管混凝土截面的弹性抗压刚度宜按下式计算：

$$E_{sc} A_{sc} = E_s A_s + E_c A_c \quad (4.2.2)$$

式中： E_{sc} —— 钢管混凝土截面的抗压弹性模量（N/mm²）；

A_{sc} —— 钢管混凝土截面面积（mm²）， $A_{sc} = A_s + A_c$ ；

E_s 、 E_c —— 分别为钢管和核心混凝土的弹性模量（N/mm²），分别按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定；

A_s 、 A_c —— 分别为钢管和核心混凝土的截面面积（mm²）。

【条文说明】4.2.2 该条文给出了桁式钢管混凝土构件中的钢管混凝土截面的弹性抗压刚度。

4.2.3 钢管混凝土截面的弹性抗弯刚度宜按下式计算：

$$E_{sc} I_{sc} = E_s I_s + 0.8 E_c I_c \quad (4.2.3)$$

式中： I_{sc} —— 钢管混凝土截面的截面惯性矩（mm⁴）；

I_s 、 I_c —— 分别为钢管和核心混凝土的截面惯性矩（mm⁴）。

【条文说明】4.2.3 该条文给出了桁式钢管混凝土构件中的钢管混凝土截面的弹性抗弯刚度。

4.2.4 钢管混凝土截面的抗剪强度设计值应按下式计算：

$$f_{sv} = (0.422 + 0.313 \alpha_s^{2.33}) \xi^{0.134} f_{sc} \quad (4.2.4)$$

式中： f_{sv} —— 截面抗剪强度设计值（N/mm²）；

f_{sc} —— 钢管混凝土截面的轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

α_s —— 截面含钢率。

【条文说明】4.2.4 基于钢管混凝土截面受纯剪切时的名义剪应力（ $f_{sv} = T / W_{sr,t}$ 或 V / A_{sc} ）和剪应变之间的关系曲线，确定了钢管混凝土截面的受剪极限状态，得到了钢管混凝土截面的抗剪强度设计值 f_{sv} 的计算公式，即式（4.2.4）。

4.2.5 钢管混凝土截面的弹性抗剪刚度宜按下式计算：

$$G_{sc} A_{sc} = G_s A_s + G_c A_c \quad (4.2.5)$$

式中: G_{sc} —— 截面弹性剪切变形模量 (N/mm^2);

G_s 、 G_c —— 分别为钢管和核心混凝土的剪切变形模量 (N/mm^2)。

【条文说明】4.2.5 该条文给出了桁式钢管混凝土构件中单个钢管混凝土截面的弹性抗剪刚度计算公式。

4.2.6 桁式钢管混凝土构件的截面抗弯刚度宜按下式计算:

$$(EI)_{sc} = \frac{\sum E_{sc} A_{sc} \sum E_s A_s (d_2 - d_1)^2}{\sum E_{sc} A_{sc} + \sum E_s A_s} \quad (4.2.6)$$

式中: $(EI)_{sc}$ —— 截面抗弯刚度;

d_1 —— 受拉区拉力合力中心到截面顶点的距离;

d_2 —— 受压区压力合力中心到截面顶点的距离;

$E_{sc} A_{sc}$ —— 单根受压弦杆的截面抗压刚度;

E_s —— 受拉弦杆的钢材弹性模量;

A_s —— 单根受拉弦杆的钢管截面面积。

【条文说明】4.2.6 基于平截面假定,通过系统的试验研究与理论分析,得到材料处于弹性阶段的桁式钢管混凝土构件截面抗弯刚度计算公式(4.2.6)。

5 构件承载力计算

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于节点采用杆件直接相贯焊缝连接的桁式钢管混凝土构件的承载力计算。

【条文说明】5.1.1 本章规定的桁式钢管混凝土构件计算方法建立在静力荷载或间接动力荷载作用基础上。对桁式钢管混凝土结构的抗震验算可参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 对钢结构的有关规定进行。

5.1.2 桁式钢管混凝土结构中弦杆的容许长细比应按现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定确定。

【条文说明】5.1.2 根据已有的工程经验，桁式钢管混凝土结构中弦杆的容许长细比按现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 对钢管混凝土构件的有关规定确定是可行的。

5.1.3 桁式钢管混凝土构件的承载力设计应分别对其整体承载力和单根弦杆、腹杆的承载力进行计算。构件的换算长细比应通过结构整体分析确定，轴心受压构件的换算长细比也可按现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 给出的方法确定。构件的整体承载力也可通过结构整体分析确定。

【条文说明】5.1.3 桁式钢管混凝土构件中的弦杆和腹杆在受力全过程中的混合作用机制较为复杂，因此应通过整体分析确定其换算长细比，并据此依据本章给出的条文进行相应的构件整体和单根弦杆、腹杆的承载力计算。现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 中给出了钢管混凝土轴心受压构件换算长细比的简化计算方法。

5.1.4 带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件设计应考虑钢筋混凝土板的组合作用。

【条文说明】5.1.4 桁式钢管混凝土构件可与钢筋混凝土板共同组成混合结构楼面系或桥面系。带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件试验结果表明，钢筋混凝土板与桁式钢管混凝土在受力全过程中保持共同工作；钢筋混凝土板的存在改变了内力的传递路径，使桁式钢管混凝土构件腹杆应变发展更为充分，整体刚度和承载力均有明显提高，其中受弯承载力提高约 16%~20%；达到极限荷载时，其截面中和轴位置可达到受压钢管混凝土弦杆的内部。

5.2 正截面承载力计算

5.2.1 桁式钢管混凝土轴心受压构件的轴向压力设计值应满足下列公式的要求：

$$N \leq \varphi \sum N_c \quad (5.2.1-1)$$

$$N_c = f_{sc} A_{sc} \quad (5.2.1-2)$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_0) \\ a\lambda^2 + b\lambda + c & (\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p) \\ d/(\lambda + 35)^2 & (\lambda > \lambda_p) \end{cases} \quad (5.2.1-3)$$

$$a = \frac{1 + (35 + 2\lambda_p - \lambda_o)e}{(\lambda_p - \lambda_o)^2} \quad (5.2.1-4)$$

$$b = e - 2a\lambda_p \quad (5.2.1-5)$$

$$c = 1 - a\lambda_o^2 - b\lambda_o \quad (5.2.1-6)$$

$$d = [13000 + 4657 \ln(\frac{235}{f_y})] \cdot (\frac{25}{f_{ck} + 5})^{0.3} \cdot (\frac{\alpha_s}{0.1})^{0.05} \quad (5.2.1-7)$$

$$e = \frac{-d}{(\lambda_p + 35)^3} \quad (5.2.1-8)$$

$$\lambda_p = \frac{1743}{\sqrt{f_y}} \quad (5.2.1-9)$$

$$\lambda_o = \pi \sqrt{\frac{420\xi + 550}{(1.02\xi + 1.14)f_{ck}}} \quad (5.2.1-10)$$

式中： N —— 轴向压力设计值（N）；

N_c —— 单肢轴心受压弦杆的强度承载力（N）；

$\sum N_c$ —— 轴心受压弦杆的强度承载力之和（N）；

φ —— 轴心受压构件的稳定系数，根据构件的换算长细比按式（5.2.1-3）计算或按本规程附录 B 取值；

f_{sc} —— 弦杆的截面轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

A_{sc} —— 单肢弦杆的横截面面积（mm²）；

D —— 钢管外直径（mm）；

λ —— 构件的换算长细比；

λ_p —— 构件弹性失稳的界限长细比；

λ_o —— 构件弹塑性失稳的界限长细比。

5.2.2 不带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件受弯承载力应按下列公式计算：

$$M_u = \min\{\sum N_c, \sum N_t\} h_i \quad (5.2.2-1)$$

$$N_t = 1.1fA_s \quad (5.2.2-2)$$

式中： M_u —— 受弯承载力（N·mm）；

$\sum N_c$ —— 轴心受压弦杆的强度承载力之和（N）；

$\sum N_t$ —— 轴心受拉弦杆的强度承载力之和（N）；

N_t —— 单肢轴心受拉弦杆的强度承载力（N）；

- h_1 —— 构件沿截面高度方向受压和受拉弦杆形心的距离 (mm)；
- f —— 钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)；
- A_s —— 单根受拉弦杆钢管的横截面面积 (mm²)。

【条文说明】5.2.2 基于系统的试验研究、有限元数值模拟与理论分析，得到弯矩单独作用下不带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件受弯承载力计算方法。基本假定包括：（1）不考虑受拉混凝土对整体受弯承载力的直接贡献；（2）不考虑腹杆直接抗弯的贡献；（3）中和轴位于腹杆高度范围内。

桁式钢管混凝土构件的弦杆轴心受拉时，钢管的径向变形将受到核心混凝土的制约，由于二者之间的相互作用使钢管处于复杂受力状态。基于试验研究和理论分析，可采用式 (5.2.2-2) 计算单肢轴心受拉弦杆的强度承载力。

5.2.3 带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件的受弯承载力计算应符合下列规定：

1 当满足下列条件时，应按第一类截面计算构件截面的受弯承载力：

$$\varphi_c [\sum b_e h_b f_c + A'_s f_s] + \varphi_{sc} f_{sc} \sum A_{sc} \leq 1.1 f \sum A_s \quad (5.2.3)$$

式中： φ_c —— 受压混凝土板的稳定系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算，计算长度按桁架节间长度 l_0 取值；

b_e —— 单肢弦杆对应的混凝土板有效宽度 (mm)， $b_e = b_{m1} + b_{m2} + b_t$ ，其中， b_{m1} 和 b_{m2} 分别为混凝土板外伸端和中间段的有效翼缘宽度，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算，对六肢构件的中间弦杆， $b_{m1} = b_{m2}$ ； b_t 为受压弦杆外包混凝土宽度；

$\sum b_e$ —— 混凝土板有效宽度之和 (mm)；

h_b —— 桁架截面受压区混凝土板厚度 (mm)；

f_c —— 混凝土板的混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm²)；

A'_s —— 受压钢筋的截面总面积 (mm²)；

f_s —— 纵向普通钢筋的抗压、抗拉和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

φ_{sc} —— 受压弦杆的稳定系数，计算长度按 $0.9 l_0$ 取值；

f_{sc} —— 受压区弦杆的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm²)；

$\sum A_{sc}$ —— 受压区弦杆的横截面面积之和 (mm²)；

f —— 受拉弦杆钢管钢材的抗压、抗拉和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

$\sum A_s$ —— 桁架受拉弦杆钢管的横截面面积之和 (mm²)。

2 当不满足公式 (5.2.3) 的条件时，应按第二类截面计算构件的受弯承载力。

【条文说明】5.2.3 基于系统的试验研究、有限元数值模拟与理论分析，得到带钢筋混凝土板的

桁式钢管混凝土构件受弯承载力计算方法。

随着截面弯矩的增大，带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件的截面中和轴不断上移（图 5.2.3）。当中和轴处于腹杆高度范围内时，相当于 T 形截面钢筋混凝土梁的第一类截面形式；当中和轴上移至上弦弦杆内时，混凝土板底即位于受拉区，其板底将会出现拉裂缝，相当于 T 形截面钢筋混凝土梁的第二类截面形式。本节考虑带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件的受弯承载力时，按照第一类截面和第二类截面进行分类，分别给出其受弯承载力的计算公式。

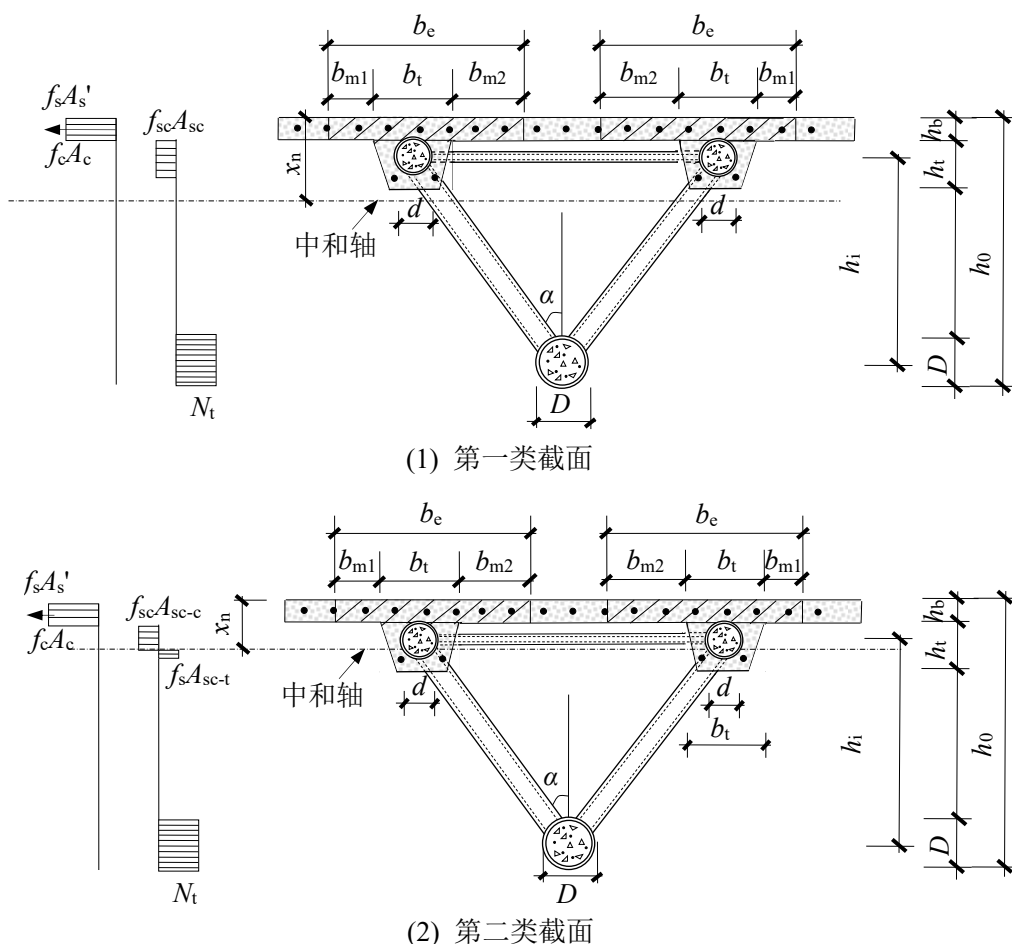


图 5.2.3 带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件截面示意图（三肢）

5.2.4 按第一类截面计算的带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件截面受弯承载力应按下列公式计算：

$$M_u = \varphi_c \left[\sum b_c h_b f_c + A'_s f_s \right] \left(\frac{h_b + d}{2} + h_i \right) + \varphi_{sc} f_{sc} \sum A_{sc} h_i \quad (5.2.4)$$

式中： M_u —— 受弯承载力（N·mm）；

d —— 受压弦杆钢管的外直径（mm）；

h_i —— 构件沿截面高度方向受压和受拉弦杆形心的距离（mm）；

- f_c —— 混凝土板的混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm²) ;
 A_s' —— 受压钢筋的截面总面积 (mm²) ;
 f_s —— 纵向普通钢筋的抗压、抗拉和抗弯强度设计值 (N/mm²) ;
 φ_{sc} —— 受压弦杆的稳定系数, 计算长度按 $0.9 l_0$ 取值, l_0 为桁架节间长度;
 f_{sc} —— 受压区弦杆截面的轴心抗压强度设计值 (N/mm²) ;
 $\sum A_{sc}$ —— 受压区弦杆的横截面面积之和 (mm²) ;
 f —— 受拉弦杆钢管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²) ;

5.2.5 按第二类截面计算的带钢筋混凝土板的桁式钢管混凝土构件的受弯承载力应按下列公式计算:

$$M_u = 1.1f \sum A_s (h_0 - D/2 - x_n) + \sigma_s \sum A_{sc-t} (h_b + d - x_n) / 2 + \varphi_c [\sum b_e h_b f_c + A_s' f_s] (x_n - h_b / 2) + \varphi_{sc} \sigma_{sc} \sum A_{sc-c} (x_n - h_b) \quad (5.2.5-1)$$

其中, x_n 、 A_{sc-c} 、 A_{sc-t} 、 σ_{sc} 、 σ_s 可由下列公式联立求解得到:

$$\varphi_c [\sum b_e h_b f_c + A_s' f_s] + \varphi_{sc} \sigma_{sc} \sum A_{sc-c} = 1.1 f_y \sum A_s + \sigma_s \sum A_{sc-t} \quad (5.2.5-2)$$

当 $h_b < x_n \leq h_b + d/2$ 时,

$$A_{sc-c} = \frac{d^2}{4} \arccos \frac{d/2 + h_b - x_n}{d/2} - \sqrt{(d/2)^2 - (d/2 + h_b - x_n)^2} \cdot (d/2 + h_b - x_n) \quad (5.2.5-3a)$$

$$A_{sc-t} = \left(\pi - \arccos \frac{d/2 + h_b - x_n}{d/2} \right) \cdot d \cdot t \quad (5.2.5-3b)$$

当 $h_b + d/2 < x_n < h_b + d$ 时,

$$A_{sc-c} = \frac{d^2}{4} \left(\pi - \arccos \frac{x_n - d/2 - h_b}{d/2} \right) + \sqrt{(d/2)^2 - (d/2 + h_b - x_n)^2} \cdot (x_n - d/2 - h_b) \quad (5.2.5-3c)$$

$$A_{sc-t} = \arccos \frac{x_n - d/2 - h_b}{d/2} \cdot d \cdot t \quad (5.2.5-3d)$$

$$\sigma_{sc} = \frac{1}{2} \cdot E_{scp} \frac{\varepsilon_{cu}}{x_n} (x_n - h_b) \quad (5.2.5-4)$$

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \cdot E_s \frac{\varepsilon_{cu}}{x_n} (h_b + d - x_n) \quad (5.2.5-5)$$

$$E_{scp} = \frac{[0.192(f_y / 235) + 0.488] \cdot f_{scy}}{3.25 \times 10^{-6} f_y} \quad (5.2.5-6)$$

式中: D —— 受拉弦杆钢管的外直径 (mm) ;

h_0 —— 构件的截面总高度 (mm) ;

E_s —— 钢材的弹性模量 (N/mm²) ;

ε_{cu} —— 混凝土的极限压应变, 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010

取值；

- t —— 受拉弦杆钢管壁厚（mm）；
 f_{scy} —— 钢管混凝土截面轴心抗压强度标准值（N/mm²）；
 f_y —— 钢材的屈服强度（N/mm²）。

【条文说明】5.2.4~5.2.5 当中和轴位于腹杆高度范围内时，部分钢管混凝土弦杆承受压力，可以充分发挥钢管混凝土受压性能好的优势。当中和轴位于钢筋混凝土板内时，钢管混凝土弦杆主要承受拉力，钢管混凝土受压性能好的优势不能得到充分发挥。受压钢管混凝土弦杆的计算长度参考了国家现行标准《钢管结构技术规程》CECS 280 的相关规定。

5.2.6 桁式钢管混凝土构件承受压、弯及共同作用时，应按下列公式验算弯矩作用平面内的稳定承载力，并应符合下列规定：

- 1 当 $u \leq \frac{M_B}{N_B}$ 时：

$$\frac{N}{\varphi \sum N_c} + \frac{M}{W_{sc}(1 - \varphi N / N_E) f_{sc}} \leq 1 \quad (5.2.6-1)$$

- 2 当 $u > \frac{M_B}{N_B}$ 时：

$$-N + \frac{M}{r_c(1 - N / N_E)} \leq 1.1 \sum A_s f \quad (5.2.6-2)$$

3 换算长细比大于 120 的桁式钢管混凝土构件的弯矩作用平面内整体稳定承载力计算应满足下式要求：

$$\frac{N}{\varphi \sum N_c} + \frac{M}{r_c \sum N_t(1 - N / N_E)} \leq 1 \quad (5.2.6-3)$$

4 曲线形桁式钢管混凝土构件（图 5.2.6）在两端承受轴压荷载时的承载力应符合本规程第 5.2.1 条和式（5.2.6-1）~式（5.2.6-3）的规定，由于构件的初始弯曲度（ u_0 ）引起的弯矩设计值 M 应按下列式计算：

$$M = Nu_0 \quad (5.2.6-4)$$

式中：

- N —— 轴力设计值（N）；
 M —— 弯矩设计值（N·mm）；
 N_B —— 承载力 N - M 相关曲线中拉压界限平衡点对应的轴力（N），
 $N_B = \varphi \sum N_c - \sum N_t$ ；
 M_B —— 承载力 N - M 相关曲线中拉压界限平衡点对应的弯矩（N·mm），
 $M_B = \varphi \sum N_c r_c + \sum N_t r_t$ ；
 r_c —— 构件截面重心至压区弦杆重心轴的距离（mm）， $r_c = \frac{N_{uc2}}{\sum N_c} h$ ；
 r_t —— 构件截面重心至拉区弦杆重心轴的距离（mm）， $r_t = \frac{N_{uc1}}{\sum N_c} h$ ；

N_{uc1} 、 N_{uc2} —— 分别为桁式钢管混凝土构件中压区弦杆和拉区弦杆的轴心受压承载力之和 (N)；

h —— 压区和拉区弦杆中心距 (mm)；

φ —— 轴心受压构件的稳定系数，根据桁式钢管混凝土构件的换算长细比按式 (5.2.1-3) 计算或按附录 B 取值；

N_c —— 单肢弦杆的截面轴心受压强度承载力 (N)；

$\sum N_c$ —— 所有弦杆的截面轴心受压强度承载力之和 (N)；

N_t —— 单肢弦杆的截面轴心受拉强度承载力 (N)；

$\sum N_t$ —— 所有弦杆的截面轴心受拉强度承载力之和 (N)；

W_{sc} —— 构件的截面抗弯模量 (mm^3)，在各弦杆截面相同的情况下，对于二肢、四肢或六肢结构， $W_{sc} = \frac{I_{sch}}{h/2}$ ， I_{sch} 为构件的截面惯性矩， h 为构件截面总

高度，对于三肢结构， $W_{sc} = \frac{I_{sch}}{2h/3}$ ；

f_{sc} —— 单肢弦杆的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)；

N_E —— 由换算长细比计算得到的欧拉临界力 (N)， $N_E = \pi^2 \sum (E_{sc} A_{sc}) / \lambda^2$ ；

u_0 —— 曲线形构件的初始弯曲度 (mm)，即构件中截面的形心到构件两端截面形心连线的垂直距离。

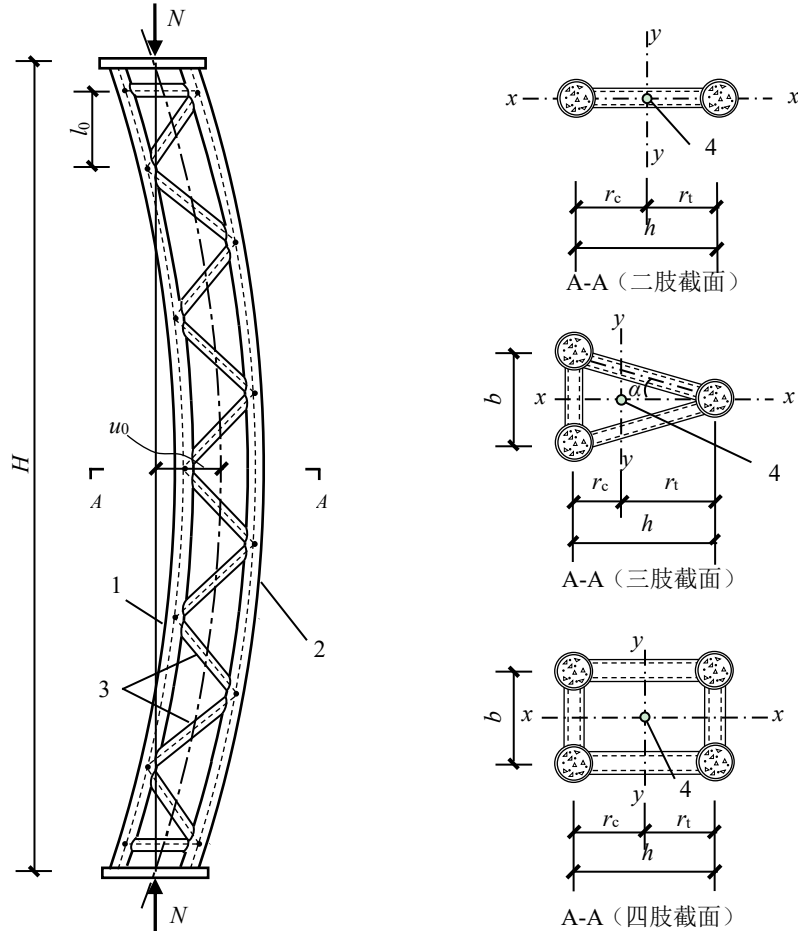


图 5.2.6 曲线形桁式钢管混凝土压弯构件

1—压区弦杆；2—拉区弦杆；3—腹杆；4—截面重心； H —构件两端截面中心点的直线距离；
 u_0 —构件的初始弯曲度； h —在弯矩作用平面内的弦杆中心距； b —在弯矩作用平面外的弦杆中心距；
 l_0 —节间长度； r_c 、 r_t —分别为截面重心至压区弦杆和拉区弦杆重心轴的距离

5.2.7 桁式钢管混凝土轴心受压构件除验算整体稳定承载力外，尚应验算单肢弦件的稳定承载力。当单肢弦件的长细比 λ_1 符合下列条件时，可不验算单肢弦杆的稳定承载力：

1 平腹杆桁式钢管混凝土构件： $\lambda_1 \leq 40$ 及 $\lambda_1 \leq 0.5\lambda_{\max}$ ，其中 $\lambda_{\max}$ 是构件在计算平面内或平面外方向换算长细比的较大值；

2 斜腹杆桁式钢管混凝土构件： $\lambda_1 \leq 0.7\lambda_{\max}$ 。

【条文说明】5.2.7 桁式钢管混凝土轴心受压构件保证单肢弦杆稳定的规定，参考了现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

5.2.8 单根钢管混凝土弦杆的承载力计算应符合下列规定：

1 直线形桁式钢管混凝土构件的单根钢管混凝土弦杆轴心受压稳定承载力 (φN_c) 不应小于其轴向压力设计值 (N)，轴心受压强度承载力 (N_c) 和轴心受压构件的稳定系数 (φ) 应按式 (5.2.1-2) 和 (5.2.1-3) 计算。

平腹杆与斜腹杆曲线形桁式钢管混凝土构件在两端承受轴压荷载时跨中节间的弦杆轴力设计值应按下列公式计算，并应满足本规程第 5.2.1 条和第 5.2.6 条的要求：

$$N_1 = \begin{cases} \frac{N_{1t}}{n_1} & (n_1 > 0) \\ 0 & (n_1 = 0) \end{cases} \quad (5.2.8-1)$$

$$N_2 = \begin{cases} \frac{N_{2t}}{n_2} & (n_2 > 0) \\ 0 & (n_2 = 0) \end{cases} \quad (5.2.8-2)$$

$$N_{1t} = \frac{Nr_c}{h} + \frac{Nu_o}{h(1 - N / N_E)} \quad (5.2.8-3)$$

$$N_{2t} = \frac{Nr_t}{h} - \frac{Nu_o}{h(1 - N / N_E)} \quad (5.2.8-4)$$

式中： N_1 —— 曲线形构件中单肢受压弦杆的轴向压力设计值 (N)；
 N_2 —— 曲线形构件中单肢受拉弦杆的轴向拉力设计值 (N)；
 N_{1t} —— 曲线形构件中压区弦杆的总轴向压力设计值 (N)；
 N_{2t} —— 曲线形构件中拉区弦杆的总轴向拉力设计值 (N)；
 n_1 、 n_2 —— 分别为曲线形构件中压区和拉区的弦杆数；
 h —— 弦杆中心距 (mm)；

N_E ——由换算长细比计算得到的欧拉临界力 (N), $N_E = \pi^2 \sum (E_{sc} A_{sc}) / \lambda^2$;

r_c 、 r_t ——分别为曲线形构件中截面重心至压区弦杆和拉区弦杆重心轴的距离 (mm)。

2 轴心受拉承载力 (N_t) 不应小于其轴向拉力设计值 (N), 并按式 (5.2.2-2) 计算。

3 曲线形桁式钢管混凝土构件在两端承受轴心荷载时端部节间的弦杆轴力和弯矩设计值应按下列公式计算:

1) 平腹杆曲线形桁式钢管混凝土构件端部弦杆的轴力设计值 (N_w) 和弯矩设计值 (M_w) 应按下列公式计算:

$$N_w = \frac{N}{n} \quad (5.2.8-5)$$

$$M_w = \frac{l_0}{m_b} \frac{\pi}{h} \frac{Nu_0}{(1 - N/N_E)} \quad (5.2.8-6)$$

式中: N_w ——曲线形构件中端部单肢弦杆轴力设计值 (N);

M_w ——曲线形构件中端部单肢弦杆弯矩设计值 (N·mm);

n ——曲线形构件中弦杆总数;

l_0 ——节间长度 (mm);

m_b ——与肢数有关的参数, 对于二肢、四肢、六肢结构 m_b 分别为 2、4 和 6, 对于三肢结构 m_b 为 $4\cos\alpha$, 其中, α 为腹杆在弦杆横截面平面投影夹角的一半;

h ——弦杆中心距 (mm);

u_0 ——曲线形构件的初始弯曲度 (mm), 即构件中截面的形心到构件两端截面形心连线的垂直距离。

2) 斜腹杆曲线形桁式钢管混凝土构件端部弦杆轴力设计值 (N_w) 应按下列公式计算:

$$N_w = \frac{N}{n} + \frac{2\pi}{h \tan \theta} \frac{Nu_0}{(1 - N/N_E)} \quad (5.2.8-7)$$

式中: θ ——斜腹杆与弦杆的夹角。

4 受弯承载力应按下列公式计算:

$$M_u = \gamma_m W_{sc1} f_{sc} \quad (5.2.8-8)$$

$$\gamma_m = 1.1 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) \quad (5.2.8-9)$$

$$W_{sc1} = \frac{\pi D^3}{32} \quad (5.2.8-10)$$

式中: M_u ——受弯承载力 (N·mm);

γ_m ——截面抗弯塑性发展系数;

ξ ——约束效应系数;

W_{sc1} ——截面抗弯模量 (mm³);

f_{sc} ——弦杆的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm²)。

5 在一个平面内承受压弯荷载共同作用时，承载力应符合下列规定：

1) 强度承载力：

a) 当 $\frac{N}{N_c} \geq 2\eta_o$ 时：

$$\frac{N}{N_c} + \frac{aM}{M_u} \leq 1 \quad (5.2.8-11)$$

b) 当 $\frac{N}{N_c} < 2\eta_o$ 时：

$$\frac{-bN^2}{N_c^2} - \frac{cN}{N_c} + \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (5.2.8-12)$$

$$a = 1 - 2\eta_o \quad (5.2.8-13)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_o}{\eta_o^2} \quad (5.2.8-14)$$

$$c = \frac{2(\zeta_o - 1)}{\eta_o} \quad (5.2.8-15)$$

$$\zeta_o = 1 + 0.18\zeta^{-1.15} \quad (5.2.8-16)$$

$$\eta_o = 0.1 + 0.14\zeta^{-0.84} \quad (5.2.8-17)$$

2) 稳定承载力：

a) 当 $\frac{N}{N_c} \geq 2\varphi^3\eta_o$ 时：

$$\frac{N}{\varphi N_c} + \frac{a}{d} \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (5.2.8-18)$$

b) 当 $\frac{N}{N_c} < 2\varphi^3\eta_o$ 时：

$$\frac{-bN^2}{N_c^2} - \frac{cN}{N_c} + \frac{1}{d} \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (5.2.8-19)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2\eta_o \quad (5.2.8-20)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_o}{\varphi^3\eta_o^2} \quad (5.2.8-21)$$

$$c = \frac{2(\zeta_o - 1)}{\eta_o} \quad (5.2.8-22)$$

$$d = 1 - 0.4 \left(\frac{N}{N_E} \right) \quad (5.2.8-23)$$

式中：N —— 轴力设计值 (N)；

M —— 弯矩设计值 (N·mm)；

N_c —— 钢管混凝土轴心受压弦杆的强度承载力 (N)；

M_u —— 钢管混凝土弦杆的受弯承载力 (N·mm)；

N_E —— 欧拉临界力 (N)， $N_E = \pi^2 E_{sc} A_{sc} / \lambda^2$ ；

φ —— 弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定系数，按式 (5.2.1-3) 计算，或根据

附录 B 确定。

6 拉弯承载力应满足下式要求：

$$\frac{N}{1.1fA_s} + \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (5.2.8-24)$$

式中： M_u —— 钢管混凝土弦杆的受弯承载力（N·mm）；
 f —— 钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值（N/mm²）；
 A_s —— 钢管的横截面面积（mm²）。

7 受剪承载力（ V_{ul} ）应按下列公式计算：

$$V_{ul} = \gamma_v A_{sc} f_{sv} \quad (5.2.8-25)$$

$$\gamma_v = 0.97 + 0.2 \ln \xi \quad (5.2.8-26)$$

式中： V_{ul} —— 受剪承载力（N）；
 γ_v —— 受剪承载力计算系数；
 A_{sc} —— 钢管混凝土弦杆的横截面面积（mm²）；
 f_{sv} —— 抗剪强度设计值（N/mm²）；
 ξ —— 约束效应系数。

8 受扭承载力应按下列公式计算：

$$T_u = \gamma_t W_{sc,t} f_{sv} \quad (5.2.8-27)$$

$$\gamma_t = 1.294 + 0.267 \ln \xi \quad (5.2.8-28)$$

$$W_{sc,t} = \frac{\pi D^3}{16} \quad (5.2.8-29)$$

式中： T_u —— 受扭承载力（N）；
 γ_t —— 受扭承载力计算系数；
 $W_{sc,t}$ —— 截面扭转抵抗矩（mm³）。

9 压扭承载力应符合下列规定：

1) 强度承载力：

$$\left(\frac{N}{N_c}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-30)$$

式中： N_c —— 钢管混凝土弦杆的轴心受压承载力（N），按式（5.2.1-2）计算。

2) 稳定承载力：

$$\left(\frac{N}{\varphi N_c}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-31)$$

式中： φ —— 轴心受压钢管混凝土弦杆的稳定系数，按式（5.2.1-3）计算，或根据附录 B 确定。

10 压弯扭承载力应符合下列规定：

$$1) \text{ 当 } N/N_c \geq 2\varphi^3\eta_o \left[1 - \left(\frac{T}{T_u}\right)^2\right]^{0.417} \text{ 时:}$$

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-32)$$

$$2) \text{ 当 } N/N_c < 2\varphi^3\eta_o \left[1 - \left(\frac{T}{T_u}\right)^2\right]^{0.417} \text{ 时:}$$

$$\left[-b\left(\frac{N}{N_c}\right)^2 - c\left(\frac{N}{N_c}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-33)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2\eta_o \quad (5.2.8-34)$$

$$b = \frac{1 - \varsigma_e}{\varphi^3\eta_e^2} \quad (5.2.8-35)$$

$$c = \frac{2(\varsigma_e - 1)}{\eta_e} \quad (5.2.8-36)$$

$$d = 1 - 0.4\left(\frac{N}{N_E}\right) \quad (5.2.8-37)$$

$$\eta_e = (1 - \beta^2)^{0.417} \eta_o \quad (5.2.8-38)$$

$$\varsigma_e = (1 - \beta^2)^{0.417} \varsigma_o \quad (5.2.8-39)$$

$$\beta = \frac{T}{T_u} \quad (5.2.8-40)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{sc} A'_{sc}}{\lambda^2} \quad (5.2.8-41)$$

式中: ς_o 、 η_o ——系数, 按式(5.2.8-16)和式(5.2.8-17)计算。

11 弦杆的压弯剪承载力应符合下列规定:

$$1) \text{ 当 } N/N_c \geq 2\varphi^3\eta_o \left[1 - \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2\right]^{0.417} \text{ 时:}$$

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-42)$$

$$2) \text{ 当 } N/N_c < 2\varphi^3\eta_o \left[1 - \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2\right]^{0.417} \text{ 时:}$$

$$\left[-b\left(\frac{N}{N_c}\right)^2 - c\left(\frac{N}{N_c}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-43)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d ——系数, 按式(5.2.8-34)~式(5.2.8-37)的规定确定。

12 弦杆的压弯扭剪承载力应符合下列规定:

$$1) \text{ 当 } N/N_c \geq 2\varphi^3\eta_o \sqrt[2.4]{1 - \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 - \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2} \text{ 时:}$$

$$\left(\frac{1}{\phi} \cdot \frac{N}{N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-44)$$

2) 当 $N/N_c < 2\phi^3\eta_o^{2.4}\sqrt{1-\left(\frac{T}{T_u}\right)^2-\left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2}$ 时:

$$\left[-b\left(\frac{N}{N_c}\right)^2 - c\left(\frac{N}{N_c}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{V}{V_{ul}}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2.8-45)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d ——系数,按式(5.2.8-34)~式(5.2.8-37)的规定确定。

【条文说明】5.2.8 对于两端受压的曲线形桁式钢管混凝土构件,其跨中节间受轴力二阶效应的影响最为显著;同时由于端部节间受剪力影响最大,该剪力也会在弦杆内引起内力。因此,需要对跨中和端部节间的弦杆同时进行承载力验算。对于平腹式构件,如果忽略跨中节间附近的剪力,则其各弦杆将与斜腹式体系构件的弦杆一样基本处于轴心受力状态,因而二者都可按杆件长度和节间宽度相等的轴心受力构件进行承载力验算。

5.2.9 桁式钢管混凝土构件的腹杆承载力设计应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB50017 的相关规定,并应满足下列公式要求:

1 桁式钢管混凝土构件在轴心受压情况下的剪力由所有腹杆共同分担,并可按下式计算:

$$V = \frac{\sum A_{sc} f_{sc}}{85} \quad (5.2.9-1)$$

式中: f_{sc} ——单肢钢管混凝土弦杆的截面轴心抗压强度设计值(N/mm²)。

2 平腹杆曲线形桁式钢管混凝土构件在两端承受轴压荷载时,腹杆截面正应力(σ)不应大于钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值(f),并应按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{M}{\gamma_x W_x} \quad (5.2.9-2)$$

式中: M ——弯矩设计值(N·mm),按式(5.2.8-6)计算;

γ_x ——截面塑性发展系数,可偏安全地取 $\gamma_x = 1.0$;

W_x ——腹杆的截面模量(mm³)。

3 平腹杆曲线形桁式钢管混凝土构件在两端承受轴压荷载时,平腹杆轴力设计值(N_b)应按下列公式计算,并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

$$N_b = \frac{\pi}{m_b h} \frac{N u_o}{(1 - N/N_E)} \quad (5.2.9-3)$$

4 斜腹杆曲线形桁式钢管混凝土构件在两端承受轴压荷载时,斜腹杆轴力设计值(N_d)应按下列公式计算,并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

$$N_d = \frac{1}{m_b \sin \theta} \frac{\pi}{h} \frac{N u_o}{(1 - N/N_E)} \quad (5.2.9-4)$$

式中: θ ——斜腹杆与弦杆的夹角;

【条文说明】5.2.9 桁式钢管混凝土轴心受压构件腹杆剪力的计算参考了现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。计算分析结果表明，当腹杆直径较小或节间数目较少时，曲线形钢管混凝土结构的腹杆可能先于结构达到极限承载力而出现强度破坏，从而导致结构提前发生破坏。为此，有必要进行腹杆的承载力验算。基于理论推导，给出了腹杆承载力计算公式。

5.3 长期荷载作用下的正截面承载力计算

5.3.1 当永久荷载引起的单肢钢管混凝土弦杆轴心压力占全部轴心压力的50%及以上时，应计入长期荷载对钢管混凝土弦杆稳定承载力的影响。

5.3.2 考虑长期荷载影响的桁式钢管混凝土构件轴心受压稳定承载力设计值应乘以长期荷载作用折减系数（ k_{cr} ）， k_{cr} 可按下列公式计算。对于换算长细比不超过40的桁式钢管混凝土构件， k_{cr} 取1.0。

$$k_{cr} = \begin{cases} 1 - 0.07n & (a \leq 0.4) \\ 0.98 - 0.07n + 0.05a & (a > 0.4) \end{cases} \quad (5.3.2-1)$$

$$a = \frac{\lambda}{100} \quad (5.3.2-2)$$

$$n = \frac{N_l}{\varphi \sum N_c} \quad (5.3.2-3)$$

式中： n —— 长期荷载比；

N_l —— 作用于桁式钢管混凝土构件的长期轴压荷载（N），其中，长期轴压荷载按准永久组合确定；

$\varphi \sum N_c$ —— 桁式钢管混凝土构件轴心受压稳定承载力（N）；

λ —— 构件换算长细比。

【条文说明】5.3.1~5.3.2 在长期荷载作用下，由于钢管内核心混凝土会发生徐变和收缩变形，进而产生应力重分布现象，使钢材和混凝土的应力发生变化。此外，二阶效应对弯矩具有放大作用，因而使构件的极限承载能力有所下降。其下降幅度与构件长细比和长期荷载比有关。在工程常用参数范围内，根据有限元分析结果，提出长期荷载作用折减系数 k_{cr} 。

5.4 斜截面受剪承载力计算

5.4.1 桁式钢管混凝土构件受剪承载力应满足下列公式要求：

$$V < V_u \quad (5.4.1)$$

式中： V —— 剪力设计值（N）；

V_u —— 桁式钢管混凝土构件受剪承载力设计值（N）。

5.4.2 曲线形桁式钢管混凝土构件在两端承受轴压荷载时的剪力设计值应按下列公式计算：

$$V = \frac{\pi}{H} \frac{Nu_0}{(1 - N/N_E)} \quad (5.4.2)$$

式中： H —— 曲线形桁式钢管混凝土构件两端截面中心点的直线距离(mm)，见图 5.2.6；
 N —— 轴力设计值 (N)；
 N_E —— 由换算长细比计算得到的欧拉临界力 (N)， $N_E = \pi^2 \sum (E_{sc} A_{sc}) / \lambda^2$ ；
 u_0 —— 初始弯曲度 (mm)，即构件中截面的形心到构件两端截面形心连线的垂直距离，见图 5.2.6。

【条文说明】5.4.2 假定曲线形桁式钢管混凝土构件在端部受压产生挠曲的过程中，其挠曲线近似为正弦半波曲线，从而推导得出两端的最大剪力（图 5.4.2），所有腹杆按最不利条件设计。

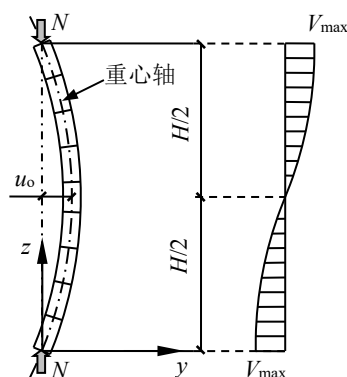


图 5.4.2 曲线形桁式钢管混凝土构件的剪力分布

5.4.3 平腹杆桁式钢管混凝土构件的受剪承载力应符合下列规定，并取两种情况的较小值：

1 弦杆受剪破坏：

$$V_u = 0.9 \sum V_{ul} \quad (5.4.3)$$

式中： V_{ul} —— 单根钢管混凝土弦杆的受剪承载力 (N)，应按式 (5.2.8-25) 计算。

2 腹杆弯剪破坏：

构件承载力主要由腹杆承载力控制时，腹杆的承载力计算应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

【条文说明】5.4.3 本条文参考现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936，给出了平腹杆桁式钢管混凝土构件的受剪承载力计算方法。对于平腹杆桁式钢管混凝土构件，当受到外部剪力作用时，对应的破坏模式主要有弦杆受剪破坏和腹杆弯剪破坏两种。式 (5.4.3) 对应的破坏模式为弦杆的受剪破坏。腹杆弯剪破坏情况下，构件承载力主要由腹杆承载力控制。构件整体受剪承载力由两种破坏模式中的较小受剪承载力控制。第 5.2.9 条中给出了腹杆设计中的剪力值，但其仅为限制桁式构件的单肢失稳破坏的剪力值；当有外部剪力时，腹杆剪力应通过整体计算得到。

5.4.4 斜腹杆桁式钢管混凝土构件的受剪承载力主要由腹杆轴向承载力控制，腹杆的承载力计算

应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

【条文说明】5.4.4 本条文参考现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936, 给出了斜腹杆桁式钢管混凝土构件的受剪承载力计算方法。对于斜腹杆桁式钢管混凝土构件, 受到的外部剪力作用主要由腹杆承担, 其受剪承载力由腹杆的拉、压承载力决定, 而非各弦杆的受剪承载力控制。第 5.2.9 条中给出了腹杆设计中的剪力值, 但其仅为限制桁式构件的单肢失稳破坏的剪力值; 当有外部剪力时, 腹杆剪力应通过整体计算得到。

5.5 抗撞击承载力计算

5.5.1 桁式钢管混凝土结构遭受车辆、船只等撞击时, 撞击荷载作用设计值可按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 中的有关规定执行。

5.5.2 为保障桁式钢管混凝土结构在使用全过程中的安全性, 减少撞击荷载作用对结构可能产生的损伤和破坏, 宜在结构设计中采取有效防撞措施。

5.5.3 撞击荷载作用影响下的桁式钢管混凝土构件受弯承载力应按下式计算:

$$M_{ud} = R_d M_u \quad (5.5.3)$$

式中: M_{ud} —— 动力受弯承载力设计值 (N·mm);

R_d —— 动力影响系数;

M_u —— 静力受弯承载力设计值 (N·mm)。

5.5.4 钢管混凝土弦杆的动力影响系数 (R_d) 可按下列公式计算:

$$R_d = 1.4912f(f_y) \cdot f(\alpha_s) \cdot f(D) \cdot f(V_0) \quad (5.5.4-1)$$

$$f(f_y) = -4 \times 10^{-7} f_y^2 + 8 \times 10^{-5} f_y + 1.0171 \quad (5.5.4-2)$$

$$f(\alpha_s) = -3.658\alpha_s^2 - 0.8964\alpha_s + 1.1276 \quad (5.5.4-3)$$

$$f(D) = 7 \times 10^{-7} D^2 - 0.0013D + 1.4019 \quad (5.5.4-4)$$

$$f(V_0) = -0.001V_0^2 + 0.0508V_0 + 0.3849 \quad (5.5.4-5)$$

式中: f_y —— 钢材屈服强度 (N/mm²);

α_s —— 截面含钢率;

D —— 钢管外直径 (mm);

V_0 —— 撞击物速度 (m/s)。

【条文说明】5.5.4 式 (5.5.4-1) 为两端铰接的单根圆钢管混凝土构件中部遭受刚体侧向撞击时的动力极限弯矩。对于其他工况, 如多根弦杆或腹杆遭受撞击作用, 以及由车辆等产生的柔性撞击等, 可偏于安全地参考此公式进行计算。

公式中各参数适用范围为: 钢材 Q235~Q460, 混凝土 C30~C60, 截面含钢率 0.06~0.20, 钢管外直径 300mm~600mm, 撞击物质量 1000kg~3000kg, 撞击物速度 10m/s~28m/s。

6 节点和连接设计

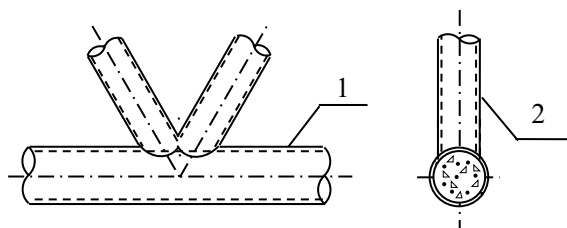
6.1 一般规定

6.1.1 桁式钢管混凝土结构节点和连接的设计应满足强度、刚度、稳定性和抗震的要求；节点和连接的设计应保证力的传递、钢管与其核心混凝土共同工作，并应便于制作、安装和核心混凝土的浇筑施工。

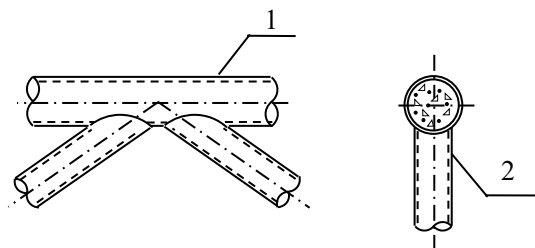
【条文说明】6.1.1 本条明确了在桁式钢管混凝土结构中的节点和连接设计的基本要求。

6.1.2 桁式钢管混凝土结构的节点和连接构造宜简单，结构受力应明确，各受力杆件的形心线宜汇交于一点。

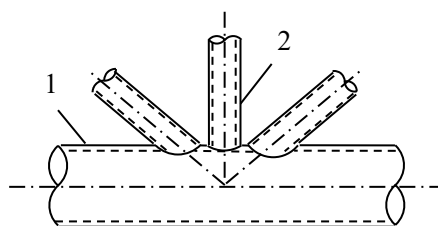
【条文说明】6.1.2 桁式钢管混凝土结构搭接 K 形节点、间隙 K 形节点，KT 形节点、空间 TT 形节点和空间 KK 形节点等如图 6.1.2 所示。



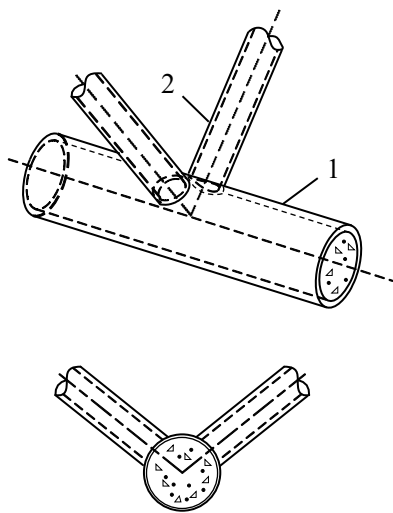
(a) 搭接 K 形节点



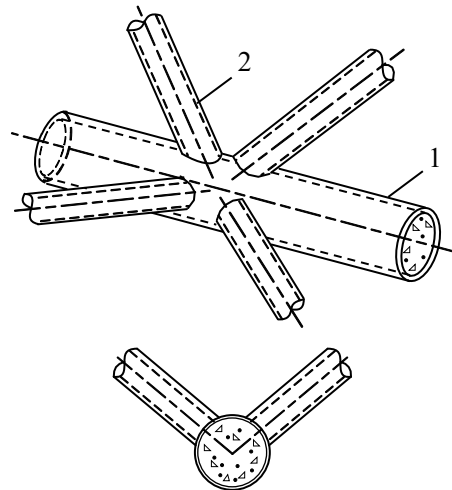
(b) 间隙 K 形节点



(c) KT 形节点



(d) TT形节点



(e) KK形节点

图 6.1.2 桁式钢管混凝土结构常用的节点形式

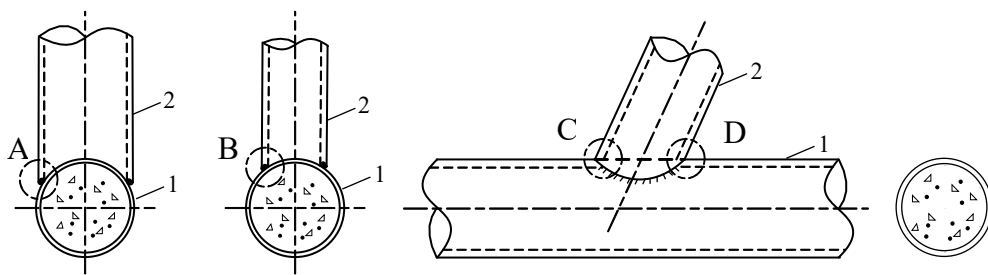
1—钢管混凝土弦杆；2—钢管腹杆

6.1.3 采用焊缝连接的桁式钢管混凝土相贯节点，腹杆沿着相贯线应采用坡口对接焊缝或角焊缝进行连接，且焊条应与钢管的型号匹配。当腹杆与弦杆间夹角小于 60° 时，不宜采用角焊缝进行连接，宜采用坡口对接焊缝进行连接。采用角焊缝连接的桁式钢管混凝土相贯节点的角焊缝连接强度不应低于腹杆承载力，角焊缝的有效焊脚尺寸 (h_e) 应满足下式要求 (图 6.1.3)：

$$h_e \geq \begin{cases} t & (\text{Q235}) \\ 1.2t & (\text{Q355、Q345GJ}) \\ 1.5t & (\text{Q390、Q420和Q460}) \end{cases} \quad (6.1.3)$$

式中： h_e —— 有效焊脚尺寸 (mm)；

t —— 腹杆壁厚 (mm)。



(a) 焊接相贯节点 (A 点表示腹杆和弦杆直径相同时鞍点部位，B 点表示腹杆直径小于弦杆直径时鞍点位置，C 点表示冠趾，D 点表示冠跟)

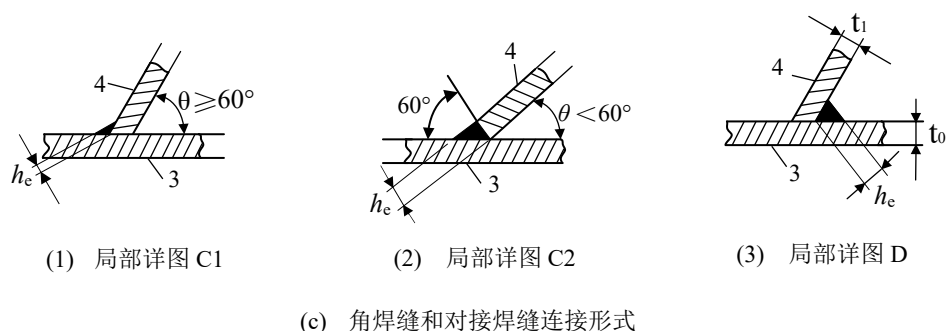
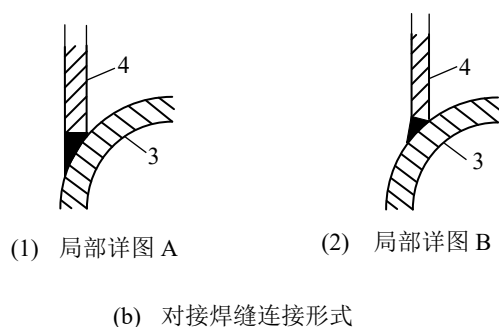


图 6.1.3 焊接相贯节点焊缝连接形式

1—弦杆；2—腹杆；3—弦杆管壁；4—腹杆管壁

【条文说明】6.1.3 桁式钢管混凝土焊接相贯钢管节点承载力设计遵循“强节点、弱构件”原则。当采用坡口对接焊缝时，能够满足焊缝强度不低于腹杆屈服承载力；当采用角焊缝连接时，为了满足焊缝强度不低于腹杆屈服承载力，参考 CIDECT 和 EC3 规范中的规定，对角焊缝有效焊角尺寸进行了限定（欧洲规范 EC3 规定：S235 钢： $h_e \geq 0.92t$ ；S275 钢： $h_e \geq 0.96t$ ；S355 钢： $h_e \geq 1.10t$ ；S420 钢： $h_e \geq 1.42t$ ；S460 钢： $h_e \geq 1.48t$ 。安全起见，本条文规定的有效焊脚尺寸略大于 EC3 中的规定限值）。考虑到腹杆和弦杆夹角小于 60° 时，采用角焊缝连接在相贯线根部很难保证焊接质量，故限定角度小于 60° 时，宜采用开坡口的对接焊缝连接形式。

6.1.4 对于腹杆搭接的 K 形和 N 形平面节点，当两个腹杆直径不相同，直径较大的腹杆应直接焊接到弦杆上，直径较小的腹杆应搭接到直径较大的腹杆上；当两个腹杆直径相同时，承受较大荷载的腹杆应直接焊接到弦杆上，承受较小荷载的腹杆应搭接到承受较大荷载的腹杆上。

【条文说明】6.1.4 对于腹杆搭接的 K 形、N 形平面节点，参考 CIDECT 规定，规定了 K 形、N 形平面搭接节点中两个腹杆搭接方式。

6.1.5 对三肢和四肢桁式钢管混凝土构件，在受有较大水平力处和运送单元的端部应设置横隔，横隔的间距不得大于 8m 和构件截面较大宽度的 9 倍。

【条文说明】6.1.5 本条参照了现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

6.1.6 桁式钢管混凝土节点中腹杆和弦杆采用节点板与螺栓连接时，腹杆端部的插板可采用 U 形板、槽形板、T 字形板或十字形板（图 6.1.6），其中 U 形板开口间隙可比节点板的厚度大 2mm～3mm。插板插入钢管的焊接长度应按内力计算确定，并计及焊缝末端的无效长度，焊缝末端的无效长度宜取 10mm，但最小焊缝长度应取 50mm 或 10 倍焊脚高度的较小值。

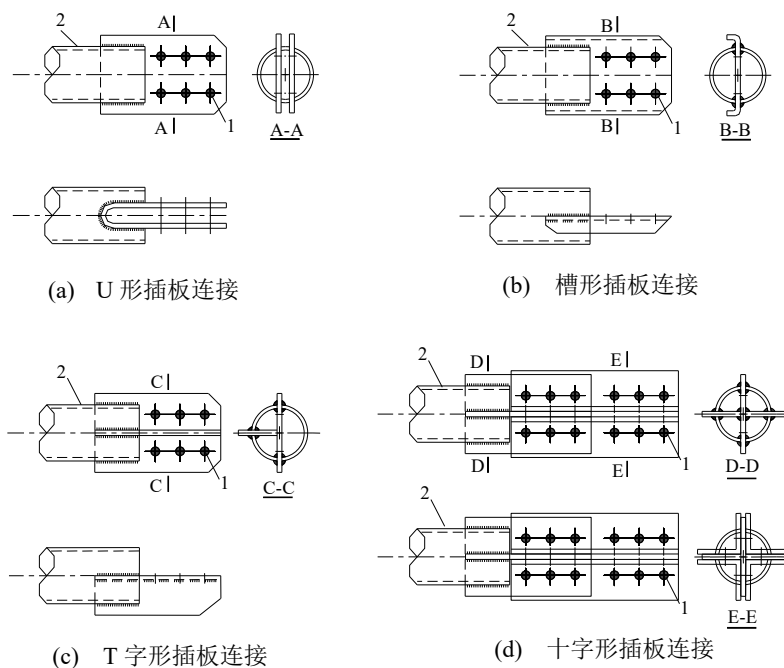


图 6.1.6 不同类型的腹杆端部插板连接构造形式

1—螺栓；2—腹杆

【条文说明】6.1.6 本条参照了国家现行标准《输电线路钢管塔构造设计规定》Q/GDW 391 和《特高压架空输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T 5486 的相关规定。

6.1.7 桁式钢管混凝土结构节点采用节点板连接时，可在节点板两侧设置环形或扇形加劲板（图 6.1.7），其所对应的圆心角不宜小于 30° ，位于同一平面内的相邻加劲板应连成为一块。当节点板自由边的长度与厚度之比值大于 $60\sqrt{235/f_y}$ 时，宜在中间设置一道环向加劲板。节点板的承载力计算应满足国家现行标准《特高压架空输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T 5486 和《钢结构设计标准》GB 50017 的有关要求。

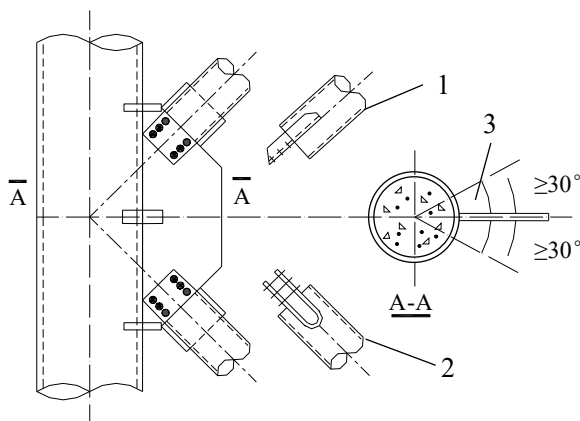


图 6.1.7 节点板连接构造形式

1— 槽形插板；2— U 形插板；3— 扇形加劲板

【条文说明】6.1.7 本条节点板连接的构造措施及承载力计算参照了国家现行标准《特高压架空

输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T 5486 和《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

6.2 K 形平面节点设计

6.2.1 桁式钢管混凝土结构 K 形连接节点的构造应符合下列规定：

- 1 在弦杆与腹杆的连接处不得将腹杆插入弦杆内；
- 2 腹杆与弦杆的连接节点处应避免偏心；偏心不可避免时，应满足下列公式的要求（图 6.2.1）；

$$-0.55 \leq \frac{e}{D} \leq 0.25 \quad (6.2.1-1)$$

式中： e —— 偏心距；

D —— 弦杆钢管外直径（mm）。

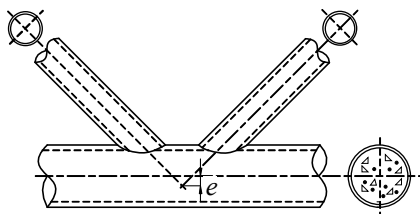


图 6.2.1-1 K 形平面节点偏心距 e

- 3 腹杆搭接的 K 形、N 形平面节点，其搭接率 η_{ov} 可按下式计算，且不应小于 25%，并不应大于 100%。

$$\eta_{ov} = \frac{q}{p} \cdot 100\% \quad (6.2.1-2)$$

- 式中：
- q —— 腹杆 1 由于搭接在腹杆 2 上而减少的与弦杆表面相交的两个冠点之间的直线距离（图 6.2.1-2）（mm）；
 - p —— 腹杆 1 在未搭接在腹杆 2 上而与弦杆表面相交的两个冠点之间的直线距离（图 6.2.1-2）（mm）。

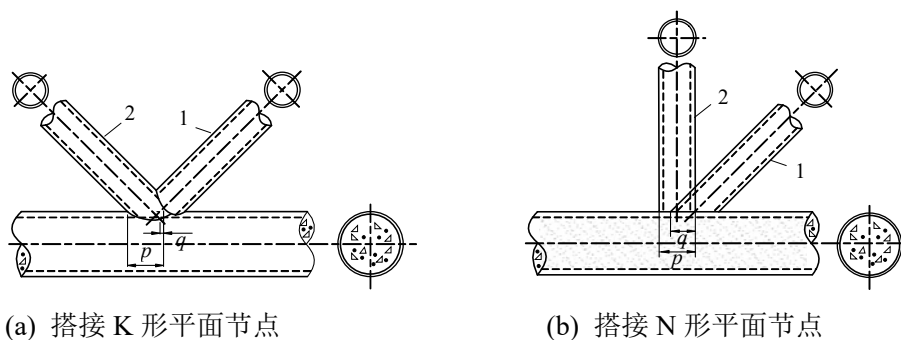


图 6.2.1-2 搭接 K 形、N 形平面节点

1— 腹杆 1；2— 腹杆 2

- 4 对于间隙 K 形、N 形平面节点，在弦杆表面焊接的相邻腹杆的间隙不应小于两腹杆钢管壁厚之和。

【条文说明】6.2.1 本节各项构造规定是用于保证桁式钢管混凝土结构 K 形平面节点的焊接方便和施工质量，从而保证实现计算规定的各种性能。

桁式钢管混凝土构件在一定条件下可近似按铰接杆件体系进行内力分析，因此节点连接处应尽可能避免偏心。但当偏心不可避免但未超过式 (6.2.1-1) 限制时，在计算节点和受拉弦杆承载力时，可不考虑偏心引起的弯矩作用，在计算受压弦杆承载力时应考虑偏心弯矩的影响；搭接形连接时，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

6.2.2 桁式钢管混凝土结构在浇筑混凝土前的空心 K 形平面节点的受压腹杆和受拉腹杆在节点处的承载力应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定进行验算。

【条文说明】6.2.2 桁式钢管混凝土结构用于桥梁工程时，弦杆的钢管混凝土分期形成，弦杆混凝土浇筑前后，其节点破坏行为各不相同。在弦杆钢管内混凝土浇筑前，节点为空心焊接相贯节点，破坏形式主要是弦杆的塑性失效或冲剪破坏。因此，需要控制腹杆内力的大小，对空心节点进行承载力验算。

6.2.3 桁式钢管混凝土结构间隙 K 形平面节点中受压和受拉腹杆的承载力计算应满足下列要求：

1 受拉腹杆的轴心受拉承载力应按下式计算：

$$N_{ti} = \min \left(f_v t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1}, f_i A_t \right) \quad (6.2.3-1)$$

式中： N_{ti} —— 受拉腹杆轴心受拉承载力 (N)；

f_v —— 弦杆钢管的剪切强度设计值 (N/mm²)；

f_i —— 腹杆钢管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

t_0 —— 弦杆钢管管壁厚度 (mm)；

d_i —— 受拉腹杆钢管外直径 (mm)；

θ_1 —— 腹受拉杆与弦杆间夹角；

A_t —— 受拉腹杆横截面面积 (mm²)。

2 受压腹杆的轴心受压承载力应按下列公式计算：

$$N_c = \kappa f_i \pi t_j (d_j - t_j) \quad (6.2.3-2)$$

$$\kappa = \begin{cases} 1 & \lambda_{sx} \leq 0.25 \\ 1.233 - 0.933 \lambda_{sx} & 0.25 < \lambda_{sx} \leq 1.0 \\ 0.3 / \lambda_{sx}^3 & 1.0 < \lambda_{sx} \leq 1.5 \\ 0.2 / \lambda_{sx}^2 & \lambda_{sx} > 1.5 \end{cases} \quad (6.2.3-3)$$

$$\lambda_{sx} = \sqrt{\frac{f_{yi}}{\sigma_{x,cr}}} \quad (6.2.3-3)$$

$$\sigma_{x,cr} = 0.605 \times 2 E_s t_j / d_j \quad (6.2.3-4)$$

式中： N_{ci} —— 受压腹杆轴心受压承载力 (N)；

t_j —— 受压腹杆钢管管壁厚度 (mm)；

- d_j —— 受压腹杆钢管外直径 (mm) ;
- κ —— 考虑长细比、加载状况及几何初始缺陷等影响的折减系数;
- f_{yi} —— 腹杆钢管钢材的屈服强度 (N/mm²) ;
- $\sigma_{x,cr}$ —— 受压腹杆理想屈曲应力 (N/mm²) ;
- E_s —— 受压腹杆钢材弹性模量 (N/mm²) 。

【条文说明】6.2.3 弦杆内填充混凝土后可显著增大节点的刚度和受压承载力。试验研究结果表明, 桁式钢管混凝土 K 形节点的失效模式主要有: 受压腹杆接头的局部屈曲、受拉腹杆接头四周弦杆冲剪破坏、受拉腹杆屈服破坏 (拉断)。当腹杆壁厚较小时, 腹杆也可能发生屈服失效, 因此对桁式钢管混凝土 K 形节点受拉腹杆的轴心受拉承载力取弦杆冲剪破坏和腹杆屈服失效两种承载力的较小值。受压腹杆对弦杆的压力主要由混凝土承受, 弦杆一般不会发生失效, 但腹杆受压容易产生屈曲, 故受压腹杆的承载力按屈曲失效临界荷载计算。腹杆受压屈曲失效参考了 DIN18800-4 的计算公式。由于受压腹杆屈曲承载力不低于其屈服荷载, 因此也可以作为腹杆受压屈服承载力计算公式。考虑到 N 形钢管混凝土节点属于 K 形节点一种特殊形式, 上述公式也可用于 N 形节点腹杆承载力计算。

6.2.4 桁式钢管混凝土结构 K 形节点区侧向可能出现混凝土局部承压破坏 (图 6.2.4), 应进行侧向局部受压承载力计算。侧向局部受压承载力 (N_{uLF}) 不应小于作用在节点区单肢钢管混凝土弦杆的侧向局部压力设计值 (N_{LF}), 并按下列公式计算:

$$N_{uLF} = \beta_c \beta_l f_c \frac{A_l}{\sin \theta} \quad (6.2.4-1)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (6.2.4-2)$$

$$A_l = \pi d^2 / 4 \quad (6.2.4-3)$$

$$A_b = \frac{A_l}{\sin \theta} + 2dD \quad (6.2.4-4)$$

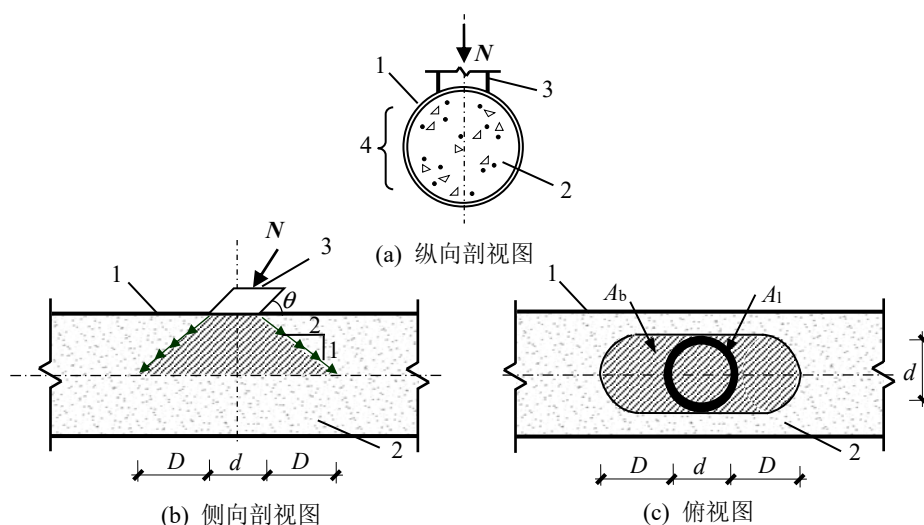


图 6.2.4 节点区核心混凝土侧向局部受压传力示意图

1—钢管; 2— 核心混凝土; 3— 腹杆; 4— 弦杆;

式中： N_{LF} — 作用在节点区弦杆的侧向局部压力设计值（N）；
 N_{uLF} — 弦杆的侧向局部受压承载力（N）；
 f_c — 混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm²）；
 θ — 传递侧向局部压力的腹杆与弦杆的夹角；
 β_1 — 侧向局部受压时混凝土强度提高系数；
 A_1 — 钢管混凝土的局部受压面积，取为外直径相等的实心腹杆的横截面面积（mm²）；
 D — 承受侧向力的弦杆直径（mm）；
 d — 传递侧向力的腹杆直径（mm）；
 A_b — 侧向局部受压的计算底面积（mm²）；
 β_c — 侧向局部受压时混凝土强度影响系数，按表 6.2.4 确定。

表 6.2.4 β_c 取值表

$\sqrt{\frac{A_1}{A_b}} \frac{f_y}{f_{ck}}$	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	≥ 3.0
β_c	1.07	1.22	1.47	1.67	1.87	2.00

注：表内中间值可采用插值法求得。

【条文说明】6.2.4 试验结果表明，腹杆传递来的侧向局部压力可以在弦杆混凝土中有效延伸传递。对于弦杆、腹杆均为圆形截面的情况，侧向局部压应力沿弦杆横向的传递路径受圆形截面边缘与腹弦杆管径比控制，在腹弦杆管径比相对较大时将较快达到弦杆混凝土与钢管的边缘；因此，在图 6.2.4(c)的传力示意图中偏于安全的将其忽略，仅考虑侧向局部压应力沿弦杆轴向的传递路径。此外，随着腹弦杆夹角 θ 的变化，侧向局部压应力在弦杆混凝土中的传递方向和斜率会有变化；经试验与有限元分析，在图 6.2.4(c)中将应力传递方向偏安全的简化为按 2:1（水平：竖直）的斜率对称传递。

6.2.5 在桁式钢管混凝土结构的节点处，腹杆沿周边应与弦杆钢管相焊；腹杆互相搭接处，搭接腹杆沿搭接边应与被搭接腹杆相焊。

【条文说明】6.2.5 应采取有效措施防止焊缝先于节点其他部位发生破坏。

6.3 T 形、Y 形和 X 形平面节点设计

6.3.1 桁式钢管混凝土结构 T 形、Y 形和 X 形平面连接节点的构造应符合 4.1.6 和 6.1.2 条的规定。

6.3.2 桁式钢管混凝土结构在浇筑混凝土前的空心 T 形、Y 形和 X 形平面连接节点的受压腹杆和受拉腹杆在节点处的承载力，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定进行验算。

6.3.3 桁式钢管混凝土结构 T 形、Y 形和 X 形平面连接节点（图 6.3.3）中受压和受拉腹杆的承载力计算应满足下列要求：

- 1 受拉腹杆的轴心受拉承载力应按式（6.2.3-1）计算；
- 2 受压腹杆的轴心受压承载力应按式（6.2.3-2）计算。

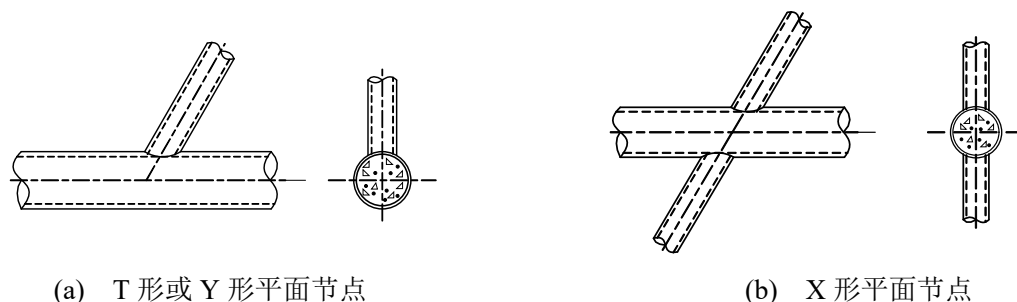


图 6.3.3 T 形、Y 形和 X 形平面节点

【条文说明】6.3.3 弦杆内填混凝土后，弦杆刚度得到显著改善，弦杆变形得到有效限制，因此不同类型节点的腹杆失效模式类同，主要是受压屈曲和受拉断裂或冲剪破坏。故对桁式钢管混凝土 T、Y 和 X 形平面节点承载力计算可采用相同的公式。

6.3.4 桁式钢管混凝土结构 T 形、Y 形和 X 形平面连接节点区侧向可能出现混凝土局部承压破坏，应按 6.2.4 条进行侧向局部受压承载力验算，其中 T 形平面节点腹杆与钢管混凝土弦杆的夹角 θ 取为 90° 。

6.4 空间节点设计

6.4.1 桁式钢管混凝土结构空间节点的构造应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

6.4.2 桁式钢管混凝土结构空间节点的腹杆在节点处的承载力设计值，应按相应的平面连接节点承载力设计值乘以空间调整系数计算。空间调整系数的取值应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。

【条文说明】6.4.2 由于空间效应和内填混凝土对弦杆刚度的改善，空间钢管混凝土节点承载力应乘以空间调整系数计算。

6.5 构件与基础、构件与构件连接节点构造

6.5.1 桁式钢管混凝土结构的弦杆与基础可采用端承式连接、埋入式或插入式连接（图 6.5.1）。端承式连接（图 6.5.1-1）的承压板直径（或边长）宜为 $1.5\sim 2.0D$ ，厚度不宜小于 25.0mm （ D 为钢管混凝土弦杆直径）；埋入式连接（图 6.5.1-2）的埋入深度应大于 $1.5D$ 且不小于 1.0m ，在预埋段应设置分布环向筋、焊钉或 PBL 剪力键等锚固构造；插入式连接（图 6.5.1-3）沿插入段管身纵向设置锚固环板，锚固环板宜加劲，插入钢管底部可设置端板。

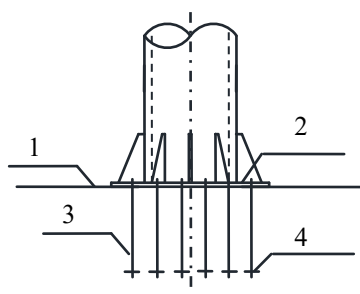


图 6.5.1-1 端承式连接

1—基础；2—加劲法兰；3—地锚螺栓；4—锚板

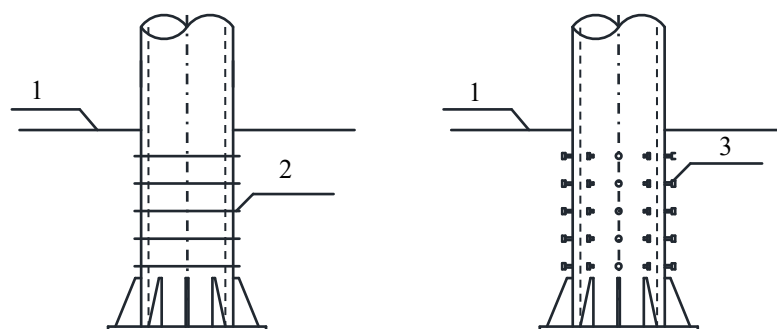


图 6.5.1-2 埋入式连接

1—基础顶面；2—贴焊钢筋环；3—圆头焊钉

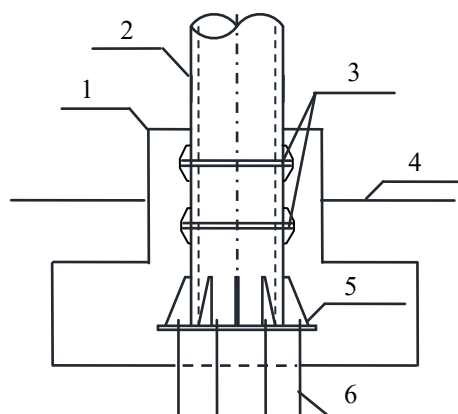


图 6.5.1-3 插入式连接

1—基础立柱及底板；2—钢管；3—锚固环板；4—地面；5—底部端板和加劲肋；6—锚固措施

6.5.2 对设置加劲焊接锚固环板的插入式构件与基础连接，尚应符合如下规定：

- 1) 插入钢管宜埋入基础底板;
- 2) 锚固环板宜按小而多的模式布置, 锚固环板的宽度 b_p 和数量应根据承载力要求并综合考虑锚固环板布置间距、基础立柱长度及底板厚度等条件优化确定, 锚固环板宽度 b_p 不宜大于 $1/10$ 插入钢管外径;
- 3) 锚固环板宜沿插入钢管纵向等间距布置, 第一块锚固环板距离立柱混凝土顶面的距离不宜小于 $8\sim 10 b_p$, 各锚固环板间的间距不宜小于 $8\sim 10 b_p$, 底部端板与其上方邻近锚固环板的距离不宜小于 $8\sim 10 b_p$ 且大于加劲肋板高度;
- 4) 基础立柱对插入钢管的外包混凝土厚度不应小于 $4 b_p$;
- 5) 对基础立柱, 插入钢管外围的竖向钢筋、箍筋的构造要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑抗震设计规范》GB 50011 的相关规定;
- 6) 插入钢管底部应设置可靠的固定措施, 应分别针对初始安装、长期使用两种状态下的受力情况, 校验固定措施强度和地基承载力。

6.5.3 桁式钢管混凝土主拱与拱座的连接构造, 宜采用预埋钢管插入拱座, 预埋管与主拱节段应采用焊接对接接头。预埋深度不得小于 $1.5D$, 预埋钢管底部应设置承压板, 其下应设置不少于三层钢筋网, 在钢管周边应设置分布环向筋、焊钉或 PBL 剪力键等锚固构造。承压板与管壁间应按构造要求设置带孔加劲肋板 (图 6.5.3)。

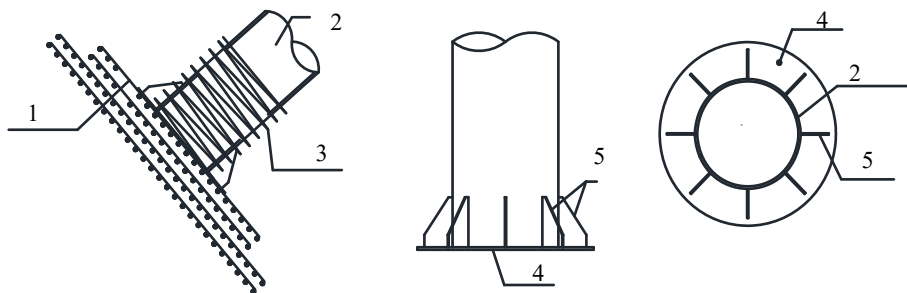
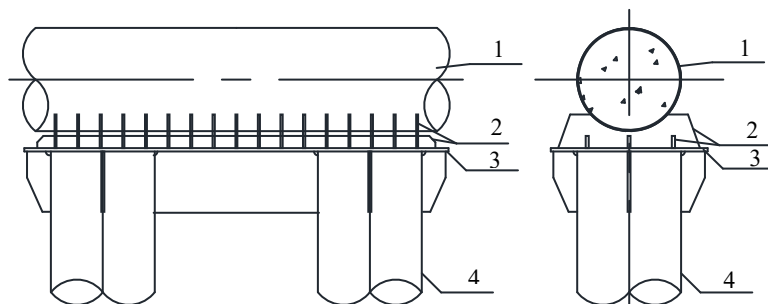


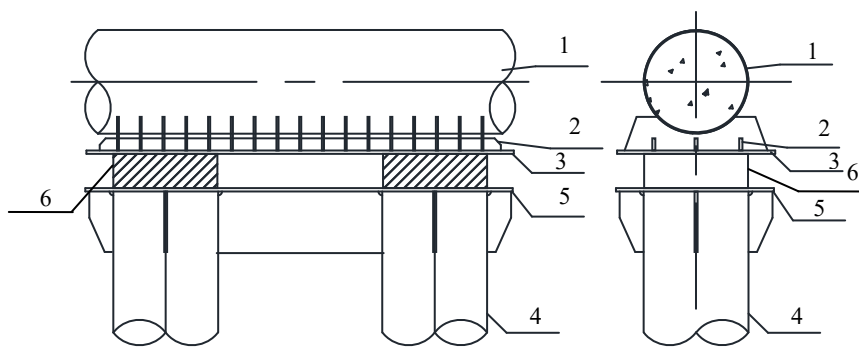
图 6.5.3 主拱与拱座的连接构造

1— 钢筋网片; 2— 弦杆预埋段; 3— 螺旋钢筋; 4— 承压板; 5— 加劲肋;

6.5.4 钢管混凝土桁式墩与钢管混凝土桁式主梁间宜采取设置加劲肋板的支座进行连接 (图 6.5.4), 支座尺寸应根据上部结构主梁的荷载进行确定。



(a) 墩、梁固结构造示意图



(b) 墩、梁支撑构造示意图

图 6.5.4 墩、桁式主梁连接构造示意图

1— 桁梁弦杆；2— 加劲肋板；3— 底座钢板；4— 墩柱；5— 墩顶盖板；6— 支座

6.6 节点抗疲劳设计

6.6.1 直接承受动力荷载重复作用的桁式钢管混凝土结构焊接节点，当应力变化的循环次数 n 等于或大于 5×10^4 次时，应进行疲劳计算。应力循环中不出现拉应力的部位，可不进行疲劳计算。

6.6.2 本节规定不适用于特殊条件下（如构件表面温度大于 150°C ，处于海水腐蚀环境，焊后消除残余应力以及低周-高应变疲劳条件等）桁式钢管混凝土结构焊接节点的疲劳计算。

【条文说明】6.6.1~6.6.2 参考现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 有关钢结构疲劳计算的一般规定。

6.6.3 需计算疲劳设计的桁式钢管混凝土结构所用钢材的质量、节点构造及焊接等，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定，同时尚需满足下列要求：

- 1 腹杆和弦杆外直径之比不应小于 0.4，弦杆的外直径和壁厚之比不应小于 40；
- 2 空钢管腹杆的长度和外直径之比不应大于 40；
- 3 相贯焊接节点不应采用加劲板或插入式节点板的连接形式；
- 4 在腹杆与弦杆连接处不得将腹杆插入弦杆内；
- 5 腹杆与弦杆的连接节点处，除搭接型节点外，应尽可能避免偏心；
- 6 腹杆与弦杆的连接焊缝，应沿全周连续焊接并平滑过渡，可用角焊缝或部分采用对接焊缝、部分采用角焊缝。腹杆管壁与弦杆管壁之间的夹角大于或等于 120° 的区域宜用对接焊缝或带坡口的角焊缝。角焊缝的有效焊脚尺寸 h_e 不宜大于腹杆壁厚的 2 倍。相贯焊缝的构造要求应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 的有关规定；
- 7 腹杆与弦杆相贯焊缝上坡口部位焊缝根部 2~3mm 范围内的焊缝检测可不作全熔透要求。
- 8 腹杆端部宜使用自动切割，腹杆壁厚小于 6mm 时可不切坡口；
- 9 多个腹杆直接交汇的桁式钢管混凝土结构焊接节点，当腹杆之间存在搭接时，则被搭接腹杆的隐藏部位应予以焊接。

10 连接部位可采用打磨焊缝、重熔焊趾、喷丸或锤击等措施改善疲劳性能。

【条文说明】6.6.3 1~3 参考了国家现行规范《公路钢管混凝土拱桥设计规范》JTG/T D65-06 的有关条文。

9 当多个腹杆直接焊接交汇于弦杆存在搭接情况时，若被搭接腹杆的隐藏部位不予焊接，相当于节点处存在一个裂口，在疲劳荷载反复作用下该处容易形成裂纹并不断扩展。因此，为了确保节点耐疲劳的可靠性，被搭接腹杆的隐藏部位应予以焊接。

6.6.4 桁式钢管混凝土结构相贯焊接节点的疲劳计算宜采用热点应力幅法，节点的热点应力可按以下公式计算：

$$\sigma_{hs} = SCF \cdot \sigma \quad (6.6.4)$$

式中： σ_{hs} — 弦杆或腹杆在冠点或鞍点位置需验算钢管热点应力（N/mm²）；
 σ — 弦杆或腹杆的圆钢管名义应力（N/mm²），按照杆件相应的内力（轴力 N 、弯矩 M ）按照材料力学方法计算；
SCF — 弦杆或腹杆在冠点或鞍点位置的圆钢管热点应力集中系数；

相贯焊接的 T 形节点、K 形间隙节点的热点应力集中系数 SCF 及其对应的热点应力，可采用附录 C 进行计算。对其他形式的节点，可采用数值分析或试验方法获得。

【条文说明】6.6.4 钢结构疲劳设计国内外通常采用基于名义应力幅的构造分类法，即根据各种具体的、不同的构造细节，提出相应的 S-N 曲线（疲劳强度-寿命）计算方法。对于钢管结构的疲劳设计，国际上早期也是采用构造分类法。但随着钢管桁架日益广泛的应用，节点形式众多，几何参数又不尽相同，国际上开始研究并采用热点应力幅法。热点应力是指钢管相贯焊接在弦杆或腹杆焊趾处的最大的几何应力，其计入节点几何形状和荷载的影响，但不计入由于施工形成的焊缝几何形状（平、凸、凹）和焊趾局部状况（焊趾半径、咬边等）的影响，图 6.6.4-1 为弦杆焊趾处的热点应力示意图。热点应力的位置就是钢管节点容易疲劳开裂的位置。热点应力幅法就是根据节点的热点应力集中系数公式计算出节点的热点应力幅，应用基于热点应力幅的 S-N 疲劳强度寿命曲线可计算节点的疲劳强度或疲劳寿命。热点应力集中系数计算公式通过试验、有限元数值分析等方法回归得到。国际焊接协会 Fatigue Design Procedures for Welded Hollow Section Joints（IIW 2000）和国际管结构发展与研究协会 Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Section Welded Joints under Fatigue Loading（CIDECT，2001）都详细地给出了钢管节点基于热点应力幅法的疲劳计算方法。

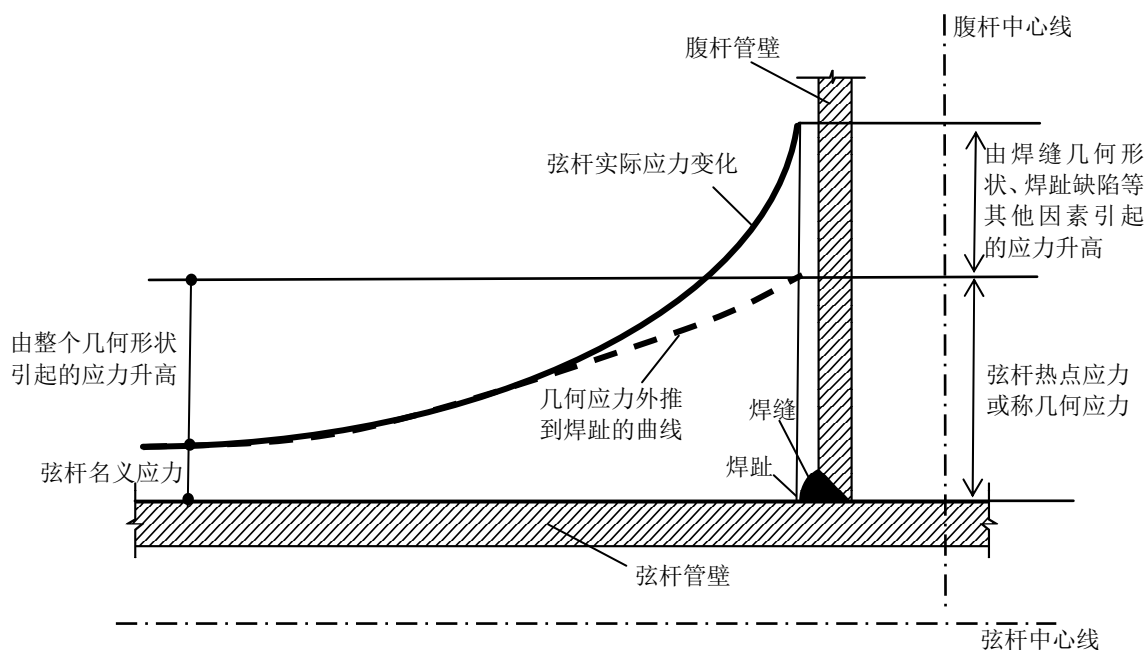
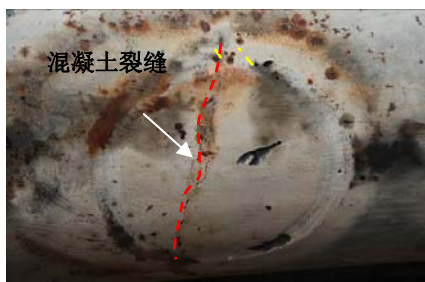


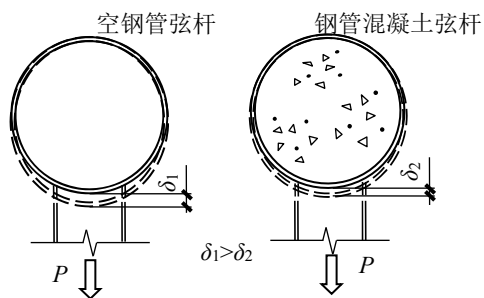
图 6.6.4-1 弦杆应力分布与热点应力概念示意图



(a) 焊接节点疲劳裂纹



(b) 节点区混凝土裂缝



(c) 节点区域变形示意图

图 6.6.4-2 桁式钢管混凝土相贯焊接节点疲劳裂纹和局部变形

相对于空钢管连接节点，在钢管弦杆中填充混凝土可有效提高节点的承载能力，并使弦杆的整体和局部刚度增大。在相同外荷载作用下，钢管混凝土弦杆-钢管腹杆连接节点的变形更小，产生的局部应力更小。有关桁式钢管混凝土桥梁工程实体观测、结构模型试验及理论分析研究均表明，钢管混凝土弦杆-钢管腹杆连接节点的疲劳性能优于相同尺寸和加载工况的空钢管节点。试验结果表明，在承受相同荷载时，钢管混凝土弦杆的局部变形和应力集中系数显著小于空钢管主管；

相贯焊连接节点的裂缝通常萌生于弦杆冠点或鞍点焊缝附近位置；混凝土受拉部分通常会出现较明显的裂纹（图 6.4.4-2）。

桁式钢管混凝土相贯焊接 T 形和 K 形节点疲劳性能的试验和有限元数值分析研究结果表明，在钢管相同几何参数的情况下，钢管混凝土节点的热点应力集中系数显著小于空钢管节点；混凝土不同的强度标号对节点的热点应力集中系数没有影响。这一特性缘于弦杆内填充的混凝土不仅提高了空钢管的节点刚度，更重要地是使节点刚度分布均匀，使节点应力分布变得均匀。相比受压部位，受拉部位的热点应力集中系数大一些。研究提出了圆钢管混凝土相贯焊接 T 形、K 形间隙节点的热点应力集中系数计算公式。

6.6.5 在桁式钢管混凝土结构设计寿命期内，当常幅疲劳下相贯焊接节点的圆钢管热点应力幅符合下列公式时，则疲劳强度满足要求。

$$\Delta\sigma_{hs} \leq \gamma_t [\Delta\sigma_{hs}] \quad (6.6.5-1)$$

$$\Delta\sigma_{hs} = \sigma_{hs,max} - \sigma_{hs,min} \quad (6.6.5-2)$$

当 $N < 5 \times 10^6$ 时：

$$[\Delta\sigma_{hs}] = \left(\frac{C}{N} \right)^{1/\beta} \quad (6.6.5-3)$$

当 $N \geq 5 \times 10^6$ 时：

$$[\Delta\sigma_{hs}] = [\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6} \quad (6.6.5-4)$$

式中：

- $\Delta\sigma_{hs}$ — 弦杆或腹杆在冠点或鞍点位置的圆钢管热点应力幅（N/mm²）；
- $\sigma_{hs,max}$ — 弦杆或腹杆的圆钢管在应力循环作用中的最大热点拉应力（N/mm²），取正值；
- $\sigma_{hs,min}$ — 弦杆或腹杆的圆钢管在应力循环作用中的最小热点拉应力或压应力（N/mm²），拉应力取正值，压应力取负值；
- $[\Delta\sigma_{hs}]$ — 常幅疲劳的容许热点应力幅（N/mm²）；
- γ_t — 钢管壁厚修正系数，仅当钢管壁厚 t 大于 25mm 时，考虑对疲劳强度的修正，可按照 $\gamma_t = (25/t)^{0.25}$ 计算；
- N — 疲劳寿命（应力循环次数）；
- C, β — 系数，按表 6.6.5 采用；
- $[\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ — 以疲劳寿命达到 $N = 5 \times 10^6$ 次为基准的常幅疲劳极限（N/mm²），按表 6.6.5 采用；

表 6.6.5 疲劳强度的计算参数

节点形式	系数		应力循环 2×10^6 次的容许热点应力幅 $[\Delta\sigma_{hs}]_{2 \times 10^6}$ (N/mm ²)	应力循环 5×10^6 次的常幅疲劳极限 $[\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ (N/mm ²)	应力循环 1×10^8 次的疲劳截止限 $[\Delta\sigma_{hs,L}]_{1 \times 10^8}$ (N/mm ²)
	C	β			
T 形节点	2.218×10^{12}	3	104	76	41
K 形间隙节点	4.345×10^{12}	3	130	95	52

【条文说明】6.6.5 本规程关于钢管混凝土相贯焊接节点疲劳强度验算，采用热点应力幅的方法，根据研究给出了 T 形节点、K 形节点基于钢管热点应力幅的疲劳设计 S-N 曲线（图 6.6.5）。对常幅疲劳的计算，该 S-N 曲线在应力循环 2×10^6 次处设置了常幅疲劳极限。国际上大量的钢结构疲劳研究指出板厚对疲劳强度有一定的影响，通常板厚小于 25mm 可不考虑其影响，反之，应采用修正系数来考虑其不利影响。

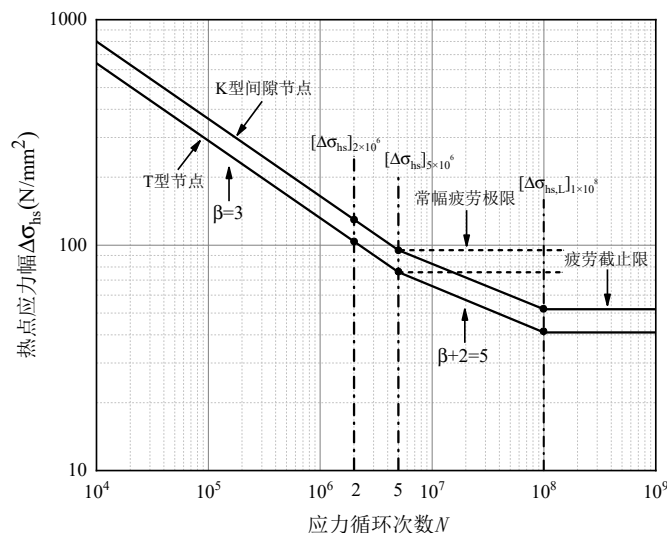


图 6.6.5 基于热点应力幅的疲劳设计 S-N 曲线

6.6.6 在桁式钢管混凝土结构设计寿命期内，当变幅疲劳（应力循环过程中的应力随机变化）的应力幅谱中最大的热点应力幅符合下列公式时，则疲劳强度满足要求。

$$\Delta\sigma_{hs} \leq \gamma_t [\Delta\sigma_{hs,L}]_{1 \times 10^8} \quad (6.6.6)$$

式中： $[\Delta\sigma_{hs,L}]_{1 \times 10^8}$ — 以疲劳寿命达到 1×10^8 次为基准的疲劳截止限（N/mm²），按表 6.6.5 采用。

【条文说明】6.6.6 对变幅疲劳计算，参考 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue,

BS EN1993-1-9:2005 的疲劳设计方法，第 6.6.5 条的条文说明中图 6.6.5 的 S-N 曲线在应力循环 1×10^8 次处设置疲劳截止限，即所有小于疲劳截止限的热点应力幅，都不计其疲劳损伤作用。

6.6.7 当变幅疲劳的计算不能满足式 (6.6.6) 要求，可按下列公式规定计算：

$$\Delta\sigma_{hs,e} \leq \gamma_t [\Delta\sigma_{hs}]_{2 \times 10^6} \quad (6.6.7-1)$$

$$\Delta\sigma_{hs,e} = \left[\frac{\sum n_i (\Delta\sigma_{hs,i})^\beta + ([\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6})^{-2} \sum n_j (\Delta\sigma_{hs,j})^{\beta+2}}{2 \times 10^6} \right]^{1/\beta} \quad (6.6.7-2)$$

式中： $\Delta\sigma_{hs,e}$ — 由设计寿命期内热点应力循环总次数 $(=\sum n_i + \sum n_j)$ 的变幅疲劳损伤与热点应力循环 2×10^6 次常幅疲劳损伤相等而换算得到的等效热点应力幅 (N/mm^2)；

$[\Delta\sigma_{hs}]_{2 \times 10^6}$ — 疲劳寿命 $N=2 \times 10^6$ 次的容许热点应力幅 (N/mm^2)，按表 6.6.5 采用；

$\Delta\sigma_{hs,i}$ 、 n_i — 应力幅谱中在 $\Delta\sigma_{hs,i} \geq [\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ 范围内的各个热点应力幅 (N/mm^2) 及其频次；

$\Delta\sigma_{hs,j}$ 、 n_j — 应力幅谱中在 $[\Delta\sigma_{hs,L}]_{1 \times 10^8} \leq \Delta\sigma_{hs,j} < [\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ 范围内的各个热点应力幅 (N/mm^2) 及其频次。

【条文说明】6.6.7 对变幅疲劳计算，按照国家标准《钢结构设计标准》，应用国际通用的 Miner 线性累积损伤定律将各级热点应力幅及其循环频次换算成常幅疲劳 200 万次的等效热点应力幅。同时，参考 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue, BS EN1993-1-9:2005 的疲劳设计方法，当热点应力幅谱中的热点应力幅数值大于疲劳截止限数值但小于常幅疲劳极限数值时，S-N 曲线（第 6.6.5 条的条文说明中的图 6.6.5）的斜率 β 由原来的 3 调整为 $\beta+2=5$ ，即认为较低的热点应力幅数值对结构的疲劳损伤作用降低。

7 抗火设计

7.0.1 桁式钢管混凝土构件的火灾荷载比应按下列式计算：

$$n_F = \frac{N}{N_u} \quad (7.0.1)$$

式中： n_F —— 火灾荷载比；

N —— 火灾下构件的轴心压力设计值（N）；

N_u —— 常温下考虑长细比影响的构件轴心受压承载力设计值（N）。

【条文说明】7.0.1 火灾荷载比（ n_F ）表征受火过程中作用在构件上的轴心受压荷载水平。已有研究表明，火灾荷载比是影响 ISO-834 标准火灾升温作用下桁式钢管混凝土构件耐火极限的重要参数。火灾下构件的轴心压力设计值（ N ）可按现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 等规范中的有关规定确定。

7.0.2 桁式钢管混凝土构件的火灾升温时间比应按下列式计算：

$$t_o = \frac{t_h}{t_R} \quad (7.0.2)$$

式中： t_o —— 火灾升温时间比；

t_h —— 火灾升温阶段持续的时间（min）；

t_R —— 耐火极限（min）。

【条文说明】7.0.2 对于在 ISO-834 标准火灾降温阶段达到极限状态的桁式钢管混凝土构件，火灾升温时间比（ t_o ）表明了升温时间接近耐火极限的程度，是影响降温阶段破坏耐火极限的重要参数。

7.0.3 桁式钢管混凝土构件的设计耐火极限应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 和《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 中的有关规定。

【条文说明】7.0.3 本标准涉及的桁式钢管混凝土构件根据弦杆数量可分为二肢、三肢、四肢和六肢 4 种类型，因其构造复杂、耐火极限影响因素较多，目前尚缺乏针对以桁式钢管混凝土为整体受力构件的耐火极限计算方法。

现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 中给出了无防火保护的钢管混凝土和钢管构件的耐火极限确定方法，将其用于桁式钢管混凝土构件时，可近似以相邻节点间的钢管混凝土弦杆段和钢管腹杆段隔离体为对象，将隔离体等效为两端铰接的钢管混凝土或钢管构件，根据《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 中的相关规定进行耐火极限计算，所有弦杆段和腹杆段隔离体的最小耐火极限（最不利弦杆段和腹杆段的耐火极限）即为桁式钢管混凝土构件的耐火极限。该方法可用于二肢、三肢、四肢和六肢桁式钢管混凝土构件耐火极限的确定。

对于无防火保护的三肢桁式钢管混凝土构件，可按下列式将三肢作为整体进行计算：

$$t_R = (0.7f_{ck} / 20 + 6.3) \cdot (1.7D_c + 0.35)n_F^{(-1.577+0.021\lambda)} \quad (7.0.3-1)$$

式中: t_R —— 构件的耐火极限 (min) ;
 f_{ck} —— 混凝土轴心抗压强度标准值 (N/mm²) ;
 n_F —— 火灾荷载比;
 λ —— 构件的换算长细比;
 D_c —— 弦杆钢管的外直径 (m) 。

基于三肢桁式钢管混凝土构件的耐火极限试验研究和理论分析发现, 在ISO-834标准火灾升温作用下, 换算长细比 (λ)、弦杆外直径 (D_c)、火灾荷载比 (n_F) 对构件的耐火极限影响明显。通过回归分析, 得到了适用于轴心受压三肢桁式钢管混凝土构件耐火极限的实用计算公式, 即式 (7.0.3-1)。该公式的适用范围: C30~C90混凝土; Q235~Q460钢; 火灾荷载比0.15~0.5; 换算长细比5~30; 弦杆外直径0.2~0.5m; 腹弦杆外径比0.2~0.5。

在ISO-834标准火灾升温作用下三肢桁式钢管混凝土构件的耐火极限研究基础上, 进一步分析了三肢桁式钢管混凝土构件在ISO-834标准火灾升、降温作用下发生降温阶段破坏时的力学性能, 发现三肢桁式钢管混凝土构件的降温阶段破坏耐火极限 (t_{R-C}) 主要与火灾荷载比 (n_F) 和火灾升温时间比 (t_0) 有关, 可按下式计算:

$$t_{R-C} = k_C t_R \quad (7.0.3-2)$$

式中: t_{R-C} —— 构件的降温阶段破坏耐火极限 (min) ;
 t_R —— 构件的耐火极限 (min) ;
 k_C —— 降温阶段影响系数, 可按表 7.0.3 确定, 表中“—”代表该种工况下, 三肢桁式钢管混凝土构件不会在火灾降温阶段达到极限状态; 在火灾荷载比为0.3~0.6、火灾升温时间比为0.5~0.95范围内其他工况下的降温破坏系数, 可通过线性内插得到。

表 7.0.3 三肢桁式钢管混凝土构件的降温阶段影响系数 k_C

火灾荷载比 n_F	火灾升温时间比 t_0					
	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
0.2	—	—	—	—	—	—
0.3	1.100	1.150	—	—	—	—
0.4	1.010	1.040	1.250	—	—	—
0.5	1.005	1.020	1.100	1.300	—	—
0.6	1.004	1.010	1.050	1.100	1.250	—

7.0.4 采用钢结构防火涂料对桁式钢管混凝土构件进行防火保护时, 设计耐火极限不超过 3.0h 的桁式钢管混凝土构件可选用膨胀型钢结构防火涂料, 设计耐火极限超过 3.0h 的桁式钢管混凝土构件宜使用非膨胀型钢结构防火涂料。

【条文说明】7.0.4 受钢结构自身耐火性能和膨胀型钢结构防火涂料自身阻隔热性能的限制, 相关规范规定耐火极限超过 1.5h 的钢构件, 不宜选用膨胀型钢结构防火涂料。而对于桁式钢管混凝土

土构件，一方面弦杆核心混凝土具有吸热与储热的作用，可以延缓火灾下钢管壁的升温；另一方面核心混凝土对组合构件承载力有较大的贡献，钢管壁应力水平相对较低，同时在火灾下核心混凝土通过应力重分布承担一部分钢管卸下来的荷载，使构件承载力衰退过程延缓。因此，桁式钢管混凝土构件自身具有较好的耐火性能，当采用膨胀型钢结构防火涂料并进行合理设计，在大多数情况下可以达到 3.0h 的耐火极限。

结合工程实际,采用膨胀型钢结构防火涂料的钢管混凝土构件受火 3.0h 后的钢管外表面平均温度见表 7.0.4。试验中采用了多种膨胀型防火涂料产品，其性能要求符合现行国家标准《钢结构防火涂料》GB 14907 的相关要求。实测结果表明，与受保护的空钢管试件和无保护的钢管混凝土试件相比,受保护钢管混凝土试件的钢管外表面温度平均值在 3.0h 受火时长以后仍控制在相对较低的水平。试验后试件的典型状态如图 7.0.4 所示，其中受保护空钢管试件受火 3.0h 后防火涂层整体脱落，而受保护钢管混凝土试件的防火涂层仍较完整的附着在试件表面，且表面温度较低。除标准火灾升温下的试验外，采用加载的耐火极限试验可以直接确定一定荷载水平下采用膨胀型钢结构防火涂料为保护措施的钢管混凝土构件达到设计耐火极限所需的涂层厚度。

表 7.0.4 采用膨胀型钢结构防火涂料的钢管混凝土柱火灾试验（3.0h）数据汇总

试件	截面尺寸 (mm)	截面类型	涂料类型	涂层厚度 (mm)	钢管外表面 平均温度 (℃)	项目背景
IPCA1	Φ600×15	钢管混凝土	A	5.84	309	青岛新机场 建设项目航 站区工程设 计 T1 航站 楼
IPCB1			B	6.08	294	
IPCB2			B	3.77	350	
IPCC1			C	3.92	345	
C1	Φ325×8.0		A	0	1056	
C2			A	1.16	592	
C3			A	3.51	462	
C4			A	3.40	418	
C5			A	4.23	390	
C6	Φ140×30		A	3.68	721	
A1	Φ400×15	空钢管	D	3.71	763.5	北京至张家 口铁路工程 清河站
B1		钢管混凝土	D	3.87	470.6	
C1			D	2.85	500.3	
A2		空钢管	E	3.54	827.5	
B2		钢管混凝土	E	3.45	607.6	
C2			E	2.36	686.7	
A3		空钢管	A	3.59	920.9	
B3		钢管混凝土	A	3.61	355.5	
C3			A	3.01	535.9	
A4		空钢管	F	3.60	780.3	
B4		钢管混凝土	F	3.33	538.6	
C4			F	2.44	559.7	



图 7.0.4 采用膨胀型防火涂料的钢管混凝土试件破坏形态

7.0.5 当采用非膨胀型钢结构防火涂料对桁式钢管混凝土结构进行防火保护时，单肢弦杆的防火保护层厚度可取为同等计算条件下钢管混凝土构件的防火保护层厚度的 1.2 倍；桁式钢管混凝土构件中弦杆和腹杆连接区域、腹杆的防火保护层厚度宜与弦杆的防火保护层厚度相同。

【条文说明】7.0.5 桁式钢管混凝土构件耐火试验研究结果表明，在同样的火灾荷载比、火灾升温曲线、弦杆尺寸和材料等条件下，由于腹杆受热变形等影响，桁式钢管混凝土构件的耐火极限略低于与弦杆对应的钢管混凝土构件。因此，可以偏安全的以 1.2 倍的钢管混凝土构件的防火保护层厚度对桁式钢管混凝土构件的弦杆进行防火保护。当采用非膨胀型防火涂料或金属挂网抹水泥砂浆作为防火保护措施时，钢管混凝土弦杆的防火保护层厚度可根据现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 的有关规定确定。当有可靠依据时，也可在涂层中加网增强节点区域的涂层构造强度，并保证涂层在受火条件下的可靠性和稳定性。对于非膨胀型防火涂料通常采用镀锌铁丝网或耐碱玻璃纤维网；膨胀型防火涂料通常采用耐碱玻璃纤维网。实际工程采用的加网措施应与型式检验报告或型式试验报告中的措施一致。

7.0.6 当采用膨胀型钢结构防火涂料为桁式钢管混凝土结构防火保护措施时，应符合下列要求：

- 1 防火涂料的涂层厚度应根据耐火试验确定，试验方法应符合现行国家标准《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978 的有关规定。
- 2 实际采用的膨胀型钢结构防火涂料涂层厚度不应小于 1.5mm。
- 3 膨胀型钢结构防火涂料应与防腐面漆配套使用。

【条文说明】7.0.6 膨胀型钢结构防火涂料产品类型众多，性能差异较大。按国家现行标准《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978 要求，开展加载条件下足尺或缩尺试件的标准火灾试验是确定特定荷载水平和防火涂层厚度下结构是否满足耐火极限设计要求的最直接方法。

另一方面，受膨胀型钢结构防火涂料涂层保护的桁式钢管混凝土构件，耐火极限与其破坏时的临界温度有关。当通过试验或理论分析得到构件临界温度后，也可合理选取基材，按国家现行

标准《钢结构防火涂料》GB 14907 和《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978 开展耐火试验，确定防火涂料的涂层厚度。

在使用寿命期内，面漆能有效阻隔环境中的水汽等对膨胀型钢结构防火涂料性能的不利影响，有效保证防火涂料的可靠性和耐久性。

7.0.7 桁式钢管混凝土结构的弦杆均应设置直径为 20mm 的排气孔。排气孔并应沿弦杆反对称布置，且排气孔纵向间距不宜超过 4m（图 7.0.7）。

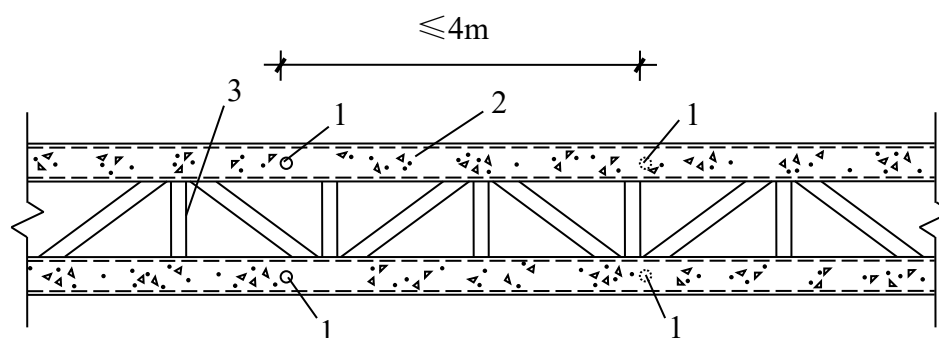


图 7.0.7 排气孔位置示意图（单位：mm）

1—排气孔； 2—钢管混凝土弦杆； 3—空钢管腹杆

【条文说明】7.0.7 桁式钢管混凝土结构的耐火极限试验表明：如没有设置充足的排气孔，核心混凝土在火灾下产生的水蒸气容易造成弦杆钢管撕裂及核心混凝土爆裂（图 7.0.7-1），从而加速桁式钢管混凝土构件在火灾下的破坏。因此，对于桁式钢管混凝土结构应该预留足够多的排气孔以保证高温下的水蒸气可以顺利排放。



图 7.0.7-1 火灾下桁式钢管混凝土构件弦杆钢管撕裂和核心混凝土爆裂

8 防腐设计

8.0.1 桁式钢管混凝土结构应遵循安全可靠、经济合理的原则，按下列要求进行防腐设计：

1 防腐设计应根据建筑物的重要性、环境腐蚀条件、施工和维修条件等要求合理确定防腐设计年限；

2 防腐设计应考虑环保节能的要求；

3 除必须采取防腐措施外，尚应尽量避免加速腐蚀的不良设计；

4 防腐设计中应考虑结构全寿命期内的检查、维护和大修。

8.0.2 桁式钢管混凝土结构的防腐设计应符合下列规定：

1 根据结构防腐重点、工艺要求，应避免出现易于积水集污的死角、未封闭焊缝及难以实施涂装施工的不良细节；

2 焊条、螺栓、垫圈、节点板等连接构件的耐腐蚀性能，不应低于主材材料；螺栓直径不应小于 12mm，垫圈不应采用弹簧垫圈；螺栓、螺母和垫圈应采用镀锌等方法防护，安装后再采用与主体结构相同的防腐方案；

3 设计使用年限大于或等于 25 年的建筑物，对不易维修的结构应加强防护。

【条文说明】8.0.1~8.0.2 参考现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

8.0.3 桁式钢管混凝土结构的钢管外侧应采取除锈后涂覆油漆或金属镀层的防腐措施，防锈和防腐采用的涂料、钢材表面的除锈等级以及防腐对钢结构的构造要求等，应符合现行国家标准《工业建筑防腐设计规范》GB 50046 和《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923 的有关规定。

8.0.4 在腐蚀环境中发生外钢管壁均匀腐蚀的桁式钢管混凝土构件，应以腐蚀后钢管的有效截面计算腐蚀后桁式钢管混凝土构件的承载力。腐蚀后钢管混凝土弦杆的计算参数可按下列公式计算：

$$\xi_e = \frac{A_{se} f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha_e \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (8.0.4-1)$$

$$\alpha_e = \frac{A_{se}}{A_c} \quad (8.0.4-2)$$

$$A_{se} = \frac{\pi}{4} [D_e^2 - (D_e - 2t_e)^2] \quad (8.0.4-3)$$

$$D_e = D - 2\Delta t \quad (8.0.4-4)$$

$$t_e = t - \Delta t \quad (8.0.4-5)$$

式中： ξ_e —— 腐蚀后名义约束效应系数；
 α_e —— 腐蚀后名义截面含钢率；
 A_{se} —— 腐蚀后钢管的截面面积（mm²）；

- Δt —— 腐蚀后钢管管壁的平均壁厚损失 (mm) ;
 D_e —— 腐蚀后钢管外直径 (mm) ;
 t_e —— 腐蚀后钢管管壁厚度 (mm) 。

【条文说明】8.0.4 本条适用于桁式钢管混凝土构件中的单肢钢管混凝土遭受均匀腐蚀或近似均匀腐蚀的工况,即钢管腐蚀表面无明显的局部坑蚀,腐蚀后钢管管壁的平均壁厚损失通过实际量测确定。

9 制作、施工和验收

9.1 一般规定

9.1.1 桁式钢管混凝土结构的制作与施工除应符合本规程的规定外，尚应符合现行国家标准《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628 和《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

9.1.2 桁式钢管混凝土结构施工前，应有施工组织设计及配套的专项施工方案等技术文件。

9.1.3 桁式钢管混凝土结构的施工单位应根据设计要求对构造复杂的构件进行工艺试验评定，并根据试验评定制定相应的施工工艺或方案。

【条文说明】9.1.3 试验研究结果表明，后施焊会造成核心混凝土强度指标下降，但对构件承载力的影响较小；由焊接造成构件挠曲产生的偏心很小，可忽略挠曲产生的偏心对承载力的影响。在设计荷载下施焊，构件刚度变化也很小，对结构的工作性能无明显影响。但应注意不宜在同一构件上多点同时施焊，且焊接电流不宜过大。

9.1.4 钢管内核心混凝土的施工阶段，由施工阶段荷载引起的单肢钢管混凝土钢管初始最大压应力值不应超过空钢管稳定承载力对应的临界应力值的 35%。

【条文说明】9.1.4 根据钢管内核心混凝土施工阶段的荷载计算空钢管构件的应力，这种初始应力对桁式钢管混凝土结构的最终截面受压承载力影响不大。但由于初应力的存在会使桁式钢管混凝土构件的弹塑性阶段提前，改变弹塑性阶段的组合切线模量，从而影响构件的稳定承载力。空钢管临界应力为 φf ， φ 为空钢管构件的稳定系数， f 为钢管材料强度设计值。

9.2 钢管制作与安装

9.2.1 钢管的制作应根据钢结构设计施工图绘制钢结构制作详图，并按设计文件和制作详图的规定编制制作工艺文件，根据制作厂的生产条件和现场施工条件、运输要求、吊装能力和安装条件，确定钢管的分段或拼焊方案。

9.2.2 直缝钢管在由钢板加工成圆管过程中，应采取措施消除钢管加工过程中的残余应力，弯管的加工应在直管验收合格后进行，钢管的纵向焊缝应尽量避免受拉边。

9.2.3 弯管可采用冷弯和热弯等方式加工，钢管加工后应保证曲线光滑平顺，钢管表面不得存在肉眼可见的压痕、褶皱，应将加工变形产生的应力控制在较小的范围内，钢管弯曲成形偏差应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 相关要求。

【条文说明】9.2.3 为保证钢材的各项材质指标不变，应控制加工变形产生的应力，关于弯曲成形误差控制应符合现行国家规范《钢结构工程施工规范》GB 50755 中的规定。

9.2.4 桁式钢管组装及加工各项要求与焊接前的准备及检验程序应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 的有关规定。

9.2.5 工程结构用直缝焊接圆管的焊缝宜采用坡口熔透焊缝。焊接管焊缝的坡口形式和尺寸，应符合现行国家标准《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》GB/T 985.1 和《埋弧焊的推荐坡口》GB/T 985.2 的有关规定。

9.2.6 钢管的接长应采用对接熔透焊缝，焊缝质量等级、制作单元接头及最短拼接长度应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 和《钢结构焊接规范》GB 50661 的有关规定；设计要求的全熔透的一、二级焊缝及探伤要求应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

【条文说明】9.2.6 桁式钢管的全熔透一、二级焊缝探伤比例分别为 100%和 20%，如超声波不能做出判断，应采用射线探伤。一、二级焊缝质量等级及缺陷分级应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 中的规定。

9.2.7 钢管接长时每个节间宜为一个接头，最短接长长度应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 的有关规定。钢管接长时，相邻管节或管段的纵向焊缝应错开，错开的最小距离（沿弧长方向）不应小于钢管壁厚的 5 倍，且不应小于 200mm。

9.2.8 钢管构件制作完成后，应按施工图和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定进行验收，构件外形尺寸的允许偏差应符合设计文件和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

9.2.9 钢管构件制作完毕后应清除钢管内的杂物，并保持管内清洁，钢管内表面应无可见油污、无附着不牢的氧化皮、铁锈或污染物。

9.2.10 钢管在吊装时应控制吊装荷载作用下的变形限值，吊点的设置及吊装技术方案应验算钢管的承载力和稳定性，验算无法满足要求时，应采取临时加固措施。

9.2.11 钢管在吊装就位后，应立即进行校正，并采取可靠固定措施以保证构件的稳定性；钢管的吊装就位质量应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

9.2.12 桁式钢管构件应按设计规定或合同约定进行预拼装，预拼装场地支承条件及尺寸要求等应符合现行国家规范《钢结构工程施工规范》GB 50755 的相关规定。

9.2.13 预拼装可采用实体预拼装或仿真模拟预拼装的方式，根据场地条件和施工组织进度要求可采取整体预拼装或累计连续预拼装的方法。

【条文说明】9.2.13 预拼装应根据工厂或现场的场地条件和吊装设备情况选择实体预拼装或仿真模拟预拼装的方式。其中仿真模拟预拼装目前有以下两种方法：

1 整体三维扫描模拟预拼装：利用三维激光扫描仪将构件单元整体进行扫描，形成构件真实的点云数据模型，在电脑上利用专业软件进行模拟预拼装。

2 关键控制点测量模拟预拼装：利用全站仪等测量仪器对构件单元的多个关键控制点进行测量，在电脑上利用专业软件结合测量数据建立模型后进行模拟预拼装。

9.3 混凝土施工

9.3.1 桁式钢管混凝土构件中混凝土的浇筑方式宜采用泵送顶升法、人工浇捣法或高位抛落法。混凝土浇筑前应根据设计要求进行混凝土配合比设计和必要的浇筑工艺试验，并在此基础上制定浇筑工艺和各项技术措施并编制专项施工方案。

【条文说明】9.3.1 泵送顶升浇筑法、高位抛落免振捣法和人工逐段浇捣等混凝土浇筑方法是目前国内钢管混凝土工程施工中较为成熟的方法。具体工艺如下：

1 泵送顶升浇筑法：在钢管柱适当的位置开设并安装顶升口，顶升口上安装一个带有防回流装置的截止阀和进料管，直接用导流管将顶升口与泵车的输送管相连，将混凝土连续不断、自下而上地灌顶入钢管内，无需振捣。

2 高位抛落免振捣法：混凝土从钢管的上部抛入，利用混凝土下落时产生的动能达到混凝土振动密实的目的。

3 人工逐段浇捣法：混凝土自钢管上口逐段灌入，并用振捣器逐段振捣密实。根据管径大小情况和作业条件，一般管径大于 350mm 时便于使用该方法。

其中以泵送顶升浇筑法的质量最易控制。无论采用哪种工艺，都不仅要保证混凝土强度，还要保证混凝土的密实度和匀质性。对于重要工程应预留工程中所用桁式钢管混凝土构件作为质量检测的参照试件。

9.3.2 桁式钢管混凝土结构浇筑应符合下列规定：

- 1 新拌混凝土应具有良好的和易性，不离析、不泌水，宜采用自密实混凝土浇筑；
- 2 混凝土应采取减少收缩的技术措施；
- 3 钢管截面较小时，应在钢管壁适当位置留有足够的排气孔，排气孔孔径不应小于 20mm；浇筑混凝土应加强排气孔观察，并应确认浆体流出和浇筑密实后再封堵排气孔。

9.3.3 自密实混凝土浇筑应符合下列规定：

- 1 应根据结构部位、结构形状等确定合适的浇筑方案；
- 2 自密实混凝土的配合比设计应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 和《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283 的规定；
- 3 自密实混凝土粗骨料粒径不宜大于 20mm，混凝土含气量宜小于 2.5%，坍落度范围宜为 200mm~260mm；扩展度宜控制为 500mm~650mm，T500 时间宜控制为 5s~20s；
- 4 混凝土浇筑前，应检查钢管焊接质量、进场设备与材料的质量和数量，应进行浇筑演练，开展拌和设备与浇筑设备的联动试车，并对钢管内壁进行清洗；
- 5 应根据设计要求，选择气温相对稳定的时段浇筑混凝土，浇筑时环境气温应大于 5℃，当环境气温高于 30℃时，宜采取措施降低钢管温度。

【条文说明】9.3.3 由于钢管是封闭的，当混凝土含气量较高时，钢管和混凝土之间容易形成气膜，从而引发钢管和混凝土脱粘的风险，因此提出混凝土含气量宜小于 2.5%的控制要求；钢管内

混凝土应具有高流动性、优良的抗离析性和填充性，如果混凝土坍落度小于 200mm、扩展度小于 500mm、T500 时间大于 20s，则混凝土的工作性能不易满足管内混凝土的均匀浇筑要求；若混凝土坍落度大于 260mm、扩展度大于 650mm、T500 时间小于 5s，则混凝土的黏聚性不良，易造成混凝土中浆体和粗骨料分离，导致钢管内混凝土浇筑不均匀，影响钢管混凝土的承载能力；环境温度过低（小于 5℃）时，不利于钢管内混凝土的持续水化，影响混凝土的强度发展；环境温度高于 30℃时，混凝土坍落度损失过快，易导致钢管内混凝土浇筑不均匀，同时，过高的浇筑温度会导致水化后期降温阶段的收缩较大，易导致钢管和混凝土的脱粘。

9.3.4 桁式钢管混凝土构件中弦杆钢管内混凝土的浇筑工作宜连续进行，若采用间歇浇筑时，间隔时间不应超过混凝土的初凝时间。当桁式钢管混凝土构件需设置施工缝时，应将管口封闭。

【条文说明】9.3.4 当桁式钢管混凝土构件需设置施工缝时，封闭管口可防止水、油和异物等落入钢管内。

9.3.5 当混凝土浇筑至弦杆钢管顶端时，可采取下列施工方法中的其中一种方式进行封顶：

1 使混凝土稍微溢出后，将留有排气孔的层间横隔板或封顶板紧压在管端，随即进行点焊；待混凝土强度达到设计值的 50%以后，再将横隔板或封顶板按设计要求进行补焊；

2 将混凝土浇灌到稍低于管口位置，待混凝土达到设计强度的 60%后，再用相同等级的水泥砂浆补填至管口，并按上述方法将横隔板或封顶板一次封焊到位。

9.3.6 桁式钢管内混凝土浇筑后浇灌孔、顶升孔、排气孔应按设计要求封堵，表面应平整，并进行表面清理和防腐处理。

9.3.7 桁式钢管内混凝土填充密实度检测可采用人工敲击法和超声波检测法相结合的办法，应符合下列规定：

1 检测次数不少于 3 次，宜为浇筑 7 天、28 天及验收前；

2 人工敲击检查可沿钢管周边选取等距离的若干点，人工敲击检查结果异常时，应加大检测密度，确定超声波检测范围；

3 超声波检测发现异常时，应进行钻孔复检。

4 对钢管内核心混凝土不密实的部位，宜采用局部钻孔压浆法进行补强，完成后应将钻孔补焊封固。

9.3.8 桁式钢管混凝土构件中的钢管混凝土发生环形均匀脱空时，脱空容限为 0.025%；超过此容限值时，应进行补强处理。

【条文说明】9.3.8 发生环形均匀脱空的钢管混凝土构件脱空率定义为环形均匀脱空距离和钢管外径的比值。试验研究表明，对于发生环形均匀脱空的钢管混凝土受压构件，当脱空率小于 0.025%时，脱空引起的承载力损失小于 5%，可按无脱空构件进行承载力计算。当脱空率大于或等于 0.025%时，钢管与混凝土之间的组合作用可能无法充分发挥，应进行补强处理，以保证钢管和混凝土能够共同工作。

9.3.9 桁式钢管混凝土构件中的钢管混凝土发生球冠形脱空时，脱空容限为 0.6%，且脱空高度不

得大于 5mm；超过此容许值时，应对发生混凝土脱空的部位进行补灌。

【条文说明】9.3.9 发生球冠形脱空的钢管混凝土构件脱空率定义为球冠形脱空高度和钢管外径的比值。通过试验研究、参数分析和数据拟合，获得了发生球冠形脱空钢管混凝土轴压构件的强度承载力折减系数，实际工程应用中可按照此折减系数进行脱空构件的强度计算。但当球冠形脱空率大于 0.6% 时，核心混凝土支撑钢管的作用减弱，对钢管混凝土承载能力和刚度影响较大，应对发生混凝土脱空的部位进行补灌。当钢管混凝土脱空率小于 0.6%，但钢管混凝土脱空高度大于 5mm 时，应对发生混凝土脱空的部位进行补灌的工艺条件，因此，还规定了脱空高度限值。发生球冠形脱空的钢管混凝土截面轴压承载力设计值可按下列公式进行计算：

$$N_{ug} = K_d N_u \quad (9.3.9-1)$$

$$K_d = 1 - f(\xi) \cdot \chi \leq 1 \quad (9.3.9-2)$$

$$f(\xi) = \begin{cases} 1.42\xi + 0.44 & (\xi \leq 1.24) \\ 4.66 - 1.97\xi & (\xi > 1.24) \end{cases} \quad (9.3.9-3)$$

$$\chi = \frac{d_s}{D} \quad (9.3.9-4)$$

式中： N_{ug} —— 考虑脱空影响的单肢钢管混凝土截面轴压承载力设计值 (N)；

N_u —— 单肢钢管混凝土的截面轴压承载力设计值 (N)；

K_d —— 脱空折减系数；

χ —— 球冠形脱空的脱空率；

d_s —— 脱空高度 (mm)；

D —— 钢管外径 (mm)。

9.3.10 预制桁式钢管混凝土构件应进行吊运、运输和安装等环节的施工验算，并应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的有关规定。吊运前管内混凝土强度应满足设计文件要求，设计文件无要求时不应低于设计强度值的 75%。

9.3.11 冬季施工应采取防止钢管混凝土发生冻胀的措施，并应满足混凝土的强度发展速率要求，同时还应符合现行行业标准《建筑工程冬期施工规程》JGJ 104 的有关规定。

9.4 防火涂料施工

9.4.1 当采用膨胀型钢结构防火涂料为桁式钢管混凝土结构的防火保护措施时，宜采用喷涂工艺。

9.4.2 桁式钢管混凝土结构的膨胀型钢结构防火涂层应采用辊涂、刷涂等施工工艺时，不宜在防火涂层表面涂刮腻子找平。

【条文说明】9.4.2 采用辊涂、刷涂等施工工艺时涂层表面通常达不到所需的平整度，腻子找平

层会严重影响膨胀型钢结构防火涂料涂层的在火灾下的性能，致使防火涂层达不到应有的防火隔热效果。

9.5 验收

9.5.1 桁式钢管混凝土结构工程的质量验收应符合国家现行标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628 中的有关规定。

9.5.2 桁式钢管混凝土结构子分部工程验收时应提供下列文件和记录：

- 1 设计变更文件；
- 2 原材料出厂质量合格证及性能检测报告；
- 3 焊接材料产品证明书、焊接工艺文件及烘焙记录；
- 4 焊工合格证书及施焊范围；
- 5 焊缝超声波探伤或射线探伤检测报告及记录；
- 6 连接节点检查记录；
- 7 钢筋接头试验报告；
- 8 混凝土工程施工记录；
- 9 混凝土试件性能试验报告；
- 10 隐蔽工程验收记录；
- 11 各检验批验收记录；
- 12 工程重大质量、技术问题的技术资料、处理方案和验收记录；
- 13 竣工图及相关设计文件；
- 14 其他必要文件和记录。

9.5.3 桁式钢管混凝土结构内部混凝土浇筑质量可采用敲击钢管的方式检查混凝土密实度，重要构件或部位宜采用超声波或冲击回波进行检测。

9.5.4 桁式钢管内混凝土的强度等级、工作性能和收缩性应符合设计要求和国家现行有关标准的规定。

9.5.5 桁式钢管内施工缝的留置应符合设计要求，当无设计要求时应在专项施工方案中做出规定，且桁式钢管柱的对接焊口的钢管应高出混凝土浇筑施工缝面 500mm 以上，以防钢管焊接时高温影响混凝土质量。

9.5.6 桁式钢管内混凝土灌注后的养护方法和养护时间应符合专项施工方案要求。

9.5.7 桁式钢管混凝土构件防火保护工程消防验收应由建设单位组织设计、施工、工程监理单位及消防设计审查验收弦杆部门进行专项验收。

9.5.8 当桁式钢管内混凝土结构工程是特殊建设工程时，建设单位应向消防设计审查验收弦杆部门申请消防验收，提交下列材料：

- 1 消防验收申请表；
- 2 工程竣工验收报告；
- 3 涉及消防的建设工程竣工图纸。

【条文说明】9.5.8 对于特殊建设工程以外的其他按照国家工程建设消防技术标准需要进行消防设计的建设工程，称为其他建设工程，实行备案抽查制度。建设单位办理备案，应当提交材料包括：消防验收备案表，工程竣工验收报告和涉及消防的建设工程竣工图纸。

9.5.9 防火涂料的检验和验收应符合现行国家规范《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 和《钢结构防火涂料》GB 14907 的有关规定。

附录 A 桁式钢管混凝土构件的材料本构模型

A.1 混凝土

A.1.1 桁式钢管混凝土构件的纤维模型中，钢管内核心混凝土单调受压应力(σ)-应变(ε)关系宜按下列公式确定：

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (\text{A.1.1-1})$$

$$y = \begin{cases} 1 + q(x^{0.1\xi} - 1) & (\xi \geq 1.12) \\ \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x} & (\xi < 1.12) \end{cases} \quad (x > 1) \quad (\text{A.1.1-2})$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (\text{A.1.1-3})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (\text{A.1.1-4})$$

$$\sigma_0 = [1 + (-0.054\xi^2 + 0.4\xi)(\frac{24}{f_c'})^{0.45}] f_c' \quad (\text{A.1.1-5})$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + [1400 + 800(\frac{f_c'}{24} - 1)]\xi^{0.2} \quad (\mu\varepsilon) \quad (\text{A.1.1-6})$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5 f_c' \quad (\mu\varepsilon) \quad (\text{A.1.1-7})$$

$$q = \frac{\xi^{0.745}}{2 + \xi} \quad (\text{A.1.1-8})$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} f_c'^2 \times 3.51 \times 10^{-4} \quad (\text{A.1.1-9})$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha_s \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (\text{A.1.1-10})$$

$$\alpha_s = A_s / A_c \quad (\text{A.1.1-11})$$

式中： α_s —— 截面含钢率；

ξ —— 约束效应系数；

f_c' —— 混凝土圆柱体抗压强度（N/mm²），按表 A.1.1 换算；

f_{ck} —— 混凝土轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

f_y —— 钢管的屈服强度（N/mm²）；

A_s —— 钢管的横截面面积（mm²）；

A_c —— 核心混凝土的横截面面积（mm²）。

表 A.1.1 混凝土强度等级和圆柱体抗压强度间的近似对应关系

强度等级	C40	C50	C60	C70	C80	C90
f_c' (N/mm ²)	33	41	51	60	70	80

A.1.2 桁式钢管混凝土构件的纤维模型中，钢管内核心混凝土单调受拉应力(σ)-应变(ε)关系宜按下列公式确定：

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{0.31\sigma_p^2(x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (\text{A.1.2-1})$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} \quad (\text{A.1.2-2})$$

$$y = \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \quad (\text{A.1.2-3})$$

$$\sigma_p = 0.26(1.25 f'_c)^{2/3} \quad (\text{A.1.2-4})$$

$$\varepsilon_p = 43.1 \sigma_p \quad (\text{A.1.2-5})$$

式中： ε_p —— 峰值拉应力时的应变（ $\mu\varepsilon$ ）；

σ_p —— 峰值拉应力（ N/mm^2 ）；

f'_c —— 混凝土圆柱体抗压强度（ N/mm^2 ），可按表 A.1.1 换算。

A.1.3 桁式钢管混凝土构件的纤维模型中，钢管内核心混凝土在反复荷载作用下的应力(σ)-应变(ε)关系宜按下列公式确定：

1 受压卸载、再加载路径宜按下列公式确定：

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma_o \varepsilon_A - \sigma_A \varepsilon_1}{\sigma_o + \sigma_A} \quad (\text{A.1.3-1})$$

$$\varepsilon_1 = 0.5 \varepsilon_o \quad (\text{A.1.3-1})$$

$$\sigma_C = \frac{0.75 \sigma_o}{0.75 \varepsilon_1 + \varepsilon_B} (\varepsilon_A - \varepsilon_B) \quad (\text{A.1.3-2})$$

$$\varepsilon_D = \frac{D_1 \varepsilon_A - D_2 \varepsilon_B - \sigma_C}{D_1 - D_2} \quad (\text{A.1.3-3})$$

$$\sigma_D = D_2 (\varepsilon_D - \varepsilon_B) \quad (\text{A.1.3-4})$$

$$D_1 = \frac{3\sigma_o + \sigma_C}{3\varepsilon_1 + \varepsilon_A} \quad (\text{A.1.3-5})$$

$$D_2 = \frac{0.2\sigma_o}{0.2\varepsilon_1 + \varepsilon_B} \quad (\text{A.1.3-6})$$

式中： ε_B —— 卸载至应力为零时的残余应变（ $\mu\varepsilon$ ）；

σ_C —— 再加载过程中 C 点应力（ N/mm^2 ）；

ε_D —— 卸载过程中 D 点对应的应变（ $\mu\varepsilon$ ）；

σ_D —— 卸载过程中 D 点应力（ N/mm^2 ）。

2 受拉卸载、再加载路径宜按下列公式确定：

$$\varepsilon_H = \varepsilon_G \left(0.1 + \frac{0.9\varepsilon_o}{\varepsilon_o + |\varepsilon_G|} \right) \quad (\text{A.1.3-7})$$

$$\sigma_{\text{con}} = 0.3\sigma_w \left(2 + \frac{|\varepsilon_H|/\varepsilon_0 - 4}{|\varepsilon_H|/\varepsilon_0 + 2} \right) \quad (\text{A.1.3-8})$$

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \sigma_0 \quad \varepsilon_h \leq \varepsilon_0 \quad \text{按 G-I-J 加卸载} \\ \sigma_w &= \sigma_A \quad \varepsilon_h > \varepsilon_0 \quad \text{按 G-I'-C-E 加卸载} \end{aligned} \quad (\text{A.1.3-8})$$

$$\sigma = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_H + \varepsilon} \right) \quad (\varepsilon_H \leq \varepsilon < 0) \quad (\text{A.1.3-9})$$

$$\sigma = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) + \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0 + \varepsilon} \sigma_0 \quad 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \quad \text{按 G-I-J 加卸载} \quad (\text{A.1.3-10})$$

$$\sigma = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_A} \right) + \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_A + \varepsilon} \sigma_C \quad 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_A \quad \text{按 G-I'-C-E 加卸载}$$

式中: ε_H —— 开始产生裂面效应的起始点 H 的应变 ($\mu\varepsilon$);

σ_{con} —— 再加载过程中应变为零点 I 或 I' 的应力 (N/mm^2);

ε_h —— 历史最大压应变 ($\mu\varepsilon$)。

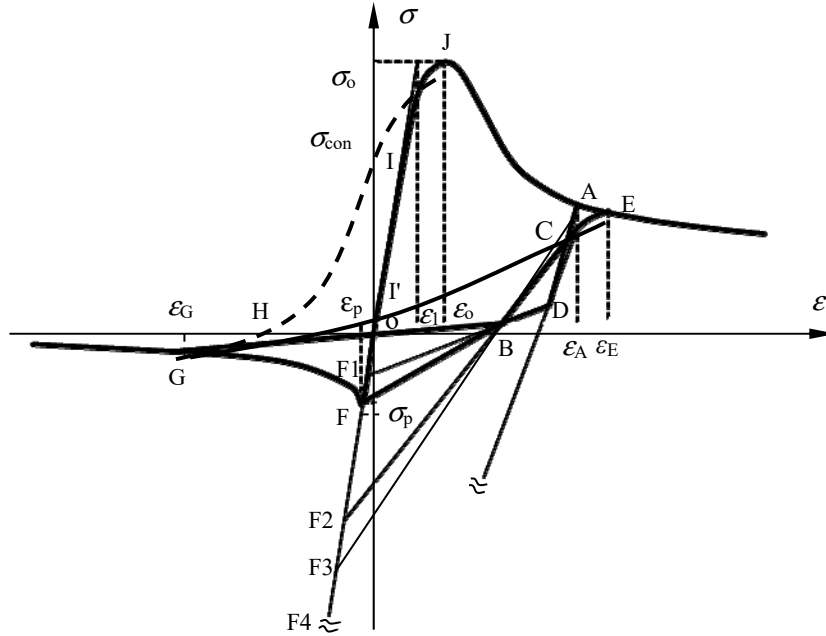


图 A.1.3 核心混凝土应力-应变滞回关系曲线示意图

【条文说明】 A.1.3 受压卸载、再加载路径中,当压应变小于等于 $0.55\varepsilon_0$ 时按弹性模量加卸载;当应变大于 $0.55\varepsilon_0$ 时,按“焦点法”确定加卸载路径,卸载至 $\sigma=0$ 时的残余应变为 ε_B 。自骨架线上卸载沿 D-B 进行,如卸载超过 B 点后再加载时,再加载线将沿折线 B-C-E 进行, E 为骨架线上应变等于 $1.15\varepsilon_A$ 时对应的点。对于卸载至 B 点后再反向加载,当应变历史上出现的最大拉应变 $\varepsilon \leq \varepsilon_p$,即受拉混凝土尚未发生开裂时,则应力、应变将沿直线 BF 发展, $F(\varepsilon_p, \sigma_p)$ 为骨架线上峰值拉应力的对应点;当应变历史上出现的最大拉应变 $\varepsilon > \varepsilon_p$ 时,则应力、应变将沿直线 BG 发展, $G(\varepsilon_G, \sigma_G)$ 为骨架线上最大拉应变的对应点。

当拉应变 ε 小于等于 ε_p 时按弹性刚度加卸载;当拉应变 ε 大于 ε_p 时,采用曲线方程来描述卸

载、再加载路径。设自下降段上 G 点卸载，考虑裂面效应，卸载首先按直线卸至 H 点，H 点为开始产生裂面效应的起始点。如果历史最大压应变小于峰值压应变，按 G-I-J 进行卸载和再加载；如果历史最大压应变大于峰值压应变，按 G-I'-C-E 进行卸载和再加载。如在 GI 曲线上任一点卸载，则卸载路径为卸载点和 G 点的连线。

A.2 钢材

A.2.1 钢管和钢筋在单调荷载作用下的应力-应变关系宜按下列公式确定：

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & |\varepsilon| \leq \varepsilon_y \\ f_y + k(\varepsilon - \varepsilon_y) & |\varepsilon| > \varepsilon_y \end{cases} \quad (\text{A.0.1})$$

式中： E_s —— 钢材的弹性模量 (N/mm^2)；

f_y —— 钢材的屈服强度 (N/mm^2)；

ε_y —— 钢材的屈服应变 ($\mu\varepsilon$)；

k —— 钢材的强化段斜率。

A.2.2 钢管在反复荷载作用下的应力-应变关系（图 A.2.2）宜按下列公式确定：

$$E_b = \begin{cases} \frac{f_y - |\sigma_d|}{|\varepsilon_d + \varepsilon_y|} & 1.65\varepsilon_y < |\varepsilon_d| \leq 6.11\varepsilon_y \\ 0.1E_s & |\varepsilon_d| > 6.11\varepsilon_y \end{cases} \quad (\text{A.0.2})$$

式中： E_b —— 软化段 de 和 d'e' 的模量 (N/mm^2)；

E_s —— 钢材的弹性模量 (N/mm^2)；

σ_d —— 软化段起始点 d 和 d' 点的应力 (N/mm^2)，d 点和 d' 点分别位于 ab 和 a'b' 平行的直线上；

ε_d —— 软化段起始点 d 和 d' 点的应变 ($\mu\varepsilon$)；

ε_y —— 钢材的屈服应变 ($\mu\varepsilon$)。

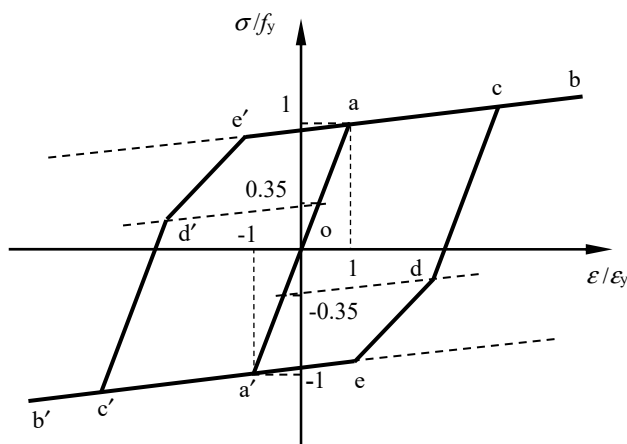


图 A.2.2 钢管应力-应变滞回关系曲线示意图

【条文说明】A.2.2 当应变小于等于屈服应变 ε_y 时，按弹性刚度 E_s 加卸载；如果钢材在进入强化段 ab 前卸载，则不考虑包辛格(Bauschinger)效应；反之，如果钢材在强化段 ab 卸载，则需考虑

包辛格(Bauschinger)效应。

A.2.3 钢筋在反复荷载作用下的应力-应变关系宜计入包辛格效应和滑移，按弹性刚度卸载至应力为零后，反向加载指向历史最大应变点（图 A.2.3）。

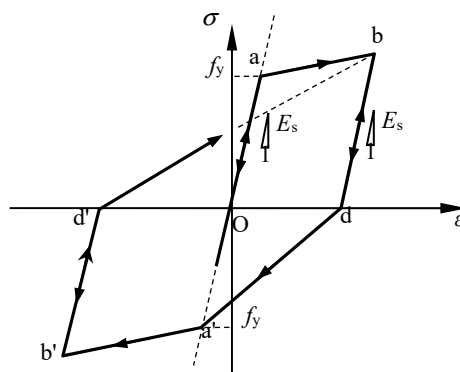


图 A.2.3 钢筋应力-应变滞回关系曲线示意图

【条文说明】A.2.3 当应变小于等于屈服应变 ε_y 时，按弹性刚度 E_s 加卸载；如果钢筋在进入强化段 ab 前卸载，则不考虑 Bauschinger 效应和钢筋滑移；反之，如果钢筋在强化段 ab 卸载，则需考虑 Bauschinger 效应和钢筋滑移，卸载过程仍按弹性刚度卸载，再加载过程按直线加载。再加载过程由应力为零点直接指向历史最大应变点，如 $d'b$ 。当再加载至历史最大应力点之后，继续按骨架线加载。

附录 B 稳定系数 φ 值表

表 B.0.1 稳定系数 φ 值表

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q235	C30	0.06	1.000	0.976	0.929	0.883	0.837	0.793	0.750	0.708	0.666	0.626
		0.08	1.000	0.977	0.931	0.887	0.843	0.800	0.758	0.716	0.675	0.635
		0.12	1.000	0.978	0.936	0.894	0.852	0.810	0.769	0.728	0.688	0.647
		0.16	1.000	0.979	0.938	0.898	0.858	0.818	0.778	0.737	0.697	0.657
		0.20	1.000	0.979	0.941	0.902	0.863	0.824	0.784	0.744	0.704	0.664
	C40	0.06	1.000	0.961	0.906	0.854	0.804	0.756	0.710	0.666	1.000	0.961
		0.08	1.000	0.962	0.909	0.859	0.810	0.763	0.717	0.674	0.632	0.592
		0.12	1.000	0.963	0.913	0.865	0.818	0.772	0.728	0.685	0.644	0.604
		0.16	1.000	0.965	0.916	0.869	0.824	0.779	0.736	0.694	0.653	0.613
		0.20	1.000	0.965	0.919	0.873	0.828	0.785	0.742	0.700	0.659	0.619
	C50	0.06	1.000	0.950	0.891	0.835	0.782	0.731	0.684	0.639	1.000	0.950
		0.08	1.000	0.951	0.894	0.840	0.787	0.738	0.691	0.646	0.604	0.565
		0.12	1.000	0.953	0.898	0.846	0.795	0.747	0.701	0.657	0.616	0.576
		0.16	1.000	0.954	0.901	0.850	0.801	0.754	0.709	0.665	0.624	0.584
		0.20	1.000	0.955	0.904	0.854	0.806	0.759	0.714	0.671	0.630	0.591
	C60	0.06	1.000	0.940	0.877	0.818	0.762	0.710	0.660	0.615	0.572	0.533
		0.08	1.000	0.941	0.880	0.822	0.767	0.716	0.667	0.622	0.580	0.541
		0.12	1.000	0.943	0.884	0.828	0.775	0.725	0.677	0.632	0.591	0.551
		0.16	1.000	0.945	0.887	0.833	0.781	0.731	0.684	0.640	0.598	0.559
		0.20	1.000	0.946	0.890	0.836	0.785	0.736	0.690	0.646	0.604	0.565
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q235	C30	0.06	0.587	0.527	0.465	0.413	0.370	0.333	0.301	0.274	0.250	0.229
		0.08	0.595	0.534	0.472	0.419	0.375	0.338	0.306	0.278	0.254	0.233
		0.12	0.607	0.545	0.481	0.428	0.383	0.345	0.312	0.283	0.259	0.237
		0.16	0.616	0.553	0.488	0.434	0.388	0.350	0.316	0.288	0.263	0.241
		0.20	0.623	0.560	0.494	0.439	0.393	0.354	0.320	0.291	0.266	0.243
	C40	0.06	0.547	0.491	0.433	0.385	0.344	0.310	0.281	0.255	0.233	0.213
		0.08	0.554	0.498	0.439	0.391	0.349	0.315	0.285	0.259	0.236	0.217
		0.12	0.566	0.508	0.448	0.399	0.357	0.321	0.290	0.264	0.241	0.221
		0.16	0.574	0.515	0.455	0.404	0.362	0.326	0.295	0.268	0.245	0.224
		0.20	0.580	0.521	0.460	0.409	0.366	0.329	0.298	0.271	0.247	0.227
	C50	0.06	0.521	0.467	0.412	0.367	0.328	0.295	0.267	0.243	0.222	0.203
		0.08	0.528	0.474	0.418	0.372	0.333	0.300	0.271	0.246	0.225	0.206
		0.12	0.539	0.484	0.427	0.380	0.340	0.306	0.277	0.252	0.230	0.211
		0.16	0.547	0.491	0.433	0.385	0.345	0.310	0.281	0.255	0.233	0.214
		0.20	0.553	0.496	0.438	0.389	0.348	0.314	0.284	0.258	0.236	0.216
	C60	0.06	0.498	0.447	0.394	0.350	0.314	0.282	0.255	0.232	0.212	0.194
		0.08	0.505	0.453	0.400	0.356	0.318	0.286	0.259	0.236	0.215	0.197
		0.12	0.515	0.462	0.408	0.363	0.325	0.292	0.264	0.240	0.219	0.201
		0.16	0.523	0.469	0.414	0.368	0.329	0.296	0.268	0.244	0.223	0.204
		0.20	0.528	0.474	0.419	0.372	0.333	0.300	0.271	0.247	0.225	0.206

续表 B.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q345	C30	0.06	1.000	0.981	0.944	0.904	0.863	0.819	0.774	0.726	0.677	0.599
		0.08	1.000	0.983	0.948	0.910	0.871	0.828	0.784	0.736	0.687	0.608
		0.12	1.000	0.985	0.954	0.919	0.882	0.841	0.798	0.751	0.701	0.620
		0.16	1.000	0.986	0.958	0.926	0.890	0.851	0.808	0.761	0.711	0.629
		0.20	1.000	0.987	0.961	0.931	0.897	0.858	0.816	0.770	0.719	0.636
	C40	0.06	1.000	0.966	0.918	0.870	0.822	0.774	0.726	0.678	0.631	0.558
		0.08	1.000	0.968	0.922	0.876	0.829	0.783	0.735	0.688	0.640	0.566
		0.12	1.000	0.970	0.928	0.884	0.840	0.795	0.749	0.701	0.653	0.578
		0.16	1.000	0.972	0.932	0.891	0.848	0.804	0.758	0.711	0.662	0.586
		0.20	1.000	0.973	0.935	0.896	0.854	0.811	0.766	0.719	0.670	0.593
	C50	0.06	1.000	0.954	0.900	0.847	0.795	0.744	0.695	0.647	0.601	0.531
		0.08	1.000	0.956	0.904	0.853	0.802	0.753	0.704	0.656	0.610	0.539
		0.12	1.000	0.959	0.910	0.861	0.813	0.764	0.717	0.669	0.622	0.550
		0.16	1.000	0.961	0.914	0.867	0.820	0.773	0.726	0.678	0.631	0.558
		0.20	1.000	0.962	0.917	0.872	0.826	0.780	0.733	0.686	0.638	0.564
	C60	0.06	1.000	0.943	0.883	0.826	0.771	0.718	0.668	0.620	0.574	0.508
		0.08	1.000	0.945	0.887	0.831	0.778	0.726	0.676	0.628	0.583	0.515
		0.12	1.000	0.948	0.893	0.840	0.788	0.737	0.688	0.641	0.595	0.526
		0.16	1.000	0.950	0.897	0.846	0.795	0.745	0.697	0.650	0.603	0.533
		0.20	1.000	0.951	0.900	0.850	0.801	0.752	0.704	0.657	0.610	0.539
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q345	C30	0.06	0.519	0.454	0.401	0.356	0.319	0.287	0.260	0.236	0.216	0.198
		0.08	0.527	0.461	0.407	0.362	0.324	0.291	0.264	0.240	0.219	0.201
		0.12	0.538	0.470	0.415	0.369	0.330	0.297	0.269	0.244	0.223	0.205
		0.16	0.545	0.477	0.421	0.374	0.335	0.302	0.273	0.248	0.226	0.208
		0.20	0.551	0.483	0.426	0.379	0.339	0.305	0.276	0.251	0.229	0.210
	C40	0.06	0.484	0.423	0.373	0.332	0.297	0.267	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.08	0.491	0.429	0.379	0.337	0.301	0.271	0.245	0.223	0.204	0.187
		0.12	0.501	0.438	0.387	0.344	0.308	0.277	0.250	0.228	0.208	0.191
		0.16	0.508	0.445	0.392	0.349	0.312	0.281	0.254	0.231	0.211	0.193
		0.20	0.514	0.449	0.397	0.353	0.316	0.284	0.257	0.234	0.213	0.196
	C50	0.06	0.461	0.403	0.356	0.316	0.283	0.255	0.230	0.210	0.191	0.175
		0.08	0.467	0.409	0.361	0.321	0.287	0.258	0.234	0.213	0.194	0.178
		0.12	0.477	0.417	0.368	0.327	0.293	0.264	0.239	0.217	0.198	0.182
		0.16	0.484	0.423	0.374	0.332	0.297	0.268	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.20	0.489	0.428	0.378	0.336	0.301	0.271	0.245	0.223	0.203	0.186
	C60	0.06	0.440	0.385	0.340	0.302	0.270	0.243	0.220	0.200	0.183	0.168
		0.08	0.447	0.391	0.345	0.307	0.274	0.247	0.223	0.203	0.185	0.170
		0.12	0.456	0.399	0.352	0.313	0.280	0.252	0.228	0.207	0.189	0.174
		0.16	0.462	0.405	0.357	0.317	0.284	0.256	0.231	0.210	0.192	0.176
		0.20	0.468	0.409	0.361	0.321	0.287	0.259	0.234	0.213	0.194	0.178

续表 B.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q390	C30	0.06	1.000	0.983	0.949	0.911	0.870	0.825	0.777	0.726	0.663	0.568
		0.08	1.000	0.985	0.953	0.918	0.878	0.835	0.788	0.737	0.673	0.577
		0.12	1.000	0.987	0.960	0.927	0.891	0.849	0.803	0.752	0.686	0.589
		0.16	1.000	0.989	0.964	0.935	0.900	0.859	0.813	0.762	0.696	0.597
		0.20	1.000	0.990	0.968	0.940	0.907	0.867	0.822	0.771	0.704	0.604
	C40	0.06	1.000	0.968	0.921	0.874	0.826	0.777	0.728	0.677	0.618	0.530
		0.08	1.000	0.969	0.926	0.881	0.834	0.787	0.738	0.687	0.627	0.537
		0.12	1.000	0.972	0.932	0.890	0.846	0.800	0.751	0.701	0.639	0.548
		0.16	1.000	0.974	0.937	0.897	0.855	0.809	0.761	0.711	0.649	0.556
		0.20	1.000	0.976	0.941	0.903	0.861	0.817	0.769	0.719	0.656	0.562
	C50	0.06	1.000	0.956	0.902	0.850	0.798	0.746	0.696	0.646	0.588	0.504
		0.08	1.000	0.958	0.907	0.856	0.806	0.755	0.705	0.655	0.597	0.512
		0.12	1.000	0.961	0.913	0.865	0.817	0.768	0.718	0.668	0.609	0.522
		0.16	1.000	0.963	0.918	0.872	0.825	0.777	0.728	0.678	0.618	0.530
		0.20	1.000	0.965	0.922	0.877	0.831	0.784	0.735	0.685	0.625	0.536
	C60	0.06	1.000	0.944	0.885	0.827	0.772	0.719	0.667	0.618	0.562	0.482
		0.08	1.000	0.946	0.889	0.834	0.780	0.727	0.676	0.626	0.570	0.489
		0.12	1.000	0.949	0.895	0.843	0.790	0.739	0.689	0.639	0.582	0.499
		0.16	1.000	0.951	0.900	0.849	0.798	0.748	0.698	0.648	0.590	0.506
		0.2	1.000	0.953	0.904	0.854	0.804	0.755	0.705	0.655	0.597	0.512
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q390	C30	0.06	0.493	0.431	0.381	0.338	0.303	0.272	0.247	0.224	0.205	0.188
		0.08	0.500	0.437	0.386	0.343	0.307	0.276	0.250	0.227	0.208	0.190
		0.12	0.510	0.446	0.394	0.350	0.313	0.282	0.255	0.232	0.212	0.194
		0.16	0.518	0.453	0.400	0.355	0.318	0.286	0.259	0.235	0.215	0.197
		0.20	0.523	0.458	0.404	0.359	0.321	0.289	0.262	0.238	0.217	0.199
	C40	0.06	0.459	0.402	0.354	0.315	0.282	0.254	0.230	0.209	0.191	0.175
		0.08	0.466	0.407	0.360	0.320	0.286	0.257	0.233	0.212	0.193	0.177
		0.12	0.475	0.416	0.367	0.326	0.292	0.263	0.238	0.216	0.197	0.181
		0.16	0.482	0.422	0.372	0.331	0.296	0.267	0.241	0.219	0.200	0.184
		0.20	0.487	0.427	0.376	0.335	0.299	0.270	0.244	0.222	0.202	0.186
	C50	0.06	0.437	0.383	0.338	0.300	0.269	0.242	0.219	0.199	0.182	0.166
		0.08	0.444	0.388	0.343	0.304	0.272	0.245	0.222	0.202	0.184	0.169
		0.12	0.453	0.396	0.350	0.311	0.278	0.250	0.226	0.206	0.188	0.172
		0.16	0.459	0.402	0.355	0.315	0.282	0.254	0.230	0.209	0.191	0.175
		0.20	0.464	0.406	0.359	0.319	0.285	0.257	0.232	0.211	0.193	0.177
	C60	0.06	0.418	0.366	0.323	0.287	0.257	0.231	0.209	0.190	0.174	0.159
		0.08	0.424	0.371	0.327	0.291	0.260	0.234	0.212	0.193	0.176	0.161
		0.12	0.433	0.379	0.334	0.297	0.266	0.239	0.216	0.197	0.180	0.165
		0.16	0.439	0.384	0.339	0.301	0.270	0.243	0.220	0.200	0.182	0.167
		0.20	0.444	0.388	0.343	0.305	0.273	0.245	0.222	0.202	0.184	0.169

续表 B.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q420	C30	0.06	1.000	0.984	0.951	0.914	0.873	0.828	0.778	0.724	0.642	0.550
		0.08	1.000	0.986	0.956	0.922	0.882	0.838	0.789	0.735	0.651	0.558
		0.12	1.000	0.989	0.963	0.932	0.895	0.852	0.804	0.750	0.664	0.569
		0.16	1.000	0.991	0.968	0.939	0.904	0.863	0.815	0.760	0.674	0.578
		0.20	1.000	0.992	0.972	0.945	0.912	0.871	0.823	0.769	0.681	0.584
	C40	0.06	1.000	0.969	0.923	0.876	0.828	0.779	0.727	0.675	0.598	0.512
		0.08	1.000	0.971	0.928	0.883	0.837	0.788	0.737	0.685	0.606	0.520
		0.12	1.000	0.974	0.935	0.893	0.849	0.802	0.752	0.699	0.619	0.530
		0.16	1.000	0.976	0.940	0.901	0.858	0.812	0.762	0.709	0.628	0.538
		0.20	1.000	0.978	0.944	0.906	0.865	0.819	0.770	0.717	0.635	0.544
	C50	0.06	1.000	0.956	0.904	0.851	0.799	0.747	0.695	0.643	0.569	0.488
		0.08	1.000	0.958	0.908	0.858	0.807	0.756	0.704	0.652	0.577	0.495
		0.12	1.000	0.962	0.915	0.867	0.819	0.769	0.718	0.666	0.589	0.505
		0.16	1.000	0.964	0.920	0.874	0.827	0.778	0.727	0.675	0.598	0.513
		0.20	1.000	0.966	0.924	0.880	0.834	0.786	0.735	0.683	0.605	0.518
	C60	0.06	1.000	0.944	0.885	0.828	0.772	0.718	0.666	0.615	0.544	0.466
		0.08	1.000	0.947	0.890	0.834	0.780	0.727	0.675	0.624	0.552	0.473
		0.12	1.000	0.950	0.897	0.844	0.791	0.739	0.688	0.636	0.563	0.483
		0.16	1.000	0.952	0.902	0.851	0.799	0.748	0.697	0.645	0.571	0.490
		0.20	1.000	0.954	0.905	0.856	0.806	0.755	0.704	0.653	0.578	0.495
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q420	C30	0.06	0.477	0.417	0.368	0.327	0.293	0.264	0.239	0.217	0.198	0.182
		0.08	0.484	0.423	0.374	0.332	0.297	0.267	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.12	0.494	0.432	0.381	0.339	0.303	0.273	0.247	0.225	0.205	0.188
		0.16	0.501	0.438	0.387	0.344	0.308	0.277	0.251	0.228	0.208	0.191
		0.20	0.506	0.443	0.391	0.348	0.311	0.280	0.253	0.230	0.210	0.193
	C40	0.06	0.444	0.389	0.343	0.305	0.273	0.246	0.222	0.202	0.184	0.169
		0.08	0.451	0.394	0.348	0.309	0.277	0.249	0.225	0.205	0.187	0.172
		0.12	0.460	0.402	0.355	0.316	0.282	0.254	0.230	0.209	0.191	0.175
		0.16	0.466	0.408	0.360	0.320	0.287	0.258	0.233	0.212	0.194	0.178
		0.20	0.472	0.413	0.364	0.324	0.290	0.261	0.236	0.215	0.196	0.180
	C50	0.06	0.423	0.370	0.327	0.290	0.260	0.234	0.212	0.192	0.176	0.161
		0.08	0.429	0.376	0.331	0.295	0.264	0.237	0.215	0.195	0.178	0.163
		0.12	0.438	0.383	0.338	0.301	0.269	0.242	0.219	0.199	0.182	0.167
		0.16	0.444	0.389	0.343	0.305	0.273	0.246	0.222	0.202	0.185	0.169
		0.20	0.449	0.393	0.347	0.308	0.276	0.248	0.225	0.204	0.187	0.171
	C60	0.06	0.404	0.354	0.312	0.278	0.248	0.224	0.202	0.184	0.168	0.154
		0.08	0.410	0.359	0.317	0.282	0.252	0.227	0.205	0.187	0.170	0.156
		0.12	0.419	0.366	0.323	0.287	0.257	0.231	0.209	0.190	0.174	0.159
		0.16	0.425	0.372	0.328	0.291	0.261	0.235	0.212	0.193	0.176	0.162
		0.20	0.429	0.376	0.332	0.295	0.264	0.237	0.215	0.195	0.178	0.163

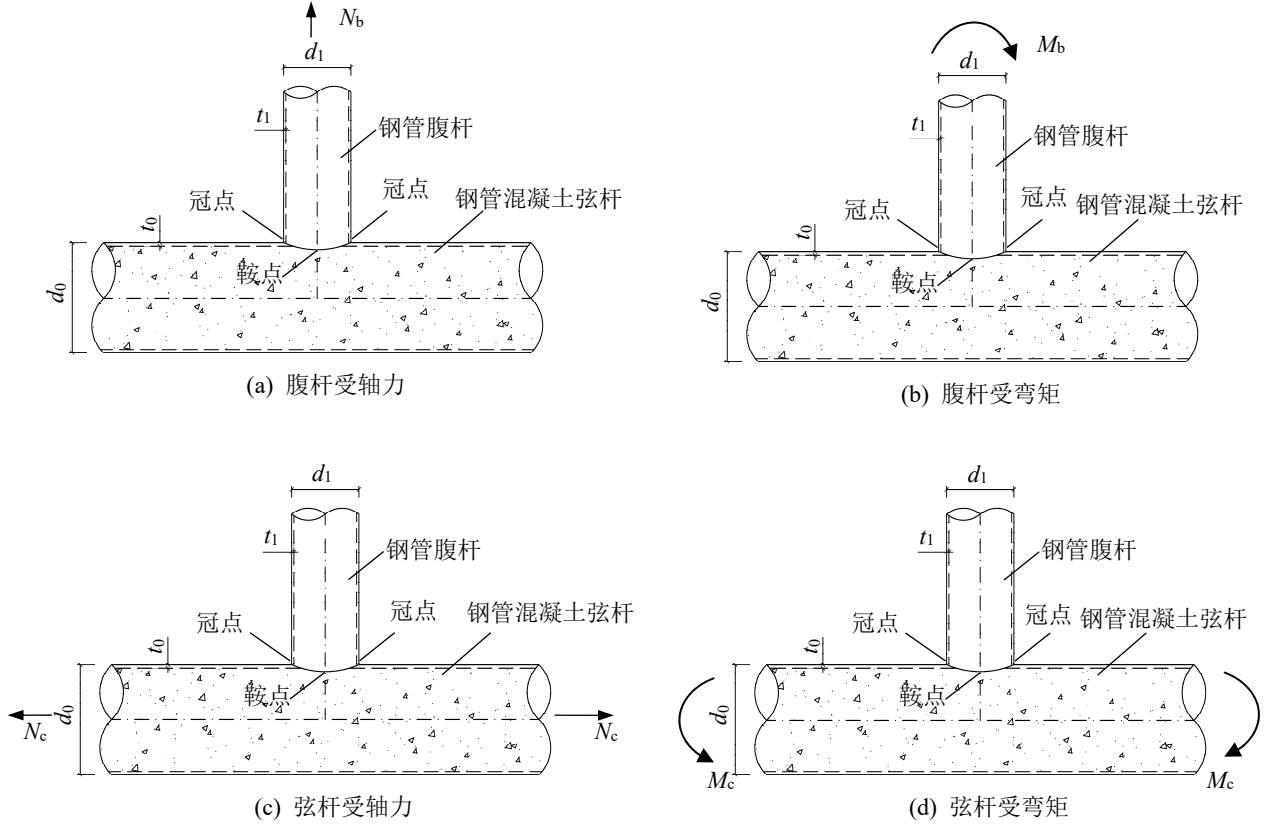
续表 B.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q460	C30	0.06	1.000	0.986	0.955	0.918	0.876	0.829	0.777	0.719	0.615	0.527
		0.08	1.000	0.988	0.960	0.926	0.886	0.840	0.787	0.729	0.624	0.535
		0.12	1.000	0.990	0.967	0.937	0.899	0.855	0.803	0.744	0.637	0.546
		0.16	1.000	0.992	0.973	0.945	0.909	0.866	0.814	0.755	0.646	0.554
		0.20	1.000	0.994	0.977	0.951	0.917	0.874	0.823	0.763	0.653	0.560
	C40	0.06	1.000	0.970	0.925	0.878	0.830	0.778	0.725	0.670	0.573	0.491
		0.08	1.000	0.972	0.930	0.886	0.838	0.788	0.735	0.679	0.581	0.498
		0.12	1.000	0.975	0.938	0.896	0.851	0.802	0.750	0.693	0.593	0.509
		0.16	1.000	0.977	0.943	0.904	0.861	0.813	0.760	0.703	0.602	0.516
		0.20	1.000	0.979	0.947	0.910	0.868	0.821	0.768	0.711	0.609	0.522
	C50	0.06	1.000	0.957	0.905	0.852	0.799	0.745	0.692	0.638	0.546	0.468
		0.08	1.000	0.959	0.910	0.859	0.807	0.755	0.701	0.647	0.554	0.475
		0.12	1.000	0.963	0.917	0.869	0.820	0.768	0.715	0.660	0.565	0.484
		0.16	1.000	0.965	0.922	0.877	0.829	0.778	0.725	0.670	0.573	0.491
		0.20	1.000	0.967	0.926	0.883	0.836	0.786	0.733	0.677	0.580	0.497
	C60	0.06	1.000	0.945	0.886	0.828	0.771	0.716	0.662	0.609	0.522	0.447
		0.08	1.000	0.947	0.890	0.835	0.780	0.725	0.671	0.618	0.529	0.454
		0.12	1.000	0.951	0.898	0.845	0.791	0.738	0.685	0.631	0.540	0.463
		0.16	1.000	0.953	0.903	0.852	0.800	0.747	0.694	0.640	0.548	0.470
		0.20	1.000	0.955	0.907	0.857	0.807	0.755	0.702	0.647	0.554	0.475
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q460	C30	0.06	0.457	0.400	0.353	0.314	0.281	0.253	0.229	0.208	0.190	0.174
		0.08	0.464	0.406	0.358	0.318	0.285	0.256	0.232	0.211	0.193	0.177
		0.12	0.473	0.414	0.365	0.325	0.291	0.262	0.237	0.215	0.197	0.180
		0.16	0.480	0.420	0.371	0.330	0.295	0.265	0.240	0.218	0.199	0.183
		0.20	0.486	0.425	0.375	0.333	0.298	0.268	0.243	0.221	0.202	0.185
	C40	0.06	0.426	0.373	0.329	0.292	0.262	0.235	0.213	0.194	0.177	0.162
		0.08	0.432	0.378	0.334	0.297	0.265	0.239	0.216	0.196	0.179	0.164
		0.12	0.441	0.386	0.340	0.303	0.271	0.244	0.221	0.201	0.183	0.168
		0.16	0.447	0.391	0.345	0.307	0.275	0.247	0.224	0.203	0.186	0.170
		0.20	0.452	0.396	0.349	0.310	0.278	0.250	0.226	0.206	0.188	0.172
	C50	0.06	0.406	0.355	0.313	0.278	0.249	0.224	0.203	0.184	0.168	0.154
		0.08	0.411	0.360	0.318	0.282	0.253	0.228	0.206	0.187	0.171	0.157
		0.12	0.420	0.367	0.324	0.288	0.258	0.232	0.210	0.191	0.174	0.160
		0.16	0.426	0.373	0.329	0.292	0.262	0.236	0.213	0.194	0.177	0.162
		0.20	0.431	0.377	0.333	0.296	0.265	0.238	0.216	0.196	0.179	0.164
	C60	0.06	0.388	0.339	0.299	0.266	0.238	0.214	0.194	0.176	0.161	0.148
		0.08	0.393	0.344	0.304	0.270	0.242	0.217	0.197	0.179	0.163	0.150
		0.12	0.401	0.351	0.310	0.276	0.247	0.222	0.201	0.183	0.167	0.153
		0.16	0.407	0.356	0.314	0.279	0.250	0.225	0.204	0.185	0.169	0.155
		0.20	0.412	0.360	0.318	0.283	0.253	0.228	0.206	0.187	0.171	0.157

注：表内中间值可采用插值法求得。

附录 C 相贯焊接节点的热点应力集中系数计算

C.0.1 相贯焊接 T 形节点的热点应力集中系数 SCF 计算。



无量纲几何参数: $\beta = d_1/d_0$, $\tau = t_1/t_0$, $\gamma = d_0/(2t_0)$

图 C.0.1 钢管混凝土 T 形节点受力形式

1 腹杆受轴力时引起弦杆冠点、鞍点和腹杆冠点、鞍点的 SCF 计算公式 (图 C.0.1(a))

$$SCF_{\text{弦冠, 轴力}} = 1.5 + \gamma^{0.067} \cdot \tau \cdot (4.932 + 2.823 \cdot (\beta - 0.03)^2) + 0.099 \cdot \beta^{-0.16} \cdot \tau^{-0.509} \quad (C.0.1-1)$$

$$SCF_{\text{弦鞍, 轴力}} = 0.5 + 0.8 \cdot \gamma^{0.683} \cdot \tau^{0.947} \cdot (1.038 - 0.56 \cdot (\beta + 0.042)^2) \quad (C.0.1-2)$$

$$SCF_{\text{腹冠, 轴力}} = 4 - 5.013 \cdot \gamma^{0.186} \cdot \tau^{2.64} \cdot (0.698 + 2.365 \cdot \beta^{0.381} \cdot (\beta - 0.6)) + 15.219 \cdot \beta^{2.047} \cdot \tau^{2.424} \quad (C.0.1-3)$$

$$SCF_{\text{腹鞍, 轴力}} = 3 + 0.226 \cdot \gamma^{1.26} \cdot \tau^{0.595} \cdot (0.144 - 0.035 \cdot \beta^{-0.894} \cdot (\beta - 0.6)) + 0.181 \cdot \beta^{0.935} \cdot \tau^{-0.469} \quad (C.0.1-4)$$

2 腹杆受平面内弯矩引起弦杆冠点和腹杆冠点的 SCF 计算公式 (图 C.0.1(b))

$$SCF_{\text{弦冠, 弯矩}} = 1.2 \cdot \beta \cdot \tau^{0.82} \cdot \gamma^{(0.873-0.519\beta)} \quad (C.0.1-5)$$

$$SCF_{\text{腹冠, 弯矩}} = 0.5 + 1.878 \cdot \beta \cdot \tau^{0.033} \cdot \gamma^{(0.698-0.83\beta)} \quad (C.0.1-6)$$

3 弦杆受轴力时引起弦杆冠点、鞍点的 SCF 计算公式 (图 C.0.1(c))

$$SCF_{\text{弦冠, 轴力}} = 1.7 \quad (C.0.1-7)$$

$$SCF_{\text{弦鞍, 轴力}} = 1.0 \quad (C.0.1-8)$$

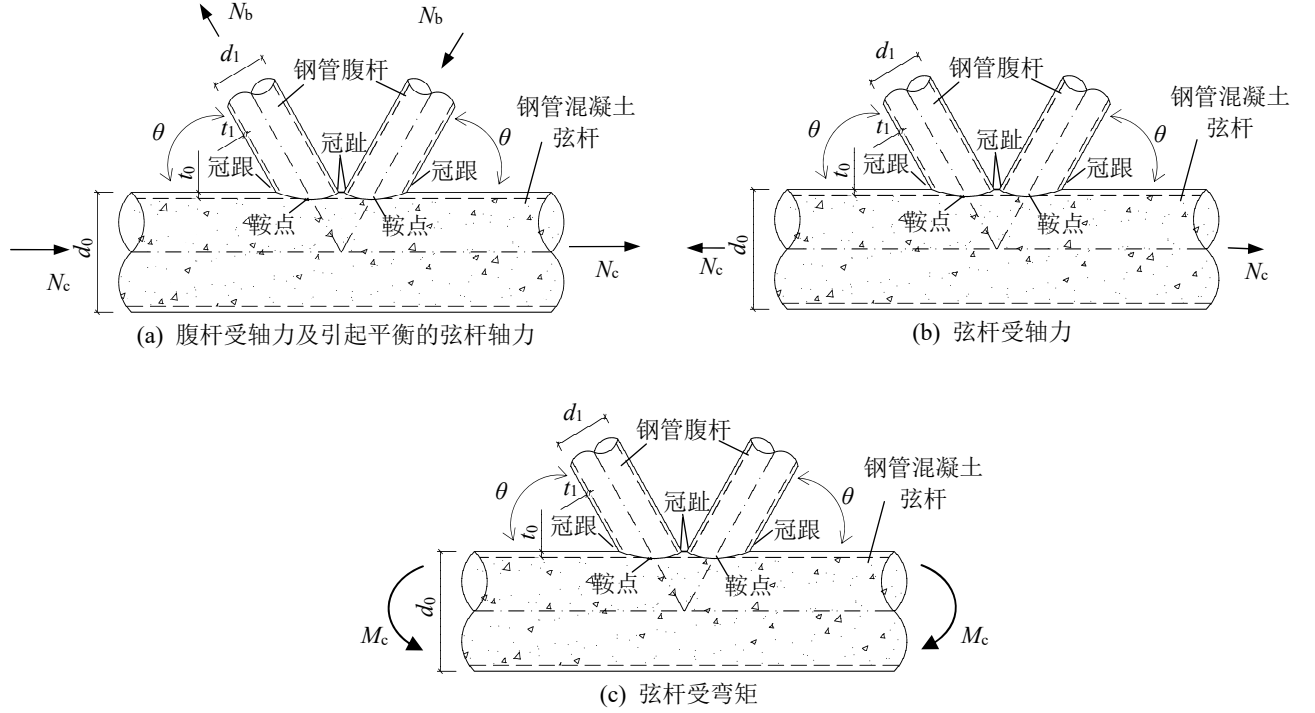
4 弦杆受平面内弯矩时引起弦杆冠点、鞍点的 SCF 计算公式 (图 C.0.1(d))

$$SCF_{\text{弦冠, 弯矩}} = 1.7 \quad (C.0.1-9)$$

$$SCF_{\text{弦鞍, 弯矩}} = 1.0 \quad (C.0.1-10)$$

以上公式适用范围: $0.2 \leq \beta \leq 0.95$, $15 \leq 2\gamma \leq 64$, $0.2 \leq \tau \leq 1.0$ 。

C.0.2 相贯焊接 K 形间隙节点的热点应力集中系数 SCF 计算。



无量纲几何参数: $\beta = d_1/d_0$, $\tau = t_1/t_0$, $\gamma = d_0/(2t_0)$ 。

图 C.0.2 K 形间隙节点受力形式

1 腹杆受轴力时引起弦杆冠趾、鞍点和腹杆冠趾、鞍点的 SCF 计算公式 (图 C.0.2(a))

$$SCF_{\text{弦冠, 轴力}} = (1.216 - 3.175 \cdot \beta + 6.652 \cdot \beta^2) \cdot \beta^{-0.739} \cdot (2\gamma)^{0.294} \cdot \tau^{0.802} \cdot (\sin \theta)^{0.596} \quad (C.0.2-1)$$

$$SCF_{\text{弦鞍, 轴力}} = (1.313 + 0.608 \cdot \beta - 0.128 \cdot \beta^2) \cdot \beta^{-0.433} \cdot (2\gamma)^{0.277} \cdot \tau^{0.989} \cdot (\sin \theta)^{0.615} \quad (C.0.2-2)$$

$$SCF_{\text{腹冠, 轴力}} = (0.832 + 0.666 \cdot \beta + 1.46 \cdot \beta^2) \cdot \beta^{-0.866} \cdot (2\gamma)^{-0.042} \cdot \tau^{-0.064} \cdot (\sin \theta)^{1.406} \quad (C.0.2-3)$$

$$SCF_{\text{腹鞍, 轴力}} = (2.248 - 4.422 \cdot \beta + 2.709 \cdot \beta^2) \cdot \beta^{0.198} \cdot (2\gamma)^{0.317} \cdot \tau^{0.448} \cdot (\sin \theta)^{0.013} \quad (C.0.2-4)$$

2 弦杆受轴力时引起弦杆冠趾、鞍点的 SCF 计算公式 (图 C.0.2(b))

$$SCF_{\text{弦冠, 轴力}} = 2.0 \quad (C.0.2-5)$$

$$SCF_{\text{弦鞍, 轴力}} = 1.0 \quad (C.0.2-6)$$

3 弦杆受平面内弯矩时引起弦杆冠趾、鞍点的 SCF 计算公式 (图 C.0.2(c))

$$SCF_{\text{弦冠, 弯矩}} = 2.0 \quad (C.0.2-7)$$

$$SCF_{\text{弦鞍, 弯矩}} = 1.0 \quad (C.0.2-8)$$

以上公式适用范围： $0.3 \leq \beta \leq 0.8$ ， $24 \leq 2\gamma \leq 60$ ， $0.25 \leq \tau \leq 1.0$ ， $30^\circ < \theta < 60^\circ$ 。

C.0.3 相贯焊接节点的热点应力计算。

根据图 C.0.1 或图 C.0.2 的内力情况以及对应内力引起的热点应力集中系数,应用叠加原理计算出相贯线上以下四点位置（即弦杆冠点（趾）、弦杆鞍点、腹杆冠点（趾）、腹杆鞍点）最终的热点应力，并取其中最大的热点应力及其位置，作为节点疲劳验算的应力指标及验算位置。

$$\sigma_{hs} = \sum (\text{SCF}_{\text{轴力}, i} \cdot \sigma_{\text{轴力}, i}) + \sum (\text{SCF}_{\text{弯矩}, i} \cdot \sigma_{\text{弯矩}, i}) \quad (\text{C.0.3-1})$$

式中： σ_{hs} — 由腹杆、弦杆的内力（轴力、弯矩）引起某一位置（冠点（趾）、鞍点）最终的热点应力；

$\text{SCF}_{\text{轴力}, i}$ — 由腹杆、弦杆各个轴力引起某一位置的热点应力集中系数，见 C.0.1 和 C.0.2 各公式；

$\text{SCF}_{\text{弯矩}, i}$ — 由腹杆、弦杆各个弯矩引起某一位置的热点应力集中系数，见 C.0.1 和 C.0.2 各公式；

$\sigma_{\text{轴力}, i}$ — 由腹杆、弦杆各个轴力引起某一位置的名义应力，由轴力除以圆钢管截面面积得到；

$\sigma_{\text{弯矩}, i}$ — 由腹杆、弦杆各个弯矩引起某一位置的名义应力，由弯矩除以圆钢管截面弹性抗弯模量得到。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况均应这样做的：
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，在条件许可时首先这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按照……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 2 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 3 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 4 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 5 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 6 《工业建筑防腐蚀设计规范》 GB 50046
- 7 《建筑结构可靠性设计统一标准》 GB 50068
- 8 《混凝土强度检验评定标准》 GB 50107
- 9 《铁路工程抗震设计规范》 GB 50111
- 10 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 11 《港口工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50158
- 12 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 13 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
- 14 《铁路工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50216
- 15 《建筑工程施工质量验收统一标准》 GB 50300
- 16 《钢管混凝土工程施工质量验收规范》 GB 50628
- 17 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 18 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 19 《钢结构工程施工规范》 GB 50755
- 20 《机械工业厂房结构设计规范》 GB 50906
- 21 《钢管混凝土结构技术规范》 GB 50936
- 22 《建筑钢结构防火技术规范》 GB 51249
- 23 《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》 GB/T 985.1
- 24 《埋弧焊的推荐坡口》 GB/T 985.2
- 25 《碳素结构钢》 GB/T 700
- 26 《钢结构用高强度大六角头螺栓》 GB/T 1228
- 27 《钢结构用高强度大六角螺母》 GB/T 1229
- 28 《钢结构用高强度垫圈》 GB/T 1230
- 29 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》 GB/T 1231
- 30 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 31 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》 GB/T 3632

- 32 《非合金钢及细晶粒钢焊条》 GB/T 5117
- 33 《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》 GB/T 5293
- 34 《六角头螺栓 C级》 GB/T 5780
- 35 《六角头螺栓》 GB/T 5782
- 36 《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》 GB/T 8110
- 37 《结构用无缝钢管》 GB/T 8162
- 38 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》 GB/T 8923
- 39 《建筑构件耐火试验方法》 GB/T 9978
- 40 《碳钢药芯焊丝》 GB/T 10045
- 41 《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》 GB/T 12470
- 42 《直缝电焊钢管》 GB/T 13793
- 43 《钢结构防火涂料通用技术条件》 GB 14907
- 44 《熔化焊用钢丝》 GB/T 14957
- 45 《低合金钢药芯焊丝》 GB/T 17493
- 46 《混凝土强度检验评定标准》 GB/T 50107
- 47 《公路工程结构可靠度设计统一标准》 GB/T 50283
- 48 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ 55
- 49 《组合结构设计规范》 JGJ 138
- 50 《自密实混凝土应用技术规程》 JGJ/T 283
- 51 《公路桥梁抗震设计细则》 JTG/T B02-01
- 52 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 53 《公路钢管混凝土拱桥设计规范》 JTG/T D65-06
- 54 《架空输电线路荷载规范》 DL/T 5551
- 55 《铁路桥涵设计基本规范》 TB 10002.1
- 56 《架空输电线路杆塔结构设计技术规范》 DL/T 5154
- 57 《钢结构防火涂料应用技术规范》 CECS 24
- 58 《钢管结构技术规程》 CECS 280
- 59 《钢管再生混凝土结构技术规程》 T/CECS 625