

前 言

根据《住房和城乡建设部标准定额司关于开展施工现场建筑垃圾减量化技术标准等 2 项标准编制工作的函》（建司局函标〔2020〕119 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准的主要技术内容是：总则、术语和符号、基本规定、材料、结构分析、钢管混凝土桁式混合结构承载力计算、钢管混凝土加劲混合结构承载力计算、节点设计、防护设计、施工和验收等。

本标准由住房和城乡建设部负责管理，由清华大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送清华大学（地址：北京市海淀区清华大学土木工程系何善衡楼，邮政编码：100084）。

本标准主要起草单位：

清华大学

中国建筑标准设计研究院有限公司

四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

中铁二院工程集团有限责任公司

中国建筑设计研究院有限公司

军事科学院国防工程研究院

中国建筑科学研究院有限公司

公路长大桥建设国家工程研究中心

应急管理部天津消防研究所

火箭军工程设计研究院

中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司

中国建筑西南设计研究院有限公司
广西交通设计集团有限公司
北京市建筑设计研究院有限公司
哈尔滨工业大学
广西大学
同济大学
大连理工大学
北京航空航天大学
天津大学
海军勤务学院
陆军工程大学
重庆交通大学
北京工业大学
南方科技大学
苏州科技大学
中国建筑第三工程局有限公司
广西路桥工程集团有限公司
广西交通投资集团有限公司

本标准主要起草人员：

韩林海	郁银泉	李 威	牟廷敏	陈克坚	肖 明
王法承	郑皆连	马丹阳	郭 勇	范 重	杨 华
杨有福	陆中琪	周建庭	刘 高	宋谦益	范碧琨
王玉银	肖从真	童乐为	于 清	陈 正	侯 超
杨蔚彪	宋天诣	许立山	陈志华	项 凯	商从晋
侯川川	陈胜云	陈启飞	高 磊	贺永胜	陈才华
姜 波	秦大燕	毛小勇	韦灼彬	王劭耘	黄德耕
李成君	韩 玉	王建军			

本标准主要审查人员：

岳清瑞	娄 宇	李国强	葛耀君	徐恭义	刘加平
叶 尹	张晋勋	刘 威	陈振明	王文达	

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	7
3.1	一般规定	7
3.2	作用与作用组合	8
3.3	构造规定	8
4	材料	10
4.1	钢材	10
4.2	混凝土	10
4.3	连接材料	11
4.4	防护材料	12
5	结构分析	13
5.1	一般规定	13
5.2	计算指标	14
5.3	分析方法	17
6	钢管混凝土桁式混合结构承载力计算	18
6.1	一般规定	18
6.2	受压、受拉、受弯承载力计算	18
6.3	受剪承载力计算	37
7	钢管混凝土加劲混合结构承载力计算	38
7.1	一般规定	38
7.2	单肢结构正截面承载力计算	39
7.3	四肢结构正截面承载力计算	46

7.4	六肢结构正截面承载力计算	55
7.5	长细比影响下正截面承载力计算	60
7.6	长期荷载作用下正截面承载力计算	62
7.7	斜截面受剪承载力计算	63
7.8	拱形结构承载力计算	64
8	节点设计	65
8.1	一般规定	65
8.2	钢管混凝土桁式混合结构节点	67
8.3	钢管混凝土加劲混合结构柱-梁连接节点	71
8.4	基础与支承节点构造	74
8.5	节点抗疲劳设计	78
9	防护设计	81
9.1	一般规定	81
9.2	防腐设计	82
9.3	防火设计	83
9.4	防撞击设计	85
10	施工和验收	89
10.1	一般规定	89
10.2	制作与安装	89
10.3	钢管内混凝土施工	91
10.4	钢管外混凝土施工	94
10.5	检测与验收	96
附录 A	钢管混凝土混合结构的材料本构模型	98
附录 B	轴心受压钢管混凝土构件的稳定系数	106
附录 C	钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数	114
附录 D	相贯焊接节点的热点应力集中系数	119
附录 E	单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限	124
本标准用词说明		126
引用标准名录		127

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	7
3.1	General Requirements	7
3.2	Actions and Combinations of Actions	8
3.3	Detailing Requirements	8
4	Materials	10
4.1	Steel	10
4.2	Concrete	10
4.3	Connection Materials	11
4.4	Protective Materials	12
5	Structural Analysis	13
5.1	General Requirements	13
5.2	Design Indices	14
5.3	Analysis Methods	17
6	Design of Trussed CFST Hybrid Structures	18
6.1	General Requirements	18
6.2	Design of Structures for Compression, Tension and Bending	18
6.3	Design of Structures for Shear	37
7	Design of Concrete-encased CFST Hybrid Structures	38
7.1	General Requirements	38

7.2	Design of Single-chord Structures for Compression and Bending	39
7.3	Design of Four-chord Structures for Compression and Bending	46
7.4	Design of Six-chord Structures for Compression and Bending	55
7.5	Design of Slender Structures for Compression and Bending	60
7.6	Design of Structures for Compression and Bending under Long-term Loading	62
7.7	Design of Structures for Shear	63
7.8	Design of Arch Structures	64
8	Design of Joints	65
8.1	General Requirements	65
8.2	Joints of Trussed CFST Hybrid Structures	67
8.3	Beam-to-column Joints of Concrete-encased CFST Hybrid Structures	71
8.4	Detailing Requirements for Column Bases and Supporting Joints	74
8.5	Fatigue Design of Joints	78
9	Protective Design	81
9.1	General Requirements	81
9.2	Design of Corrosion Resistance	82
9.3	Design of Fire Resistance	83
9.4	Design of Impact Resistance	85
10	Construction and Acceptance	89
10.1	General Requirements	89
10.2	Fabrication and Erection of Steel Tubes	89
10.3	Construction of Core Concrete	91
10.4	Construction of Concrete Encasement	94

10.5	Inspection and Acceptance	96
Appendix A	Constitutive Models for Materials in CFST Hybrid Structures	98
Appendix B	Stability Factors for CFST Members in Axial Compression	106
Appendix C	Long-term Load Coefficients for Concrete-encased CFST Hybrid Structures	114
Appendix D	Hot-spot Stress Concentration Factors for Intersecting Welded Joints	119
Appendix E	Fire Resistance Ratings of Single-chord Concrete-encased CFST Hybrid Structures	124
	Explanation of Wording in This Standard	126
	List of Quoted Standards	127

1 总 则

1.0.1 为了在钢管混凝土混合结构工程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，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于房屋建筑、铁路、公路、电力、港口等工程中钢管混凝土混合结构的设计、施工和验收。

1.0.3 钢管混凝土混合结构的设计、施工和验收除应执行本标准外，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 钢管混凝土混合结构 concrete-filled steel tubular (CFST) hybrid structure

以钢管混凝土为主要构件，与其他结构构（部）件混合而成且共同工作的结构，包括钢管混凝土桁式混合结构、钢管混凝土加劲混合结构等。

2.1.2 钢管混凝土桁式混合结构 trussed concrete-filled steel tubular (CFST) hybrid structure

由圆形钢管混凝土弦杆与钢管、钢管混凝土或其他型钢腹杆混合组成的桁式结构。

2.1.3 钢管混凝土加劲混合结构 concrete-encased concrete-filled steel tubular (CFST) hybrid structure

由内置圆形钢管混凝土部分与钢管外包钢筋混凝土部分混合而成的结构。

2.1.4 钢管初应力限值 limiting value of initial stress in the steel tube

钢管混凝土构件在钢管与混凝土共同工作前钢管应力的容许值。

2.1.5 钢管内混凝土脱空容限 limiting value of core concrete void in the steel tube

圆形钢管与管内混凝土间形成的环形脱空或球冠形脱空的脱空率限值或容许脱空高度。

2.1.6 约束效应系数 confinement factor

钢管截面与钢管内混凝土截面的名义轴心受压承载力的比值。

2.1.7 换算长细比 equivalent slenderness ratio

在轴心受压钢管混凝土桁式混合结构整体稳定计算中，将钢管混凝土桁式混合结构换算为钢管混凝土构件时相应的长细比。

2.2 符 号

2.2.1 作用、作用效应和抗力

- M ——弯矩设计值；
- M_u ——受弯承载力；
- N ——轴力设计值；
- N_0 ——钢管混凝土混合结构的截面受压承载力；
- N_c ——钢管混凝土弦杆的截面受压承载力；
- N_{cst} ——内置钢管混凝土部分的截面受压承载力；
- N_{rc} ——外包混凝土部分的截面受压承载力；
- N_t ——钢管混凝土弦杆的截面受拉承载力；
- N_u ——钢管混凝土混合结构的轴心受压承载力；
- V ——剪力设计值；
- V_{cst} ——内置钢管混凝土部分的受剪承载力；
- V_{rc} ——外包混凝土部分的受剪承载力；
- V_u ——钢管混凝土混合结构的受剪承载力。

2.2.2 材料力学性能

- E_c ——混凝土的弹性模量；
- $E_{c,c}$ ——钢管内混凝土的弹性模量；
- $E_{c,oc}$ ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土的弹性模量；
- E_s ——钢材的弹性模量；
- f ——钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
- f_c ——混凝土的轴心抗压强度设计值；
- f_{ck} ——混凝土的轴心抗压强度标准值；
- $f_{c,oc}$ ——钢管外包混凝土的轴心抗压强度设计值；
- $f_{cu,oc}$ ——钢管外包混凝土的立方体抗压强度标准值；

f_t ——纵筋的抗拉强度设计值；
 f'_t ——纵筋的抗压强度设计值；
 f_{sc} ——钢管混凝土截面的轴心抗压强度设计值；
 f_{scy} ——钢管混凝土截面的轴心抗压强度标准值；
 f_{sv} ——钢管混凝土截面的抗剪强度设计值；
 f_y ——钢材的屈服强度；
 $G_{c,c}$ ——钢管内混凝土的剪变模量；
 $G_{c,oc}$ ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土的剪变模量；
 G_s ——钢材的剪变模量；
 W_{sc} ——钢管混凝土桁式混合结构的截面抗弯模量。

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_t ——纵向受力钢筋的截面面积；
 A_{lc} ——侧向局部受压面积；
 A_{oc} ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土的截面面积；
 A_s ——钢管的截面面积；
 A_{sc} ——钢管混凝土的截面面积；
 A_{se} ——腐蚀后钢管的截面面积；
 A_{sv} ——箍筋的截面面积；
 A_v ——箍筋约束混凝土的截面面积；
 A_w ——桁式结构中单根腹杆空钢管的截面面积；
 b_c ——混凝土结构板的翼缘计算宽度；
 B ——截面宽度；
 d_r ——环形脱空的平均距离；
 d_s ——球冠形脱空的最大高度；
 d_w ——腹杆钢管外径；
 D ——圆钢管混凝土的钢管外径；

D_e ——腐蚀后钢管外径；
 D_i ——钢管内混凝土的直径；
 h_0 ——沿弯矩作用方向截面计算高度；
 h_i ——结构沿截面高度方向受压和受拉弦杆形心的距离；
 H ——截面高度；
 I_c ——钢管内混凝土的截面惯性矩；
 I_s ——钢管的截面惯性矩；
 l_0 ——结构的计算长度；
 l_1 ——钢管混凝土桁式混合结构中单根柱肢的节间长度；
 l_v ——箍筋长度；
 s ——箍筋间距；
 t ——钢管壁厚或钢板厚度；
 t_e ——腐蚀后钢管壁厚；
 u_0 ——初始弯曲度；
 α ——腹杆在弦杆截面平面投影夹角的一半；
 Δt ——腐蚀后钢管的平均壁厚损失值；
 ρ ——纵向受力钢筋的配筋率；
 ρ_v ——体积配箍率；
 θ ——斜腹杆与弦杆的夹角。

2.2.4 计算系数及其他

c ——中和轴距受压边缘距离；
 C_m ——结构端截面偏心距调节系数；
 k_{cr} ——长期荷载影响系数；
 K_d ——脱空折减系数；
 K_{SCF} ——热点应力集中系数；
 n ——轴压比；钢管混凝土桁式混合结构中弦杆总数；
 n_{cfs} ——内置钢管混凝土部分的承载力系数；
 n_L ——长期荷载比；
 R ——火灾下结构的荷载比；
 R_d ——撞击动力影响系数；

t_R ——耐火极限；
 V_0 ——撞击物速度；
 α_1 ——钢管外包混凝土等效应力块强度系数；
 α_e ——腐蚀后钢管混凝土名义截面含钢率；
 α_s ——钢管混凝土截面含钢率；
 β_t ——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；
 ε ——应变；
 ε_o ——钢管内混凝土单轴峰值压应变；
 ε_{cu} ——混凝土极限压应变；
 η_c ——弯矩增大系数；
 γ_m ——截面抗弯塑性发展系数；
 γ_{sc} ——钢管混凝土轴心抗压强度分项系数；
 φ ——轴心受压结构的稳定系数；
 λ ——结构的换算长细比；
 λ_o ——结构弹塑性失稳的界限长细比；
 λ_v ——计算截面的剪跨比；
 λ_p ——结构弹性失稳的界限长细比；
 ξ ——约束效应系数；
 ξ_c ——腐蚀后名义约束效应系数；
 σ ——应力；
 σ_o ——钢管内混凝土单轴峰值压应力；
 χ_t ——环形脱空的脱空率；
 χ_s ——球冠形脱空的脱空率。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 钢管混凝土混合结构设计应包括下列内容：

- 1 结构方案设计，包括结构选型、结构布置；
- 2 材料选用及截面选择；
- 3 作用及作用效应分析；
- 4 结构的极限状态验算；
- 5 结构、构件及连接的构造；
- 6 制作、运输、安装、防腐和防火等要求；
- 7 满足特殊要求结构的专门性能设计。

3.1.2 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数设计表达式进行设计。

3.1.3 钢管混凝土混合结构应进行承载能力极限状态设计，且除偶然设计状况外，应进行正常使用极限状态设计，并应符合下列规定：

- 1 进行承载能力极限状态设计时，应采用作用的基本组合、偶然组合或地震组合；
- 2 进行正常使用极限状态设计时，应采用作用的标准组合、频遇组合或准永久组合。

3.1.4 钢管混凝土混合结构的安全等级和设计工作年限应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的有关规定。钢管混凝土混合结构的安全等级，不应低于整体工程结构的安全等级。

3.1.5 进行钢管混凝土混合结构设计时，应合理选择材料、结构方案和构造措施，满足结构构件在施工和使用过程中的强度、刚度和稳定性要求，并应符合防腐和防火等要求。

3.1.6 钢管混凝土混合结构的变形和裂缝宽度应满足安全和使用要求。根据工程类别，结构各部位的变形和裂缝宽度容许值应符合国家现行有关标准的规定。

3.1.7 钢管混凝土混合结构的最大适用高度、抗震等级、内力调整和构造措施，应根据工程类别，符合国家现行标准中关于钢管混凝土结构和型钢混凝土结构的有关规定。

3.1.8 钢管混凝土混合结构应结合施工技术与实际工程条件，选择合理施工方法，并制定技术要求。

3.2 作用与作用组合

3.2.1 钢管混凝土混合结构荷载标准值、荷载组合的分项系数、组合值系数的确定应根据工程类别，符合国家现行有关标准的规定。直接承受动力荷载的钢管混凝土混合结构，计算构件强度、稳定性以及连接强度、疲劳时，动力荷载代表值应乘以动力系数。动力系数取值应符合国家现行有关标准的规定。

3.2.2 进行钢管混凝土混合结构的强度、稳定性以及连接强度验算时，应采用荷载设计值；进行钢管混凝土混合结构的疲劳验算时，应采用荷载标准值。

3.3 构造规定

3.3.1 钢管混凝土混合结构中钢管混凝土的构造应符合下列规定：

1 圆形截面钢管外径不应小于 200mm，壁厚不应小于 4mm，外径与壁厚之比不应大于 $150 \left(\frac{235}{f_y} \right)$ ，且不宜小于 $25 \left(\frac{235}{f_y} \right)$ ，其中 f_y 为钢管钢材的屈服强度 (N/mm^2)。

2 截面含钢率不宜小于 0.06，且不应大于 0.20。截面含钢率应按下列式计算：

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_c} \quad (3.3.1-1)$$

式中： α_s ——截面含钢率；

A_s ——钢管的截面面积 (mm^2);

A_c ——钢管内混凝土的截面面积 (mm^2)。

3 约束效应系数不宜小于 0.6, 且不应大于 4.0。约束效应系数应按下式计算:

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (3.3.1-2)$$

式中: ξ ——约束效应系数;

f_{ck} ——混凝土的轴心抗压强度标准值 (N/mm^2);

f_y ——钢管钢材的屈服强度 (N/mm^2)。

4 当钢管外径大于或等于 2000mm 时, 宜采取减小钢管内混凝土收缩的构造措施。

3.3.2 偏心受压的钢管混凝土桁式混合结构宜采用斜腹杆形式; 当弦杆间距较小或有使用要求时, 也可采用平腹杆形式。钢管混凝土桁式混合结构腹杆的构造应符合下列规定:

1 腹杆宜采用圆钢管或钢管混凝土, 也可采用其他型钢;

2 斜腹杆轴线宜交于节点中心; 当杆件偏心不可避免时, 应满足本标准第 8.2.1 条的要求; 采用 K 形间隙连接节点时, 腹杆端部净距不宜小于两腹杆壁厚之和;

3 平腹杆中心距离不宜大于弦杆中心距的 4 倍; 腹杆空钢管截面积不宜小于单根弦杆钢管截面积的 1/5;

4 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应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。

3.3.3 单肢钢管混凝土加劲混合结构中钢管混凝土部分的钢管外径 (D) 与结构外截面宽度 (B) 的比值不宜小于 0.5, 且不宜大于 0.75; 多肢钢管混凝土加劲混合结构中钢管混凝土部分中角部钢管外径 (D) 与结构外截面宽度 (B) 的比值不宜小于 0.15, 且不宜大于 0.25。

4 材 料

4.1 钢 材

4.1.1 钢管混凝土混合结构中的钢管材料宜采用 Q355、Q390、Q420 和 Q460 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《桥梁用结构钢》GB/T 714 的有关规定。

4.1.2 钢管混凝土混合结构中钢管的强度设计值和其他物理性能指标，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的有关规定执行。

4.1.3 钢管混凝土混合结构中的钢管宜采用直缝焊接钢管，焊缝应采用全熔透对接焊缝并应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 中关于一级焊缝质量检验标准；也可采用无缝钢管，钢管质量应符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB/T 8162 的有关规定。

4.1.4 钢管混凝土混合结构中的纵向受力钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋；箍筋宜采用 HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500 钢筋，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

4.2 混 凝 土

4.2.1 钢管混凝土混合结构的混凝土质量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/T 50107 的有关规定，并应符合下列规定：

- 1 钢管内混凝土的水胶比不宜大于 0.45；

- 2 钢管内混凝土的强度等级不应低于 C30；
 - 3 钢管混凝土加劲混合结构管内混凝土的强度等级不应低于钢管外包混凝土的强度等级；钢管外包混凝土的强度等级不应低于 C30。
- 4.2.2 钢管内混凝土强度等级的确定应符合表 4.2.2 的规定。

表 4.2.2 钢管内混凝土强度等级

钢材牌号	Q355	Q390、Q420 和 Q460
混凝土强度等级	C30~C80	C50~C80

4.3 连接材料

4.3.1 用于钢管混凝土混合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 和《热强钢焊条》GB/T 5118 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、《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》GB/T 8110、《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》GB/T 10045 和《热强钢药芯焊丝》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《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 5293 和《埋弧焊用热强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 12470 的有关规定。

4.3.2 焊缝的强度指标应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。

4.3.3 用于钢管混凝土混合结构的连接紧固件应符合下列规定：

- 1 钢结构连接用 4.6 级、4.8 级、5.6 级、6.8 级、8.8 级普通螺栓，螺栓质量应符合现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1 和《紧固件公差 螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3103.1 的规定；C 级螺栓与 A 级、B 级螺

栓的规格和尺寸应分别符合现行国家标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 与《六角头螺栓》GB/T 5782 的规定；

2 钢结构用大六角高强度螺栓的质量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、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 的规定。扭剪型高强度螺栓的质量应符合现行国家标准《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632 的规定；

3 圆柱头焊（栓）钉连接件的质量应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定。

4.3.4 连接紧固件的强度指标应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。

4.4 防 护 材 料

4.4.1 用于钢管混凝土混合结构的防腐材料应符合现行国家标准《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第 1 部分：总则》GB/T 30790.1 的有关规定。

4.4.2 用于钢管混凝土混合结构的防火涂料应符合现行国家标准《钢结构防火涂料》GB 14907 的有关规定，其他类型防火材料应符合国家现行有关标准的规定。

5 结 构 分 析

5.1 一 般 规 定

5.1.1 钢管混凝土混合结构应进行整体作用效应分析，并应对结构中受力状况特殊部位进行更详细地分析。

5.1.2 当结构在施工阶段和使用阶段有多种受力工况时，应分别进行结构分析，确定对结构最不利的作用组合，并应符合下列规定：

1 结构遭受罕遇地震、火灾、撞击等偶然作用时，尚应按国家现行有关标准的要求进行相应的结构分析；

2 当混凝土的收缩、徐变、支座沉降、温度变化、腐蚀等间接作用在结构中产生的作用效应危及结构的安全或正常使用时，应进行相应的作用效应分析，并应采取相应的技术措施；

3 使用阶段的结构分析，应计入施工过程中形成的内力和变形对结构受力性能的影响。

5.1.3 结构分析应符合下列要求：

1 满足力学平衡条件；

2 符合变形协调条件，包括节点和边界的约束条件等；

3 采用合理的材料本构模型；

4 进行施工阶段和使用阶段结构计算。

5.1.4 钢管混凝土混合结构应对主要施工阶段进行下列计算：

1 钢管构件制作、运输、安装过程中，钢结构的强度、变形和稳定计算；

2 钢管内混凝土浇筑过程中，钢结构的强度、变形和稳定计算；

3 对于钢管混凝土加劲混合结构，浇筑钢管外包混凝土过程中钢结构及混凝土结构的强度、变形和稳定计算。

5.1.5 施工阶段结构分析中，应计入施工全过程中出现的实际作用和效应，包括架设机具和材料、安装过程中的钢管结构、浇筑过程中的混凝土、临时支撑的安装和拆除、温度变化、风荷载和其他施工临时荷载。

5.2 计算指标

5.2.1 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：

$$f_{sc} = \frac{f_{scy}}{\gamma_{sc}} \quad (5.2.1-1)$$

$$f_{scy} = (1.14 + 1.02\xi)f_{ck} \quad (5.2.1-2)$$

式中： f_{sc} ——钢管混凝土截面的轴心抗压强度设计值（N/mm²）；
 f_{scy} ——钢管混凝土截面的轴心抗压强度标准值（N/mm²）；
 ξ ——约束效应系数，应按本标准式（3.3.1-2）计算；
 f_{ck} ——混凝土的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，对于房屋建筑结构、公路桥涵结构、电力塔架结构和港口工程结构应分别取 1.20、1.40、1.20 和 1.20。

5.2.2 钢管混凝土截面的抗剪强度设计值宜按下式计算：

$$f_{sv} = (0.422 + 0.313\alpha_s^{2.33})\xi^{0.134}f_{sc} \quad (5.2.2)$$

式中： f_{sv} ——钢管混凝土截面的抗剪强度设计值（N/mm²）；
 α_s ——截面含钢率，应按本标准式（3.3.1-1）计算。

5.2.3 钢管混凝土截面的弹性抗压和抗拉刚度宜分别按本标准式（5.2.3-1）和式（5.2.3-2）计算：

$$(EA)_c = E_s A_s + E_{c,c} A_c \quad (5.2.3-1)$$

$$(EA)_t = E_s A_s \quad (5.2.3-2)$$

式中： $(EA)_c$ ——钢管混凝土截面的弹性抗压刚度（N）；
 $(EA)_t$ ——钢管混凝土截面的弹性抗拉刚度（N）；
 E_s ——钢管钢材的弹性模量（N/mm²），应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关

规定确定；

$E_{c,c}$ ——钢管内混凝土的弹性模量 (N/mm^2)，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定；

A_s ——钢管的截面面积 (mm^2)；

A_c ——钢管内混凝土的截面面积 (mm^2)。

5.2.4 钢管混凝土截面的弹性抗弯刚度宜按下式计算：

$$EI = E_s I_s + E_{c,c} I_c \quad (5.2.4)$$

式中： EI ——钢管混凝土截面的弹性抗弯刚度 ($N \cdot mm^2$)；

I_s ——钢管的截面惯性矩 (mm^4)；

I_c ——钢管内混凝土的截面惯性矩 (mm^4)。

5.2.5 钢管混凝土截面的弹性抗剪刚度宜按下式计算：

$$GA = G_s A_s + G_{c,c} A_c \quad (5.2.5)$$

式中： GA ——钢管混凝土截面的弹性抗剪刚度 (N)；

G_s ——钢管钢材的剪变模量 (N/mm^2)，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定确定；

$G_{c,c}$ ——钢管内混凝土的剪变模量 (N/mm^2)，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定。

5.2.6 钢管混凝土混合结构的截面弹性抗压和抗拉刚度宜分别按式 (5.2.6-1) 和式 (5.2.6-2) 计算：

$$(EA)_{c,h} = \Sigma(E_s A_s + E_{s,l} A_l + E_{c,c} A_c) + E_{c,oc} A_{oc} \quad (5.2.6-1)$$

$$(EA)_{t,h} = \Sigma(E_s A_s + E_{s,l} A_l) \quad (5.2.6-2)$$

式中： $(EA)_{c,h}$ ——钢管混凝土混合结构的截面弹性抗压刚度 (N)；

$(EA)_{t,h}$ ——钢管混凝土混合结构的截面弹性抗拉刚度 (N)；

E_s ——钢管钢材的弹性模量 (N/mm^2);
 $E_{s,l}$ ——纵筋钢材的弹性模量 (N/mm^2);
 $E_{c,c}$ ——钢管内混凝土的弹性模量 (N/mm^2);
 $E_{c,oc}$ ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土的弹性模量 (N/mm^2);
 A_s ——钢管的截面面积 (mm^2);
 A_l ——纵筋的截面面积 (mm^2);
 A_c ——钢管内混凝土的截面面积 (mm^2);
 A_{oc} ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土的截面面积 (mm^2)。

5.2.7 钢管混凝土混合结构的截面弹性抗弯刚度宜按下式计算:

$$(EI)_h = E_s I_{s,h} + E_{s,l} I_{l,h} + E_{c,c} I_{c,h} + E_{c,oc} I_{oc,h} \quad (5.2.7)$$

式中: $(EI)_h$ ——钢管混凝土混合结构的截面弹性抗弯刚度 ($\text{N} \cdot \text{mm}^2$);

$I_{s,h}$ ——钢管对钢管混凝土混合结构截面形心轴的惯性矩 (mm^4);

$I_{l,h}$ ——纵筋对钢管混凝土混合结构截面形心轴的惯性矩 (mm^4);

$I_{c,h}$ ——钢管内混凝土对钢管混凝土混合结构截面形心轴的惯性矩 (mm^4);

$I_{oc,h}$ ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土对钢管混凝土混合结构截面形心轴的惯性矩 (mm^4)。

5.2.8 钢管混凝土混合结构的截面弹性抗剪刚度宜按下式计算:

$$(GA)_h = \Sigma(G_s A_s + G_{c,c} A_c) + G_{c,oc} A_{oc} \quad (5.2.8)$$

式中: $(GA)_h$ ——钢管混凝土混合结构的截面弹性抗剪刚度 (N);

$G_{c,c}$ ——钢管内混凝土的剪变模量 (N/mm^2), 应按

现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定；

$G_{c,oc}$ ——混凝土结构板中的混凝土或钢管外包混凝土的剪变模量 (N/mm^2)，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定。

5.3 分析方法

5.3.1 钢管混凝土混合结构分析应根据结构类型、材料性能和受力特点等，选择弹性分析方法、弹塑性分析方法或试验分析方法。采用计算软件进行结构分析时，应对结果进行判断和校核，确认结果合理、有效后方可应用于工程设计。

5.3.2 钢管混凝土混合结构的计算分析应计入风荷载的静力和动力作用，特殊结构的风荷载体型系数宜通过风洞试验确定。

5.3.3 钢管混凝土桁式混合结构的阻尼比，在多遇地震作用下可取 0.03，在罕遇地震作用下可取 0.04；钢管混凝土加劲混合结构的阻尼比，在多遇地震作用下可取 0.045，在罕遇地震作用下可取 0.05；结构阻尼比也可根据结构试验确定。

5.3.4 采用纤维模型法进行钢管混凝土混合结构的弹塑性分析时，可采用本标准附录 A 中的材料本构模型。

6 钢管混凝土桁式混合结构承载力计算

6.1 一般规定

6.1.1 钢管混凝土桁式混合结构中，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，腹杆的容许长细比应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定确定。

6.1.2 钢管混凝土桁式混合结构的承载力设计应分别对结构整体承载力和单根弦杆、腹杆的承载力进行计算。结构的换算长细比应通过结构整体分析确定，轴心受压结构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 确定。除按本标准方法计算外，结构的承载力也可通过结构整体分析确定。

6.1.3 带混凝土结构板的钢管混凝土桁式混合结构，混凝土结构板和桁架之间应有效连接并共同工作。

6.1.4 由施工过程引起的单肢弦杆钢管初应力限值应为空钢管承载力对应临界应力值的 35%。当钢管混凝土中由施工过程引起的钢管初应力小于限值时，可忽略施工过程对成型后结构承载力计算的影响。当钢管混凝土中由施工过程引起的钢管初应力大于或等于限值时，应计入施工过程对成型后结构承载力计算的影响。

6.2 受压、受拉、受弯承载力计算

6.2.1 弦杆相同的钢管混凝土桁式混合结构的轴心受压承载力应符合下列规定：

1 不计入荷载长期作用影响时，钢管混凝土桁式混合结构的轴心受压承载力应符合式（6.2.1-1）的规定，且宜按

式 (6.2.1-2) 计算:

$$N \leq N_u \quad (6.2.1-1)$$

$$N_u = \varphi \Sigma N_c \quad (6.2.1-2)$$

$$N_c = f_{sc} A_{sc} \quad (6.2.1-3)$$

$$A_{sc} = A_s + A_c \quad (6.2.1-4)$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_o) \\ a\lambda^2 + b\lambda + c & (\lambda_o < \lambda \leq \lambda_p) \\ d/(\lambda + 35)^2 & (\lambda > \lambda_p) \end{cases} \quad (6.2.1-5)$$

$$a = \frac{1 + (35 + 2\lambda_p - \lambda_o)e}{(\lambda_p - \lambda_o)^2} \quad (6.2.1-6)$$

$$b = e - 2a\lambda_p \quad (6.2.1-7)$$

$$c = 1 - a\lambda_o^2 - b\lambda_o \quad (6.2.1-8)$$

$$d = \left[13000 + 4657 \ln \left(\frac{235}{f_y} \right) \right] \cdot \left(\frac{25}{f_{ck} + 5} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{\alpha_s}{0.1} \right)^{0.05} \quad (6.2.1-9)$$

$$e = \frac{-d}{(\lambda_p + 35)^3} \quad (6.2.1-10)$$

$$\lambda_p = \frac{1743}{\sqrt{f_y}} \quad (6.2.1-11)$$

$$\lambda_o = \pi \sqrt{\frac{420\xi + 550}{(1.02\xi + 1.14)f_{ck}}} \quad (6.2.1-12)$$

式中: N ——轴向压力设计值 (N);

N_u ——轴心受压承载力 (N);

N_c ——单肢弦杆的截面受压承载力 (N);

ΣN_c ——弦杆的截面受压承载力之和 (N);

φ ——轴心受压结构的稳定系数, 取截面两主轴稳定系数的较小者, 应根据结构的换算长细比按式 (6.2.1-5) 计算, 也可按本标准附录 B 取值;

f_{sc} ——钢管混凝土截面的轴心抗压强度设计值 (N/mm²), 应按本标准式 (5.2.1-1) 计算;

f_{ck} ——混凝土的轴心抗压强度标准值 (N/mm²);

f_y ——钢管钢材的屈服强度 (N/mm²);
 A_{sc} ——单肢弦杆的截面面积 (mm²);
 ξ ——约束效应系数, 应按本标准式 (3.3.1-2) 计算;
 λ ——结构的换算长细比, 应按第 6.1.2 条确定;
 λ_p ——结构弹性失稳的界限长细比;
 λ_o ——结构弹塑性失稳的界限长细比。

2 当永久荷载引起的单肢钢管混凝土弦杆轴向压力占其全部轴向压力的 50% 及以上时, 应计入荷载长期作用对结构稳定承载力的影响。计入荷载长期作用影响时, 钢管混凝土桁式混合结构的轴心受压承载力应符合式 (6.2.1-13) 的规定, 且长期荷载影响系数宜按式 (6.2.1-14) 计算:

$$N \leq k_{cr} N_u \quad (6.2.1-13)$$

$$k_{cr} = \begin{cases} (0.2a^2 - 0.4a + 1)b^{2.5a}k_{nL} & (a \leq 0.4) \\ (0.2a^2 - 0.4a + 1)bk_{nL} & (0.4 < a \leq 1.2) \\ 0.808bk_{nL} & (a > 1.2) \end{cases} \quad (6.2.1-14)$$

$$a = \frac{\lambda}{100} \quad (6.2.1-15)$$

$$b = \xi^{0.05} \quad (6.2.1-16)$$

$$k_{nL} = \begin{cases} 1 - 0.07n_L & (a \leq 0.4) \\ 0.98 - 0.07n_L + 0.05a & (a > 0.4) \end{cases} \quad (6.2.1-17)$$

$$n_L = \frac{N_L}{N_u} \quad (6.2.1-18)$$

式中: N ——轴向压力设计值 (N);

k_{cr} ——长期荷载影响系数, 当 k_{cr} 计算值大于 1.0 时, 取 1.0;

N_u ——钢管混凝土桁式混合结构的轴心受压承载力 (N), 应按式 (6.2.1-2) 计算;

k_{nL} ——长期荷载比调整系数, 当 k_{nL} 计算值大于 1.0 时,

取 1.0;

λ ——结构的换算长细比,应按本标准第 6.1.2 条确定;

ξ ——约束效应系数,应按本标准式 (3.3.1-2) 计算;

n_L ——长期荷载比;

N_L ——作用于钢管混凝土桁式混合结构的长期轴向压力 (N),应按荷载的准永久组合确定。

6.2.2 不带混凝土结构板且受压弦杆相同的钢管混凝土桁式混合结构的受弯承载力应符合式 (6.2.2-1) 的规定,且宜按式 (6.2.2-2) 计算:

$$M \leq M_u \quad (6.2.2-1)$$

$$M_u = \min\{\varphi \sum N_c, \sum N_t\} h_i \quad (6.2.2-2)$$

$$N_t = (1.1 - 0.4\alpha_s) f A_s \quad (6.2.2-3)$$

式中: M ——弯矩设计值 (N·mm);

M_u ——受弯承载力 (N·mm);

$\varphi \sum N_c$ ——弦杆的轴心受压稳定承载力之和 (N);

$\sum N_t$ ——弦杆的截面受拉承载力之和 (N);

N_t ——单肢弦杆的截面受拉承载力 (N);

h_i ——沿截面高度方向受压和受拉弦杆形心的距离 (mm);

α_s ——截面含钢率,应按本标准式 (3.3.1-1) 计算;

f ——钢管钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²);

A_s ——单肢受拉弦杆钢管的截面面积 (mm²)。

6.2.3 带混凝土结构板且受压、受拉弦杆分别相同的钢管混凝土桁式混合结构的受弯承载力计算应符合下列规定:

1 正弯矩作用区段的结构受弯承载力计算应符合下列规定:

1) 当满足下列条件时,宜按图 6.2.3 (a) 所示第一类截面计算结构的受弯承载力:

$$\varphi_c (\sum b_e h_b f_c + A'_1 f'_1) + \varphi_{sc} f_{sc} \sum A_{sc} \leq (1.1 - 0.4\alpha_s) f \sum A_s \quad (6.2.3)$$

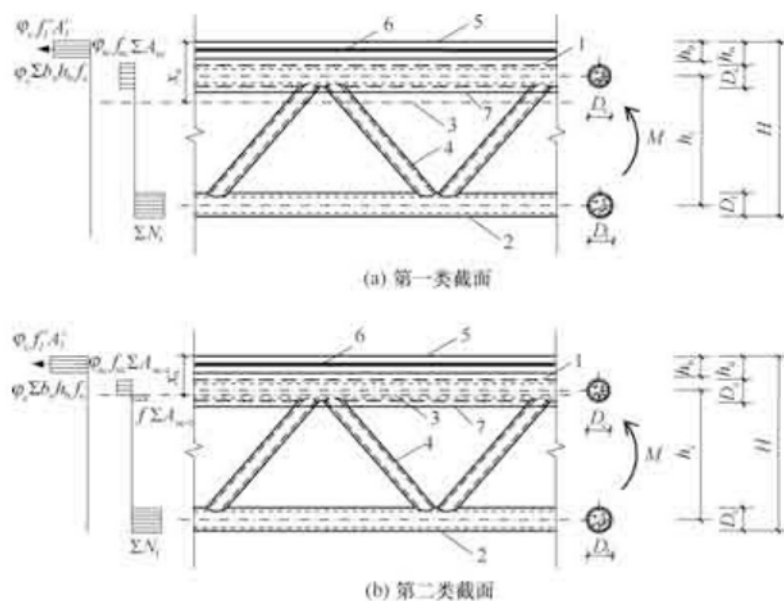


图 6.2.3 带混凝土结构板的钢管混凝土桁式混合结构截面示意

1—受压弦杆；2—受拉弦杆；3—中和轴；4—腹杆；
5—混凝土结构板；6—纵筋；7—弦杆外包混凝土

式中： φ_c ——混凝土结构板的受压稳定系数，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算，计算长度宜按节间长度 l_1 取值；

b_c ——单肢弦杆梁对应的混凝土结构板翼缘计算宽度 (mm)，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算；

Σb_c ——混凝土结构板翼缘计算宽度之和 (mm)，计算宽度重叠的部分不应重复计算；

h_b ——截面受压区混凝土结构板厚度 (mm)；

f_c ——混凝土结构板中混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)；

A'_l ——纵向受压钢筋的截面总面积 (mm^2);

f'_l ——纵筋的抗压强度设计值 (N/mm^2);

φ_{sc} ——受压弦杆的稳定系数, 计算长度宜按节间长度的90%取值;

f_{sc} ——受压弦杆的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm^2), 应按本标准式 (5.2.1-1) 计算;

ΣA_{sc} ——受压弦杆的截面面积之和 (mm^2);

f ——受拉弦杆钢管钢材的抗压、抗拉和抗弯强度设计值 (N/mm^2);

ΣA_s ——受拉弦杆钢管的截面面积之和 (mm^2)。

2) 当不满足式 (6.2.3) 的条件时, 宜按图 6.2.3 (b) 所示第二类截面计算结构的受弯承载力。

2 负弯矩作用区段的结构受弯承载力计算宜计入板内钢筋的承载力影响, 也可按式 (6.2.2-2) 计算。

6.2.4 带混凝土结构板且受压、受拉弦杆分别相同的钢管混凝土桁式混合结构第一类截面的受弯承载力宜按下列公式计算:

$$M_u = \varphi_c (\Sigma b_e h_b f_c + A'_l f'_l) (H - D_t/2 - h_b/2) + \varphi_{sc} f_{sc} \Sigma A_{sc} h_i \quad (6.2.4)$$

式中: M_u ——受弯承载力 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

f_c ——混凝土结构板中混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm^2);

A'_l ——纵向受压钢筋的截面总面积 (mm^2);

f'_l ——纵筋的抗压强度设计值 (N/mm^2);

H ——截面高度 (mm);

D_t ——受拉弦杆钢管外径 (mm);

h_b ——截面受压区混凝土结构板厚度 (mm);

f_{sc} ——受压弦杆截面的轴心抗压强度设计值 (N/mm^2), 应按本标准式 (5.2.1-1) 计算;

ΣA_{sc} ——受压弦杆的截面面积之和 (mm^2);

h_i ——沿截面高度方向受压和受拉弦杆形心的距离

(mm)。

6.2.5 带混凝土结构板且受压、受拉弦杆分别相同的钢管混凝土桁式混合结构第二类截面的受弯承载力宜按下列公式计算：

$$\begin{aligned} M_u = & (1.1 - 0.4\alpha_s)f \sum A_s (H - D_t/2 - x_n) \\ & + \sigma_s \sum A_{sc-t} (h_n + D_c - x_n)/2 + \varphi_c (\sum b_e h_b f_c + A'_l f'_l) \\ & (x_n - h_b/2) + \varphi_{sc} \sigma_{sc} \sum A_{sc-c} (x_n - h_n)/2 \end{aligned} \quad (6.2.5-1)$$

$$\begin{aligned} & \varphi_c (\sum b_e h_b f_c + A'_l f'_l) + \varphi_{sc} f_{sc} \sum A_{sc-c} \\ = & (1.1 - 0.4\alpha_s)f \sum A_s + f \sum A_{sc-t} \end{aligned} \quad (6.2.5-2)$$

$$h_n = H - h_i - D_c/2 - D_t/2 \quad (6.2.5-3)$$

当 $h_n < x_n \leq h_n + D_c/2$ 时，则：

$$\begin{aligned} A_{sc-c} = & \frac{D_c^2}{4} \arccos \frac{D_c/2 + h_n - x_n}{D_c/2} - (D_c/2 + h_n - x_n) \\ & \sqrt{(D_c/2)^2 - (D_c/2 + h_n - x_n)^2} \end{aligned} \quad (6.2.5-4)$$

$$A_{sc-t} = \left(\pi - \arccos \frac{D_c/2 + h_n - x_n}{D_c/2} \right) D_c t \quad (6.2.5-5)$$

当 $h_n + D_c/2 < x_n < h_n + D_c$ 时，则：

$$\begin{aligned} A_{sc-c} = & \frac{D_c^2}{4} \left(\pi - \arccos \frac{x_n - D_c/2 - h_n}{D_c/2} \right) + (x_n - D_c/2 - h_n) \\ & \sqrt{(D_c/2)^2 - (x_n - D_c/2 - h_n)^2} \end{aligned} \quad (6.2.5-6)$$

$$A_{sc-t} = \arccos \frac{x_n - D_c/2 - h_n}{D_c/2} D_c t \quad (6.2.5-7)$$

$$\sigma_{sc} = \frac{1}{2} E_{scp} \frac{\epsilon_{cu}}{x_n} (x_n - h_n) \quad (6.2.5-8)$$

$$\sigma_s = \frac{1}{2} E_s \frac{\epsilon_{cu}}{x_n} (h_n + D_c - x_n) \leq f \quad (6.2.5-9)$$

$$E_{scp} = \frac{[0.192(f/235) + 0.488]f_{sc}}{3.25 \times 10^{-6} f} \quad (6.2.5-10)$$

式中： α_s ——截面含钢率，应按本标准式 (3.3.1-1) 计算；

D_c ——受压弦杆的钢管外径 (mm)；

H ——截面高度 (mm);
 φ_{sc} ——受压弦杆的稳定系数, 宜按式 (6.2.1-5) 计算, 计算长度宜按节间长度的 90% 取值;
 h_n ——受压弦杆上顶点到混凝土结构板上表面的距离 (mm);
 x_n ——结构上表面到中和轴的高度 (mm);
 E_s ——钢材的弹性模量 (N/mm^2);
 ϵ_{cu} ——混凝土的极限压应变, 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 取值;
 t ——受压弦杆的钢管壁厚 (mm);
 f ——钢管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm^2)。

6.2.6 弦杆相同的钢管混凝土桁式混合结构承受压、弯荷载共同作用时, 弯矩作用平面内的稳定承载力宜符合下列规定:

$$N_B = \varphi \sum N_c - \sum N_t \quad (6.2.6-1)$$

$$M_B = \varphi \sum N_c r_c + \sum N_t r_t \quad (6.2.6-2)$$

$$r_c = \frac{N_{uc2}}{N_{uc1} + N_{cu2}} \quad (6.2.6-3)$$

$$r_t = \frac{N_{uc1}}{N_{uc1} + N_{cu2}} \quad (6.2.6-4)$$

1 当 $\frac{M}{N} \leq \frac{M_B}{N_B}$ 时, 则:

$$\frac{N}{\varphi f_{sc} \sum A_{sc}} + \frac{M}{W_{sc} (1 - \varphi N/N_E) f_{sc}} \leq 1 \quad (6.2.6-5)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 \sum (EA)_c}{\lambda^2} \quad (6.2.6-6)$$

2 当 $\frac{M}{N} > \frac{M_B}{N_B}$ 时, 则:

$$-N + \frac{M}{r_c (1 - N/N_E)} \leq (1.1 - 0.4\alpha_s) \sum A_s f \quad (6.2.6-7)$$

式中: N ——轴力设计值 (N);

M ——弯矩设计值 ($N \cdot mm$);

- 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);
- 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);
- r_c ——截面重心至压区弦杆形心轴的距离 (mm);
- r_t ——截面重心至拉区弦杆形心轴的距离 (mm);
- N_{uc1} 、 N_{uc2} ——分别为钢管混凝土桁式混合结构中压区弦杆和拉区弦杆的轴心受压承载力之和 (N);
- φ ——轴心受压结构的稳定系数, 应根据钢管混凝土桁式混合结构的换算长细比按式 (6.2.1-5) 计算, 也可按本标准附录 B 取值;
- ΣA_{sc} ——所有弦杆的截面面积之和 (mm²);
- ΣA_s ——所有弦杆的钢管部分截面面积之和 (mm²);
- N_c ——单肢弦杆的截面受压承载力 (N);
- ΣN_c ——受压弦杆的截面受压承载力之和 (N);
- N_t ——单肢弦杆的截面受拉承载力 (N);
- ΣN_t ——受拉弦杆的截面受拉承载力之和 (N);
- W_{sc} ——结构的截面抗弯模量 (mm³);
- f_{sc} ——单肢弦杆的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm²), 应按本标准式 (5.2.1-1) 计算;
- N_E ——由结构换算长细比计算得到的欧拉临界力 (N);
- $(EA)_c$ ——单肢受压弦杆截面的抗压刚度 (N);
- λ ——结构的换算长细比。

3 换算长细比大于 120 的钢管混凝土桁式混合结构的弯矩作用平面内整体稳定承载力计算宜满足下式要求:

$$\frac{N}{\varphi f_{sc} \Sigma A_{sc}} + \frac{M}{r_c (1.1 - 0.4\alpha_s) f \Sigma A_s (1 - N/N_E)} \leq 1 \quad (6.2.6-8)$$

4 曲线形钢管混凝土桁式混合结构 (图 6.2.6) 在两端承受轴压荷载时的承载力宜符合式 (6.2.6-5)、式 (6.2.6-7) 和

式 (6.2.6-8) 的规定, 结构的初始弯曲度引起的弯矩设计值宜按下式计算:

$$M = Nu_0 \quad (6.2.6-9)$$

式中: M ——弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

u_0 ——曲线形桁式混合结构的初始弯曲度 (mm), 即中截面形心到两端截面形心连线的垂直距离。

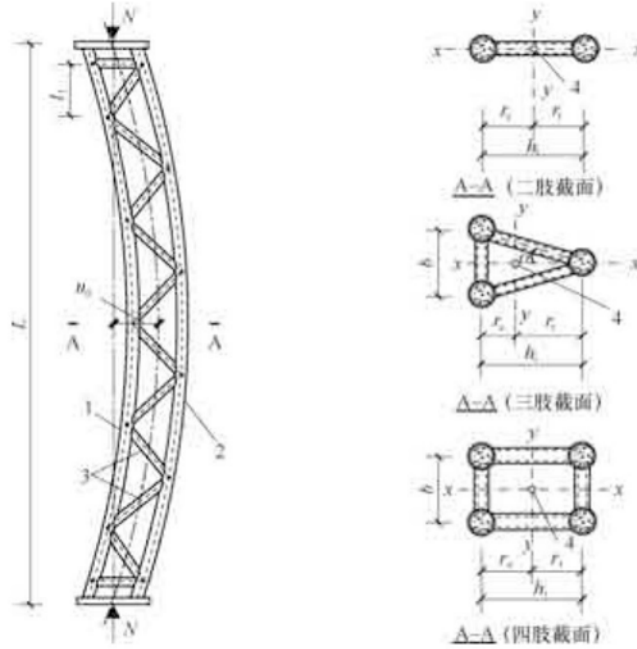


图 6.2.6 曲线形压弯钢管混凝土桁式混合结构

1—压区弦杆; 2—拉区弦杆; 3—腹杆; 4—截面重心;

L —两端截面中心点的直线距离; u_0 —初始弯曲度;

h_i —结构沿截面高度方向受压和受拉弦杆形心的距离; b —在弯矩作用平面外的弦杆中心距; l_1 —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形心轴的距离;

α —腹杆在弦杆截面平面投影夹角的一半

6.2.7 轴向受压钢管混凝土桁式混合结构除应验算整体稳定承

载力外，尚应验算单肢弦杆的稳定承载力。

6.2.8 弦杆相同的曲线形钢管混凝土桁式混合结构弦杆的轴力和弯矩设计值应符合下列规定：

1 平腹杆与斜腹杆曲线形钢管混凝土桁式混合结构在两端受轴向荷载时，跨中节间的弦杆轴力设计值宜按下列公式计算，并应满足本标准第 6.2.1 条和第 6.2.6 条的要求：

$$N_{cd,1} = \begin{cases} \frac{N_{1t}}{n_1} & (n_1 > 0) \\ 0 & (n_1 = 0) \end{cases} \quad (6.2.8-1)$$

$$N_{cd,2} = \begin{cases} \frac{N_{2t}}{n_2} & (n_2 > 0) \\ 0 & (n_2 = 0) \end{cases} \quad (6.2.8-2)$$

$$N_{1t} = \frac{Nr_t}{h} + \frac{Nu_0}{h(1-N/N_E)} \quad (6.2.8-3)$$

$$N_{2t} = \frac{Nr_c}{h} - \frac{Nu_0}{h(1-N/N_E)} \quad (6.2.8-4)$$

式中：\$N\$——曲线形结构所受轴力设计值（N），受压为正值，受拉为负值；

\$N_{cd,1}\$——曲线形结构中压区单肢弦杆的轴力设计值（N）；

\$N_{cd,2}\$——曲线形结构中拉区单肢弦杆的轴力设计值（N）；

\$N_{1t}\$——曲线形结构中压区弦杆的总轴力设计值（N）；

\$N_{2t}\$——曲线形结构中拉区弦杆的总轴力设计值（N）；

\$n_1\$、\$n_2\$——分别为曲线形结构中压区和拉区的弦杆数；

\$h\$——弦杆中心距（mm）；

\$N_E\$——由结构换算长细比计算得到的欧拉临界力（N），应按式（6.2.6-6）计算；

\$r_c\$、\$r_t\$——分别为曲线形结构中截面重心至压区弦杆和拉区弦杆形心轴的距离（mm）；

\$u_0\$——曲线形结构的初始弯曲度（mm），即中截面形心到两端截面形心连线的垂直距离。

2 平腹杆曲线形钢管混凝土桁式混合结构在两端受轴向荷载时，端部弦杆的轴力设计值和弯矩设计值宜按下列公式计算：

$$N_{cd} = \frac{N}{n} \quad (6.2.8-5)$$

$$M_{cd} = \frac{l_1}{m_b} \cdot \frac{\pi}{L} \cdot \frac{Nu_0}{1 - N/N_E} \quad (6.2.8-6)$$

式中： N_{cd} ——曲线形结构中端部单肢弦杆轴力设计值（N）；

M_{cd} ——曲线形结构中端部单肢弦杆弯矩设计值（N·mm）；

N ——曲线形结构轴力设计值（N）；

n ——弦杆总数；

l_1 ——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 为腹杆在弦杆截面平面投影夹角的一半（图 6.2.6）；

L ——曲线形结构两端截面中心点的直线距离（mm）；

u_0 ——曲线形结构的初始弯曲度（mm），即中截面形心到两端截面形心连线的垂直距离。

3 斜腹杆曲线形钢管混凝土桁式混合结构在两端受轴向荷载时，端部弦杆轴力设计值宜按下式计算：

$$N_{cd} = \frac{N}{n} + \frac{2\pi}{L\tan\theta} \cdot \frac{Nu_0}{1 - N/N_E} \quad (6.2.8-7)$$

式中： N_{cd} ——端部弦杆轴力设计值（N）；

θ ——斜腹杆与弦杆的夹角。

6.2.9 单根钢管混凝土弦杆的承载力计算应符合下列规定：

1 轴心受压稳定承载力应符合下列规定，弦杆的计算长度应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定：

$$N_{cd} \leq \varphi N_c \quad (6.2.9-1)$$

式中： N_{cd} ——轴向压力设计值（N）；

N_c ——单根钢管混凝土弦杆的截面受压承载力（N），宜按式（6.2.1-3）计算；

φ ——轴心受压弦杆的稳定系数，宜按式 (6.2.1-5) 计算，也可按本标准附录 B 取值。

2 轴心受拉承载力应符合下列规定：

$$N_{td} \leq N_t \quad (6.2.9-2)$$

式中： N_{td} ——轴向拉力设计值 (N)；

N_t ——单根钢管混凝土弦杆的截面受拉承载力 (N)，宜按式 (6.2.2-3) 计算。

3 受弯承载力应符合式 (6.2.9-3) 的规定，且宜按式 (6.2.9-4) 计算：

$$M_{cd} \leq M_{cu} \quad (6.2.9-3)$$

$$M_{cu} = \gamma_m W_{sc1} f_{sc} \quad (6.2.9-4)$$

$$\gamma_m = 1.1 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) \quad (6.2.9-5)$$

$$W_{sc1} = \frac{\pi D^3}{32} \quad (6.2.9-6)$$

式中： M_{cd} ——单根弦杆的弯矩设计值 (N·mm)；

M_{cu} ——单根弦杆的截面受弯承载力 (N·mm)；

γ_m ——截面抗弯塑性发展系数；

ξ ——约束效应系数，应按本标准式 (3.3.1-2) 计算；

W_{sc1} ——单根弦杆的截面抗弯模量 (mm³)；

f_{sc} ——弦杆的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm²)；

D ——弦杆外径 (mm)。

4 在一个平面内受压、弯荷载共同作用时，承载力宜符合下列规定：

当 $\frac{N_{cd}}{N_c} \geq 2\eta_0$ 时，则：

$$\frac{N_{cd}}{N_c} + \frac{aM_{cd}}{M_{cu}} \leq 1 \quad (6.2.9-7)$$

当 $\frac{N_{cd}}{N_c} < 2\eta_0$ 时，则：

$$\frac{-bN_{cd}^2}{N_c^2} - \frac{cN_{cd}}{N_c} + \frac{M_{cd}}{M_{cu}} \leq 1 \quad (6.2.9-8)$$

$$a = 1 - 2\eta_0 \quad (6.2.9-9)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_0}{\eta_0^2} \quad (6.2.9-10)$$

$$c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0} \quad (6.2.9-11)$$

$$\eta_0 = 0.1 + 0.14\xi^{-0.84} \quad (6.2.9-12)$$

$$\zeta_0 = 1 + 0.18\xi^{-1.15} \quad (6.2.9-13)$$

式中：
 N_{cd} ——轴力设计值 (N)；
 M_{cd} ——弯矩设计值 (N·mm)；
 N_c ——截面受压承载力 (N)，宜按式 (6.2.1-3) 计算；
 M_{cu} ——截面受弯承载力 (N·mm)，宜按式 (6.2.9-4) 计算；

a 、 b 、 c 、 η_0 、 ζ_0 ——系数。

5 在一个平面内受压、弯荷载共同作用时，稳定承载力应符合下列规定：

当 $\frac{N_{cd}}{N_c} \geq 2\varphi^3 \eta_0$ 时，则：

$$\frac{N_{cd}}{\varphi N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}} \leq 1 \quad (6.2.9-14)$$

当 $\frac{N_{cd}}{N_c} < 2\varphi^3 \eta_0$ 时，则：

$$\frac{-bN_{cd}^2}{N_c^2} - \frac{cN_{cd}}{N_c} + \frac{1}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}} \leq 1 \quad (6.2.9-15)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2 \eta_0 \quad (6.2.9-16)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_0}{\varphi^3 \eta_0^2} \quad (6.2.9-17)$$

$$c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0} \quad (6.2.9-18)$$

$$d = 1 - 0.4 \left(\frac{N_{cd}}{N_{cE}} \right) \quad (6.2.9-19)$$

$$N_{cE} = \frac{\pi^2 (EA)_c}{\lambda_c^2} \quad (6.2.9-20)$$

式中：\$N_{cE}\$——单根弦杆的欧拉临界力（N）；

\$(EA)_c\$——弦杆截面的弹性抗压刚度（N），应按本标准式（5.2.3-1）计算；

\$\lambda_c\$——弦杆的换算长细比，弦杆计算长度宜按节间长度的90%取值；

\$\varphi\$——弯矩作用平面内轴心受压弦杆的稳定系数，宜按式（6.2.1-5）计算，也可按本标准附录B取值。

6 受拉、弯荷载共同作用时，承载力宜符合下列规定：

$$\frac{N_{td}}{(1.1 - 0.4\alpha_s)fA_s} + \frac{M_{cd}}{M_{cu}} \leq 1 \quad (6.2.9-21)$$

式中：\$N_{td}\$——轴向拉力设计值（N）；

\$M_{cd}\$——弯矩设计值（N·mm）；

\$\alpha_s\$——截面含钢率，应按本标准式（3.3.1-1）计算；

\$f\$——钢管钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值（N/mm²）；

\$A_s\$——钢管的截面面积（mm²）；

\$M_{cu}\$——截面受弯承载力（N·mm）。

7 受剪承载力应符合式（6.2.9-22）的规定，且宜按式（6.2.9-23）计算：

$$V_{cd} \leq V_{cu} \quad (6.2.9-22)$$

$$V_{cu} = \gamma_v A_{sc} f_{sv} \quad (6.2.9-23)$$

$$\gamma_v = 0.97 + 0.2 \ln \xi \quad (6.2.9-24)$$

式中：\$V_{cd}\$——单根弦杆的剪力设计值（N）；

\$V_{cu}\$——单根弦杆的受剪承载力（N）；

\$\gamma_v\$——受剪承载力计算系数；

\$A_{sc}\$——钢管混凝土的截面面积（mm²）；

\$f_{sv}\$——抗剪强度设计值（N/mm²），应按本标准式（5.2.2）计算；

ξ ——约束效应系数，应按本标准式 (3.3.1-2) 计算。

8 受扭承载力应符合式 (6.2.9-25) 的规定，且宜按式 (6.2.9-26) 计算：

$$T_{cd} \leq T_{cu} \quad (6.2.9-25)$$

$$T_{cu} = \gamma_t W_{sc,t} f_{sv} \quad (6.2.9-26)$$

$$\gamma_t = 1.294 + 0.267 \ln \xi \quad (6.2.9-27)$$

$$W_{sc,t} = \frac{\pi D^3}{16} \quad (6.2.9-28)$$

式中： T_{cd} ——单根弦杆的扭矩设计值 (N·mm)；

T_{cu} ——单根弦杆的受扭承载力 (N·mm)；

γ_t ——受扭承载力计算系数；

$W_{sc,t}$ ——截面扭转抵抗矩 (mm³)；

D ——弦杆外径 (mm)。

9 受压、扭荷载共同作用时，截面承载力宜符合式 (6.2.9-29) 的规定，稳定承载力宜符合式 (6.2.9-30) 的规定。

$$\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right)^{2.4} + \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-29)$$

$$\left(\frac{N_{cd}}{\varphi N_c}\right)^{2.4} + \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-30)$$

式中： N_c ——截面受压承载力 (N)，宜按本标准式 (6.2.1-3) 计算；

N_{cd} ——轴力设计值 (N)；

φ ——轴心受压弦杆的稳定系数，宜按本标准式 (6.2.1-5) 计算，也可按本标准附录 B 取值。

10 受压、弯、扭荷载共同作用时，承载力宜符合下列规定：

当 $N_{cd}/N_c \geq 2\varphi^3 \eta_0 \left[1 - \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2\right]^{0.417}$ 时，则：

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N_{cd}}{N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}}\right)^{2.4} + \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-31)$$

当 $N_{cd}/N_c < 2\varphi^3\eta_o \left[1 - \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2\right]^{0.417}$ 时, 则:

$$\left[-b\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right)^2 - c\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}}\right]^{2.4} + \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-32)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2\eta_o \quad (6.2.9-33)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_e}{\varphi^3\eta_e^2} \quad (6.2.9-34)$$

$$c = \frac{2(\zeta_e - 1)}{\eta_e} \quad (6.2.9-35)$$

$$d = 1 - 0.4\left(\frac{N_{cd}}{N_{cE}}\right) \quad (6.2.9-36)$$

$$\eta_e = (1 - \beta^2)^{0.417}\eta_o \quad (6.2.9-37)$$

$$\zeta_e = (1 - \beta^2)^{0.417}\zeta_o \quad (6.2.9-38)$$

$$\beta = \frac{T_{cd}}{T_{cu}} \quad (6.2.9-39)$$

式中: M_{cd} ——单根弦杆的弯矩设计值 (N·mm);
 M_{cu} ——单根弦杆的截面受弯承载力 (N·mm);
 η_o ——系数, 应按式 (6.2.9-12) 计算;
 a 、 b 、 c 、 d 、 η_e 、 ζ_e 、 β ——系数;
 ζ_o ——系数, 应按式 (6.2.9-13) 计算;
 N_{cE} ——单根弦杆的欧拉临界力 (N), 应按式 (6.2.9-20) 计算。

11 受压、弯、剪荷载共同作用时, 承载力应符合下列规定:

当 $N_{cd}/N_c \geq 2\varphi^3\eta_o \left[1 - \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2\right]^{0.417}$ 时, 则:

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N_{cd}}{N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}}\right)^{2.4} + \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-40)$$

当 $N_{cd}/N_c < 2\varphi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2\right]^{0.417}$ 时, 则:

$$\left[-b\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right)^2 - c\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}}\right]^{2.4} + \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-41)$$

式中: V_{cd} ——单根弦杆的剪力设计值 (N);

V_{cu} ——单根弦杆的受剪承载力 (N);

a 、 b 、 c 、 d ——系数, 应按式 (6.2.9-33) ~ 式 (6.2.9-36) 计算。

12 受压、弯、扭、剪荷载共同作用时, 承载力应符合下列规定:

当 $N_{cd}/N_c \geq 2\varphi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 - \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2\right]^{0.417}$ 时, 则:

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N_{cd}}{N_c} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}}\right)^{2.4} + \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2 + \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-42)$$

当 $N_{cd}/N_c < 2\varphi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 - \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2\right]^{0.417}$ 时, 则:

$$\left[-b\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right)^2 - c\left(\frac{N_{cd}}{N_c}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M_{cd}}{M_{cu}}\right]^{2.4} + \left(\frac{V_{cd}}{V_{cu}}\right)^2 + \left(\frac{T_{cd}}{T_{cu}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.2.9-43)$$

式中: T_{cd} ——单根弦杆的扭矩设计值 (N·mm);

T_{cu} ——单根弦杆的受扭承载力 (N·mm);

a 、 b 、 c 、 d ——系数, 应按式 (6.2.9-33) ~ 式 (6.2.9-36) 计算。

6.2.10 钢管混凝土桁式混合结构的腹杆承载力设计应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。承受轴压荷载且弦杆相同的钢管混凝土桁式混合结构腹杆分担的荷载可按下列公式计算:

1 直线形钢管混凝土桁式混合结构在两端承受轴压荷载时的腹杆剪力可按下列公式计算:

$$V = \frac{\Sigma(A_{sc}f_{sc})}{85} \quad (6.2.10-1)$$

式中：V——腹杆剪力设计值之和 (N)；

f_{sc} ——单肢钢管混凝土弦杆截面的轴心抗压强度设计值 (N/mm²)，应按本标准式 (5.2.1-1) 计算；

A_{sc} ——受压弦杆的截面面积 (mm²)。

2 曲线形钢管混凝土桁式混合结构在两端承受轴压荷载时，腹杆的最大剪力设计值可按下式计算：

$$V_{wm} = \frac{\pi}{L} \cdot \frac{Nu_0}{1 - N/N_E} \quad (6.2.10-2)$$

式中：V_{wm}——腹杆的最大剪力设计值 (N)；

L——曲线形钢管混凝土桁式混合结构两端截面中心点的直线距离 (mm)，见图 6.2.6；

N——轴力设计值 (N)；

N_E——由结构换算长细比计算得到的欧拉临界力 (N)，应按式 (6.2.6-6) 计算；

u₀——初始弯曲度 (mm)，即结构中截面的形心到两端截面形心连线的垂直距离，见图 6.2.6。

3 平腹杆曲线形钢管混凝土桁式混合结构在两端承受轴压荷载时，腹杆的最大弯矩设计值可按下式计算：

$$M_{wd} = \frac{l_1}{m_b} \cdot V_{wm} \quad (6.2.10-3)$$

式中：M_{wd}——腹杆的最大弯矩设计值 (N·mm)；

l₁——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 4cosα，其中，α 为腹杆在弦杆截面平面投影夹角的一半 (图 6.2.6)。

4 斜腹杆曲线形钢管混凝土桁式混合结构在两端承受轴压荷载时，腹杆的最大轴力设计值可按下式计算：

$$N_{wd} = \frac{1}{m \sin \theta} \cdot V_{wm} \quad (6.2.10-4)$$

式中： N_{wd} ——腹杆的最大轴力设计值（N）；

θ ——腹杆轴线与弦杆轴线的夹角；

m ——与肢数有关的参数，对于二肢、三肢、四肢、六肢结构 m 分别为 1、 $2\cos\alpha$ 、2 和 3，其中， α 为腹杆在弦杆截面平面投影夹角的一半（本标准图 6.2.6）。

6.3 受剪承载力计算

6.3.1 钢管混凝土桁式混合结构受剪承载力应符合下列规定：

$$V \leq V_u \quad (6.3.1)$$

式中： V ——剪力设计值（N）；

V_u ——钢管混凝土桁式混合结构的受剪承载力（N）。

6.3.2 平腹杆钢管混凝土桁式混合结构的受剪承载力应取腹杆弯剪破坏和弦杆受剪破坏情况下的较小值。腹杆弯剪破坏情况下，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；弦杆受剪破坏情况下，结构受剪承载力可按下列式计算：

$$V_u = 0.9 \sum V_{cu} \quad (6.3.2)$$

式中： V_{cu} ——单肢钢管混凝土弦杆的受剪承载力（N），宜按本标准式（6.2.9-23）计算。

6.3.3 斜腹杆钢管混凝土桁式混合结构的受剪承载力宜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。

7 钢管混凝土加劲混合结构承载力计算

7.1 一般规定

7.1.1 钢管混凝土加劲混合结构的计算长度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定，截面回转半径计算宜按组合截面确定。钢管混凝土加劲混合结构整体的长细比不应大于 60。

7.1.2 钢管内混凝土的施工阶段，由施工荷载引起的钢管最大压应力值不应超过空钢管稳定承载力对应临界应力值的 35%。

7.1.3 钢管外包混凝土的保护层厚度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

7.1.4 钢管外包混凝土的纵向受力钢筋的配筋率应按式 (7.1.4) 计算，并根据工程类别，符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 或《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01 的有关规定。

$$\rho = \frac{A_l}{A_{oc}} \quad (7.1.4)$$

式中： ρ ——纵向受力钢筋的配筋率；

A_l ——纵向受力钢筋的截面总面积 (mm^2)；

A_{oc} ——钢管外包混凝土的截面面积 (mm^2)。

7.1.5 钢管外包混凝土的箍筋直径、间距和体积配箍率应根据工程类别，符合国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 或《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01 的有关规定。计算截面配箍率时，箍筋约束混凝土截面面积宜取箍筋内区域钢管外包混凝土的截面面积。

7.1.6 钢管混凝土加劲混合结构中的钢腹杆截面外尺寸和布置应符合外包混凝土部分保护层厚度的要求。

7.1.7 多于六肢或其他复杂情况的钢管混凝土加劲混合结构，可通过结构整体分析确定结构的承载力。

7.2 单肢结构正截面承载力计算

7.2.1 单肢钢管混凝土加劲混合结构的截面轴心受压承载力应符合式 (7.2.1-1) 的规定，并宜按式 (7.2.1-2) 计算：

$$N \leq N_0 \quad (7.2.1-1)$$

$$N_0 = 0.9(N_{rc} + N_{cfst}) \quad (7.2.1-2)$$

$$N_{rc} = f_{c,oc}A_{oc} + f'_lA_l \quad (7.2.1-3)$$

$$N_{cfst} = f_{sc}A_{sc} \quad (7.2.1-4)$$

式中： N ——钢管混凝土加劲混合结构的截面轴向压力设计值 (N)；

N_0 ——钢管混凝土加劲混合结构的截面受压承载力 (N)；

N_{cfst} ——内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N)；

N_{rc} ——钢管外包混凝土部分的截面受压承载力 (N)；

$f_{c,oc}$ ——钢管外包混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm²)；

A_{oc} ——钢管外包混凝土部分的截面面积 (mm²)；

f'_l ——纵筋的抗压强度设计值 (N/mm²)；

A_l ——纵筋的截面面积 (mm²)；

f_{sc} ——内置钢管混凝土部分的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm²)，应按本标准式 (5.2.1-1) 计算；

A_{sc} ——内置钢管混凝土部分的截面面积 (mm²)。

7.2.2 当中和轴位于截面高度范围内时，轴压力和弯矩共同作用下单肢钢管混凝土加劲混合结构的截面承载力应满足下列公式要求：

$$N \leq N'_{rc} + N'_{cfst} \quad (7.2.2-1)$$

$$M \leq M_{rc} + M_{cfst} \quad (7.2.2-2)$$

式中： N ——钢管混凝土加劲混合结构的截面轴向压力设计值 (N)；

M ——钢管混凝土加劲混合结构的截面弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

N'_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下外包混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下外包混凝土部分的截面受弯承载力 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

N'_{cfsst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{cfsst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受弯承载力 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)。

7.2.3 单肢钢管混凝土加劲混合结构中的外包混凝土部分
(图 7.2.3)的截面受压承载力和相应的截面受弯承载力宜按下列公式计算:

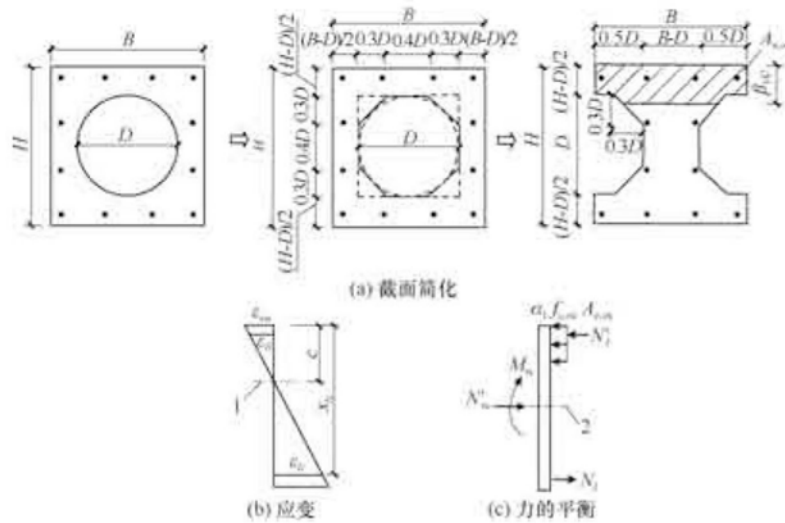


图 7.2.3 外包混凝土部分的截面承载力计算示意

1—中和轴; 2—形心轴; B —截面宽度; c —中和轴距受压边缘距离;

H —截面高度; N_t —受拉区纵筋轴力; N'_t —受压区纵筋轴力;

ϵ_{ti} —第 i 根纵筋应变; ϵ_{cu} —混凝土极限压应变

$$N'_{rc} = \alpha_1 f_{c,oc} A_{e,oc} + \sum \sigma_{li} A_{li} \quad (7.2.3-1)$$

$$M_{rc} = \alpha_1 f_{c,oc} A_{e,oc} \left(\frac{H}{2} - x_{e,oc} \right) + \sum \sigma_{li} A_{li} \left(\frac{H}{2} - x_{li} \right) \quad (7.2.3-2)$$

$$\sigma_{li} = E_s \epsilon_{cu} \frac{c - x_{li}}{c} \quad (7.2.3-3)$$

$$|\sigma_{li}| \leq f_t \quad (7.2.3-4)$$

式中: N'_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下钢管外包混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下钢管外包混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm);

$A_{e,oc}$ ——钢管外包混凝土等效应力块面积 (mm²) [图 7.2.3 (a)], 等效应力块高度为受压区高度 $\beta_1 c$, β_1 为钢管外包混凝土等效应力块高度系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 0.80; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.74; C50~C80 中间值按线性内插法确定;

A_{li} ——第 i 根纵筋的截面面积 (mm²);

ϵ_{cu} ——受压边缘混凝土极限压应变;

c ——中和轴距受压边缘距离 (mm);

$x_{e,oc}$ ——钢管外包混凝土等效应力块形心到受压边缘距离 (mm);

x_{li} ——第 i 根纵筋到受压边缘距离 (mm);

σ_{li} ——第 i 根纵筋应力 (N/mm²), 受压为正, 受拉为负;

f_t ——纵筋的抗拉强度设计值 (N/mm²);

α_1 ——钢管外包混凝土等效应力块强度系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.94; C50~C80 中间值按线性内插法确定。

7.2.4 单肢钢管混凝土加劲混合结构中的内置钢管混凝土部分 (图 7.2.4) 的截面受压承载力和相应的截面受弯承载力宜按式 (7.2.4-1) 和式 (7.2.4-2) 计算, 并应符合下列规定:

$$N'_{\text{cfst}} = N'_c + N'_s \quad (7.2.4-1)$$

$$M_{\text{cfst}} = M_c + M_s \quad (7.2.4-2)$$

式中: N'_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm);

N'_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受压承载力 (N);

M_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受弯承载力 (N·mm);

N'_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受压承载力 (N);

M_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受弯承载力 (N·mm)。

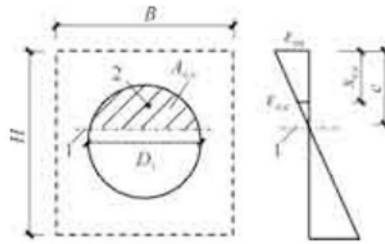


图 7.2.4 钢管内混凝土截面的承载力计算示意

1—中和轴; 2—点 A

1 钢管内混凝土截面的受压承载力和相应的受弯承载力宜按下列公式计算:

$$N'_c = \alpha_{co} A_{c,c} \sigma_{e,c} \quad (7.2.4-3)$$

$$M_c = \alpha_{\infty} A_{c,c} \sigma_{e,c} (0.5H - x_{e,c}) \quad (7.2.4-4)$$

$$\alpha_{\infty} = \begin{cases} 0.12 \frac{c - 0.5(H - D_i)}{D_i} + 0.73 \\ \quad [0.5(H - D_i) \leq c < 0.5(H + D_i)] \\ -0.3 \frac{H - c}{H - D_i} + 1 \\ \quad [0.5(H + D_i) \leq c \leq H] \end{cases} \quad (7.2.4-5)$$

$$\frac{\sigma_{e,c}}{\sigma_o} = 2 \left(\frac{\epsilon_{e,c}}{\epsilon_o} \right) - \left(\frac{\epsilon_{e,c}}{\epsilon_o} \right)^2 \quad (7.2.4-6)$$

$$\epsilon_{e,c} = \epsilon_{cu} \frac{c - x_{e,c}}{c} \quad (7.2.4-7)$$

$$x_{e,c} = \begin{cases} \left(-0.04 \frac{c - 0.5H + 0.5D_i}{D_i} + 0.46 \right) (c - 0.5H + 0.5D_i) \\ \quad + \frac{H - D_i}{2} \quad [0.5(H - D_i) \leq c < 0.5(H + D_i)] \\ \left(-0.16 \frac{H - c}{H - D_i} + 0.5 \right) D_i + \frac{H - D_i}{2} \\ \quad [0.5(H + D_i) \leq c \leq H] \end{cases} \quad (7.2.4-8)$$

式中: N'_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受压承载力 (N);

M_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受弯承载力 (N · mm);

$A_{c,c}$ ——钢管内混凝土受压区面积 (mm^2), $0 \leq A_{c,c} \leq A_c$;

$\sigma_{e,c}$ ——等效点 A 处混凝土纤维应力 (N/mm^2), $\sigma_{e,c} \leq \sigma_o$;

$x_{e,c}$ ——受压区等效点 A 距受压边缘距离 (mm) (图 7.2.4);

α_{∞} ——受压区高度系数;

D_i ——钢管内混凝土直径 (mm);

$\epsilon_{e,c}$ ——等效点 A 处混凝土纤维应变;

ϵ_{cu} ——受压边缘混凝土极限压应变;

σ_o ——钢管内混凝土单轴峰值压应力 (N/mm²), 应按表 7.2.4-1 确定;

ε_o ——钢管内混凝土单轴峰值压应变, 应按表 7.2.4-2 确定。

2 钢管截面的受压承载力和相应的受弯承载力宜按下列公式计算:

$$N'_s = k_1 f A_s \quad (7.2.4-9)$$

$$M_s = k_2 f A_s D \quad (7.2.4-10)$$

$$k_1 = \begin{cases} \left[\left(2.8 \frac{D}{H} - 4.2 \right) \left(\frac{c}{H} \right)^2 - \left(4.6 \frac{D}{H} - 7.9 \right) \frac{c}{H} \right. \\ \left. + \left(1.6 \frac{D}{H} - 2.9 \right) \right] \left(\frac{345}{f_y} \right)^{0.38} & (0.5 \leq \frac{c}{H} \leq 1) \\ \left(-3.0 \frac{D}{H} + 4.6 \right) \frac{c}{H} + 1.5 \frac{D}{H} - 2.3 & \left(\frac{c}{H} < 0.5 \right) \end{cases} \quad (7.2.4-11)$$

$$k_2 = m_1 \left(\frac{c}{H} \right)^2 + m_2 \frac{c}{H} + m_3 \quad (7.2.4-12)$$

$$m_1 = \begin{cases} -5.3 \left(\frac{D}{H} \right)^2 + 6.7 \frac{D}{H} - 1.8 & (0.5 \leq \frac{c}{H} \leq 1) \\ -22.2 \left(\frac{D}{H} \right)^2 + 29.4 \frac{D}{H} - 12 & \left(\frac{c}{H} < 0.5 \right) \end{cases} \quad (7.2.4-13)$$

$$m_2 = \begin{cases} 9.1 \left(\frac{D}{H} \right)^2 - 11.8 \frac{D}{H} + 0.6 \frac{345}{f_y} + 2.3 & (0.5 \leq \frac{c}{H} \leq 1) \\ 13.7 \left(\frac{D}{H} \right)^2 - 19.4 \frac{D}{H} - 0.76 \frac{345}{f_y} + 9.7 & \left(\frac{c}{H} < 0.5 \right) \end{cases} \quad (7.2.4-14)$$

$$m_3 = \begin{cases} -3.9 \left(\frac{D}{H} \right)^2 + 5.3 \frac{D}{H} - 0.46 \frac{345}{f_y} - 0.7 & (0.5 \leq \frac{c}{H} \leq 1) \\ -2.1 \left(\frac{D}{H} \right)^2 + 3.5 \frac{D}{H} + 0.22 \frac{345}{f_y} - 1.9 & \left(\frac{c}{H} < 0.5 \right) \end{cases} \quad (7.2.4-15)$$

式中： N'_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受压承载力 (N)；

M_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受弯承载力 (N·mm)；

k_1 、 k_2 ——计算系数，当 k_1 计算值大于 1.0 时，取 1.0，小于 -1.0 时，取 -1.0；当 k_2 计算值小于 0 时，取 0；

A_s ——钢管的截面面积 (mm²)；

f ——钢管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

f_y ——钢管钢材的屈服强度 (N/mm²)。

表 7.2.4-1 钢管内混凝土单轴峰值压应力 σ_0 值 (N/mm²)

混凝土 强度等级	约束效应系数 ξ							
	0.6	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
C30	20.9	23.1	25.4	27.1	28.5	29.4	29.8	29.8
C40	28.1	30.6	33.4	35.5	37.1	38.1	38.6	38.6
C50	34.4	37.2	40.3	42.7	44.5	45.7	46.3	46.3
C60	42.1	45.4	48.9	51.6	53.6	54.9	55.6	55.6
C70	49.1	52.6	56.4	59.4	61.6	63.1	63.8	63.8
C80	56.8	60.7	64.8	68.1	70.4	72.1	72.8	72.8

注：表内中间值按线性内插法确定。

表 7.2.4-2 钢管内混凝土单轴峰值压应变 ϵ_0 值 ($\mu\epsilon$)

混凝土 强度等级	约束效应系数 ξ							
	0.6	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
C30	2900	3000	3100	3200	3300	3300	3400	3500
C40	3200	3400	3600	3700	3800	3800	3900	4000
C50	3600	3800	3900	4100	4200	4300	4300	4400
C60	4000	4200	4400	4600	4700	4800	4900	5000
C70	4400	4700	4900	5000	5200	5300	5400	5500
C80	4800	5100	5400	5500	5700	5800	5900	6000

注：表内中间值按线性内插法确定。

7.2.5 当中和轴位于截面高度范围外时，轴压力和弯矩共同作用下单肢钢管混凝土加劲混合结构的截面受弯承载力应符合下列

公式规定：

$$M \leq M_{u,N} \quad (7.2.5-1)$$

$$M_{u,N} = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_{u,H}} M_{u,H} \quad (7.2.5-2)$$

式中： $M_{u,N}$ ——轴压力 N 作用下截面受弯承载力 ($N \cdot \text{mm}$)；

$N_{u,H}$ ——当中和轴距受压边缘距离 c 等于截面高度 H 时的截面受压承载力 (N)，应按本标准第 7.2.2 条规定确定；

$M_{u,H}$ ——当中和轴距受压边缘距离 c 等于截面高度 H 时的截面受弯承载力 ($N \cdot \text{mm}$)，应按本标准第 7.2.2 条规定确定；

N_0 ——截面受压承载力 (N)，应按本标准式 (7.2.1-2) 计算。

7.2.6 单肢钢管混凝土加劲混合结构的截面轴心受拉承载力应符合下列公式规定：

$$N \leq N_{rc,t} + N_{cfs,t} \quad (7.2.6-1)$$

$$N_{rc,t} = f_t A_t \quad (7.2.6-2)$$

$$N_{cfs,t} = (1.1 - 0.4\alpha_s) A_s f \quad (7.2.6-3)$$

式中： N ——钢管混凝土加劲混合结构的截面轴向拉力设计值 (N)；

$N_{rc,t}$ ——外包混凝土部分的截面受拉承载力 (N)；

$N_{cfs,t}$ ——内置钢管混凝土部分的截面受拉承载力 (N)；

A_t ——纵筋的截面面积 (mm^2)；

A_s ——钢管的截面面积 (mm^2)；

α_s ——内置钢管混凝土部分的截面含钢率，应按本标准式(3.3.1-1)计算；

f_t ——纵筋的抗拉强度设计值 (N/mm^2)；

f ——钢管钢材的抗拉强度设计值 (N/mm^2)。

7.3 四肢结构正截面承载力计算

7.3.1 四肢钢管混凝土加劲混合结构的截面轴心受压承载力应

符合式 (7.3.1-1) 的规定, 并宜按式 (7.3.1-2) 计算。

$$N \leq N_0 \quad (7.3.1-1)$$

$$N_0 = 0.9(N_{rc} + N_{cfst}) \quad (7.3.1-2)$$

$$N_{rc} = f_{c,oc}A_{oc} + f'_lA_l \quad (7.3.1-3)$$

$$N_{cfst} = \sum f_{sc,i}A_{sc,i} \quad (7.3.1-4)$$

式中: N ——钢管混凝土加劲混合结构的截面轴向压力设计值 (N);

N_0 ——钢管混凝土加劲混合结构的截面受压承载力 (N);

N_{rc} ——外包混凝土部分的截面受压承载力 (N);

N_{cfst} ——内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

$f_{c,oc}$ ——钢管外包混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm²);

A_{oc} ——钢管外包混凝土的截面面积 (mm²);

f'_l ——纵筋的抗压强度设计值 (N/mm²);

A_l ——纵筋的截面面积 (mm²);

$f_{sc,i}$ ——第 i 个内置钢管混凝土构件的截面轴心抗压强度设计值 (N/mm²);

$A_{sc,i}$ ——第 i 个内置钢管混凝土构件的截面面积 (mm²)。

7.3.2 当中和轴位于截面高度范围内时, 轴压力和弯矩共同作用下四肢钢管混凝土加劲混合结构的截面承载力应符合下列公式:

$$N \leq N'_{rc} + N'_{cfst} \quad (7.3.2-1)$$

$$M \leq M_{rc} + M_{cfst} \quad (7.3.2-2)$$

式中: N ——钢管混凝土加劲混合结构的截面轴向压力设计值 (N);

M ——钢管混凝土加劲混合结构的截面弯矩设计值 (N·mm);

N'_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下外包混凝土部分的截面受压承载力 (N);

N'_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下外包混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm);

M_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm)。

7.3.3 四肢钢管混凝土加劲混合结构中的外包混凝土部分
(图 7.3.3)的截面受压承载力和相应的截面受弯承载力宜按下列公式计算:

$$N'_{rc} = \alpha_1 f_{c,oc} A_{e,oc} + \sum \sigma_{li} A_{li} \quad (7.3.3-1)$$

$$M_{rc} = \alpha_1 f_{c,oc} A_{e,oc} \left(\frac{H}{2} - x_{e,oc} \right) + \sum \sigma_{li} A_{li} \left(\frac{H}{2} - x_{li} \right) \quad (7.3.3-2)$$

$$\sigma_{li} = E_s \epsilon_{cu} \frac{c - x_{li}}{c} \quad (7.3.3-3)$$

$$|\sigma_{li}| \leq f_l \quad (7.3.3-4)$$

式中: N'_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下钢管外包混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下钢管外包混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm);

$A_{e,oc}$ ——钢管外包混凝土等效应力块面积 (mm²) [图 7.3.3 (a)], 等效应力块高度为受压区高度 $\beta_1 c$, β_1 为钢管外包混凝土等效应力块高度系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 0.80; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.74; C50~C80 中间值按线性内插法确定;

A_{li} ——第 i 根纵筋的截面面积 (mm²);

ϵ_{cu} ——受压边缘混凝土极限压应变;

c ——中和轴距受压边缘距离 (mm);

$x_{e,oc}$ ——钢管外包混凝土等效应力块形心到受压边缘距离 (mm);

x_{li} ——第 i 根纵筋形心到受压边缘距离 (mm);

σ_{li} ——第 i 根纵筋应力 (N/mm²), 受压为正, 受拉为负;

α_1 ——钢管外包混凝土等效应力块强度系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.94; C50~C80 中间值按线性内插法确定。

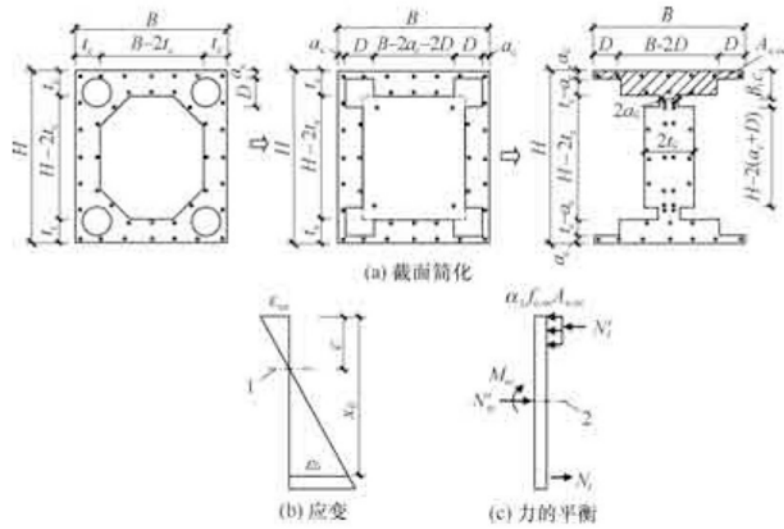


图 7.3.3 外包混凝土部分的截面承载力计算示意

1—中和轴；2—形心轴； B —截面宽度； c —中和轴距受压边缘距离； H —截面高度； N_t —受拉区纵筋轴力； N'_t —受压区纵筋轴力； t_c —空心边缘到混凝土外表面的距离； a_c —钢管外边缘到混凝土外表面的距离； ε_{si} —第 i 根纵筋应变； ε_{cu} —混凝土极限压应变

7.3.4 对称布置的四肢钢管混凝土加劲混合结构中的内置钢管混凝土部分（图 7.3.4-1）的截面受压承载力和相应的截面受弯

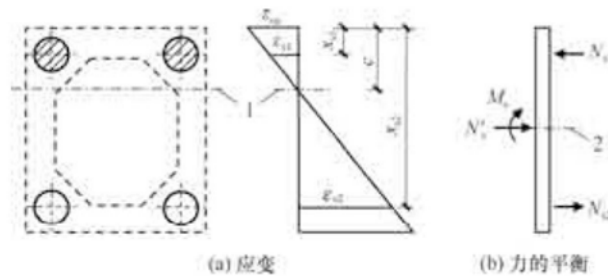


图 7.3.4-1 钢管截面的承载力计算示意

1—中和轴；2—形心轴； N_{s1} —靠近受压边缘的钢管轴力； N_{s2} —远离受压边缘的钢管轴力； ε_{s1} —靠近受压边缘的钢管形心应变； ε_{s2} —远离受压边缘的钢管形心应变； ε_{cu} —混凝土极限压应变

承载力宜按式 (7.3.4-1) 和式 (7.3.4-2) 计算, 并应符合下列规定:

$$N'_{\text{cfst}} = N'_c + N'_s \quad (7.3.4-1)$$

$$M'_{\text{cfst}} = M_c + M_s \quad (7.3.4-2)$$

式中: N'_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M'_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm);

N'_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受压承载力 (N);

N'_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受压承载力 (N);

M_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受弯承载力 (N·mm);

M_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受弯承载力 (N·mm)。

1 钢管截面的受压承载力和相应的受弯承载力宜分别按式 (7.3.4-3) 和式 (7.3.4-4) 计算 (图 7.3.4-1):

$$N'_s = 2\sigma_{s1}A_{s1} + 2\sigma_{s2}A_{s2} \quad (7.3.4-3)$$

$$M_s = 2\sigma_{s1}A_{s1}(0.5H - x_{s1}) + 2\sigma_{s2}A_{s2}(0.5H - x_{s2}) \quad (7.3.4-4)$$

式中: N'_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受压承载力 (N);

M_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受弯承载力 (N·mm);

A_{s1} ——靠近受压边缘的钢管截面面积 (mm²);

A_{s2} ——远离受压边缘的钢管截面面积 (mm²);

x_{s1} ——靠近受压边缘的钢管形心到受压边缘距离 (mm);

x_{s2} ——远离受压边缘的钢管形心到受压边缘距离 (mm);

σ_{s1} ——靠近受压边缘的钢管形心处钢管应力 (N/mm²), 受压为正, 受拉为负;

σ_{s2} ——远离受压边缘的钢管形心处钢管应力 (N/mm^2),
受压为正, 受拉为负。

2 以中和轴分别穿过靠近和远离受压边缘的钢管内混凝土为界, 管内混凝土截面的受压承载力和相应的受弯承载力宜符合下列规定:

1) 当 $(H-a_{ci}) \leq c \leq H$ 时, 全部管内混凝土均处于受压状态 (图 7.3.4-2), 宜按下列公式计算:

$$N'_c = 2\sigma_{c1}A_{c1} + 2\sigma_{c2}A_{c2} \quad (7.3.4-5)$$

$$M_c = 2\sigma_{c1}A_{c1}(0.5H - x_{c1}) + 2\sigma_{c2}A_{c2}(0.5H - x_{c2}) \quad (7.3.4-6)$$

式中: N'_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受压承载力 (N);

M_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受弯承载力 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

A_{c1} ——靠近受压边缘的管内混凝土面积 (mm^2);

A_{c2} ——远离受压边缘的管内混凝土面积 (mm^2);

x_{c1} ——靠近受压边缘的管内混凝土形心到受压边缘距离 (mm);

x_{c2} ——远离受压边缘的管内混凝土形心到受压边缘距离 (mm);

σ_{c1} ——靠近受压边缘的管内混凝土形心处应力 (N/mm^2),
应按式 (7.2.4-6) 计算;

σ_{c2} ——远离受压边缘的管内混凝土形心处应力 (N/mm^2),
应按式 (7.2.4-6) 计算。

2) 当 $(H-D_i-a_{ci}) < c < (H-a_{ci})$ 时, 中和轴穿过远离受压边缘的管内混凝土, 远离受压边缘的管内混凝土受拉区域不宜计入内力贡献 (图 7.3.4-3), 宜按下列公式计算:

$$N'_c = 2\sigma_{c1}A_{c1} + 2\sigma_{e,c2}A_{e,c2} \quad (7.3.4-7)$$

$$M_c = 2\sigma_{c1}A_{c1}(0.5H - x_{c1}) + 2A_{e,c2}\sigma_{e,c2}(0.5H - x_{e,c2}) \quad (7.3.4-8)$$

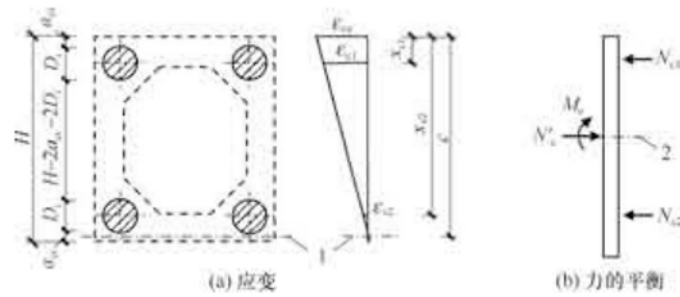


图 7.3.4-2 钢管内混凝土截面的承载力计算示意 $[(H-a_{ci}) \leq c \leq H]$

1—中和轴；2—形心轴； H —截面高度； a_{ci} —管内混凝土外边缘到混凝土外表面的距离； c —中和轴距受压边缘距离； N_{c1} —靠近受压边缘的管内混凝土轴力； N_{c2} —远离受压边缘的管内混凝土轴力； ϵ_{c1} —靠近受压边缘的管内混凝土形心应变； ϵ_{c2} —远离受压边缘的管内混凝土形心应变； ϵ_{cu} —混凝土极限压应变

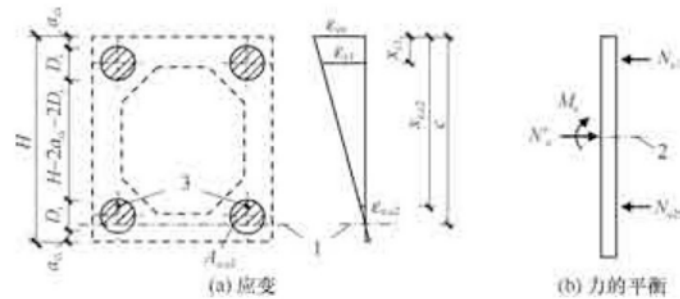


图 7.3.4-3 钢管内混凝土截面的承载力计算示意

$$[(H-D_1-a_{ci}) < c < (H-a_{ci})]$$

1—中和轴；2—形心轴；3—等效点 A； H —截面高度； a_{ci} —管内混凝土外边缘到混凝土外表面的距离； c —中和轴距受压边缘距离； ϵ_{c1} —靠近受压边缘的管内混凝土形心应变； ϵ_{c2} —远离受压边缘的管内混凝土等效点 A 处应变； ϵ_{cu} —混凝土极限压应变

$$x_{e,c2} = 0.54c + 0.46H - 0.5D_i - 0.46a_{ci} \quad (7.3.4-9)$$

式中： $A_{c,c2}$ ——远离受压边缘的管内混凝土受压面积 (mm^2)；

$x_{e,c2}$ ——远离受压边缘的管内混凝土等效点 A 到受压边缘距离 (mm)；

$\sigma_{e,c2}$ ——远离受压边缘的管内混凝土等效点 A 处应力 (N/mm^2)，应按式 (7.2.4-6) 计算。

- 3) 当 $(D_i + a_{ci}) \leq c \leq (H - D_i - a_{ci})$ 时，中和轴位于远离和靠近受拉边缘的管内混凝土之间，不宜计入远离受压区的管内混凝土的内力贡献 (图 7.3.4-4)，宜按下列公式计算：

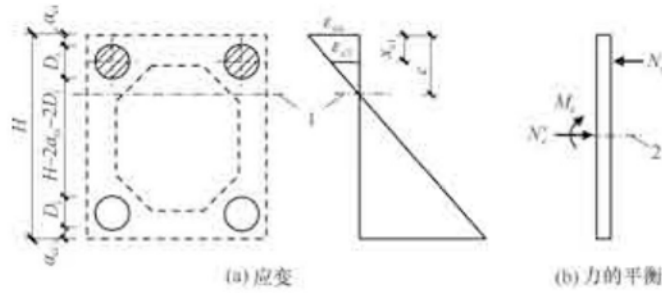


图 7.3.4-4 钢管内混凝土截面的承载力计算示意

$$[(D_i + a_{ci}) \leq c \leq (H - D_i - a_{ci})]$$

1—中和轴；2—形心轴； H —截面高度； a_{ci} —管内混凝土外边缘到混凝土外表面的距离； c —中和轴距受压边缘距离； ϵ_{ci} —靠近受压边缘的管内混凝土形心应变； ϵ_{cu} —混凝土极限压应变

$$N'_c = 2\sigma_{ci}A_{ci} \quad (7.3.4-10)$$

$$M_c = 2\sigma_{ci}A_{ci}(0.5H - x_{ci}) \quad (7.3.4-11)$$

式中： A_{ci} ——靠近受压边缘的管内混凝土面积 (mm^2)；

x_{ci} ——靠近受压边缘的管内混凝土形心到受压边缘距离 (mm)；

σ_{ci} ——靠近受压边缘的管内混凝土形心处应力 (N/mm^2)，应按式 (7.2.4-6) 计算。

- 4) 当 $a_{ci} < c < (D_i + a_{ci})$ 时, 中和轴穿过靠近受压边缘的管内混凝土, 不宜计入靠近受压边缘的管内混凝土受拉区域的内力贡献 (图 7.3.4-5), 宜按下列公式计算:

$$N'_c = 2\sigma_{e,cl}A_{c,cl} \quad (7.3.4-12)$$

$$M_c = 2A_{c,cl}\sigma_{e,cl}(0.5H - x_{e,cl}) \quad (7.3.4-13)$$

$$x_{e,cl} = 0.46c + 0.04D_i + 0.54a_{ci} \quad (7.3.4-14)$$

式中: $A_{c,cl}$ ——靠近受压边缘的管内混凝土受压面积 (mm^2);
 $x_{e,cl}$ ——靠近受压边缘的管内混凝土等效点 B 到受压边缘距离 (mm);
 $\sigma_{e,cl}$ ——靠近受压边缘的管内混凝土等效点 B 处应力 (N/mm^2), 应按式 (7.2.4-6) 计算。

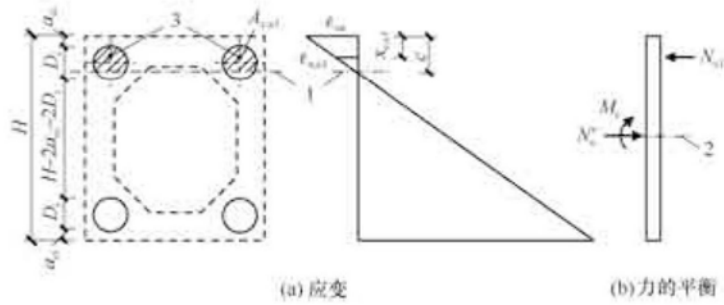


图 7.3.4-5 钢管内混凝土截面的承载力计算示意 [$a_{ci} < c < (D_i + a_{ci})$]

1—中和轴; 2—形心轴; 3—点 B; H —截面高度;

a_{ci} —管内混凝土外边缘到混凝土外表面的距离; c —中和轴距受压边缘距离;

$\epsilon_{e,cl}$ —靠近受压边缘的管内混凝土等效点 B 处应变;

ϵ_{cu} —混凝土极限压应变

7.3.5 当中和轴在截面高度范围外时, 轴压力和弯矩共同作用下四肢钢管混凝土加劲混合结构的截面受弯承载力应满足式 (7.3.5-1) 的要求, 并宜按式 (7.3.5-2) 计算:

$$M \leq M_{u,N} \quad (7.3.5-1)$$

$$M_{u,N} = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_{u,H}} M_{u,H} \quad (7.3.5-2)$$

式中：\$N_{u,H}\$——当中和轴距受压边缘距离 \$c\$ 等于截面高度 \$H\$ 时，按本标准第 7.3.2 条计算的截面受压承载力 (N)；

\$M_{u,H}\$——当中和轴距受压边缘距离 \$c\$ 等于截面高度 \$H\$ 时，按本标准第 7.3.2 条计算的截面受弯承载力 (N·mm)；

\$M_{u,N}\$——轴压力 \$N\$ 作用下截面受弯承载力 (N·mm)；

\$N_0\$——按本标准第 7.3.1 条计算的截面轴心受压承载力 (N)。

7.3.6 进行正截面压弯承载力验算时，可通过轴向压力设计值等于截面受压承载力的假设得到中和轴距受压边缘距离 (\$c\$)。若 \$c \leq H\$，宜按本标准第 7.3.2 条计算截面受弯承载力 (\$M_u\$)；若 \$c > H\$，宜按本标准第 7.3.5 条计算截面受弯承载力 (\$M_u\$)。

7.4 六肢结构正截面承载力计算

7.4.1 六肢钢管混凝土加劲混合结构的截面轴心受压承载力应符合本标准第 7.3.1 条的规定。

7.4.2 当中和轴位于截面高度范围内时，轴压力和弯矩共同作用下六肢钢管混凝土加劲混合结构的截面承载力应符合下列公式规定：

$$N \leq N'_{rc} + N'_{cfs} \quad (7.4.2-1)$$

$$M \leq M_{rc} + M_{cfs} \quad (7.4.2-2)$$

式中：\$N\$——钢管混凝土加劲混合结构的截面轴向压力设计值 (N)；

\$M\$——钢管混凝土加劲混合结构的截面弯矩设计值 (N·mm)；

\$N'_{rc}\$——轴压力和弯矩共同作用下外包混凝土部分的截面受压承载力 (N)；

N'_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N)；

M_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下外包混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm)；

M_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm)。

7.4.3 六肢钢管混凝土加劲混合结构中的外包混凝土部分
(图 7.4.3)的截面受压承载力和相应的截面受弯承载力宜按下列公式计算：

$$N'_{\text{rc}} = \alpha_1 f_{\text{c,oc}} A_{\text{e,oc}} + \sum \sigma_{li} A_{li} \quad (7.4.3-1)$$

$$M_{\text{rc}} = \alpha_1 f_{\text{c,oc}} A_{\text{e,oc}} \left(\frac{H}{2} - x_{\text{e,oc}} \right) + \sum \sigma_{li} A_{li} \left(\frac{H}{2} - x_{li} \right) \quad (7.4.3-2)$$

$$\sigma_{li} = E_s \epsilon_{\text{cu}} \frac{c - x_{li}}{c} \quad (7.4.3-3)$$

$$|\sigma_{li}| \leq f_l \quad (7.4.3-4)$$

式中： N'_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下钢管外包混凝土部分的截面受压承载力 (N)；

M_{rc} ——轴压力和弯矩共同作用下钢管外包混凝土部分的截面受弯承载力 (N·mm)；

$A_{\text{e,oc}}$ ——钢管外包混凝土等效应力块面积 (mm²) [图 7.4.3 (a)]，等效应力块高度为受压区高度 $\beta_1 c$ ， β_1 为钢管外包混凝土等效应力块高度系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时，取 0.80；当混凝土强度等级为 C80 时，取 0.74；C50~C80 中间值按线性内插法确定；

A_{li} ——第 i 根纵筋的截面面积 (mm²)；

ϵ_{cu} ——受压边缘混凝土极限压应变；

- c ——中和轴距受压边缘距离 (mm);
- $x_{e,oc}$ ——钢管外包混凝土等效应力块形心到受压边缘距离 (mm);
- x_{li} ——第 i 根纵筋形心到受压边缘距离 (mm);
- σ_{li} ——第 i 根纵筋应力 (N/mm^2), 受压为正, 受拉为负;
- α_1 ——钢管外包混凝土等效应力块强度系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.94; C50~C80 中间值按线性内插法确定。

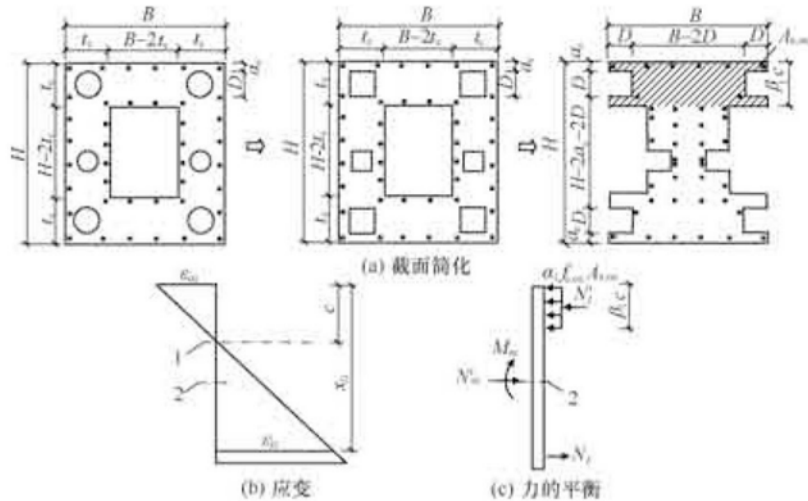


图 7.4.3 外包混凝土部分的截面承载力计算示意

1—中和轴; 2—形心轴; B —截面宽度; c —中和轴距受压边缘距离;

H —截面高度; N_l —受拉区纵筋轴力; N_l' —受压区纵筋轴力;

t_c —空心边缘到混凝土外表面的距离; a_c —钢管外边缘到混凝土外表面的距离;

ϵ_{li} —第 i 根纵筋应变; ϵ_{cu} —混凝土极限压应变

7.4.4 对称布置的六肢钢管混凝土加劲混合结构中的内置钢管混凝土部分 (图 7.4.4) 的截面受压承载力和相应的截面受弯承载力宜按式(7.4.4-1)和式 (7.4.4-2) 计算, 并应符合下列规定:

$$N'_{\text{cfst}} = N'_c + N'_s \quad (7.4.4-1)$$

$$M_{\text{cfst}} = M_c + M_s \quad (7.4.4-2)$$

式中: N'_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

M_{cfst} ——轴压力和弯矩共同作用下内置钢管混凝土部分的截面受弯承载力 (N · mm);

N'_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受压承载力 (N);

N'_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受压承载力 (N);

M_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受弯承载力 (N · mm);

M_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受弯承载力 (N · mm)。

1 钢管截面的受压承载力和相应的受弯承载力宜按下列公式计算 (图 7.4.4):

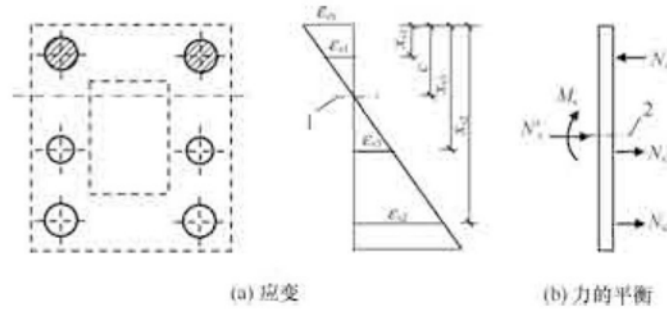


图 7.4.4 钢管截面的承载力计算示意

1—中和轴; 2—形心轴; N_{s1} —靠近受压边缘的钢管轴力;

N_{s2} —远离受压边缘的钢管轴力; N_{s3} —腰部钢管轴力; N'_s —钢管轴力;

M_s —钢管弯矩; ϵ_{s1} —靠近受压边缘的钢管形心应变; ϵ_{s2} —远离受压边缘的钢管形心应变; ϵ_{s3} —腰部钢管形心应变; ϵ_{c0} —混凝土极限压应变

$$N'_s = 2\sigma_{s1}A_{s1} + 2\sigma_{s2}A_{s2} + 2\sigma_{s3}A_{s3} \quad (7.4.4-3)$$

$$M_s = 2\sigma_{s1}A_{s1}(0.5H - x_{s1}) + 2\sigma_{s2}A_{s2}(0.5H - x_{s2}) + 2\sigma_{s3}A_{s3}(0.5H - x_{s3}) \quad (7.4.4-4)$$

式中: N'_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受压承载力 (N);

M_s ——轴压力和弯矩共同作用下钢管截面的受弯承载力 (N·mm);

A_{s1} ——靠近受压边缘的钢管截面面积 (mm²);

A_{s2} ——远离受压边缘的钢管截面面积 (mm²);

A_{s3} ——腰部钢管的截面面积 (mm²);

x_{s1} ——靠近受压边缘的钢管形心到受压边缘距离 (mm);

x_{s2} ——远离受压边缘的钢管形心到受压边缘距离 (mm);

x_{s3} ——腰部钢管形心到受压边缘距离 (mm);

σ_{s1} ——靠近受压边缘的钢管形心处钢管应力 (N/mm²), 受压为正, 受拉为负;

σ_{s2} ——远离受压边缘的钢管形心处钢管应力 (N/mm²), 受压为正, 受拉为负;

σ_{s3} ——腰部钢管形心处钢管应力 (N/mm²), 受压为正, 受拉为负。

2 钢管内混凝土截面的受压承载力和相应的受弯承载力宜按下列公式计算:

$$N'_c = \sum \sigma_{ci}A_{ci} \quad (7.4.4-5)$$

$$M_c = \sum \sigma_{ci}A_{ci}(0.5H - x_{ci}) \quad (7.4.4-6)$$

式中: N'_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受压承载力 (N);

M_c ——轴压力和弯矩共同作用下钢管内混凝土截面的受弯承载力 (N·mm);

A_{ci} ——钢管内混凝土纤维的面积 (mm²);

σ_{ci} ——钢管内混凝土纤维的应力 (N/mm²), 应按

式 (7.2.4-6) 计算;

x_{ci} ——钢管内混凝土纤维形心到受压边缘距离 (mm)。

7.4.5 当中和轴位于截面高度范围外时, 轴压力和弯矩共同作用下六肢钢管混凝土加劲混合结构的截面受弯承载力应符合式 (7.4.5-1) 的规定, 并宜按式 (7.4.5-2) 计算。

$$M \leq M_{u,N} \quad (7.4.5-1)$$

$$M_{u,N} = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_{u,H}} M_{u,H} \quad (7.4.5-2)$$

式中: $N_{u,H}$ ——当中和轴距受压边缘距离 c 等于截面高度 H 时, 按本标准第 7.4.2 条计算的截面受压承载力 (N);

$M_{u,H}$ ——当中和轴距受压边缘距离 c 等于截面高度 H 时, 按本标准第 7.4.2 条计算的截面受弯承载力 (N · mm);

$M_{u,N}$ ——轴压力 N 作用下截面受弯承载力 (N · mm);

N_0 ——按本标准第 7.4.1 条计算的截面轴心受压承载力 (N)。

7.4.6 进行正截面压弯承载力验算时, 可通过轴向压力设计值等于截面受压承载力的假设得到中和轴距受压边缘距离 (c)。若 $c \leq H$, 宜按本标准第 7.4.2 条计算截面受弯承载力 (M_u); 若 $c > H$, 宜按本标准第 7.4.5 条计算截面受弯承载力 (M_u)。

7.5 长细比影响下正截面承载力计算

7.5.1 轴压荷载作用下, 长细比影响下正截面受压承载力宜按下式计算:

$$N_u = 0.9\varphi(N_{rc} + N_{cst}) \quad (7.5.1)$$

式中: N_u ——钢管混凝土加劲混合结构轴心受压承载力 (N);

N_{rc} ——外包混凝土部分的截面受压承载力 (N);

N_{cst} ——内置钢管混凝土部分的截面受压承载力 (N);

φ ——钢管混凝土加劲混合结构的稳定系数, 应根据结

构长细比按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算。

7.5.2 轴压力和弯矩共同作用下，结构长细比 (λ) 宜按式 (7.5.2-1) 计算。当结构长细比 (λ) 满足式 (7.5.2-2) 要求时，可不计入轴向压力在该方向挠曲杆件中产生的附加弯矩的影响，其他情况宜按本标准第 7.5.3 条规定计入附加弯矩的影响。

$$\lambda = l_0 / i \quad (7.5.2-1)$$

$$\lambda \leq 34 - 12 \frac{M_1}{M_2} \quad (7.5.2-2)$$

式中： M_1 、 M_2 ——已计入侧移影响的压弯构件两端截面按结构弹性分析确定的对同一主轴的组合弯矩设计值 ($N \cdot mm$)，绝对值较小端为 M_1 ，绝对值较大端为 M_2 ，当结构按单曲率弯曲时， M_1/M_2 取正值，否则取负值；

l_0 ——结构计算长度 (mm)，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定；

i ——偏心方向的截面回转半径 (mm)。

7.5.3 偏心受压结构考虑轴向压力在挠曲杆件中产生的二阶效应后控制截面的弯矩设计值，宜按下列公式计算：

$$M = C_m \eta_c M_2 \quad (7.5.3-1)$$

$$C_m = 0.7 + 0.3 \frac{M_1}{M_2} \quad (7.5.3-2)$$

$$\eta_c = 1 + \frac{1}{1300 e_i / h_0} \left(\frac{l_0}{H} \right)^2 \zeta_c \quad (7.5.3-3)$$

$$\zeta_c = \begin{cases} \frac{0.5(f_{c,oc}A_{oc} + f_{c,c}A_c)}{N_u} + \frac{13.6e_i}{l_0} + 0.1 & \text{(单肢截面)} \\ \frac{0.5[f_{c,oc}A_{oc} + \sum(f_{c,c}A_c)]}{N_u} + \frac{6.7e_i}{l_0} + 0.1 & \text{(四肢和六肢截面)} \end{cases} \quad (7.5.3-4)$$

式中： M ——控制截面的弯矩设计值 ($N \cdot mm$)；

M_1 、 M_2 ——已计入侧移影响的压弯构件两端截面按结构弹性分析确定的对同一主轴的组合弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)，绝对值较小端为 M_1 ，绝对值较大端为 M_2 ，当结构按单曲率弯曲时， M_1/M_2 取正值，否则取负值；
 C_m ——结构端截面偏心距调节系数，当计算值小于 0.7 时，取 0.7；
 η_c ——弯矩增大系数；
 N_u ——钢管混凝土加劲混合结构轴心受压承载力 (N)；
 e_i ——计入附加偏心距 e_a 后的初始偏心距 (mm)，即 $e_i = e_a + \frac{M_2}{N}$ ， N 为与弯矩设计值 M_2 相应的轴向压力设计值 (N)；
 e_a ——附加偏心距 (mm)，取 20mm 和弯矩作用方向截面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值；
 H ——截面高度 (mm)；
 h_0 ——沿弯矩作用方向截面计算高度 (mm)，纵向受拉钢筋合力点至受压边缘的距离；
 ζ_c ——曲率调整系数，当计算值大于 1.0 时，取 1.0；
 A_c ——钢管内混凝土的截面面积 (mm^2)；
 A_{oc} ——钢管外包混凝土的截面面积 (mm^2)；
 $f_{c,c}$ ——钢管内混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)；
 $f_{c,oc}$ ——钢管外包混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)；
 $\Sigma(f_{c,c}A_c)$ ——四肢和六肢截面的钢管内混凝土受压承载力之和 (N)。

7.6 长期荷载作用下正截面承载力计算

7.6.1 长期荷载作用下钢管混凝土加劲混合结构的轴心受压承载力宜按下式计算：

$$N_{ul} = k_{cr} N_u \quad (7.6.1)$$

式中： N_{ul} ——长期荷载作用影响下结构的轴心受压承载力 (N)；

N_u ——长细比影响下钢管混凝土加劲混合结构的轴心受压承载力 (N)，宜按本标准式 (7.5.1) 计算；

k_{cr} ——长期荷载影响系数。

7.6.2 长期荷载影响系数 (k_{cr}) 宜按本标准附录 C 取值。

7.7 斜截面受剪承载力计算

7.7.1 受弯钢管混凝土加劲混合结构的斜截面受剪承载力应满足下式要求：

$$V \leq V_{rc} + V_{cfst} \quad (7.7.1)$$

式中： V ——剪力设计值 (N)；

V_{rc} ——外包混凝土部分的受剪承载力 (N)；

V_{cfst} ——内置钢管混凝土部分的受剪承载力 (N)。

7.7.2 外包混凝土部分的受剪承载力宜按下式计算：

$$V_{rc} = 0.45A_{oc}\sqrt{(2+60\rho)\sqrt{f_{cu,oc}}\rho_{sv}f_v} \quad (7.7.2-1)$$

$$\rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{sB} \quad (7.7.2-2)$$

式中： V_{rc} ——外包混凝土部分的受剪承载力 (N)；

A_{oc} ——钢管外包混凝土的截面面积 (mm^2)；

ρ ——斜截面纵向受拉钢筋的配筋率，当 $\rho > 2.5\%$ 时，取 $\rho = 2.5\%$ ；

$f_{cu,oc}$ ——钢管外包混凝土的立方体抗压强度标准值 (N/mm^2)；

ρ_{sv} ——斜截面内箍筋配筋率；

A_{sv} ——箍筋的截面面积 (mm^2)；

s ——箍筋间距 (mm)；

B ——截面宽度 (mm)；

f_v ——箍筋抗拉强度设计值 (N/mm^2)。

7.7.3 内置钢管混凝土部分的受剪承载力宜按下式计算：

$$V_{cfst} = \sum 0.9(0.97 + 0.2\ln\xi_i)A_{sc,i}f_{sv,i} \quad (7.7.3)$$

式中： V_{cfs} ——内置钢管混凝土部分的受剪承载力（N）；

ξ_i ——第 i 个内置钢管混凝土构件的约束效应系数，应按本标准式（3.3.1-2）计算；

$A_{sc,i}$ ——第 i 个内置钢管混凝土构件的截面面积（ mm^2 ）；

$f_{sv,i}$ ——第 i 个内置钢管混凝土构件的截面抗剪强度设计值（ N/mm^2 ），应按本标准式（5.2.2）计算。

7.7.4 单肢钢管混凝土加劲混合结构承受弯矩、轴力和剪力共同作用时，当计算截面的剪跨比 $\lambda_v \left(= \frac{M}{Vh_0} \right)$ 不小于 1.5 时，钢管的外径与结构外截面宽度的比值（ D/B ）不小于 0.5，且外包混凝土部分配筋符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定时，压弯承载力计算可按本标准第 7.2 节、第 7.5 节和第 7.6 节的规定执行，并可忽略剪力对压弯承载力降低的影响。

7.8 拱形结构承载力计算

7.8.1 拱形结构应验算平面内和平面外整体稳定性。计算拱结构的平面内整体稳定承载力时，可采用等效梁柱法分析拱结构的稳定性。

7.8.2 对于无铰拱、双铰拱和三铰拱，等效梁柱的计算长度应分别取拱轴线长度（ S ）的 36%、54% 和 58%。等效梁柱的两端作用力和验算截面尺寸应分别取控制截面的内力及截面尺寸。特大跨及变截面等复杂拱结构，可采用拱的换算等代截面作为验算截面，并根据结构整体分析确定拱结构等效梁柱的计算长度及内力。

8 节 点 设 计

8.1 一 般 规 定

8.1.1 钢管混凝土混合结构的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、钢管与管内混凝土共同工作，并应便于制作、安装和管内混凝土施工。

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

8.1.3 采用焊缝连接的钢管混凝土桁式混合结构相贯节点，腹杆钢管沿着相贯线应采用坡口对接焊缝或角焊缝进行连接，且焊条型号应与钢管钢材牌号匹配。焊缝承载力可按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定计算。

8.1.4 对于腹杆搭接的平面 K 形和 N 形节点，当两个腹杆直径不同时，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。

8.1.5 钢管混凝土桁式混合结构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 8.1.5），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。

8.1.6 钢管混凝土桁式混合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 8.1.6），环形或扇形加劲板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整体。当节点板自由边的长度与厚度的比值大于

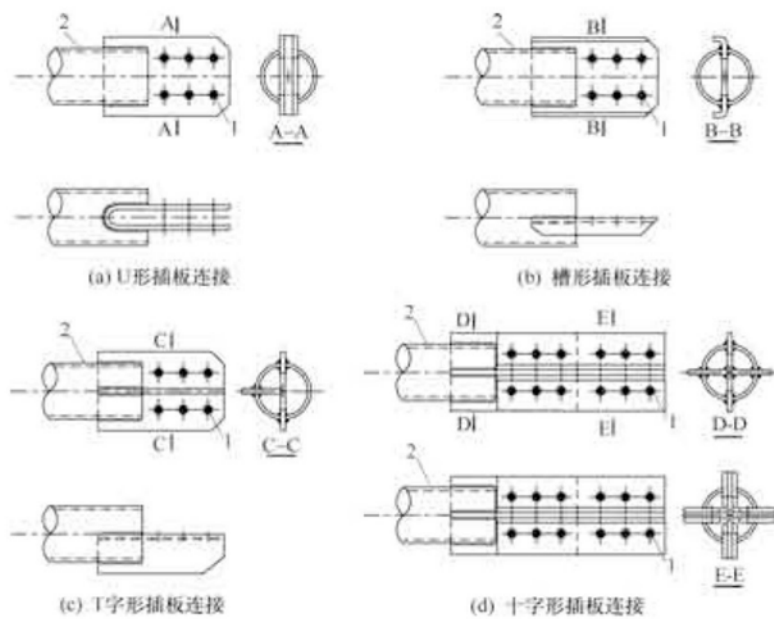


图 8.1.5 不同类型的腹杆端部插板连接构造形式
1—螺栓；2—腹杆

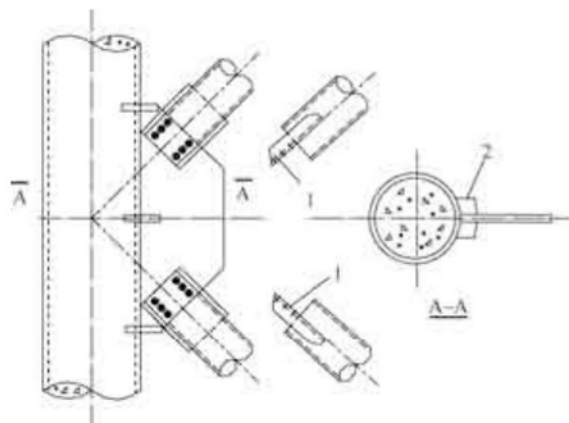


图 8.1.6 节点板连接构造形式
1—插板；2—加劲板

$60\sqrt{235/f_y}$ 时,宜卷边或设置纵向加劲板。节点板的承载力计算应符合国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T 5486 的有关规定。

8.2 钢管混凝土桁式混合结构节点

8.2.1 钢管混凝土桁式混合结构平面 K 形和 N 形相贯焊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应将腹杆插入弦杆内。
- 2 腹杆与弦杆的连接节点处应避免偏心;偏心不可避免时,偏心距应满足下列公式的要求(图 8.2.1)。

$$-0.55 \leq \frac{e}{D} \leq 0.25 \quad (8.2.1-1)$$

式中: e ——偏心距 (mm), 见图 8.2.1;

D ——弦杆钢管外径 (mm)。

3 腹杆搭接的平面 K 形、N 形节点的搭接率 (η_{ov}) 可按下式计算,且不应小于 25%,并不应大于 100%。

$$\eta_{ov} = \frac{q}{p} \times 100\% \quad (8.2.1-2)$$

式中: q ——搭接腹杆与弦杆理论上相交的冠点 (A') 与被搭接腹杆与弦杆表面相交的冠趾 (A) 之间的直线距离 AA' (mm) (图 8.2.1);

p ——搭接腹杆与弦杆理论上相交的冠点 (A') 与搭接腹杆与弦杆表面相交的冠跟 (B) 之间的直线距离 $A'B$ (mm) (图 8.2.1)。

4 弦杆与腹杆的连接焊缝应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

5 对于平面 K 形、N 形间隙节点,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。

6 钢管混凝土桁式混合结构在浇筑混凝土前的空心平面 K

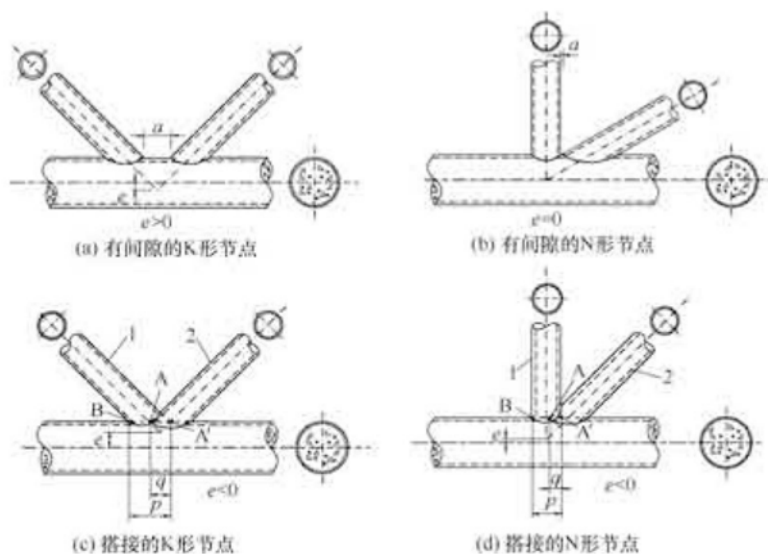


图 8.2.1 平面 K 形和 N 形节点的偏心和间隙

1—搭接腹杆；2—被搭接腹杆；a—间隙

形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。

7 钢管混凝土桁式混合结构平面 K 形间隙节点中受压和受拉腹杆的承载力计算应满足下列要求：

- 1) 受拉圆形截面空钢管腹杆的轴心受拉承载力宜按下式计算：

$$N_{tw} = \min \left(f_v t \pi d_w \frac{1 + \sin \theta}{2 \sin^2 \theta}, f_w A_w \right) \quad (8.2.1-3)$$

式中： N_{tw} ——受拉腹杆轴心受拉承载力 (N)；

f_v ——弦杆钢管钢材的抗剪强度设计值 (N/mm²)；

f_w ——腹杆钢管钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

t ——弦杆钢管壁厚 (mm)；

d_w ——受拉腹杆钢管外径 (mm);

θ ——受拉腹杆与弦杆间夹角;

A_w ——受拉腹杆的截面面积 (mm²)。

2) 受压空钢管腹杆的轴心受压承载力计算应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中轴心受压构件稳定性计算的有关规定。

8 钢管混凝土桁式混合结构 K 形节点弦杆和圆形截面腹杆连接部位的侧向局部受压承载力应符合式 (8.2.1-4) 规定, 并宜按式 (8.2.1-5) 计算。

$$N_{LF} \leq N_{uLF} \quad (8.2.1-4)$$

$$N_{uLF} = \beta_c \beta_l f_c \frac{A_{lc}}{\sin \theta} \quad (8.2.1-5)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_{lc}}} \quad (8.2.1-6)$$

$$A_{lc} = \pi d_w^2 / 4 \quad (8.2.1-7)$$

$$A_b = \frac{A_{lc}}{\sin \theta} + 2d_w D \quad (8.2.1-8)$$

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_l ——侧向局部受压混凝土强度提高系数;

A_{lc} ——侧向局部受压面积, 可取为外径相等的实心腹杆的截面面积 (mm²);

D ——承受侧向力的弦杆外径 (mm);

d_w ——传递侧向力的腹杆外径 (mm);

A_b ——侧向局部受压的计算底面积 (mm²);

β_c ——侧向局部受压混凝土强度影响系数，应按表 8.2.1 确定。

表 8.2.1 侧向局部受压混凝土强度影响系数

$\sqrt{\frac{A_{lc}}{A_b} \frac{f_y}{f_{ck}}}$	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：表内中间值按线性内插法确定。

9 腹杆与弦杆的相贯焊缝应沿全周连续焊接并平滑过渡；腹杆互相搭接处，搭接腹杆沿搭接边应与被搭接腹杆焊接连接。

8.2.2 钢管混凝土桁式混合结构平面 T 形、Y 形和 X 形连接节点的构造和计算应符合下列规定：

1 钢管混凝土桁式混合结构平面 T 形、Y 形和 X 形连接节点的构造应符合第 8.2.1 条的规定。

2 钢管混凝土桁式混合结构在浇筑混凝土前的空心平面 T 形、Y 形和 X 形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。

3 钢管混凝土桁式混合结构平面 T 形、Y 形和 X 形连接节点（图 8.2.2）中受压和受拉腹杆的承载力计算应满足下列要求：

1) 轴心受拉腹杆的承载力宜按式（8.2.1-3）计算；

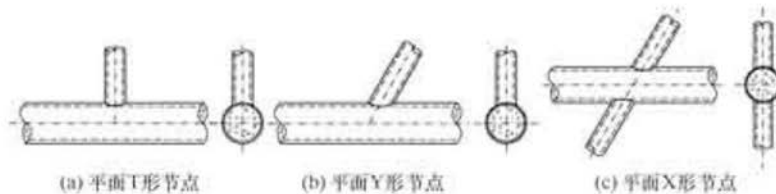


图 8.2.2 钢管混凝土桁式混合结构平面 T 形、Y 形和 X 形节点

2) 轴心受压腹杆的承载力计算应符合本标准第 8.2.1 条的规定。

4 当钢管混凝土桁式混合结构平面 T 形、Y 形和 X 形连接节点区承受侧向局部压力作用时, 应按本标准第 8.2.1 条进行侧向局部受压承载力验算, 其中平面 T 形节点腹杆与钢管混凝土弦杆的夹角 θ 应取为 90° 。

8.2.3 钢管混凝土桁式混合结构空间节点的钢结构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。腹杆在节点处的承载力, 应按相应的平面连接节点承载力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。

8.3 钢管混凝土加劲混合结构柱-梁连接节点

8.3.1 框架结构中钢管混凝土加劲混合结构柱与工字形截面钢梁刚性连接节点应符合下列规定:

- 1 宜采用环板连接;
- 2 环板翼缘和竖向加劲板的外伸长度应满足钢梁连接施工的要求;
- 3 钢梁翼缘和腹板在现场应分别与环板和竖向加劲板连接(图 8.3.1)。

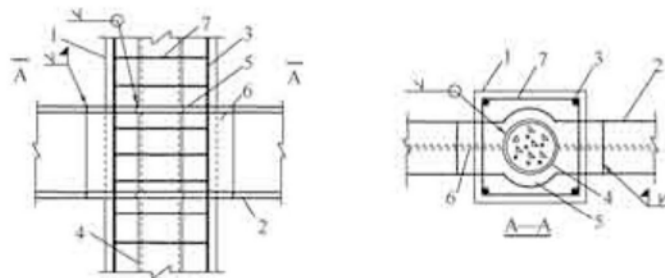


图 8.3.1 钢梁环板连接节点

1—柱; 2—钢梁; 3—纵筋; 4—钢管;
5—环板; 6—竖向加劲板; 7—箍筋

8.3.2 框架结构中钢管混凝土加劲混合结构柱与钢筋混凝土梁刚性连接节点应符合下列规定：

1 当梁两侧纵筋间距大于钢管外径时，宜采用节点加强环板和加劲工字钢的连接构造 [图 8.3.2 (a)]；

2 当梁两侧纵筋间距小于钢管外径时，宜使纵筋绕过钢管；当采用节点加强环板连接 [图 8.3.2 (b)] 时，宜将环板预埋在钢管上，施工时应将钢筋混凝土梁内纵筋焊接于环板表面。

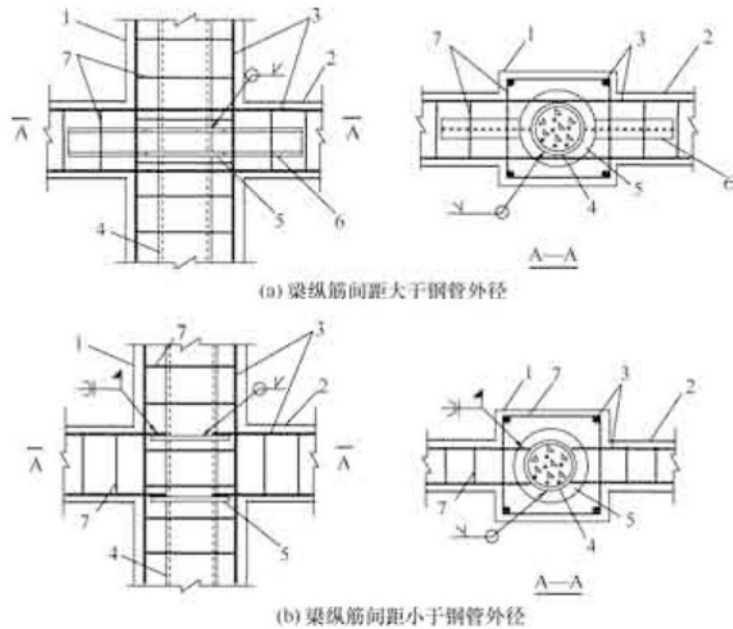


图 8.3.2 柱与钢筋混凝土梁连接节点

1—柱；2—钢筋混凝土梁；3—纵筋；4—钢管；
5—加强环板；6—加劲工字钢；7—箍筋

8.3.3 抗震设计的梁柱连接节点应符合下列规定：

1 采用钢梁时，梁端截面设计应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《钢结构设计标准》GB 50017 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的有关规定；

2 采用钢筋混凝土梁时，加强环板的抗震验算应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 对钢结构的有关规定；

3 加强环板的外形应曲线光滑，无裂纹、刻痕；节点管段与柱肢钢管间的水平焊缝应与母材等强；加强环板与钢梁翼缘的对接焊接应采用熔透的坡口焊；

4 节点内箍筋直径及箍筋间距应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定；

5 连接节点中的环板厚度应大于 10mm 和钢管厚度二者的较小值，环板宽度应大于 40mm 并应满足钢筋焊接长度要求，环板钢材屈服强度不应小于钢管钢材屈服强度，同时不宜小于 355N/mm^2 ；焊接工艺应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的有关规定；

6 梁纵筋与钢管采用钢筋连接器连接时，梁纵筋在钢筋连接器中的连接长度不应小于梁纵筋的直径，机械连接工艺应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的有关规定。

8.3.4 多肢钢管混凝土加劲混合结构柱内钢管之间横向连接件应满足相应的构造要求。内置钢管混凝土节点板宜采用焊接，节点板与横撑之间宜采用螺栓连接（图 8.3.4）。

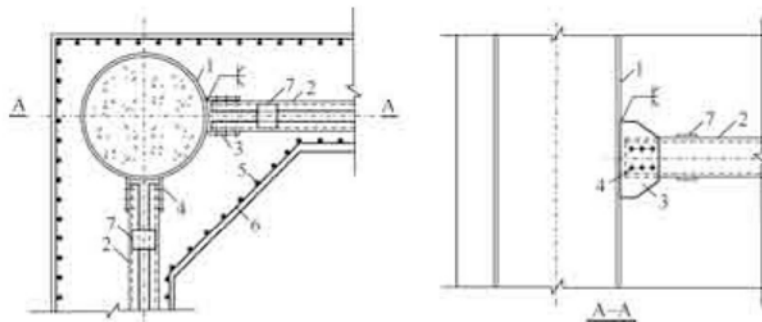


图 8.3.4 多肢柱内钢管连接节点

1—钢管；2—横撑；3—节点板；4—拼接螺栓；5—纵筋；6—箍筋；7—缀板

8.3.5 多肢钢管混凝土加劲混合结构的钢管混凝土部分与横撑连接构造设计应满足结构的刚度要求，不应出现混凝土浇筑死角。

8.4 基础与支承节点构造

8.4.1 钢管混凝土桁式混合结构的弦杆与基础可采用端承式连接、埋入式连接或外包式连接并应符合下列规定：

1 端承式连接（图 8.4.1-1）的承压板直径或边长宜为 $1.5D \sim 2.0D$ （ D 为弦杆钢管外径），厚度不宜小于 25mm；

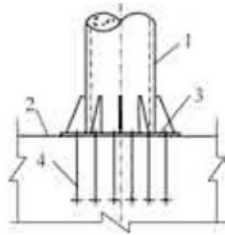


图 8.4.1-1 端承式连接
1—弦杆；2—基础；3—承压板；4—锚栓

2 埋入式连接（图 8.4.1-2）的弦杆埋入深度应大于 1.5D 且不应小于 1.0m，在预埋段应设置分布环向筋、焊钉或开孔板连接件等锚固构造；

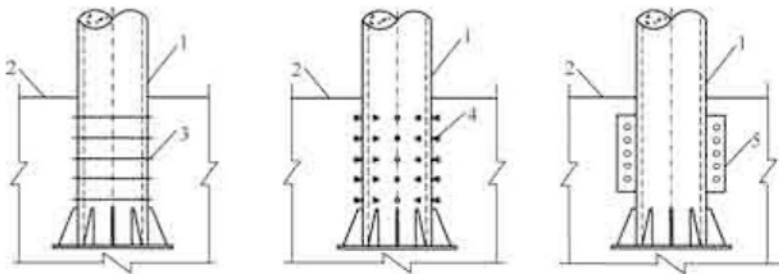


图 8.4.1-2 埋入式连接
1—弦杆；2—基础；3—贴焊钢筋环；4—圆头焊钉；5—开孔板连接件

3 外包式连接（图 8.4.1-3）宜沿外包段管身纵向设置锚固环板，锚固环板可加劲，钢管底部可设置端板。

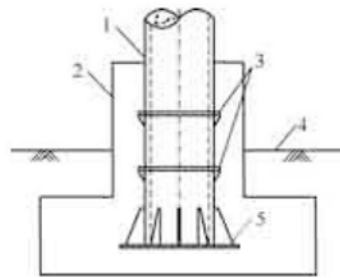


图 8.4.1-3 外包式连接

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

8.4.2 对设置加劲焊接锚固环板的外包式连接，应符合下列规定：

1 插入钢管应埋入基础底板，对承受较大拉力的外包式连接，弦杆埋入基础深度不宜小于 $2.5D$ ；

2 锚固环板宜按小而多的模式布置，锚固环板宽度 (b_p) 和数量应根据承载力要求、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 $0.1D$ ；

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 $10b_p$ ，锚固环板间距不宜小于 $10b_p$ ，底部端板与上方邻近锚固环板的距离不宜小于 $5B_p$ (B_p 为端板宽度) 和 $8b_p$ 的较大值，且宜大于加劲肋板高度；

4 基础立柱对插入钢管的外包混凝土厚度不应小于 $4b_p$ ；

5 对基础立柱，插入钢管外围的竖向钢筋、箍筋的配置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 和《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定；

6 插入钢管底部应设置固定措施，应分别针对初始安装和长期使用状态下的受力情况，校验固定措施强度和地基承载力。

8.4.3 曲线形钢管混凝土桁式混合结构与基础的连接构造，宜采用埋入式连接。预埋钢管与主管节段应采用焊接对接接头。预埋钢管底部应设置承压板，承压板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或焊钉等锚固构造。承压板与管壁间应按构造要求设置带孔加劲肋板(图 8.4.3)。

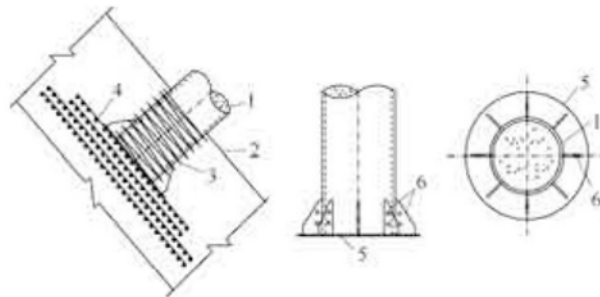


图 8.4.3 曲线形结构与基础的连接构造

1—弦杆；2—基础；3—螺旋钢筋；4—钢筋网片；5—承压板；6—加劲肋

8.4.4 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 8.4.4），支座尺寸应根据上部结构主梁的荷载进行确定。

8.4.5 钢管混凝土加劲混合结构的柱脚应满足强度、刚度、稳定性和抗震的要求，并应保证上部荷载的有效传递。偏心受压结构宜采用埋入式柱脚，也可采用非埋入式柱脚；偏心受拉结构应采用埋入式柱脚（图 8.4.5）。

8.4.6 钢管混凝土加劲混合结构的柱脚设计宜按国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《钢结构设计标准》GB 50017、《组合结构设计规范》JGJ 138 和《钢骨混凝土结构技术规程》YB 9082 的有关规定执行。

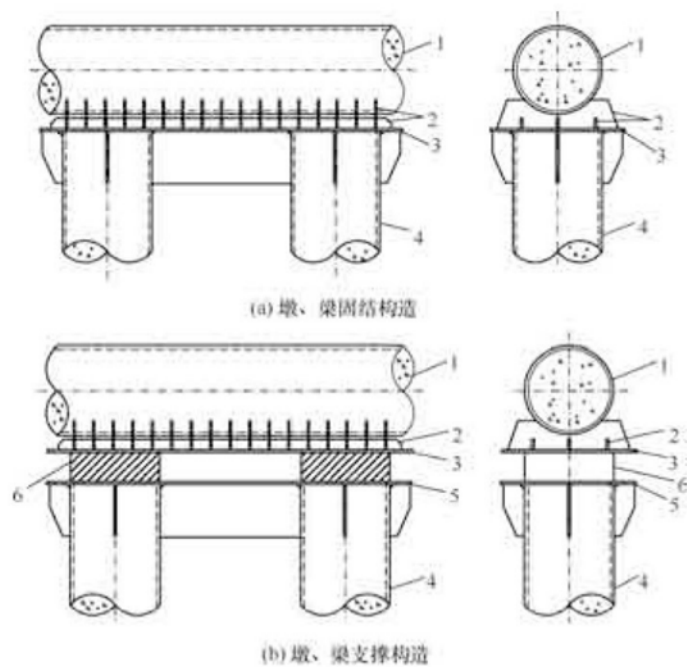


图 8.4.4 墩、桁式主梁连接构造

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

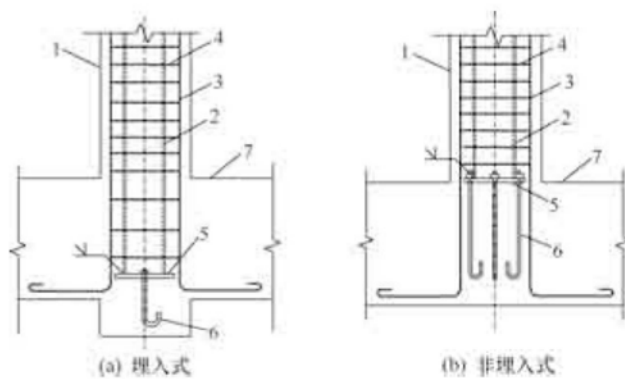


图 8.4.5 钢管混凝土加劲混合结构柱脚构造

1—钢管混凝土加劲混合结构柱；2—钢管；3—纵筋；
4—箍筋；5—端部底板；6—锚栓；7—基础

8.5 节点抗疲劳设计

8.5.1 直接承受动力荷载重复作用的钢管混凝土桁式混合结构焊接节点，当应力变化的循环次数不小于 5×10^4 次时，应进行疲劳计算。

8.5.2 需计算疲劳的钢管混凝土桁式混合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，同时尚应满足下列要求：

- 1 相贯焊接节点空钢管腹杆和弦杆外径之比不应小于 0.4，壁厚之比不应大于 1，弦杆的外径和壁厚之比不应小于 40；
- 2 相贯焊接节点空钢管腹杆的长度和外径之比不应大于 40；
- 3 相贯焊接节点不应采用加劲板或外包式节点板的连接形式；
- 4 采用节点板连接的节点不应在连接处采用外包式焊缝、T 形或十字形焊接接头；
- 5 焊接接头不应采用间断、超间隙和塞焊的焊缝；
- 6 相贯焊接节点应采用相贯线切割机开制相贯线坡口，并采用全熔透焊缝连接；钢管与节点板焊接连接接头应采用坡口全熔透焊缝；钢管对接接头应采用全熔透焊缝；管端坡口应满足工艺模型试验的要求；
- 7 相贯焊缝与钢管纵、环焊缝不应相交；
- 8 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。

8.5.3 钢管混凝土桁式混合结构连接节点的疲劳计算宜采用基于名义应力的容许应力法。对相贯焊接节点也可采用热点应力法，节点的热点应力可按式 (8.5.3) 计算。相贯焊接的 T 形节点、K 形间隙节点的热点应力集中系数及对应的热点应力，可按本标准附录 D 的规定进行计算。对其他形式的节点，热点应力集中系数可采用数值分析或试验方法获得。

$$\sigma_{hs} = K_{SCF}\sigma \quad (8.5.3)$$

式中： σ_{hs} ——弦杆或腹杆在冠点或鞍点位置的热点应力(N/mm²)；

σ ——弦杆或腹杆圆钢管的名义应力 (N/mm²)，可按杆件轴力、弯矩等内力，采用材料力学方法计算；

K_{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。

8.5.4 常幅疲劳下相贯焊接节点的圆钢管热点应力幅应符合式(8.5.4-1)的规定，常幅疲劳的容许热点应力幅可按式(8.5.4-3)计算。

$$\Delta\sigma_{hs} \leq \gamma_t [\Delta\sigma_{hs}] \quad (8.5.4-1)$$

$$\Delta\sigma_{hs} = \sigma_{hs,max} - \sigma_{hs,min} \quad (8.5.4-2)$$

$$[\Delta\sigma_{hs}] = \begin{cases} \left(\frac{C}{N_f}\right)^{1/\beta} & (N_f < 5 \times 10^6) \\ [\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6} & (N_f \geq 5 \times 10^6) \end{cases} \quad (8.5.4-3)$$

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；当钢管壁厚 t 小于或等于 25mm 时，取 1.0；当钢管壁厚 t 大于 25mm 时，可按 $\gamma_t = (25/t)^{0.25}$ 计算；

N_f ——失效的循环次数，即疲劳寿命；

C 、 β ——系数，可按表 8.5.4 采用；

$[\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ ——以疲劳寿命达到 $N_f = 5 \times 10^6$ 次为基准的常幅疲劳极限 (N/mm²)，见表 8.5.4。

表 8.5.4 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

8.5.5 变幅疲劳下相贯焊接节点的圆钢管热点应力幅可按下列规定执行：

1 当满足下式条件时，可不进行疲劳验算：

$$\Delta\sigma_{hs,e} \leq \gamma_t [\Delta\sigma_{hs,L}]_{1 \times 10^8} \quad (8.5.5-1)$$

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)，可按表 8.5.4 采用。

2 当变幅疲劳计算不满足式 (8.5.5-1) 的要求时，可按下列公式计算：

$$\Delta\sigma_{hs,e} \leq \gamma_t [\Delta\sigma_{hs}]_{2 \times 10^6} \quad (8.5.5-2)$$

$$\Delta\sigma_{hs,e} = \left[\frac{\sum n_i (\Delta\sigma_{hs,i})^\beta + ([\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6})^{-2} \sum n_j (\Delta\sigma_{hs,j})^{\beta+2}}{2 \times 10^6} \right]^{1/\beta} \quad (8.5.5-3)$$

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/mm²)；

$[\Delta\sigma_{hs}]_{2 \times 10^6}$ ——疲劳寿命 $N_f = 2 \times 10^6$ 次的容许热点应力幅 (N/mm²)，可按表 8.5.4 采用；

$\Delta\sigma_{hs,i}$ 、 n_i ——应力幅谱中在 $\Delta\sigma_{hs,i} \geq [\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ 范围内各热点应力幅 (N/mm²) 及频次；

$\Delta\sigma_{hs,j}$ 、 n_j ——应力幅谱中在 $[\Delta\sigma_{hs,L}]_{1 \times 10^8} \leq \Delta\sigma_{hs,j} < [\Delta\sigma_{hs,c}]_{5 \times 10^6}$ 范围内各热点应力幅 (N/mm²) 及频次。

9 防护设计

9.1 一般规定

9.1.1 钢管混凝土混合结构的防腐设计应遵循安全可靠、经济合理的原则，按下列要求进行：

- 1 防腐设计年限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确定；
- 2 防腐设计应符合节能环保的要求；
- 3 除必须采取防腐蚀措施外，尚应避免加速腐蚀的不良设计；
- 4 防腐设计应便于结构全寿命期内的检查、维护和大修。

9.1.2 钢管混凝土混合结构防腐设计除应符合本标准的规定，尚应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的有关规定。

9.1.3 钢管混凝土混合结构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 的有关规定。

9.1.4 当无防火保护钢管混凝土桁式混合结构的耐火极限不满足设计耐火极限的要求时，应对弦杆和腹杆钢管外表面设置防火涂料或采取其他有效的防火措施。

9.1.5 钢管混凝土加劲混合结构的外包混凝土采用强度等级为 C60~C80 的高强混凝土时，宜通过布置钢丝网或玻璃纤维网等措施降低混凝土在高温下发生爆裂的风险。

9.1.6 钢管混凝土混合结构遭受车辆、船只等撞击时，撞击荷载作用设计值可按现行行业标准《公路桥梁抗撞设计规范》

JTG/T 3360-02 的有关规定执行。

9.2 防腐设计

9.2.1 钢管混凝土桁式混合结构的防腐构造措施应符合下列规定：

1 应根据结构防腐蚀重点、工艺要求，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等不良细节；

2 焊条、螺栓、垫圈、节点板等连接材料的耐腐蚀性能，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、螺母和垫圈防护应采用镀锌等方法，安装后应再采用与主体结构相同的防腐蚀方案；

3 设计工作年限大于或等于 25 年的房屋建筑、桥梁、电力塔架等，对不易维修的结构应加强防护。

9.2.2 钢管混凝土桁式混合结构的钢管外表皮应采取除锈后涂覆涂料或金属镀层的防腐措施，防锈和防腐蚀采用的涂料、钢材表面的除锈等级以及防腐蚀对钢结构的构造要求等，应符合国家现行标准《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046、《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》GB/T 8923.1 和《建筑钢结构防腐蚀技术规程》JGJ/T 251 的有关规定。

9.2.3 在腐蚀环境中发生钢管壁均匀腐蚀的钢管混凝土桁式混合结构，腐蚀后的承载力应按腐蚀后钢管的有效截面计算。

9.2.4 腐蚀后钢管混凝土弦杆的计算参数可按下列公式计算：

$$\xi_e = \frac{A_{sc} f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha_e \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (9.2.4-1)$$

$$\alpha_e = \frac{A_{sc}}{A_c} \quad (9.2.4-2)$$

$$A_{sc} = \frac{\pi}{4} [D_c^2 - (D_c - 2t_c)^2] \quad (9.2.4-3)$$

$$D_e = D - 2\Delta t \quad (9.2.4-4)$$

$$t_e = t - \Delta t \quad (9.2.4-5)$$

式中： ξ_e ——腐蚀后名义约束效应系数；

f_y ——钢管钢材的屈服强度 (N/mm²)；

f_{ck} ——混凝土的轴心抗压强度标准值 (N/mm²)；

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)；

A_c ——钢管内混凝土的截面面积 (mm²)；

D_e ——腐蚀后钢管外径 (mm)；

t_e ——腐蚀后钢管壁厚 (mm)；

D ——圆钢管混凝土的钢管外径 (mm)；

Δt ——腐蚀后钢管的平均壁厚损失值 (mm)；

t ——钢管壁厚 (mm)。

9.3 防火设计

9.3.1 火灾下钢管混凝土混合结构的荷载比应按式计算：

$$R = \frac{N}{N_u} \quad (9.3.1)$$

式中： R ——火灾下钢管混凝土混合结构的荷载比；

N ——火灾下钢管混凝土混合结构的轴心压力设计值 (N)；

N_u ——常温下受长细比影响的钢管混凝土混合结构轴压承载力 (N)，对于轴心受压钢管混凝土桁式混合结构，宜按本标准式 (6.2.1-2) 计算；对于轴心受压钢管混凝土加劲混合结构，宜按本标准式 (7.5.1) 计算。

9.3.2 采用钢结构防火涂料对钢管混凝土桁式混合结构进行防火保护时，设计耐火极限不超过 3.0h 的结构可选用膨胀型钢结构防火涂料，设计耐火极限超过 3.0h 的结构宜使用非膨胀型钢

结构防火涂料。

9.3.3 当采用非膨胀型钢结构防火涂料对钢管混凝土桁式混合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；钢管混凝土桁式混合结构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。

9.3.4 当采用膨胀型钢结构防火涂料对钢管混凝土桁式混合结构进行防火保护时，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，有可靠依据时，也可采用计算确定；试验方法应符合现行国家标准《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分：通用要求》GB/T 9978.1 的有关规定；

2 膨胀型钢结构防火涂料应与防腐面漆配套使用；

3 膨胀型钢结构防火涂料应满足相关耐久性的要求。

9.3.5 对火灾下受压钢管混凝土加劲混合结构耐火极限进行验算时，宜对柱的有效长度进行相应折减，可按下列规定执行：

1 有支撑框架中间层柱的有效长度可取柱高的 50%；

2 顶层柱的有效长度可取柱高的 50%~70%。

9.3.6 轴心受压单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限可按本标准附录 E 确定。

9.3.7 钢管混凝土混合结构的防火构造措施应符合以下规定：

1 钢管混凝土桁式混合结构的弦杆均应设置直径不小于 20mm 的排气孔，排气孔应沿弦杆反对称布置，且应避开节点区域；排气孔的纵向间距不宜超过 4m（图 9.3.7-1）；

2 钢管混凝土加劲混合结构内埋钢管混凝土的钢管上应设置直径不小于 20mm 的排气孔。排气孔的设置应保证钢管内混凝土与外部空气连通，保证火灾下钢管内部水蒸气可顺利排出。排气孔宜在每个楼层柱与楼板相交位置的上、下各布置 1 个，排气孔与楼板或钢梁的间距（ d_v ）应为 100mm~200mm，并宜沿柱身

反对称布置（图 9.3.7-2）。

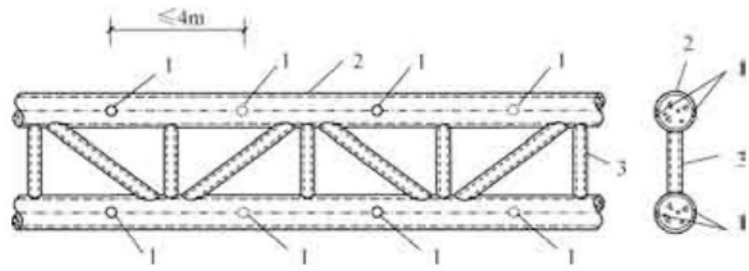


图 9.3.7-1 钢管混凝土桁式混合结构排气孔位置示意
1—排气孔；2—钢管混凝土弦杆；3—腹杆

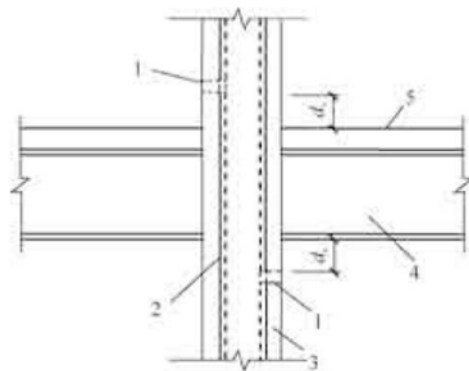


图 9.3.7-2 钢管混凝土加劲混合结构排气孔位置示意
1—排气孔；2—内置钢管混凝土；3—外包混凝土；4—钢梁；5—楼板

9.4 防撞击设计

9.4.1 撞击作用下钢管混凝土混合结构的受弯承载力应按式计算：

$$M_d \leq R_d M_u \quad (9.4.1)$$

式中： M_d ——撞击弯矩设计值（ $N \cdot mm$ ）；
 R_d ——撞击动力影响系数；

M_u ——静力受弯承载力 ($N \cdot mm$)，对于钢管混凝土弦杆，宜按本标准式 (6.2.9-4) 计算；对于钢管混凝土加劲混合结构，宜按本标准第 7.2 节~第 7.4 节相关规定计算。

9.4.2 钢管混凝土弦杆的撞击动力影响系数可按下列公式计算：

$$R_d = 1.49f_1f_2f_3f_4 \quad (9.4.2-1)$$

$$f_1 = -4.00 \times 10^{-7}f_y^2 + 8.00 \times 10^{-5}f_y + 1.02 \quad (9.4.2-2)$$

$$f_2 = -3.66\alpha_s^2 - 0.896\alpha_s + 1.13 \quad (9.4.2-3)$$

$$f_3 = 7.00 \times 10^{-7}D^2 - 1.30 \times 10^{-3}D + 1.40 \quad (9.4.2-4)$$

$$f_4 = -1.00 \times 10^{-3}V_0^2 + 5.08 \times 10^{-2}V_0 + 0.385 \quad (9.4.2-5)$$

式中：
 R_d ——钢管混凝土弦杆的撞击动力影响系数；
 f_y ——钢管钢材的屈服强度 (N/mm^2)；
 α_s ——弦杆截面含钢率，应按本标准式 (3.3.1-1) 计算；
 D ——弦杆钢管外径 (mm)；
 V_0 ——撞击物速度 (m/s)；

f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 ——计算系数。

9.4.3 钢管混凝土加劲混合结构的撞击动力影响系数可按下列公式计算：

1 单肢钢管混凝土加劲混合结构的撞击动力影响系数可按下列公式计算：

$$R_d = 1.52\gamma_m\gamma_g\gamma_v\gamma_n \quad (9.4.3-1)$$

$$\gamma_m = m_1m_2m_3m_4 \quad (9.4.3-2)$$

$$m_1 = 1.27 \times 10^{-4}f_{cu,oc}^2 - 1.39 \times 10^{-2}f_{cu,oc} + 1.36 \quad (9.4.3-3)$$

$$m_2 = -7.24 \times 10^{-6}f_{cu,c}^2 + 1.69 \times 10^{-3}f_{cu,c} + 0.925 \quad (9.4.3-4)$$

$$m_3 = -2.31 \times 10^{-4}f_{yt} + 1.07 \quad (9.4.3-5)$$

$$m_4 = 3.37 \times 10^{-4} f_y + 0.883 \quad (9.4.3-6)$$

$$\gamma_g = g_1 g_2 g_3 \quad (9.4.3-7)$$

$$g_1 = -5.92\rho + 1.06 \quad (9.4.3-8)$$

$$g_2 = 0.235\alpha_s + 0.978 \quad (9.4.3-9)$$

$$g_3 = -0.238\left(\frac{D}{B}\right)^2 + 7.70 \times 10^{-2} \frac{D}{B} + 1.02 \quad (9.4.3-10)$$

$$\gamma_v = -7.50 \times 10^{-3} V_0^2 + 0.136V_0 + 0.354 \quad (9.4.3-11)$$

$$\gamma_n = 3.08n^2 - 1.47n + 1.16 \quad (9.4.3-12)$$

2 内置钢管混凝土相同的四肢和六肢钢管混凝土加劲混合结构的撞击动力影响系数可按下列公式计算：

$$R_d = 0.61\gamma_m\gamma_g\gamma_v\gamma_n \quad (9.4.3-13)$$

$$\gamma_m = m_1 m_2 m_3 m_4 \quad (9.4.3-14)$$

$$m_1 = 5.78 \times 10^{-5} f_{cu,oc}^2 - 4.64 \times 10^{-3} f_{cu,oc} + 1.10 \quad (9.4.3-15)$$

$$m_2 = -4.89 \times 10^{-5} f_{cu,c}^2 + 4.51 \times 10^{-3} f_{cu,c} + 0.905 \quad (9.4.3-16)$$

$$m_3 = -1.33 \times 10^{-6} f_{yl}^2 + 7.44 \times 10^{-4} f_{yl} + 0.898 \quad (9.4.3-17)$$

$$m_4 = -7.26 \times 10^{-4} f_y + 1.25 \quad (9.4.3-18)$$

$$\gamma_g = g_1 g_2 g_3 \quad (9.4.3-19)$$

$$g_1 = 566\rho^2 - 12.6\rho + 1.07 \quad (9.4.3-20)$$

$$g_2 = -2.33\alpha_s + 1.23 \quad (9.4.3-21)$$

$$g_3 = -2.74 \frac{D}{B} + 1.54 \quad (9.4.3-22)$$

$$\gamma_v = -7.00 \times 10^{-3} V_0^2 + 0.105V_0 + 0.673 \quad (9.4.3-23)$$

$$\gamma_n = 6.43n^2 - 4.22n + 1.71 \quad (9.4.3-24)$$

式中： R_d ——钢管混凝土加劲混合结构的撞击动力影响系数；

$f_{cu,oc}$ ——外包混凝土立方体抗压强度标准值（N/mm²）；

$f_{cu,c}$ ——钢管内混凝土立方体抗压强度标准值 (N/mm^2);
 f_{yl} ——纵筋的屈服强度 (N/mm^2);
 f_y ——钢管钢材的屈服强度 (N/mm^2);
 ρ ——纵筋的配筋率;
 α_s ——钢管混凝土截面含钢率, 应按本标准式 (3.3.1-1) 计算;
 D ——弦杆钢管外径 (mm);
 B ——截面宽度 (mm);
 V_0 ——撞击物速度 (m/s);
 n ——轴压比, 为钢管混凝土加劲混合结构轴向压力设计值和截面受压承载力的比值。

10 施工和验收

10.1 一般规定

10.1.1 钢管混凝土混合结构施工可分为结构的制作与安装、钢管内混凝土浇筑及钢管外混凝土的施工。除应符合本标准的规定外，钢管混凝土混合结构的施工还应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755、《钢结构焊接规范》GB 50661、《钢-混凝土组合结构施工规范》GB 50901 和《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定；钢筋混凝土部分的施工还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。

10.1.2 钢管混凝土混合结构施工前，应有施工组织设计及专项施工方案等技术文件。施工方案应符合结构制作与安装、钢管内混凝土浇筑及钢管外混凝土施工阶段结构的安全性要求。钢管混凝土混合结构的施工应符合国家环境保护有关法律法规的要求。

10.1.3 钢管混凝土混合结构的施工质量应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 和《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628 的有关规定。

10.2 制作与安装

10.2.1 钢管制作应根据钢结构设计施工图绘制深化设计图，并根据生产条件和现场施工条件、运输要求、吊装能力、安装条件和安装方法，确定钢管的分段和拼接方案。钢管制作应进行焊接工艺试验评定，并应根据设计文件、深化设计图和试验评定结果制定制作工艺文件或方案。

10.2.2 弯管加工可采用冷弯和热弯等方式，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，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 的规定。

10.2.3 钢管的制作长度可根据运输和吊装条件确定。钢管的接长应采用对接熔透焊缝，焊缝质量等级及制作单元接头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。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。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。

10.2.4 钢管的焊接应严格按焊接工艺文件规定的焊接方法、工艺参数、施焊顺序进行。

10.2.5 钢管在制作时可不作表面防护，但不应长时间处于潮湿环境中。钢管制作完成后，应清除钢管内的杂物，除锈可采用机械除锈或手工除锈方法。钢管混凝土桁式混合结构钢管的内表面、钢管混凝土加劲混合结构钢管的内外表面应无可见油污，无附着不牢的氧化皮、铁锈或污染物等。

10.2.6 钢管运输、现场吊装作业时，应控制构件的变形限值；吊点的设置及吊装方案应根据钢管构件本身的承载力和稳定性验算后确定，需要时应对钢管采取临时加固措施。对于三肢、四肢和六肢钢管混凝土桁式混合结构，在受有较大水平力处和运输单元的端部应设置横隔，横隔间距不应大于 8m 和构件截面较大宽度的 9 倍。钢管在吊装时应将管口包封。构件吊装就位并校正后，应采取临时固定措施。

10.2.7 预制钢管混凝土混合结构应进行吊运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。吊运前钢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%。

10.2.8 拱形钢管混凝土加劲混合结构中的加劲钢管骨架节段组装过程中，应减少安装荷载作用下的变形，吊点设置及吊装技术方案应验算构件的承载力和稳定性，验算无法满足要求时，应采取临时加固措施。节段吊装就位后，应及时进行校正，并应采取临时固定措施。钢结构预拼装工程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。

10.2.9 拱形钢管混凝土加劲混合结构用于桥梁工程时，加劲钢管骨架节段除应满足本标准的规定外，尚应符合国家现行标准《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923 和《拱形钢结构技术规范》JGJ/T 249 的有关规定。

10.3 钢管内混凝土施工

10.3.1 钢管内混凝土的浇筑应在钢管构件安装完毕并验收合格后进行。浇筑混凝土之前应清除钢管内异物和积水，且应清理附在钢管外壁的新浇混凝土。

10.3.2 钢管内混凝土的浇筑方式宜采用泵送顶升法、人工浇捣法、埋管输入法和高位抛落法。拱形钢管内混凝土宜采用泵送顶升法浇筑。混凝土浇筑前应根据设计要求进行混凝土配合比设计和浇筑工艺试验，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。

10.3.3 混凝土的配合比应根据施工工艺、强度指标、混凝土坍落度要求，经浇筑试验确定。采用泵送顶升浇筑法时，混凝土的配合比应根据施工组织设计的要求，结合浇筑时间，对混凝土初凝时间、坍落度损失和扩展度等参数进行控制。

10.3.4 钢管内混凝土宜连续浇筑。采用间歇浇筑时，间隔时间不应超过混凝土的初凝时间。当需要留置混凝土施工缝时，应留设在便于施工缝剔凿处理的位置，并将管口临时封闭。对接焊口钢管应高出混凝土浇筑施工缝面 500mm 以上。

10.3.5 采用人工浇捣法、埋管输入法和高位抛落法进行施工时，每次浇筑混凝土前，如果前期浇筑的混凝土已达到终凝，应先浇

筑一层与混凝土同强度等级、厚 100mm~150mm 的水泥砂浆。

10.3.6 当混凝土浇筑到钢管顶端时，可使混凝土稍微溢出后再将留有排气孔的层间横隔板或封顶板紧压在管端，并应同步进行点焊固定，待混凝土强度达到设计值的 50% 以上时，再将横隔板或封顶板按设计要求进行补焊；也可将混凝土浇筑到稍低于管口的位置，待混凝土强度达到设计值的 60% 后，再采用与混凝土同强度等级的砂浆填充至管口，并将横隔板或封顶板一次封焊到位。

10.3.7 钢管内的混凝土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；
- 2 管内混凝土宜根据情况适当采取降低水化热或进行收缩补偿的技术措施；
- 3 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，应开展拌合设备和浇筑设备的联动试车，并对钢管内壁进行清洗；
- 4 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℃ 且钢管表面温度高于 60℃ 时，宜采取降低钢管温度措施；混凝土浇筑时入模温度不宜高于 35℃。

10.3.8 当钢管直径小于 400mm 时，钢管内混凝土宜采用自密实混凝土。自密实混凝土浇筑应符合下列规定：

- 1 应根据结构部位、结构形状等确定适当的浇筑方案；
- 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%，扩展度宜控制为 550mm~700mm，扩展时间 (T_{500}) 宜控制为 5s~20s。

10.3.9 用于钢管内浇筑的后浇灌孔、顶升孔、排气孔应按设计要求封堵，表面应平整，并应进行表面清理和防腐处理。

10.3.10 钢管内核心混凝土应保证密实，且应满足不大于脱空容

限的要求。当脱空大于脱空容限时，应对脱空部位采取补强处理。

1 钢管内的混凝土不得出现沿周边连贯的环形脱空。当钢管内混凝土发生局部环形脱空时 [图 10.3.10 (a)], 脱空率容限应为 0.025%。发生环形脱空的钢管混凝土构件脱空率应按下列式计算:

$$\chi_r = \frac{d_r}{D} \quad (10.3.10-1)$$

式中: χ_r —— 环形脱空的脱空率;

d_r —— 环形脱空的平均距离 (mm);

D —— 钢管外径 (mm)。

2 当钢管内混凝土发生局部球冠形脱空时 [图 10.3.10 (b)], 脱空率容限应为 0.6%, 且脱空高度不应大于 5mm。发生球冠形脱空的钢管混凝土构件脱空率应按下列式计算:

$$\chi_s = \frac{d_s}{D} \quad (10.3.10-2)$$

式中: χ_s —— 球冠形脱空的脱空率;

d_s —— 球冠形脱空的最大高度 (mm);

D —— 钢管外径 (mm)。

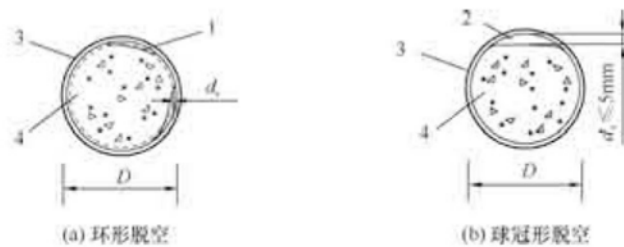


图 10.3.10 混凝土脱空尺寸示意

1—环形脱空; 2—球冠形脱空; 3—钢管; 4—钢管内混凝土

10.3.11 当拱形钢管混凝土加劲混合结构采用分批次浇筑钢管内混凝土时, 应按照设计要求制定混凝土浇筑施工工艺, 严格控制混凝土的工作性能和浇筑温度; 同一拱肋中上一段钢管内混凝土的强度达到设计强度的 70% 以上, 方可进行下一段相连钢管

内混凝土的浇筑。

10.3.12 拱形钢管混凝土混合结构用于桥梁工程时，钢管内混凝土的施工除应满足本标准的规定外，尚应符合国家现行标准《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923 和《拱形钢结构技术规程》JGJ/T 249 的有关规定。

10.4 钢管外混凝土施工

10.4.1 钢管外混凝土施工前，应根据结构的施工特点和现场条件，确定施工方案和施工工艺，并应做好准备工作。

10.4.2 钢管外钢筋及模板工程应在内部空钢管或钢管混凝土结构施工且验收合格之后进行，施工前应对钢管外表面进行除锈等清理工作。

10.4.3 钢管外混凝土可晚于钢管内混凝土施工，也可同期施工。混凝土同期浇筑时，设计单位应复核混凝土同期浇筑工况下空钢管的承载力及稳定性。

10.4.4 钢管外混凝土可采用单层浇筑或多层浇筑施工。若采用多层浇筑施工，设计单位应计算结构在施工阶段的承载力及稳定性，提出钢管外混凝土的浇筑层数和加载程序。施工方应按设计规定的施工加载程序进行施工。

10.4.5 钢管外混凝土的工作性能应根据浇筑方法和振捣条件进行选择。

10.4.6 对于带混凝土结构板的钢管混凝土桁式混合结构，周边应设置专用模板，模板上的钢筋预留孔和模板与底钢板的缝隙宜设置堵头封闭。确定混凝土浇筑工艺时，应避免振捣混凝土对已初凝的混凝土产生不利影响。

10.4.7 施工拱形钢管混凝土加劲混合结构钢管外包混凝土时，宜分为三环或两环、4个~8个工作面进行浇筑。主拱钢管外包混凝土的每个工作面应至少具备相邻两个节段的模板数量，并应预留施工缝（图 10.4.7-1 和图 10.4.7-2）。

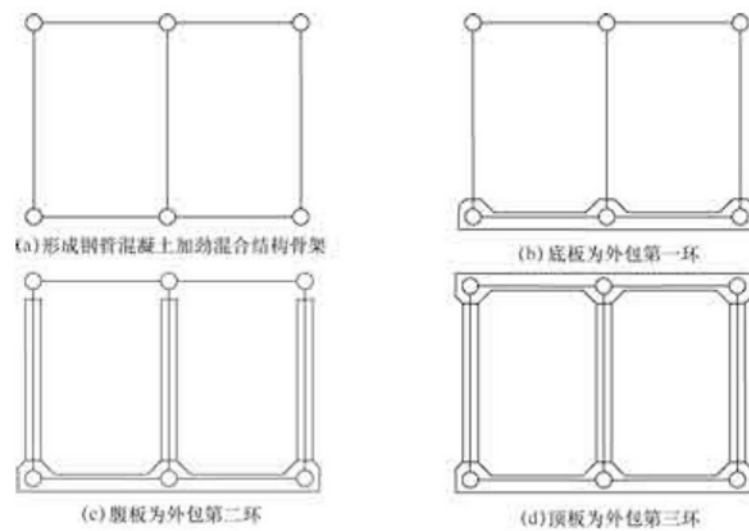


图 10.4.7-1 主拱钢管外包混凝土的三环施工缝示意

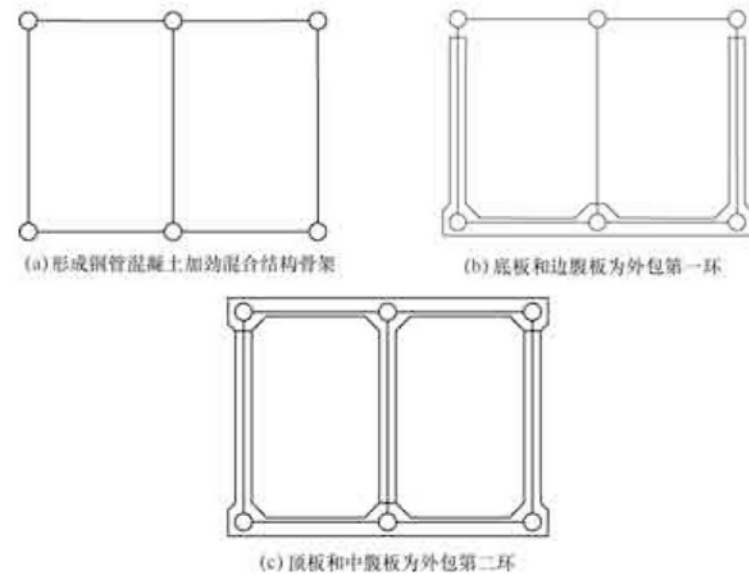


图 10.4.7-2 主拱钢管外包混凝土的两环施工缝示意

10.5 检测与验收

10.5.1 钢管混凝土混合结构工程的质量检测与验收除一般规定外，防火保护工程的检测与验收还应符合现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 和《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

10.5.2 钢结构安装的允许偏差、焊缝的尺寸偏差、外观质量和内部质量检验、焊缝等级以及探伤要求，应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 和《钢结构焊接规范》GB 50661 的有关规定。

10.5.3 钢管内混凝土浇筑密实度检测可采用人工敲击、超声波、冲击回波等方法，并应符合下列规定：

1 检测次数不应少于 4 次，宜为浇筑后 3d、7d、28d 及验收前；

2 人工敲击检查可根据工程实际情况确定检查点，人工敲击检查结果异常时，应加大检测点密度，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。

10.5.4 钢管外钢筋混凝土各工序的施工，应在前道工序质量检查合格后进行，并应进行自检、互检和交接检，对检查中发现的质量问题应及时处理。

10.5.5 钢管混凝土混合结构子分部工程验收时应提供下列文件和记录：

- 1 工程图纸、设计变更及相关设计文件；
- 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 混凝土工程施工记录；
- 8 混凝土试件性能试验报告；

9 隐蔽工程验收记录；

10 分项工程质量验收记录和检验批质量验收记录；

11 工程重大质量、技术问题的技术资料、处理方案和验收记录。

10.5.6 钢管混凝土混合结构中钢管混凝土部分的管内混凝土的强度等级、工作性能和收缩特性应符合设计要求和国家现行有关标准的规定，浇筑后的养护方法和养护时间应符合专项施工方案要求。

10.5.7 当钢管混凝土混合结构是特殊建设工程时，建设单位应向消防设计审查验收主管部门申请消防验收，并提交下列材料：

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。

附录 A 钢管混凝土混合结构的材料本构模型

A.1 混 凝 土

A.1.1 采用纤维模型法分析钢管混凝土混合结构时，钢管内混凝土的本构模型应计入钢管的约束作用；钢管混凝土加劲混合结构中，钢管外包混凝土可分为无约束混凝土和箍筋约束混凝土（图 A.1.1）。

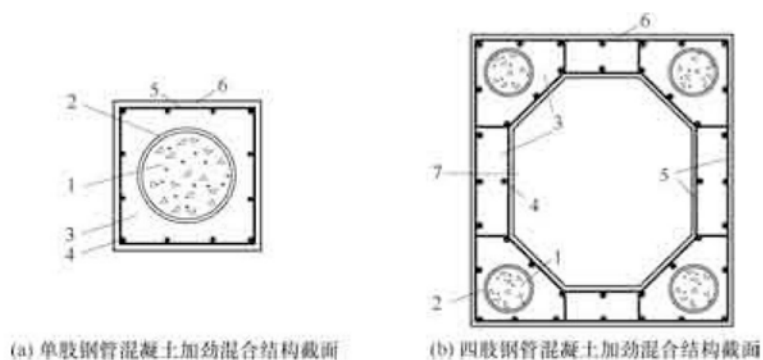


图 A.1.1 钢管混凝土加劲混合结构截面材料组成和划分示意

1—钢管内混凝土；2—钢管；3—箍筋约束混凝土；4—纵筋；
5—箍筋；6—无约束混凝土；7—空心部分

A.1.2 钢管内混凝土单调受压应力(σ)-应变(ϵ)关系宜按下列公式确定：

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (\text{A.1.2-1})$$

$$y = \begin{cases} 1 + q(x^{0.1\xi} - 1) & (\xi \geq 1.12) \\ \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x} & (\xi < 1.12) \end{cases} \quad (x > 1) \quad (\text{A.1.2-2})$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{A.1.2-3})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_o} \quad (\text{A. 1. 2-4})$$

$$\sigma_o = \left[1 + (-0.054\xi^2 + 0.4\xi) \left(\frac{24}{f'_c} \right)^{0.45} \right] f'_c \quad (\text{A. 1. 2-5})$$

$$\epsilon_o = \epsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \left(\frac{f'_c}{24} - 1 \right) \right] \xi^{0.2} \quad (\text{A. 1. 2-6})$$

$$\epsilon_{cc} = 1300 + 12.5 f'_c \quad (\text{A. 1. 2-7})$$

$$q = \frac{\xi^{0.745}}{2 + \xi} \quad (\text{A. 1. 2-8})$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} f'^2_c \times 3.51 \times 10^{-4} \quad (\text{A. 1. 2-9})$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha_s \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (\text{A. 1. 2-10})$$

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_c} \quad (\text{A. 1. 2-11})$$

式中： σ ——应力（N/mm²）；

ϵ ——应变（ $\mu\epsilon$ ）；

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），应按表 A. 1. 2 换算；

f_{ck} ——混凝土轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

f_y ——钢管钢材的屈服强度（N/mm²）；

A_s ——钢管的截面面积（mm²）；

A_c ——管内混凝土的截面面积（mm²）。

表 A. 1. 2 混凝土强度等级和圆柱体抗压强度间的对应关系

强度等级	C30	C40	C50	C60	C70	C80
f'_c (N/mm ²)	24	33	41	51	60	70

注：表内中间值按线性内插法确定。

A. 1. 3 钢管混凝土加劲混合结构的箍筋约束混凝土单调受压应

力(σ)-应变(ϵ)关系宜按下列公式确定:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ 1 - \frac{E_{\text{des}}}{\sigma_0}(\epsilon - \epsilon_0) & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (\text{A. 1. 3-1})$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{A. 1. 3-2})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (\text{A. 1. 3-3})$$

$$\sigma_0 = f'_c \left(1 + 0.73 \frac{\rho_v f_{yh}}{f'_c} \right) \quad (\text{A. 1. 3-4})$$

$$\epsilon_0 = 0.00245 + 0.0122 \frac{\rho_v f_{yh}}{f'_c} \quad (\text{A. 1. 3-5})$$

$$\rho_v = \frac{A_{sv} l_v}{A_v s} \quad (\text{A. 1. 3-6})$$

$$E_{\text{des}} = \frac{11.2 f'^2_c}{\rho_v f_{yh}} \quad (\text{A. 1. 3-7})$$

式中: f'_c ——混凝土圆柱体抗压强度 (N/mm^2), 应按表 A. 1. 2 换算;

f_{yh} ——箍筋的屈服强度 (N/mm^2);

ρ_v ——体积配箍率;

A_{sv} ——箍筋的截面面积 (mm^2);

l_v ——箍筋长度 (mm);

A_v ——箍筋约束混凝土的截面面积 (mm^2);

s ——箍筋间距 (mm)。

A. 1. 4 钢管混凝土加劲混合结构的箍筋外无约束混凝土单调受压应力(σ)-应变(ϵ)关系宜按下列公式确定:

$$y = \frac{Ax + Bx^2}{1 + Cx + Dx^2} \quad (\text{A. 1. 4-1})$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{A. 1. 4-2})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_o} \quad (\text{A. 1. 4-3})$$

$$\sigma_o = f'_c \quad (\text{A. 1. 4-4})$$

$$\epsilon_o = \frac{4.26 f'_c}{E_c \sqrt[4]{f'_c}} \quad (\text{A. 1. 4-5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{E_c \epsilon_o}{f'_c} \\ B = \frac{(A-1)^2}{0.55} - 1 \quad (\epsilon \leq \epsilon_o) \\ C = A - 2 \\ D = B + 1 \end{array} \right. \quad (\text{A. 1. 4-6})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{f_i (\epsilon_i - \epsilon_o)^2}{\epsilon_i \epsilon_o (f'_c - f_i)} \\ B = 0 \\ C = A - 2 \\ D = 1 \end{array} \right. \quad (\epsilon > \epsilon_o)$$

$$f_i = f'_c [1.41 - 0.17 \ln(f'_c)] \quad (\text{A. 1. 4-7})$$

$$\epsilon_i = \epsilon_o [2.5 - 0.3 \ln(f'_c)] \quad (\text{A. 1. 4-8})$$

式中: f'_c ——混凝土圆柱体抗压强度 (N/mm^2), 应按表 A. 1. 2 换算;

E_c ——混凝土的弹性模量 (N/mm^2)。

A. 1. 5 混凝土单调受拉应力(σ)-应变(ϵ)关系宜按下列公式确定:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{0.31\sigma_p^2(x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (\text{A. 1. 5-1})$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_p} \quad (\text{A. 1. 5-2})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_p} \quad (\text{A. 1. 5-3})$$

$$\sigma_p = 0.26(1.25 f'_c)^{2/3} \quad (\text{A. 1. 5-4})$$

$$\epsilon_p = 43.1 \sigma_p \quad (\text{A. 1. 5-5})$$

式中: ϵ_p ——峰值拉应力对应的应变 ($\mu\epsilon$);

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), 应按表 A. 1. 2 换算。

A. 1. 6 钢管混凝土混合结构的纤维模型中, 混凝土在反复荷载作用下的应力(σ)-应变(ϵ)关系(图 A. 1. 6)的卸载、再加载路径宜按下列公式确定:

1 受压卸载、再加载路径宜按下列公式计算:

$$\epsilon_B = \frac{\sigma_o \epsilon_A - \sigma_A \epsilon_1}{\sigma_o + \sigma_A} \quad (A. 1. 6-1)$$

$$\epsilon_1 = 0.5 \epsilon_o \quad (A. 1. 6-2)$$

$$\sigma_C = \frac{0.75 \sigma_o}{0.75 \epsilon_1 + \epsilon_B} (\epsilon_A - \epsilon_B) \quad (A. 1. 6-3)$$

$$\epsilon_D = \frac{D_1 \epsilon_A - D_2 \epsilon_B - \sigma_C}{D_1 - D_2} \quad (A. 1. 6-4)$$

$$\sigma_D = D_2 (\epsilon_D - \epsilon_B) \quad (A. 1. 6-5)$$

$$D_1 = \frac{3 \sigma_o + \sigma_C}{3 \epsilon_1 + \epsilon_A} \quad (A. 1. 6-6)$$

$$D_2 = \frac{0.2 \sigma_o}{0.2 \epsilon_1 + \epsilon_B} \quad (A. 1. 6-7)$$

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

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 ($\mu\epsilon$);

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计算:

$$\epsilon_{II} = \epsilon_G \left(0.1 + \frac{0.9 \epsilon_o}{\epsilon_o + |\epsilon_G|} \right) \quad (A. 1. 6-8)$$

$$\sigma_{con} = 0.3 \sigma_w \left(2 + \frac{|\epsilon_H| / \epsilon_o - 4}{|\epsilon_H| / \epsilon_o + 2} \right) \quad (A. 1. 6-9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \sigma_o & \epsilon_h &\leq \epsilon_o & \text{按 G-I-J 加卸载} \\ \sigma_w &= \sigma_A & \epsilon_h &> \epsilon_o & \text{按 G-I'-C-E 加卸载} \end{aligned} \quad (A. 1. 6-10)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_H + \varepsilon} \right) \quad (\varepsilon_H \leq \varepsilon < 0) \quad (\text{A. 1. 6-11})$$

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

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

(A. 1. 6-12)

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 ($\mu\varepsilon$)。

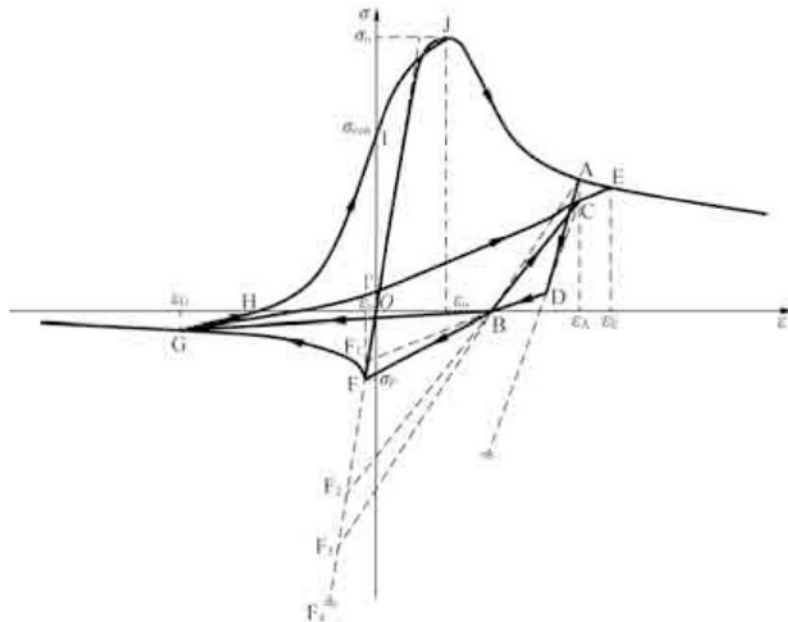


图 A. 1. 6 混凝土应力-应变滞回关系曲线示意

A. 2 钢 材

A. 2. 1 钢管和钢筋在单调荷载作用下的应力(σ)-应变(ε)关系宜按下列公式确定:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y + 0.01 E_s (\varepsilon - \varepsilon_y) & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (\text{A. 2. 1})$$

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。

A. 2. 2 钢管在反复荷载作用下应力(σ)-应变(ε)关系(图 A. 2. 2)的骨架线宜按本标准第 A. 2. 1 条确定, 软化段的模量宜按下列公式确定:

$$E_b = \begin{cases} \frac{f_y + \sigma_d}{\varepsilon_y + \varepsilon_d} & 1.65\varepsilon_y < \varepsilon_d \leq 6.11\varepsilon_y \\ 0.1E_s & \varepsilon_d > 6.11\varepsilon_y \end{cases} \quad (\text{A. 2. 2})$$

式中: E_d ——软化段 de 和相应的反对称段 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 的应力 (N/mm^2), d 点位于与 ab 平行的直线上;

ε_d ——软化段起始点 d 的应变;

ε_y ——钢材的屈服应变。

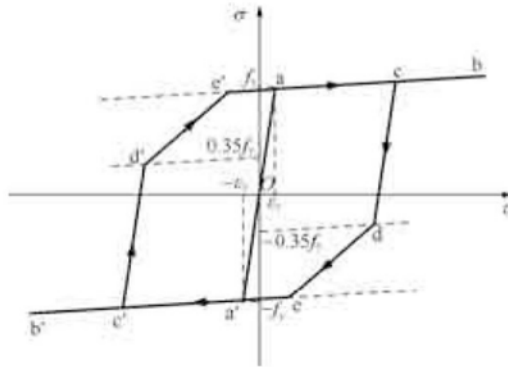


图 A. 2. 2 钢管应力-应变滞回关系曲线示意

A.2.3 钢筋在反复荷载作用下应力(σ)-应变(ϵ)关系(图 A.2.3)的骨架线宜按本标准第 A.2.1 条确定;按弹性模量卸载至应力为零后,如再加载方向钢筋未曾屈服,则再加载宜指向钢筋初始屈服点;如再加载方向钢筋曾屈服,则再加载宜指向该方向钢筋历史最大应变点。

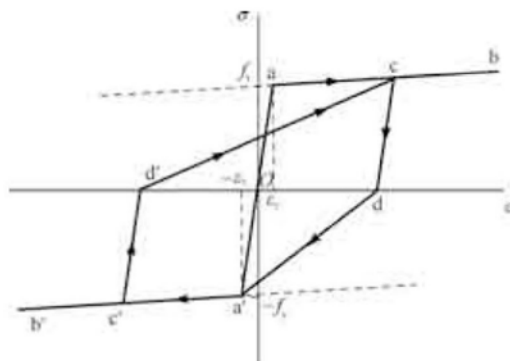


图 A.2.3 钢筋应力-应变滞回关系曲线示意

附录 B 轴心受压钢管混凝土构件的稳定系数

表 B 稳定系数 φ 值表

钢材 牌号	混凝土 强度等 级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q355	C30	0.06	1.000	0.982	0.945	0.906	0.864	0.821	0.775	0.727	0.676	0.592
		0.08	1.000	0.983	0.949	0.912	0.872	0.830	0.785	0.737	0.686	0.600
		0.12	1.000	0.985	0.955	0.921	0.884	0.843	0.799	0.751	0.700	0.613
		0.16	1.000	0.987	0.959	0.928	0.893	0.853	0.810	0.762	0.710	0.622
		0.20	1.000	0.988	0.963	0.933	0.899	0.861	0.818	0.770	0.718	0.629
	C40	0.06	1.000	0.966	0.919	0.871	0.823	0.775	0.727	0.679	0.630	0.551
		0.08	1.000	0.968	0.923	0.877	0.831	0.784	0.736	0.688	0.639	0.559
		0.12	1.000	0.971	0.929	0.886	0.842	0.796	0.750	0.702	0.652	0.571
		0.16	1.000	0.972	0.933	0.892	0.850	0.805	0.759	0.711	0.662	0.579
		0.20	1.000	0.974	0.937	0.897	0.856	0.812	0.767	0.719	0.669	0.586
	C50	0.06	1.000	0.955	0.900	0.847	0.796	0.745	0.696	0.647	0.600	0.525
		0.08	1.000	0.956	0.905	0.853	0.803	0.753	0.704	0.656	0.609	0.533
		0.12	1.000	0.959	0.911	0.862	0.814	0.765	0.717	0.669	0.621	0.544
		0.16	1.000	0.961	0.915	0.868	0.821	0.774	0.727	0.679	0.630	0.552
		0.20	1.000	0.963	0.918	0.873	0.827	0.781	0.734	0.686	0.637	0.558
	C60	0.06	1.000	0.943	0.884	0.826	0.771	0.718	0.668	0.620	0.574	0.502
		0.08	1.000	0.945	0.888	0.832	0.778	0.726	0.676	0.628	0.582	0.509
		0.12	1.000	0.948	0.894	0.840	0.788	0.738	0.689	0.641	0.594	0.520
		0.16	1.000	0.950	0.898	0.846	0.796	0.746	0.697	0.649	0.602	0.527
		0.20	1.000	0.952	0.901	0.851	0.802	0.753	0.704	0.656	0.609	0.533
	C70	0.06	1.000	0.933	0.869	0.808	0.751	0.696	0.645	0.597	0.552	0.483
		0.08	1.000	0.935	0.873	0.814	0.758	0.704	0.653	0.605	0.560	0.490
		0.12	1.000	0.938	0.879	0.822	0.767	0.715	0.665	0.617	0.571	0.500
		0.16	1.000	0.941	0.883	0.828	0.775	0.723	0.673	0.626	0.580	0.507
		0.20	0.999	0.942	0.887	0.833	0.780	0.729	0.680	0.632	0.586	0.513
	C80	0.06	0.997	0.925	0.857	0.794	0.734	0.678	0.626	0.578	0.534	0.467
		0.08	0.996	0.927	0.861	0.799	0.741	0.686	0.634	0.586	0.542	0.474
		0.12	0.996	0.930	0.867	0.807	0.750	0.696	0.646	0.598	0.553	0.484
		0.16	0.996	0.932	0.871	0.813	0.757	0.704	0.654	0.606	0.561	0.491
		0.20	0.996	0.934	0.875	0.818	0.763	0.710	0.660	0.613	0.567	0.496

续表 B

钢材 牌号	混凝土 强度等 级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q355	C30	0.06	0.513	0.449	0.396	0.352	0.315	0.284	0.257	0.233	0.213	0.195
		0.08	0.520	0.455	0.402	0.357	0.320	0.288	0.260	0.237	0.216	0.198
		0.12	0.531	0.465	0.410	0.365	0.326	0.294	0.266	0.242	0.221	0.202
		0.16	0.539	0.472	0.416	0.370	0.331	0.298	0.270	0.245	0.224	0.205
		0.20	0.545	0.477	0.421	0.374	0.335	0.301	0.273	0.248	0.226	0.207
	C40	0.06	0.478	0.418	0.369	0.328	0.294	0.264	0.239	0.217	0.198	0.182
		0.08	0.485	0.424	0.374	0.333	0.298	0.268	0.243	0.221	0.201	0.185
		0.12	0.495	0.433	0.382	0.340	0.304	0.274	0.248	0.225	0.205	0.188
		0.16	0.502	0.439	0.388	0.345	0.308	0.278	0.251	0.228	0.208	0.191
		0.20	0.508	0.444	0.392	0.348	0.312	0.281	0.254	0.231	0.211	0.193
	C50	0.06	0.455	0.398	0.352	0.312	0.280	0.252	0.228	0.207	0.189	0.173
		0.08	0.462	0.404	0.357	0.317	0.284	0.255	0.231	0.210	0.192	0.176
		0.12	0.471	0.412	0.364	0.324	0.289	0.261	0.236	0.214	0.196	0.179
		0.16	0.478	0.418	0.369	0.328	0.294	0.264	0.239	0.217	0.199	0.182
		0.20	0.483	0.423	0.373	0.332	0.297	0.267	0.242	0.220	0.201	0.184
	C60	0.06	0.435	0.381	0.336	0.299	0.267	0.241	0.218	0.198	0.181	0.166
		0.08	0.441	0.386	0.341	0.303	0.271	0.244	0.221	0.201	0.183	0.168
		0.12	0.450	0.394	0.348	0.309	0.277	0.249	0.225	0.205	0.187	0.171
		0.16	0.457	0.400	0.353	0.314	0.281	0.253	0.229	0.208	0.190	0.174
		0.20	0.462	0.404	0.357	0.317	0.284	0.255	0.231	0.210	0.192	0.176
	C70	0.06	0.418	0.366	0.323	0.287	0.257	0.231	0.209	0.190	0.174	0.159
		0.08	0.425	0.372	0.328	0.291	0.261	0.235	0.212	0.193	0.176	0.162
		0.12	0.433	0.379	0.335	0.297	0.266	0.240	0.217	0.197	0.180	0.165
		0.16	0.440	0.385	0.339	0.302	0.270	0.243	0.220	0.200	0.183	0.167
		0.20	0.444	0.389	0.343	0.305	0.273	0.246	0.222	0.202	0.185	0.169
	C80	0.06	0.405	0.354	0.313	0.278	0.249	0.224	0.203	0.184	0.168	0.154
		0.08	0.411	0.360	0.317	0.282	0.252	0.227	0.206	0.187	0.171	0.156
		0.12	0.419	0.367	0.324	0.288	0.258	0.232	0.210	0.191	0.174	0.160
		0.16	0.425	0.372	0.328	0.292	0.261	0.235	0.213	0.193	0.177	0.162
		0.20	0.430	0.376	0.332	0.295	0.264	0.238	0.215	0.196	0.179	0.164

续表 B

钢材 牌号	混凝土强 度等级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q390	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
		0.20	1.000	0.953	0.904	0.854	0.804	0.755	0.705	0.655	0.597	0.512
	C70	0.06	1.000	0.934	0.870	0.809	0.751	0.696	0.644	0.595	0.541	0.464
		0.08	1.000	0.936	0.874	0.815	0.758	0.704	0.652	0.603	0.549	0.470
		0.12	1.000	0.939	0.880	0.823	0.769	0.715	0.664	0.615	0.560	0.480
		0.16	0.999	0.941	0.885	0.830	0.776	0.724	0.673	0.624	0.568	0.487
		0.20	0.999	0.943	0.888	0.835	0.782	0.731	0.680	0.631	0.574	0.492
	C80	0.06	0.997	0.925	0.857	0.793	0.733	0.677	0.624	0.576	0.523	0.449
		0.08	0.996	0.927	0.862	0.799	0.740	0.685	0.633	0.584	0.531	0.455
		0.12	0.996	0.931	0.868	0.808	0.751	0.696	0.644	0.596	0.542	0.465
		0.16	0.996	0.933	0.872	0.814	0.758	0.704	0.653	0.604	0.550	0.471
		0.20	0.996	0.935	0.876	0.819	0.764	0.711	0.660	0.611	0.556	0.477

续表 B

钢材 牌号	混凝土 强度等 级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q390	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
	C70	0.06	0.402	0.352	0.310	0.276	0.247	0.222	0.201	0.183	0.167	0.153
		0.08	0.408	0.357	0.315	0.280	0.250	0.225	0.204	0.185	0.169	0.155
		0.12	0.416	0.364	0.321	0.286	0.256	0.230	0.208	0.189	0.173	0.158
		0.16	0.422	0.369	0.326	0.290	0.259	0.233	0.211	0.192	0.175	0.161
		0.20	0.427	0.374	0.330	0.293	0.262	0.236	0.214	0.194	0.177	0.163
	C80	0.06	0.389	0.340	0.300	0.267	0.239	0.215	0.195	0.177	0.162	0.148
		0.08	0.395	0.345	0.305	0.271	0.242	0.218	0.197	0.179	0.164	0.150
		0.12	0.403	0.352	0.311	0.276	0.247	0.223	0.201	0.183	0.167	0.153
		0.16	0.409	0.358	0.316	0.280	0.251	0.226	0.204	0.186	0.170	0.156
		0.20	0.413	0.362	0.319	0.284	0.254	0.228	0.207	0.188	0.172	0.157

续表 B

钢材 牌号	混凝土强 度等级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q420	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
	C70	0.06	1.000	0.934	0.870	0.809	0.750	0.694	0.642	0.592	0.523	0.449
		0.08	1.000	0.936	0.874	0.815	0.758	0.703	0.650	0.600	0.531	0.455
		0.12	1.000	0.940	0.881	0.824	0.769	0.715	0.663	0.612	0.542	0.464
		0.16	0.999	0.942	0.886	0.831	0.777	0.724	0.672	0.621	0.550	0.471
		0.20	0.999	0.944	0.890	0.836	0.783	0.731	0.679	0.628	0.556	0.476
	C80	0.06	0.996	0.925	0.857	0.793	0.732	0.675	0.622	0.573	0.506	0.434
		0.08	0.996	0.927	0.861	0.799	0.740	0.683	0.631	0.581	0.514	0.441
		0.12	0.996	0.931	0.868	0.808	0.750	0.695	0.643	0.593	0.524	0.450
		0.16	0.996	0.933	0.873	0.814	0.758	0.704	0.651	0.601	0.532	0.456
		0.20	0.996	0.935	0.876	0.819	0.764	0.710	0.658	0.608	0.538	0.461

续表 B

钢材 牌号	混凝土 强度等 级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q420	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
	C70	0.06	0.389	0.340	0.300	0.267	0.239	0.215	0.195	0.177	0.162	0.148
		0.08	0.395	0.345	0.305	0.271	0.242	0.218	0.197	0.179	0.164	0.150
		0.12	0.403	0.352	0.311	0.276	0.247	0.223	0.201	0.183	0.167	0.153
		0.16	0.408	0.357	0.315	0.280	0.251	0.226	0.204	0.186	0.170	0.156
		0.20	0.413	0.361	0.319	0.284	0.254	0.228	0.207	0.188	0.172	0.157
	C80	0.06	0.376	0.329	0.291	0.258	0.231	0.208	0.188	0.171	0.156	0.143
		0.08	0.382	0.334	0.295	0.262	0.235	0.211	0.191	0.174	0.159	0.145
		0.12	0.390	0.341	0.301	0.268	0.239	0.215	0.195	0.177	0.162	0.148
		0.16	0.395	0.346	0.305	0.271	0.243	0.219	0.198	0.180	0.164	0.150
		0.20	0.400	0.350	0.309	0.274	0.246	0.221	0.200	0.182	0.166	0.152

续表 B

钢材 牌号	混凝土 强度等 级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q460	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
	C70	0.06	1.000	0.934	0.869	0.808	0.748	0.692	0.638	0.586	0.502	0.430
		0.08	1.000	0.936	0.874	0.814	0.756	0.701	0.647	0.595	0.509	0.436
		0.12	1.000	0.940	0.881	0.824	0.768	0.713	0.659	0.607	0.519	0.445
		0.16	0.999	0.943	0.886	0.831	0.776	0.722	0.669	0.616	0.527	0.452
		0.20	0.999	0.945	0.890	0.836	0.783	0.729	0.676	0.623	0.533	0.457
	C80	0.06	0.996	0.924	0.856	0.791	0.730	0.672	0.618	0.567	0.486	0.416
		0.08	0.996	0.927	0.861	0.798	0.738	0.681	0.627	0.576	0.493	0.422
		0.12	0.996	0.931	0.868	0.807	0.749	0.693	0.639	0.587	0.503	0.431
		0.16	0.996	0.933	0.873	0.814	0.757	0.701	0.648	0.596	0.510	0.437
		0.20	0.996	0.935	0.877	0.819	0.763	0.708	0.655	0.603	0.516	0.442

续表 B

钢材 牌号	混凝土 强度等 级	截面 含钢 率 α_s	长细比 λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q460	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
	C70	0.06	0.373	0.326	0.288	0.256	0.229	0.206	0.187	0.170	0.155	0.142
		0.08	0.378	0.331	0.292	0.260	0.232	0.209	0.189	0.172	0.157	0.144
		0.12	0.386	0.338	0.298	0.265	0.237	0.213	0.193	0.176	0.160	0.147
		0.16	0.392	0.343	0.302	0.269	0.241	0.217	0.196	0.178	0.163	0.149
		0.20	0.396	0.347	0.306	0.272	0.243	0.219	0.198	0.180	0.164	0.151
	C80	0.06	0.361	0.316	0.279	0.248	0.222	0.200	0.181	0.164	0.150	0.137
		0.08	0.366	0.320	0.283	0.251	0.225	0.202	0.183	0.167	0.152	0.139
		0.12	0.374	0.327	0.289	0.257	0.230	0.207	0.187	0.170	0.155	0.142
		0.16	0.379	0.332	0.293	0.260	0.233	0.210	0.190	0.172	0.157	0.144
		0.20	0.383	0.335	0.296	0.263	0.235	0.212	0.192	0.174	0.159	0.146

注：表内中间值按线性内插法确定。

附录 C 钢管混凝土加劲混合结构的 长期荷载影响系数

C.0.1 单肢钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数宜按表 C.0.1 取值。

表 C.0.1 单肢钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数 k_{σ}

钢管外包混凝土强度等级 C30										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.50	1.000	1.000	1.000	0.996	1.000	1.000	0.973	0.982	0.998
	0.63	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	0.75	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
40	0.50	0.808	0.877	0.936	0.772	0.848	0.905	0.808	0.880	0.927
	0.63	0.829	0.904	0.960	0.790	0.871	0.926	0.835	0.905	0.947
	0.75	0.864	0.929	0.976	0.820	0.903	0.955	0.872	0.934	0.965
60	0.50	0.625	0.701	0.765	0.669	0.740	0.798	0.756	0.824	0.879
	0.63	0.647	0.733	0.789	0.697	0.768	0.823	0.781	0.858	0.905
	0.75	0.682	0.773	0.829	0.723	0.796	0.858	0.815	0.887	0.940

续表 C.0.1

钢管外包混凝土强度等级 C60										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.50	0.953	0.968	0.997	0.905	0.943	0.985	0.882	0.902	0.941
	0.63	0.985	0.992	0.999	0.924	0.972	0.997	0.912	0.933	0.959
	0.75	0.989	0.998	1.000	0.942	0.986	0.999	0.917	0.951	0.976
40	0.50	0.699	0.769	0.824	0.673	0.745	0.798	0.705	0.779	0.820
	0.63	0.715	0.795	0.845	0.693	0.769	0.819	0.732	0.802	0.837
	0.75	0.751	0.819	0.864	0.724	0.797	0.845	0.764	0.826	0.857
60	0.50	0.538	0.610	0.665	0.575	0.644	0.698	0.661	0.729	0.783
	0.63	0.566	0.641	0.691	0.604	0.668	0.723	0.691	0.757	0.806
	0.75	0.591	0.676	0.729	0.629	0.698	0.761	0.717	0.787	0.841
钢管外包混凝土强度等级 C80										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.50	0.952	0.968	0.997	0.904	0.942	0.984	0.881	0.901	0.940
	0.63	0.985	0.992	0.999	0.923	0.971	0.996	0.911	0.932	0.958
	0.75	0.989	0.998	1.000	0.941	0.985	0.999	0.916	0.950	0.975
40	0.50	0.677	0.746	0.800	0.651	0.723	0.773	0.683	0.755	0.794
	0.63	0.693	0.771	0.820	0.672	0.745	0.794	0.708	0.778	0.811
	0.75	0.728	0.795	0.838	0.702	0.773	0.820	0.740	0.801	0.831
60	0.50	0.499	0.567	0.619	0.535	0.598	0.648	0.614	0.677	0.727
	0.63	0.526	0.596	0.643	0.561	0.620	0.672	0.642	0.702	0.748
	0.75	0.549	0.629	0.678	0.584	0.649	0.708	0.665	0.730	0.781

注: e 为荷载偏心距, 当绕强轴弯曲时, $r_0 = H/2$; 当绕弱轴弯曲时, $r_0 = B/2$ 。
表内中间值按线性内插法确定。

C.0.2 内置钢管混凝土相同的四肢钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数宜按表 C.0.2 取值。

表 C.0.2 四肢钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数 k_{σ}

钢管外包混凝土强度等级 C30										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.15	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.971	0.971	1.000
	0.20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	0.976	1.000
	0.25	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
40	0.15	0.862	0.902	0.949	0.835	0.889	0.935	0.830	0.882	0.946
	0.20	0.866	0.904	0.952	0.837	0.890	0.936	0.833	0.888	0.948
	0.25	0.877	0.929	0.976	0.854	0.909	0.954	0.878	0.929	0.964
60	0.15	0.692	0.762	0.850	0.683	0.767	0.846	0.733	0.811	0.887
	0.20	0.701	0.768	0.853	0.691	0.770	0.849	0.744	0.816	0.891
	0.25	0.722	0.811	0.888	0.720	0.805	0.880	0.776	0.861	0.921
钢管外包混凝土强度等级 C60										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.15	0.956	0.972	1.000	0.927	0.939	1.000	0.874	0.882	0.950
	0.20	0.962	0.974	1.000	0.932	0.941	1.000	0.877	0.883	0.954
	0.25	1.000	1.000	1.000	0.953	1.000	1.000	0.943	0.945	0.977
40	0.15	0.764	0.811	0.886	0.728	0.786	0.859	0.729	0.785	0.853
	0.20	0.770	0.813	0.889	0.736	0.788	0.861	0.733	0.791	0.856
	0.25	0.801	0.859	0.907	0.758	0.831	0.889	0.779	0.836	0.878
60	0.15	0.592	0.665	0.746	0.583	0.668	0.742	0.634	0.715	0.789
	0.20	0.601	0.667	0.748	0.593	0.672	0.743	0.641	0.722	0.790
	0.25	0.623	0.711	0.780	0.627	0.704	0.775	0.682	0.762	0.815

续表 C.0.2

钢管外包混凝土强度等级 C80										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.15	0.957	0.974	1.000	0.928	0.939	1.000	0.874	0.883	0.951
	0.20	0.961	0.978	1.000	0.932	0.941	1.000	0.877	0.884	0.953
	0.25	1.000	1.000	1.000	0.954	1.000	1.000	0.944	0.945	0.980
40	0.15	0.750	0.795	0.869	0.713	0.770	0.843	0.713	0.768	0.835
	0.20	0.753	0.797	0.872	0.720	0.773	0.845	0.718	0.773	0.838
	0.25	0.785	0.843	0.891	0.744	0.815	0.871	0.762	0.818	0.860
60	0.15	0.563	0.633	0.711	0.553	0.635	0.706	0.600	0.679	0.749
	0.20	0.571	0.635	0.712	0.563	0.639	0.707	0.608	0.685	0.752
	0.25	0.592	0.677	0.743	0.595	0.670	0.738	0.646	0.723	0.775

注: e 为荷载偏心距, 当绕强轴弯曲时, $r_0 = H/2$; 当绕弱轴弯曲时, $r_0 = B/2$ 。

表内中间值按线性内插法确定。

C.0.3 内置钢管混凝土相同的六肢钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数宜按表 C.0.3 取值。

表 C.0.3 六肢钢管混凝土加劲混合结构的长期荷载影响系数 k_{σ}

钢管外包混凝土强度等级 C30										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.15	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	0.949	0.961	1.000
	0.20	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	0.950	0.965	1.000
	0.25	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	0.934	1.000	1.000
40	0.15	0.851	0.900	0.953	0.816	0.876	0.934	0.816	0.876	0.943
	0.20	0.855	0.902	0.954	0.818	0.879	0.942	0.820	0.881	0.951
	0.25	0.871	0.927	0.979	0.831	0.906	0.955	0.838	0.922	0.965
60	0.15	0.681	0.760	0.858	0.674	0.763	0.851	0.723	0.808	0.892
	0.20	0.690	0.766	0.860	0.682	0.766	0.854	0.734	0.813	0.894
	0.25	0.712	0.808	0.893	0.710	0.801	0.881	0.768	0.855	0.921

续表 C. 0. 3

钢管外包混凝土强度等级 C60										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.15	0.938	0.967	1.000	0.908	0.934	1.000	0.854	0.876	0.952
	0.20	0.942	0.969	1.000	0.910	0.936	1.000	0.856	0.877	0.954
	0.25	1.000	1.000	1.000	0.941	0.990	1.000	0.925	0.933	0.971
40	0.15	0.750	0.808	0.890	0.716	0.783	0.863	0.717	0.781	0.855
	0.20	0.755	0.810	0.893	0.722	0.785	0.865	0.721	0.786	0.857
	0.25	0.789	0.853	0.909	0.748	0.825	0.887	0.769	0.828	0.874
60	0.15	0.581	0.663	0.753	0.575	0.666	0.745	0.625	0.713	0.792
	0.20	0.591	0.666	0.754	0.584	0.668	0.745	0.633	0.718	0.794
	0.25	0.615	0.707	0.783	0.617	0.701	0.778	0.675	0.755	0.814
钢管外包混凝土强度等级 C80										
长细比 λ	钢管直径与 截面宽度比 D/B	荷载相对偏心率 e/r_0								
		0			0.5			1		
		纵筋配筋率 ρ (%)								
		1	3	5	1	3	5	1	3	5
20	0.15	0.939	0.968	1.000	0.909	0.935	1.000	0.856	0.877	0.954
	0.20	0.943	0.971	1.000	0.911	0.937	1.000	0.857	0.878	0.956
	0.25	1.000	1.000	1.000	0.942	0.992	1.000	0.926	0.935	0.972
40	0.15	0.736	0.792	0.873	0.701	0.767	0.846	0.701	0.764	0.837
	0.20	0.741	0.794	0.874	0.708	0.770	0.848	0.706	0.769	0.840
	0.25	0.774	0.835	0.885	0.734	0.809	0.869	0.752	0.810	0.855
60	0.15	0.554	0.632	0.717	0.546	0.633	0.710	0.592	0.676	0.752
	0.20	0.562	0.634	0.718	0.556	0.636	0.711	0.600	0.682	0.755
	0.25	0.586	0.675	0.746	0.587	0.667	0.740	0.639	0.718	0.773

注: e 为荷载偏心距, 当绕强轴弯曲时, $r_0 = H/2$; 当绕弱轴弯曲时, $r_0 = B/2$ 。

表内中间值按线性内插法确定。

附录 D 相贯焊接节点的热点应力集中系数

D.0.1 相贯焊接 T 形节点的热点应力集中系数可按下列规定计算。

1 腹杆受轴力时引起弦杆冠点、鞍点和腹杆冠点、鞍点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D.0.1 (a)]。

$$K_{\text{SCF,cc,wn}} = 1.5 + \gamma^{0.067} \tau [4.932 + 2.823(\beta - 0.03)^2] + 0.099\beta^{-0.16} \tau^{-0.509} \quad (\text{D.0.1-1})$$

$$K_{\text{SCF,cs,wn}} = 0.5 + 0.8\gamma^{0.683} \tau^{0.947} [1.038 - 0.56(\beta + 0.042)^2] \quad (\text{D.0.1-2})$$

$$K_{\text{SCF,wc,wn}} = 4 - 5.013\gamma^{0.186} \tau^{2.64} [0.698 + 2.365\beta^{0.381}(\beta - 0.6)] + 15.219\beta^{2.047} \tau^{2.424} \quad (\text{D.0.1-3})$$

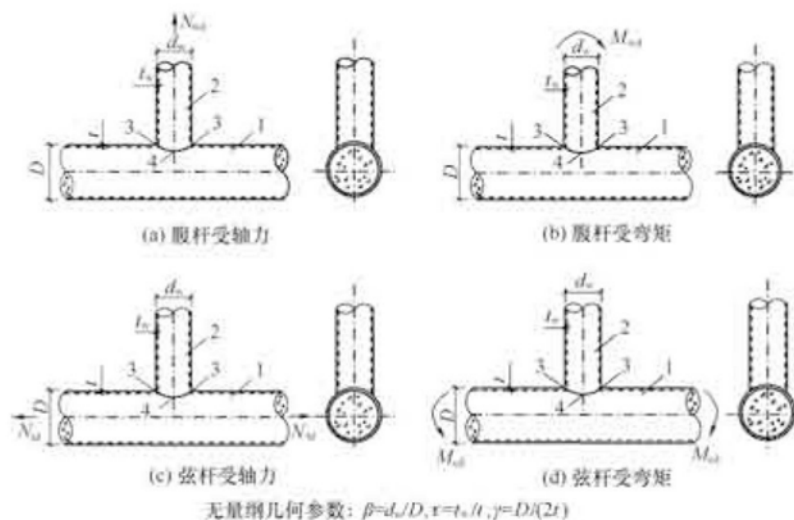


图 D.0.1 T 形节点受力形式

1—钢管混凝土弦杆; 2—空钢管腹杆; 3—冠点; 4—鞍点

$$K_{SCF,ws,wn} = 3 + 0.226\gamma^{1.26}\tau^{0.595}[0.144 - 0.035\beta^{-0.894}(\beta - 0.6)] + 0.181\beta^{0.935}\tau^{-0.469} \quad (D.0.1-4)$$

式中: $K_{SCF,cc,wn}$ ——由腹杆轴力引起弦杆冠点的热点应力集中系数;

$K_{SCF,cs,wn}$ ——由腹杆轴力引起弦杆鞍点的热点应力集中系数;

$K_{SCF,wc,wn}$ ——由腹杆轴力引起腹杆冠点的热点应力集中系数;

$K_{SCF,ws,wn}$ ——由腹杆轴力引起腹杆鞍点的热点应力集中系数。

2 腹杆受平面内弯矩引起弦杆冠点和腹杆冠点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D.0.1 (b)]。

$$K_{SCF,cc,wm} = 1.2\beta\tau^{0.82}\gamma^{(0.873-0.519\beta)} \quad (D.0.1-5)$$

$$K_{SCF,wc,wm} = 0.5 + 1.878\beta\tau^{0.033}\gamma^{(0.698-0.83\beta)} \quad (D.0.1-6)$$

式中: $K_{SCF,cc,wm}$ ——由腹杆平面内弯矩引起弦杆冠点的热点应力集中系数;

$K_{SCF,wc,wm}$ ——由腹杆平面内弯矩引起腹杆冠点的热点应力集中系数。

3 弦杆受轴力时引起弦杆冠点、鞍点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D.0.1 (c)]。

$$K_{SCF,cc,cn} = 1.7 \quad (D.0.1-7)$$

$$K_{SCF,cs,cn} = 1.0 \quad (D.0.1-8)$$

式中: $K_{SCF,cc,cn}$ ——由弦杆轴力引起弦杆冠点的热点应力集中系数;

$K_{SCF,cs,cn}$ ——由弦杆轴力引起弦杆鞍点的热点应力集中系数。

4 弦杆受平面内弯矩时引起弦杆冠点、鞍点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D.0.1 (d)]。

$$K_{SCF,cc,cm} = 1.7 \quad (D.0.1-9)$$

$$K_{SCF,cs,cm} = 1.0 \quad (D.0.1-10)$$

式中: $K_{\text{SCF,cc,cm}}$ ——由弦杆平面内弯矩引起弦杆冠点的热点应力集中系数;

$K_{\text{SCF,cs,cm}}$ ——由弦杆平面内弯矩引起弦杆鞍点的热点应力集中系数。

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

D.0.2 相贯焊接 K 形间隙节点的热点应力集中系数可按下列规定计算。

1 腹杆受轴力时引起弦杆冠趾、鞍点和腹杆冠趾、鞍点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D.0.2 (a)]。

$$K_{\text{SCF,cc,wn}} = (1.216 - 3.175\beta + 6.652\beta^2)\beta^{-0.739} (2\gamma)^{0.294} \tau^{0.802} (\sin\theta)^{0.596} \quad (\text{D.0.2-1})$$

$$K_{\text{SCF,cs,wn}} = (1.313 + 0.608\beta - 0.128\beta^2)\beta^{-0.433} (2\gamma)^{0.277} \tau^{0.989} (\sin\theta)^{0.615} \quad (\text{D.0.2-2})$$

$$K_{\text{SCF,wc,wn}} = (0.832 + 0.666\beta + 1.46\beta^2)\beta^{-0.866} (2\gamma)^{-0.042} \tau^{-0.064} (\sin\theta)^{1.406} \quad (\text{D.0.2-3})$$

$$K_{\text{SCF,ws,wn}} = (2.248 - 4.422\beta + 2.709\beta^2)\beta^{0.198} (2\gamma)^{0.317} \tau^{0.448} (\sin\theta)^{0.013} \quad (\text{D.0.2-4})$$

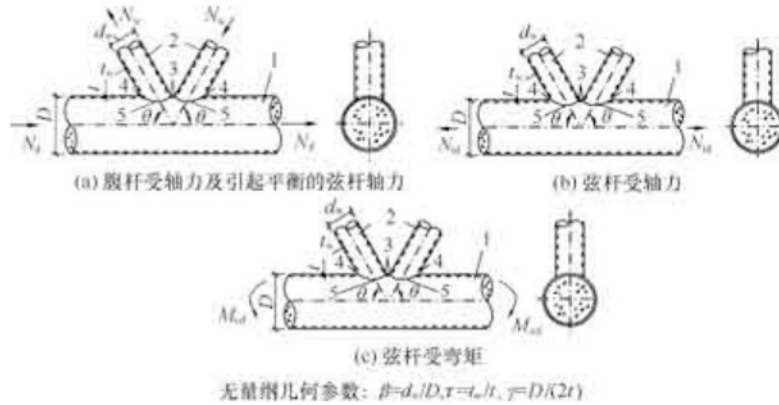


图 D.0.2 K 形间隙节点受力形式示意

1—钢管混凝土弦杆; 2—空钢管腹杆; 3—冠趾; 4—冠跟; 5—鞍点

式中: $K_{SCF, cc, wn}$ ——由腹杆轴力引起弦杆冠趾的热点应力集中系数;

$K_{SCF, cs, wn}$ ——由腹杆轴力引起弦杆鞍点的热点应力集中系数;

$K_{SCF, wc, wn}$ ——由腹杆轴力引起腹杆冠趾的热点应力集中系数;

$K_{SCF, ws, wn}$ ——由腹杆轴力引起腹杆鞍点的热点应力集中系数。

2 弦杆受轴力时引起弦杆冠趾、鞍点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D. 0. 2 (b)]。

$$K_{SCF, cc, cn} = 2.0 \quad (D. 0. 2-5)$$

$$K_{SCF, cs, cn} = 1.0 \quad (D. 0. 2-6)$$

式中: $K_{SCF, cc, cn}$ ——由弦杆轴力引起弦杆冠趾的热点应力集中系数;

$K_{SCF, cs, cn}$ ——由弦杆轴力引起弦杆鞍点的热点应力集中系数。

3 弦杆受平面内弯矩时引起弦杆冠趾、鞍点的热点应力集中系数可按下列公式计算 [图 D. 0. 2 (c)]。

$$K_{SCF, cc, cm} = 2.0 \quad (D. 0. 2-7)$$

$$K_{SCF, cs, cm} = 1.0 \quad (D. 0. 2-8)$$

式中: $K_{SCF, cc, cm}$ ——由弦杆平面内弯矩引起弦杆冠趾的热点应力集中系数;

$K_{SCF, cs, cm}$ ——由弦杆平面内弯矩引起弦杆鞍点的热点应力集中系数。

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

D. 0. 3 相贯焊接节点的热点应力宜根据图 D. 0. 1 或图 D. 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相应位置,

作为节点疲劳验算的应力指标及验算位置。

$$\sigma_{hs} = \Sigma(K_{SCF,n,i} \sigma_{n,i}) + \Sigma(K_{SCF,m,i} \sigma_{m,i}) \quad (D.0.3)$$

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；

$K_{SCF,n,i}$ ——由腹杆、弦杆各个轴力引起某一位置的热点应力集中系数，可按本标准第 D.0.1 条、第 D.0.2 条各公式计算；

$K_{SCF,m,i}$ ——由腹杆、弦杆各个弯矩引起某一位置的热点应力集中系数，可按本标准第 D.0.1 条、第 D.0.2 条各公式计算；

$\sigma_{n,i}$ ——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；

$\sigma_{m,i}$ ——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。

附录 E 单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限

E. 0.1 当内置钢管混凝土部分的承载力系数 (n_{cfs}) 为 0.30 时，轴心受压单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限可按表 E. 0.1 确定。

表 E. 0.1 单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限 t_R ($n_{cfs}=0.30$, h)

长细比 λ	截面宽度 B (mm)	荷载比 R			
		0.3	0.4	0.5	0.6
22	300	>3.00	>3.00	>3.00	2.47
	600	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
	900	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
	1500	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
44	300	1.57	1.00	0.70	0.48
	600	>3.00	1.85	1.15	0.80
	900	>3.00	>3.00	1.73	1.13
	1500	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00

注：表内中间值按线性内插法确定。

E. 0.2 当内置钢管混凝土部分的承载力系数 (n_{cfs}) 为 0.50 时，轴心受压单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限可按表 E. 0.2 确定。

表 E. 0.2 单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限 t_R ($n_{cfs}=0.50$, h)

长细比 λ	截面宽度 B (mm)	荷载比 R			
		0.3	0.4	0.5	0.6
22	300	>3.00	>3.00	>3.00	2.45
	600	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
	900	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00
	1500	>3.00	>3.00	>3.00	>3.00

续表 E. 0. 2

长细比 λ	截面宽度 B (mm)	荷载比 R			
		0. 3	0. 4	0. 5	0. 6
44	300	1. 95	1. 24	0. 87	0. 62
	600	>3. 00	2. 83	1. 93	1. 24
	900	>3. 00	>3. 00	2. 81	1. 70
	1500	>3. 00	>3. 00	>3. 00	>3. 00

注：表内中间值按线性内插法确定。

E. 0. 3 当内置钢管混凝土部分的承载力系数 ($n_{\text{cfs}})$ 为 0. 70 时，轴心受压单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限可按表 E. 0. 3 确定。

表 E. 0. 3 单肢钢管混凝土加劲混合结构的耐火极限 t_R ($n_{\text{cfs}}=0. 70$, h)

长细比 λ	截面宽度 B (mm)	荷载比 R			
		0. 3	0. 4	0. 5	0. 6
22	300	>3. 00	>3. 00	>3. 00	1. 63
	600	>3. 00	>3. 00	>3. 00	>3. 00
	900	>3. 00	>3. 00	>3. 00	>3. 00
	1500	>3. 00	>3. 00	>3. 00	>3. 00
44	300	1. 95	1. 22	0. 87	0. 65
	600	>3. 00	>3. 00	1. 65	1. 17
	900	>3. 00	>3. 00	>3. 00	1. 87
	1500	>3. 00	>3. 00	>3. 00	>3. 00

注：表内中间值按线性内插法确定。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，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，在正常情况下均应这样做的：
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，在条件许可时首先应这样做的：
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……执行”。

引用标准名录

- 1 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 2 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 3 《建筑设计防火规范》GB 50016
- 4 《钢结构设计标准》GB 50017
- 5 《铁路工程抗震设计规范》GB 50111
- 6 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
- 7 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 8 《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205
- 9 《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300
- 10 《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628
- 11 《钢结构焊接规范》GB 50661
- 12 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
- 13 《钢结构工程施工规范》GB 50755
- 14 《钢-混凝土组合结构施工规范》GB 50901
- 15 《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923
- 16 《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936
- 17 《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249
- 18 《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046
- 19 《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107
- 20 《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476
- 21 《碳素结构钢》GB/T 700
- 22 《桥梁用结构钢》GB/T 714
- 23 《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228
- 24 《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229
- 25 《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230

- 26 《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
- 27 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 28 《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1
- 29 《紧固件公差 螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3103.1
- 30 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632
- 31 《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117
- 32 《热强钢焊条》GB/T 5118
- 33 《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 5293
- 34 《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780
- 35 《六角头螺栓》GB/T 5782
- 36 《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》GB/T 8110
- 37 《结构用无缝钢管》GB/T 8162
- 38 《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》GB/T 8923.1
- 39 《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分：通用要求》GB/T 9978.1
- 40 《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》GB/T 10045
- 41 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 42 《埋弧焊用热强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 12470
- 43 《钢结构防火涂料》GB 14907
- 44 《熔化焊用钢丝》GB/T 14957
- 45 《热强钢药芯焊丝》GB/T 17493
- 46 《建筑结构用钢板》GB/T 19879
- 47 《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第 1 部分：总则》GB/T 30790.1

- 48 《钢筋焊接及验收规程》 JGJ 18
- 49 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ 55
- 50 《高层民用建筑钢结构技术规程》 JGJ 99
- 51 《钢筋机械连接技术规程》 JGJ 107
- 52 《组合结构设计规范》 JGJ 138
- 53 《拱形钢结构技术规程》 JGJ/T 249
- 54 《建筑钢结构防腐技术规程》 JGJ/T 251
- 55 《自密实混凝土应用技术规程》 JGJ/T 283
- 56 《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》 DL/T 5486
- 57 《公路桥梁抗震设计规范》 JTG/T 2231 - 01
- 58 《公路桥梁抗撞设计规范》 JTG/T 3360 - 02
- 59 《钢骨混凝土结构技术规程》 YB 9082