

# 不锈钢管混凝土结构技术规程

Technical Specification for Concrete-Filled Stainless Steel Tubular  
Structures

(征求意见稿)

《不锈钢管混凝土结构技术规程》编制组

2020 年 3 月 22 日

# 公 告

# 目 次

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1 总则                       | 1  |
| 2 术语和符号                    | 2  |
| 2.1 术语                     | 2  |
| 2.2 符号                     | 3  |
| 3 材料                       | 6  |
| 3.1 不锈钢                    | 6  |
| 3.2 混凝土                    | 10 |
| 3.3 连接材料                   | 11 |
| 4 基本规定                     | 13 |
| 4.1 一般规定                   | 13 |
| 4.2 设计指标                   | 15 |
| 4.3 构造要求                   | 19 |
| 5 构件承载力计算                  | 21 |
| 5.1 一般规定                   | 21 |
| 5.2 轴心受力构件承载力计算            | 21 |
| 5.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算        | 23 |
| 5.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算        | 27 |
| 5.5 长期荷载作用下的构件承载力计算        | 29 |
| 5.6 抗撞击设计                  | 30 |
| 5.7 抗震设计                   | 31 |
| 6 节点和连接设计                  | 32 |
| 7 抗火设计                     | 41 |
| 7.1 一般规定                   | 41 |
| 7.2 抗火计算                   | 43 |
| 7.3 防火构造措施                 | 45 |
| 8 制作、施工和验收                 | 47 |
| 8.1 一般规定                   | 47 |
| 8.2 不锈钢管的制作与施工             | 47 |
| 8.3 混凝土施工                  | 48 |
| 8.4 验收                     | 52 |
| 附录 A 稳定系数 $\varphi$ 值表     | 54 |
| 附录 B 长期荷载作用影响系数 $k_{or}$ 值 | 64 |
| 附录 C 静力荷载下混凝土本构模型          | 72 |
| 附录 D 循环荷载下混凝土本构模型          | 74 |
| 本规程用词说明                    | 76 |
| 引用标准名录                     | 77 |

# Contents

|            |                                                                           |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1          | General Provisions.....                                                   | 1  |
| 2          | Terms and Symbols .....                                                   | 2  |
| 2.1        | Terms .....                                                               | 2  |
| 2.2        | Symbols .....                                                             | 3  |
| 3          | Materials .....                                                           | 6  |
| 3.1        | Stainless Steel .....                                                     | 6  |
| 3.2        | Concrete.....                                                             | 10 |
| 3.3        | Connection Materials.....                                                 | 11 |
| 4          | Basic Requirements .....                                                  | 13 |
| 4.1        | General Requirements .....                                                | 13 |
| 4.2        | Design Indexes .....                                                      | 15 |
| 4.3        | Structural Detailing Requirements .....                                   | 18 |
| 5          | Calculation of Capacities of Members .....                                | 21 |
| 5.1        | General Requirements .....                                                | 21 |
| 5.2        | Calculation of Axial Capacity .....                                       | 21 |
| 5.3        | Calculation of Bending and Compression (Tension)-Bending Capacities ..... | 23 |
| 5.4        | Calculation of Shear, Torsion and Compression-Torsion Capacities.....     | 27 |
| 5.5        | Calculation of Capacities under Long-Term Loading.....                    | 29 |
| 5.6        | Design of Impact Resistance .....                                         | 30 |
| 5.7        | Seismic Design .....                                                      | 31 |
| 6          | Joints and Connections.....                                               | 32 |
| 7          | Fire Safety Design .....                                                  | 41 |
| 7.1        | General Requirements .....                                                | 41 |
| 7.2        | Calculation of Fire Resistance.....                                       | 43 |
| 7.3        | Fire Protection Construction Requirements.....                            | 45 |
| 8          | Manufacture and Fabrication Requirements.....                             | 47 |
| 8.1        | General Requirements .....                                                | 47 |
| 8.2        | Manufacture and Fabrication of Stainless Steel Tube.....                  | 47 |
| 8.3        | Concrete Construction .....                                               | 48 |
| 8.4        | Inspection and Acceptance .....                                           | 52 |
| Appendix A | Table of $\phi$ values .....                                              | 54 |
| Appendix B | Table of $k_{cr}$ values.....                                             | 64 |
| Appendix C | Constitutive Models of Concrete under Static Loading.....                 | 72 |
| Appendix D | Constitutive Models of Concrete under Cyclic Loading.....                 | 74 |
|            | Explanation of wording in this specification.....                         | 76 |
|            | List of quoted standards.....                                             | 77 |

# 1 总则

**1.0.1** 为在不锈钢管混凝土结构设计、施工及验收中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、经济合理和确保质量，制定本规程。

**【条文说明】1.0.1** 不锈钢管混凝土是在不锈钢管中填充混凝土而形成的，且不锈钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的结构构件。不锈钢管混凝土可充分利用不锈钢美观与耐腐蚀等优点，有效提高结构美观性与耐久性，降低其维护成本；利用不锈钢的应变硬化特性，有效改善核心混凝土的脆性，提高其塑性和韧性性能；利用不锈钢较好的高温力学性能，使其抗火性能优于碳素钢管混凝土构件，显著降低防火保护费用；同时，钢管内混凝土可有效延缓或避免不锈钢管的局部屈曲，减小不锈钢管厚度，进而减少结构中不锈钢用量，降低工程造价。

基于全寿命周期的设计理念，本规程分别给出了不锈钢管混凝土结构在施工阶段和服役阶段的有关规定，具体包括：施工、静力荷载、偶然撞击、地震作用、火灾等工况。

**1.0.2** 本规程适用于对耐久性要求较高且定期维护难度较大的工业与民用建（构）筑物、水下设施、海工结构、输变电杆塔、桥梁等不锈钢管混凝土结构的设计、施工及验收。

**【条文说明】1.0.2** 不锈钢管混凝土可满足本条建议的工程结构较高的耐久性要求，有效降低全寿命周期内的维护成本和工程综合造价。能源需求的持续增长导致大量酸性气体排放和酸雨区的不断扩大，进一步提高了对结构耐久性的要求，不锈钢管混凝土结构也适用于酸雨区的建筑物与构筑物。本规程同样适用于有外观要求的土木工程中不锈钢管混凝土结构。

**1.0.3** 不锈钢管混凝土结构设计应结合工程实际，合理选用材料、结构方案和构造措施，充分发挥不锈钢的高延性、耐腐蚀、耐高温和表面美观等优越性，保证结构在运输、安装和使用过程中满足强度、稳定性和刚度要求，并应符合防腐、防火与维护等要求。

**【条文说明】1.0.3** 不锈钢管混凝土结构中的不锈钢应根据结构使用环境合理选材，且在结构方案与构造措施中配合设计，以充分发挥不锈钢的优越性能。

**1.0.4** 不锈钢管混凝土结构的设计、施工及验收，除应执行本规程外，尚应符合有关国家现行标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 不锈钢管混凝土构件 concrete-filled stainless steel tubular members

不锈钢管内填充混凝土形成且不锈钢管与混凝土共同受力的组合构件，截面可为圆形或矩形。

#### 2.1.2 不锈钢管混凝土结构 concrete-filled stainless steel tubular structures

以不锈钢管混凝土构件作为主要受力构件的结构形式。

#### 2.1.3 名义屈服强度 proof strength

不锈钢残余应变为 0.2%时对应的应力。

#### 2.1.4 约束效应系数 confinement factor

反映不锈钢管混凝土组合截面的几何特征和组成材料物理特性的综合参数。

## 2.2 符号

### 2.2.1 作用和作用效应:

- $M$  —— 弯矩设计值;  
 $M_c$  —— 柱中心线处的梁支座弯矩;  
 $N$  —— 轴向力设计值;  
 $T$  —— 扭矩设计值;  
 $V$  —— 剪力设计值。

### 2.2.2 计算指标:

- $C40$  —— 立方体抗压强度标准值为  $40\text{N/mm}^2$  的混凝土强度等级;  
 $E_c$  —— 混凝土的弹性模量;  
 $E_s$  —— 不锈钢的初始弹性模量;  
 $(EA)_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面的轴压刚度;  
 $(EI)_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面的抗弯刚度;  
 $G_s$  —— 不锈钢的剪变模量;  
 $(GA)_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面的弹性抗剪刚度;  
 $M_u$  —— 不锈钢管混凝土构件的受弯承载力;  
 $M_{ud}$  —— 不锈钢管混凝土构件的动力极限弯矩;  
 $M_{ux}$  —— 矩形不锈钢管混凝土构件绕强轴的受弯承载力;  
 $M_{uy}$  —— 矩形不锈钢管混凝土构件绕弱轴的受弯承载力;  
 $N_E$  —— 欧拉临界力;  
 $N_l$  —— 作用于不锈钢管混凝土柱的长期轴压荷载;  
 $N_u$  —— 不锈钢管混凝土轴压构件的强度承载力;  
 $N_f$  —— 火灾下不锈钢管混凝土柱的轴压力设计值 (N);  
 $T_u$  —— 不锈钢管混凝土构件的受扭承载力;  
 $V_u$  —— 不锈钢管混凝土构件的受剪承载力;  
 $f$  —— 不锈钢的抗拉、抗压和抗弯强度设计值;  
 $f_b$  —— 不锈钢管和混凝土粘结强度设计值;  
 $f_{ck}$ 、 $f_c$  —— 混凝土轴心抗压强度标准值和设计值;  
 $f_{jv}$  —— 角焊缝抗剪强度设计值;  
 $f_l$  —— 加强环板不锈钢材抗拉强度设计值;  
 $f_{scy}$ 、 $f_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面轴心受压强度标准值和设计值;  
 $f_{tk}$ 、 $f_t$  —— 混凝土轴心抗拉强度标准值和设计值;  
 $f_t^f$  —— 混凝土轴心抗拉疲劳强度设计值;  
 $f_v$  —— 不锈钢的抗剪强度设计值;  
 $f_{0.2}$  —— 不锈钢的名义屈服强度;  
 $f_{svy}$ 、 $f_{sv}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面的受剪强度标准值和设计值。

### 2.2.3 几何参数:

- $A_c$  —— 不锈钢管内混凝土的截面面积;
- $A_s$  —— 不锈钢管的截面面积;
- $A_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面面积;
- $B$  —— 矩形不锈钢管混凝土的不锈钢管宽边边长;
- $C$  —— 不锈钢管混凝土构件的截面周长;
- $D$  —— 圆不锈钢管混凝土的不锈钢管外直径; 矩形不锈钢管混凝土的不锈钢管长边边长;
- $I$  —— 不锈钢管混凝土的等效截面惯性矩;
- $I_{s,s}$  —— 加劲肋的刚度;
- $I_c$  —— 混凝土的截面惯性矩;
- $I_{p,sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的极惯性矩;
- $I_{p,s}$  —— 不锈钢管截面的极惯性矩;
- $I_{p,c}$  —— 混凝土截面的极惯性矩;
- $I_s$  —— 不锈钢管截面的惯性矩;
- $I_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面的惯性矩;
- $L_0$  —— 构件的计算长度;
- $L_j$  —— 焊缝长度;
- $W_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的受弯模量;
- $W_{sc,t}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的扭转抵抗矩;
- $b$  —— 加强环板控制截面宽度;
- $b_0$  —— 矩形不锈钢管肋间子板件宽度;
- $b_e$  —— 不锈钢管管壁参与加强环工作的有效宽度;
- $b_s$  —— 加强环板宽度;
- $e$  —— 荷载偏心距;
- $e/r$  —— 荷载偏心率,  $r=D/2$  或  $B/2$ ;
- $h$  —— 梁端截面高度;
- $h_f$  —— 角焊缝焊脚高度;
- $t$  —— 不锈钢管或不锈钢板厚度;
- $t_b$  —— 不锈钢梁翼缘厚度;
- $t_1$  —— 加强环板厚度。

### 2.2.4 计算系数及其他:

- $k_{cr}$  —— 长期荷载作用影响系数;
- $k_T$  —— 无保护不锈钢管混凝土柱在标准火灾下的承载力系数;
- $n$  —— 轴压比、长期荷载比;
- $n_f$  —— 火灾荷载比;

- $\alpha_s$  —— 截面含钢率 ( $\alpha_s=A_s/A_c$ ) ;  
 $\beta_m$  —— 等效弯矩系数;  
 $\psi$  —— 受拉强度承载力计算系数;  
 $\gamma$  —— 刚度折减系数;  
 $\gamma_m$  —— 截面受弯塑性发展系数;  
 $\gamma_t$  —— 受扭强度承载力计算系数;  
 $\gamma_v$  —— 受剪承载力计算系数;  
 $\varphi$  —— 轴心受压构件的稳定系数;  
 $\lambda$  —— 构件长细比, 为构件的计算长度与组合截面的回转半径之比;  
 $\xi$ 、 $\xi_o$  —— 约束效应系数标准值、设计值。

## 3 材料

### 3.1 不锈钢

**3.1.1** 不锈钢质量应符合国家现行标准《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》GB/T 20878、《不锈钢热轧钢板和钢带》GB/T 4237、《不锈钢冷轧钢板和钢带》GB/T 3280、《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 和《不锈钢结构技术规范》CECS 410 的有关规定。不锈钢宜采用奥氏体型、铁素体型和奥氏体-铁素体双相型不锈钢，不锈钢选用应符合下列规定：

1 当采用奥氏体型不锈钢时，可选用统一数字代号为 S30408、S30403、S31603、S30210、S32169 的不锈钢；

2 当采用铁素体型不锈钢时，可选用统一数字代号为 S11873 和 S11972 的不锈钢；

3 当采用奥氏体-铁素体双相型不锈钢时，可选用统一数字代号为 S22053 和 S22253 的不锈钢。

**【条文说明】3.1.1** 根据现行国家标准《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》GB/T 20878 的定义，不锈钢是指以不锈、耐腐蚀性为主要特性，且铬（Cr）含量至少为 10.5%，碳（C）含量最大不超过 1.2% 的钢材。应注意，本条与 2.1.3 条规定为对于不锈钢铬含量与碳含量为最低要求，针对所选用具体牌号的不锈钢，其成分应符合现行国家标准《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》GB/T 20878 及相关国家现行标准对其化学成分组成的要求。不锈钢可以按金相组织的不同分成五类，其中马氏体型不锈钢和沉淀硬化型不锈钢因其焊接及冷加工性能差，故无法作为结构用材料使用。

奥氏体型不锈钢的基体以奥氏体组织为主，具有优良的耐腐蚀、抗冲击和可焊接性能，可塑性性能优良，可以通过冷加工方式提高其强度，是目前应用最为广泛的不锈钢。铁素体型不锈钢的基体以铁素体组织为主，其强度普遍高于奥氏体不锈钢，但不适合低温环境，且由于焊接热影响区的脆化，铁素体型不锈钢的焊接性能不如其他两种不锈钢。奥氏体-铁素体双相型不锈钢的基体兼有奥氏体和铁素体两相组织，相对于奥氏体型不锈钢，双相型不锈钢一般具有更高的强度、更好的耐磨和耐腐蚀性能，但由于合金元素含量多，其单价一般比奥氏体型不锈钢更高。

不锈钢管混凝土构件主要用作各类结构柱，本规程对不锈钢的要求符合国家现行标准《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》GB/T 20878、《不锈钢热轧钢板和钢带》GB/T 4237、《不锈钢冷轧钢板和钢带》GB/T 3280 和《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 的规定，在现行行业标准《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 中规定的选材范围内对不锈钢管混凝土结构所用不锈钢给出牌号推荐。当有可靠依据时，亦可采用其他牌号的不锈钢。

**3.1.2** 不锈钢应根据结构使用环境、荷载类型、结构形式、钢材厚度、成型方法和表面要求合理选取不锈钢牌号及性能指标，并应在设计文件中注明。

**【条文说明】3.1.2** 选用不锈钢的耐腐蚀极限主要取决于其组成元素，当暴露在腐蚀环境中时，各

等级不锈钢的响应略有不同，因此，需要在结构设计中选用最合适等级的不锈钢。一般来说，要求的耐腐蚀性越高，材料的成本就越高。在不锈钢管混凝土结构中选用不锈钢时，基于充分发挥材料耐腐蚀性的角度，应注意下列事项：

- 1、需考虑结构所处环境、构件加工方式、表面处理方式和维护方式；
- 2、对于在常规大气环境中的结构，可依据表3.1.2-1进行材料选择；

**表3.1.2-1 常规大气环境中不锈钢选材建议**

| 统一数字代号                               | 乡村，城市郊区 |   |   | 城市市区 |     |     | 工业密集区 |     |     | 沿海地区 |   |     |
|--------------------------------------|---------|---|---|------|-----|-----|-------|-----|-----|------|---|-----|
|                                      | L       | M | H | L    | M   | H   | L     | M   | H   | L    | M | H   |
| S11873                               | √       | √ | √ | (√)  | (√) | (√) | ×     | ×   | ×   | ×    | × | ×   |
| S11972                               | √       | √ | √ | √    | (√) | (√) | √     | ×   | ×   | ×    | × | ×   |
| S30403<br>S30408<br>S30210<br>S32169 | √       | √ | √ | √    | √   | √   | (√)   | (√) | ×   | (√)  | √ | ×   |
| S31603<br>S31608                     | ○       | ○ | ○ | ○    | ○   | √   | ○     | √   | (√) | √    | √ | (√) |
| S22053<br>S22253                     | ○       | ○ | ○ | ○    | √   | √   | √     | √   | √   | √    | √ | √   |

注：1 L代表所处地区的环境腐蚀危害轻微（低温、低湿度）；M代表所处地区的环境腐蚀危害一般；H代表所处地区的环境腐蚀危害严重（高温、高湿度）；

2 ○表示材料性能超过环境抗腐蚀要求；√表示材料性能和环境抗腐蚀要求匹配；×表示材料性能低于环境抗腐蚀要求；(√)采用相对光滑的表面处理并经常维护时，材料性能能够满足环境抗腐蚀要求。

3、对于直接接触海水环境、近海区域或与除冰盐使用区域的结构，可根据表3.1.2-2进行材料选择，也宜征求材料供应商或专业机构的建议；

**表3.1.2-2 氯离子腐蚀环境中不锈钢选材建议**

| 统一数字代号                               | 与海水距离 M          |                         |                 | 与盐除冰公路距离 S        |                             |                    |
|--------------------------------------|------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|
|                                      | 低度风险<br>M > 10km | 中度风险<br>1 km < M ≤ 10km | 高度风险<br>M < 1km | 低度风险<br>S > 0.1km | 中度风险<br>0.01 km < S ≤ 0.1km | 高度风险<br>S < 0.01km |
| S11873                               | √                | ×                       | ×               | (√)               | ×                           | ×                  |
| S11972                               | √                | ×                       | ×               | √                 | ×                           | ×                  |
| S30403<br>S30408<br>S30210<br>S32169 | √                | (√)                     | ×               | √                 | (√)                         | ×                  |
| S31603<br>S31608                     | ○                | ○                       | √               | ○                 | ○                           | √                  |
| S22053<br>S22253                     | ○                | ○                       | √               | ○                 | ○                           | √                  |

注：○表示材料性能超过环境抗腐蚀要求；√表示材料性能和环境抗腐蚀要求匹配；×表示材料性能低于环境抗腐蚀要求；(√)采用相对光滑

的表面处理并经常维护时，材料性能能够满足环境抗腐蚀要求。

4、对于暴露二氧化硫环境中的结构可依据表3.1.2-3进行材料选择，也宜征求材料供应商或专业机构的建议。

表3.1.2-3 二氧化硫环境中不锈钢选材建议

| 统一数字代号                               | 二氧化硫沉积值                                 |                                                                        |                                         |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                      | 低度风险<br>$Q < 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | 中度风险<br>$10 \mu\text{g}/\text{m}^3 < Q \leq 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | 高度风险<br>$M > 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| S30403<br>S30408<br>S30210<br>S32169 | √                                       | (√)                                                                    | ×                                       |
| S31603<br>S31608                     | ○                                       | ○                                                                      | √                                       |
| S22053<br>S22253                     | ○                                       | ○                                                                      | (√)                                     |

注：○表示材料性能超过环境抗腐蚀要求；√表示材料性能和环境抗腐蚀要求匹配；×表示材料性能低于环境抗腐蚀要求；(√)采用相对光滑的表面处理并经常维护时，材料性能能够满足环境抗腐蚀要求。

5、当有可靠设计依据选用本规程3.1.1条推荐牌号以外的不锈钢，可根据表3.1.2-4计算选用不锈钢的点蚀当量（PREN）值，之后根据表3.1.2-2与表3.1.2-3对氯离子腐蚀环境中或二氧化硫环境中不锈钢材料进行选择。

表3.1.2-4 按点蚀当量（PREN）值的不锈钢耐腐蚀风险分级

| PREN=Cr+3.3Mo+16N |                  |
|-------------------|------------------|
| 低度风险              | PREN ≤ 17.5      |
| 中度风险              | 17.5 ≤ PREN < 23 |
| 高度风险              | PREN ≥ 23        |

注：表中Cr为不锈钢中铬含量，Mo为不锈钢中钼含量，N为不锈钢中氮含量。

**3.1.3** 不锈钢管可采用无缝管或焊接管，不锈钢管的质量应符合国家现行标准《结构用不锈钢无缝钢管》GB/T 14975 和《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 的有关规定。

**【条文说明】3.1.3** 不锈钢管制作过程中应符合国家现行标准要求，对不锈钢的化学成分、制造方法、外观、尺寸偏差、力学性能、焊缝质量等进行控制。

当有可靠设计依据时，亦可采用不锈钢复合管，不锈钢复合管的基材(内层)为碳素钢、覆材(外层)为不锈钢，其质量应符合现行国家标准《结构用不锈钢复合管》GB/T 18704 的有关规定。

**3.1.4** 热轧不锈钢管或由热轧钢板焊接而成的不锈钢管管材的强度指标与伸长率应满足表3.1.4的要求。

表3.1.4 不锈钢焊接管材强度指标与伸长率

| 类型         | 统一数字代号 | 牌号             | 名义屈服强度<br>$f_{0.2}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 抗拉极限强度 $f_u$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 强度设计值<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |            | 伸长率<br>(%) |
|------------|--------|----------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------|------------|
|            |        |                |                                             |                                      | 抗拉、抗压和抗弯强度 $f$                | 抗剪强度 $f_v$ |            |
| 奥氏体型       | S30408 | 06Cr19Ni10     | 210                                         | 520                                  | 175                           | 100        | 25         |
|            | S30403 | 022Cr19Ni10    | 180                                         | 480                                  | 145                           | 85         | 25         |
|            | S31608 | 06Cr17Ni12Mo2  | 210                                         | 520                                  | 175                           | 100        | 25         |
|            | S31603 | 022Cr17Ni12Mo2 | 180                                         | 480                                  | 145                           | 85         | 25         |
|            | S30210 | 12Cr18Ni9      | 210                                         | 520                                  | 175                           | 100        | 25         |
|            | S32169 | 07Cr19Ni11Ti   | 210                                         | 520                                  | 175                           | 100        | 25         |
| 铁素体型       | S11873 | 022Cr18NbTi    | 205                                         | 415                                  | 170                           | 80         | 22         |
|            | S11972 | 019Cr19Mo2NbTi | 275                                         | 415                                  | 240                           | 130        | 20         |
| 奥氏体-铁素体双相型 | S22053 | 022Cr23Ni5Mo3N | 450                                         | 655                                  | 385                           | 220        | 20         |
|            | S22253 | 022Cr22Ni5Mo3N | 450                                         | 640                                  | 385                           | 220        | 25         |

注：表中所列均为最小值。

【条文说明】3.1.4 碳素钢在达到屈服应力前表现出线性弹性行为，在发生应变硬化之前通常存在屈服平台。相比之下，不锈钢没有明显的屈服平台。因此，通常将 0.2%残余应变的应力定义为名义屈服强度 ( $f_{0.2}$ )。不锈钢通常具有良好的延展性，奥氏体型不锈钢在拉伸状态下的断裂后伸长率可达 50-60%，而奥氏体-铁素体双相型不锈钢的断裂后伸长率可达 30-40%。考虑到结构用不锈钢工作特点，本标准对于奥氏体型不锈钢的伸长率进行了一定程度的调整，与现行行业标准《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 保持一致。

本规程中对于不锈钢强度标准值的规定沿用现行行业标准《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 的规定；对于不锈钢的强度设计值，参考采用现行协会标准《不锈钢结构技术规范》CECS 410 的有关规定，抗力分项系数偏于安全地取与现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB50018 中的冷弯型钢相同。对于受拉、受压和受弯应力状态，按  $f = f_{0.2}/\gamma_R = f_{0.2}/1.165$  进行换算，对于受剪应力状态，按  $f_v = f_{0.2}/1.732$  进行换算。

表 3.1.4-1 为本规程推荐选用不锈钢在各国家与地区牌号对照。

表 3.1.4-1 不锈钢牌号对照表

| GB/T 20878 |               | 国际<br>ISO/TS 15510<br>ISO 4955 | 美国<br>ASTM A959 | 欧洲<br>EN 10088:1 | 日本<br>JIS G4303<br>JIS G4311 |
|------------|---------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------|
| 统一数字<br>代号 | 牌号            |                                |                 |                  |                              |
| S30408     | 06Cr19Ni10    | X5CrNi18-10                    | S30400,304      | 1.4301           | SUS304                       |
| S30403     | 022Cr19Ni10   | X2CrNi19-11                    | S30403,304L     | 1.4306           | SUS304L                      |
| S31608     | 06Cr17Ni12Mo2 | X5CrNiMo17-12-2                | S31600,316      | 1.4401           | SUS316                       |

|        |                |                 |             |        |           |
|--------|----------------|-----------------|-------------|--------|-----------|
| S31603 | 022Cr17Ni12Mo2 | X2CrNiMo17-12-2 | S31603,316L | 1.4404 | SUS316L   |
| S32169 | 07Cr19Ni11Ti   | X7CrNiTi18-10   | S32109,321H | 1.4541 | SUS321H   |
| S11873 | 022Cr18NbTi    | X2CrTiNb18      | S43940      | 1.4509 |           |
| S11972 | 019Cr19Mo2NbTi | X2CrMoTi18-2    | S44400,444  | 1.4521 | SUS444    |
| S22053 | 022Cr23Ni5Mo3N |                 | S32205,2205 |        |           |
| S22253 | 022Cr22Ni5Mo3N | X2CrNiMoN22-5-3 | S31803      | 1.4462 | SUS329J3L |

3.1.5 不锈钢的物理性能指标应按表3.1.5采用。

表3.1.5 不锈钢的物理性能指标

| 类型         | 统一数字代号 | 初始弹性模量 $E_s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 初始剪变模量 $G_s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 线膨胀系数 $\alpha$<br>(/°C) | 质量密度 $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 奥氏体型       | S30408 | 1.93×10 <sup>5</sup>                 | 7.42×10 <sup>4</sup>                 | 1.73×10 <sup>-5</sup>   | 7900                                |
|            | S30403 |                                      |                                      | 1.60×10 <sup>-5</sup>   | 8000                                |
|            | S31608 |                                      |                                      |                         |                                     |
|            | S31603 |                                      |                                      |                         |                                     |
|            | S30210 |                                      |                                      |                         |                                     |
|            | S32169 |                                      |                                      |                         |                                     |
| 铁素体型       | S11873 | 2.00×10 <sup>5</sup>                 | 7.69×10 <sup>4</sup>                 | 1.05×10 <sup>-5</sup>   | 7760                                |
|            | S11972 |                                      |                                      |                         |                                     |
| 奥氏体-铁素体双相型 | S22053 | 2.00×10 <sup>5</sup>                 | 7.69×10 <sup>4</sup>                 | 1.37×10 <sup>-5</sup>   | 7800                                |
|            | S22253 |                                      |                                      |                         |                                     |

【条文说明】3.1.5 不锈钢常温下初始弹性模型、线膨胀系数、质量密度数据来源于现行国家标准《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》GB/T 20878，初始剪变模量数据来源于现行协会标准《不锈钢结构技术规范》CECS 410。

## 3.2 混凝土

3.2.1 不锈钢管混凝土中混凝土可采用普通混凝土、高强混凝土、自密实混凝土与海砂混凝土，水胶比不宜大于0.45。混凝土强度等级不应低于C40，也不应高于C80，混凝土质量标准应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107的有关规定；当采用海砂混凝土时，海砂混凝土质量标准还应符合现行行业标准《海砂混凝土应用技术规范》JGJ 206的有关规定。

【条文说明】3.2.1 本规程编写基于编制组开展的不锈钢管混凝土结构的系统研究，研究对象包括分别内填普通混凝土、高强混凝土、自密实混凝土、海砂混凝土及再生混凝土的不锈钢管混凝土构件。

在不锈钢管中填充高强混凝土可以更加有效地利用不锈钢出色的延性性能，同时可以提高构件强度并减小截面面积，达到降低不锈钢用量的目的。但当混凝土强度等级超过C80时，需要进行专门分析与设计，以保证结构的可靠性。

在不锈钢管中填充自密实混凝土，可以充分利用自密实混凝土的填充性能，保证不锈钢管混凝土结构的浇筑质量，降低浇筑混凝土的劳动强度，加快施工进度，同时还可减轻混凝土施工引起的噪音污染等。

在不锈钢管中填充海砂混凝土，用海砂混凝土代替传统河砂混凝土，有益于保护环境，节约日益匮乏的河砂资源，但同时会引入相当高的氯离子、贝壳和轻质杂质成分，使用不锈钢管混凝土可降低氯离子腐蚀带来的结构可靠性降低的风险。

当有可靠依据时，也可采用再生混凝土。随着我国城镇化建设的快速推进，新老建筑物频繁更替扩大了对建筑原材料的需求，同时又会产生大量的建筑废弃物。将废弃混凝土通过破碎、加工等处理工序形成再生骨料，进而用于生产再生混凝土并用于工程结构是建筑业可持续发展方向之一。然而，再生混凝土在组成成分和力学性能（包括强度和收缩、徐变等）方面可能存在较大的离散性。因此，虽然不锈钢管的约束作用可有效地改善内填再生混凝土的脆性，但仍需有可靠试验、理论依据，以保证使用再生混凝土的可行性。

**3.2.2** 混凝土的抗压强度标准值、抗压强度设计值、弹性模量和剪变模量应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定执行。

**【条文说明】3.2.2** 若为再生混凝土，则相关力学指标应参考现行协会标准《钢管再生混凝土结构技术规程》T/CECS 625。

**3.2.3** 在本规程规定截面含钢率情况下，混凝土强度等级与不锈钢类型的组合关系宜按表3.2.3采用。

**表3.2.3 不同类型的不锈钢材对应的混凝土强度等级**

| 不锈钢类型      | 混凝土强度等级 |
|------------|---------|
| 奥氏体型、铁素体型  | C40~C60 |
| 奥氏体-铁素体双相型 | C50~C80 |

**【条文说明】3.2.3** 本规程规定截面含钢率情况下，对于奥氏体型、铁素体型不锈钢，其名义屈服强度较低，宜匹配C40~C60级混凝土；对于奥氏体-铁素体双相型不锈钢，其名义屈服强度较高，宜匹配C50~C80级混凝土。

### 3.3 连接材料

**3.3.1** 用于不锈钢管混凝土结构的焊接材料应符合现行国家标准《不锈钢焊条》GB/T 983、《不锈钢药芯焊丝》GB/T 17853、《埋弧焊用不锈钢焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 17854和《不锈钢焊丝和焊带》GB/T 29713的有关规定。选用的焊接材料应满足主体金属力学性能和耐腐蚀性能要求。

**3.3.2** 不宜将不同类型的不锈钢进行焊接，且不宜将不锈钢与不同种类金属材料进行焊接。

**3.3.3** 用于不锈钢管混凝土结构的连接紧固件应符合现行国家标准《紧固件机械性能不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.6、《紧固件机械性能不锈钢螺母》GB/T 3098.15和《环槽铆钉连接副技术条

件》GB/T 36993的有关规定。连接紧固件宜使用沉淀硬化型不锈钢S51740制成的高强螺栓和环槽铆钉，并宜进行固溶和时效处理，亦可使用达克罗高强螺栓。

**【条文说明】3.3.1~3.3.3** 本条规定参考现行协会标准《不锈钢结构技术规范》CECS 410。在不锈钢管混凝土结构设计中应注意连接材料的选用。焊接和其他制造工艺可通过点蚀、敏化、电偶作用、应力腐蚀开裂等机制对不锈钢的耐腐蚀性产生不利影响。当不锈钢与碳素钢、低合金钢、耐候钢或铝等异种金属连接时，需要注意异种金属（电偶）接头腐蚀问题。若与紧固件连接，螺栓材料应与耐腐蚀性最强的金属等效。

不锈钢紧固件宜进行固溶处理以保证其耐腐蚀能力，宜进行时效处理以提升其强度硬度。达克罗螺栓是经过锌铬涂层表面处理的高强螺栓。

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 不锈钢管混凝土结构设计应考虑工程情况、材料供应、构件运输与安装、施工条件和结构和结构的抗腐蚀性能与抗火性能要求，合理选择结构方案。不锈钢管混凝土结构的安全等级和设计使用年限应按现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 和《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的有关规定确定。

**【条文说明】4.1.1** 不锈钢管混凝土结构构件基本性能试验研究表明，不锈钢管混凝土结构构件相比于钢筋混凝土结构构件具有承载力高、延性性能好的优点，但同时工程造价较高。因此，相比碳素钢管混凝土，不锈钢管混凝土更适合在沿海等气候较为恶劣的地区和涉水区域使用，以充分发挥不锈钢管混凝土结构在耐久性能方面的优势。此外，应注意合理选材，并在运输与安装过程中避免对不锈钢的损伤。

根据现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 和《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153，普通房屋和构筑物的设计使用年限为 50 年，标志性建筑和特别重要的建筑结构的设计使用年限为 100 年，经合理设计的不锈钢管混凝土结构可充分发挥长设计使用年限下的耐久性好和便于维护的优势。

**4.1.2** 不锈钢管混凝土结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计，不锈钢管混凝土结构的极限状态应包括下列内容：

1 承载能力极限状态应包括：构件或连接的强度破坏、脆性断裂，因过度变形而不适用于继续承载，结构或构件丧失稳定，结构转变为机动体系和结构倾覆。

2 正常使用极限状态应包括：影响结构、构件或非结构构件正常使用或外观的变形，影响正常使用的振动，影响正常使用或耐久性能的局部损坏。

**【条文说明】4.1.2** 按承载能力极限状态设计时，应考虑荷载效应的基本组合，必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合，结构构件的承载力计算应采用材料强度的设计值。按正常使用极限状态设计时，应根据不同的设计要求，采用荷载的标准组合、频遇组合或准永久组合。

**4.1.3** 不锈钢管混凝土结构构件应按空不锈钢管进行施工阶段的强度、稳定性和变形验算，并应符合现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755、《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 和《钢-混凝土组合结构施工规范》GB 50901 的有关规定。

**4.1.4** 不锈钢管混凝土构件的构造应符合下列规定：

1 圆不锈钢管混凝土构件的截面直径不宜小于 300mm，壁厚不应小于 4mm。矩形不锈钢管混凝土构件的截面短边不宜小于 200mm，壁厚不应小于 4mm。

2 圆不锈钢管混凝土构件的截面含钢率（ $\alpha_s$ ）不应小于 0.06，且不宜大于 0.20；矩形不锈钢管混凝土构件的截面含钢率（ $\alpha_s$ ）不应小于 0.10，且不宜大于 0.20。

3 矩形不锈钢管混凝土构件的截面长宽比（ $D/B$ ）不应大于 1.5。

4 圆不锈钢管混凝土构件的约束效应系数标准值（ $\xi$ ）不应小于 0.6，且不应大于 4.0；矩形不锈钢管混凝土构件的约束效应系数标准值（ $\xi$ ）不应小于 1.0，且不应大于 4.0；约束效应系数标准值（ $\xi$ ）和设计值（ $\xi_0$ ）应按下列公式计算：

$$\xi = \frac{A_s \cdot f_{0.2}}{A_c \cdot f_{ck}} \quad (4.1.4-1)$$

$$\xi_0 = \frac{A_s \cdot f}{A_c \cdot f_c} \quad (4.1.4-2)$$

式中：  $A_s$ 、 $A_c$  —— 分别为不锈钢管和混凝土的截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$f_{0.2}$  —— 不锈钢的名义屈服强度（ $\text{N/mm}^2$ ）；

$f_{ck}$  —— 混凝土的轴心抗压强度标准值（ $\text{N/mm}^2$ ）；

$f$  —— 不锈钢的抗拉强度设计值（ $\text{N/mm}^2$ ）；

$f_c$  —— 混凝土的轴心抗压强度设计值（ $\text{N/mm}^2$ ）。

**【条文说明】4.1.4** 研究表明，由于不锈钢管对核心混凝土的约束作用，使混凝土材料本身力学性能得到改善，即强度得以提高，塑性和韧性性能大为改善。同时，由于混凝土的存在可以延缓或阻止钢管发生内凹的局部屈曲。因此，不仅钢管和混凝土本身的材料力学性能对不锈钢管混凝土性能的影响很大，而且二者几何特性和物理特性参数如何“匹配”，也将对不锈钢管混凝土力学性能起着非常重要的影响。研究表明，可以以“约束效应系数”作为衡量这种相互作用的基本参数；约束效应系数越大，构件的延性越好，反之则越差。在本条给出的约束效应系数限值范围内，可采用规程所给出的承载力计算方法对不锈钢管混凝土构件进行偏于安全的设计计算，同时约束效应系数的下限值的规定也保证了不锈钢管混凝土构件必要的延性。

**4.1.5** 进行抗震设计时，不锈钢管混凝土柱的轴压比（ $n$ ）应按下式计算，结构的抗震等级应根据现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 确定，并不宜大于表 4.1.5 中的限值。

$$n = \frac{N}{\varphi \cdot N_u} \quad (4.1.5)$$

式中：  $N$  —— 不锈钢管混凝土柱的轴向压力设计值（ $\text{N}$ ）；

$N_u$  —— 不锈钢管混凝土柱的强度承载力设计值（ $\text{N}$ ）；

$\varphi$  —— 轴心受压构件稳定系数，按本规程附录 A 确定。

**表 4.1.5 不锈钢管混凝土柱轴压比限值**

| 结构类型     | 柱类型 | 圆不锈钢管混凝土 |      |      | 矩形不锈钢管混凝土 |      |      |
|----------|-----|----------|------|------|-----------|------|------|
|          |     | 抗震等级     |      |      |           |      |      |
|          |     | 一级       | 二级   | 三、四级 | 一级        | 二级   | 三、四级 |
| 框架结构     | 框架柱 | 0.70     | 0.80 | 0.90 | 0.65      | 0.75 | 0.85 |
| 框架-支撑结构  | 框架柱 | 0.75     | 0.85 | 0.95 | 0.70      | 0.80 | 0.90 |
| 框架-核心筒结构 | 框架柱 | 0.75     | 0.85 | 0.95 | 0.70      | 0.80 | 0.90 |
|          | 转换柱 | 0.65     | 0.75 | 0.85 | 0.60      | 0.70 | 0.80 |

注：剪跨比不大于2时，轴压比限值应比表中数值减少0.05。

**【条文说明】4.1.5** 依据目前关于不锈钢管混凝土抗震性能的研究，相同条件下，不锈钢管混凝土构件的延性优于碳素钢管混凝土构件，因此其抗震设计暂参照现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定进行。

## 4.2 设计指标

**4.2.1** 不锈钢管混凝土组合截面的轴心受压强度设计值可按下式计算：

$$f_{sc} = \begin{cases} (1.14 + 1.02\xi_0) \cdot f_c & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ (1.18 + 0.85\xi_0) \cdot f_c & \text{(矩形不锈钢管混凝土)} \end{cases} \quad (4.2.1)$$

式中： $\xi_0$  —— 约束效应系数设计值；

$f_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土组合截面的轴心抗压强度设计值（N/mm<sup>2</sup>）；

$f_c$  —— 混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm<sup>2</sup>）。

**【条文说明】4.2.1** 基于收集和整理的现有试验结果，针对不同不锈钢等级、混凝土强度等级、含钢率进行计算分析后表明，可采用本规定的设计方法对不锈钢管混凝土基本构件进行偏于安全的抗力计算。

图 4.2.1.1 给出了典型不锈钢管混凝土短柱的轴压荷载比  $N/N_u$ -纵向平均应变  $\varepsilon$  关系曲线。根据不锈钢管对核心混凝土约束效应的大小，曲线可分为 A、B、C 三种类型，且当约束效应系数逐渐降低时，曲线由 A 类向 B 类和 C 类转变。对于 A 类曲线，曲线初期呈线弹性，经过点 1 后构件刚度逐渐降低，随着不同构件约束效应系数的降低，点 1 和点 2 之间的构件刚度减小。由于不锈钢具有较高的塑性硬化特性，后期构件刚度有所上升，承载能力继续增长直至到达点 3；B 类曲线和 A 类曲线较为相似，但在点 1'至点 2'之间构件刚度降低；C 类具有应变软化响应，这在碳素钢管混凝土中很常见。一般而言，C 类不锈钢管混凝土短柱的峰值荷载后承载力下降幅度远小于碳素钢管混凝土短柱。结果表明，与碳素钢管混凝土柱中的钢管相比，不锈钢管在加载后期能更好地约束其核心混凝土。

进一步对比碳素钢管混凝土和不锈钢管混凝土短柱的  $N/N_u$ - $\varepsilon$  全过程曲线，图 4.2.1.2 给出了约束效应系数相同的典型碳素钢管混凝土和不锈钢管混凝土构件对比情况，对于圆形构件， $\xi$ 为 0.75，对于矩形构件， $\xi$ 为 3.52。由于不锈钢的比例极限低于碳素钢，曲线较早进入非线性阶段，因此不锈钢

管混凝土柱的轴压刚度低于碳素钢管混凝土柱。不锈钢的轴压应力-应变关系曲线上有明显的非线性强化过程，不锈钢管混凝土柱表现出更为平缓的屈曲行为。同时，不锈钢管混凝土柱的峰值荷载后强度大于其对应的碳素钢管混凝土柱，这一特性使得不锈钢管混凝土柱非常适合作可能承受爆炸、撞击和火灾等极端作用的结构构件。

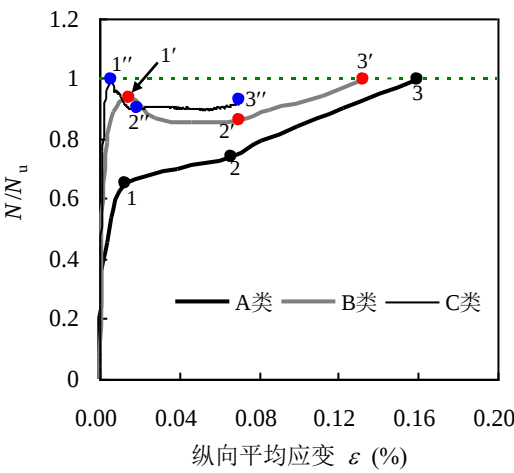
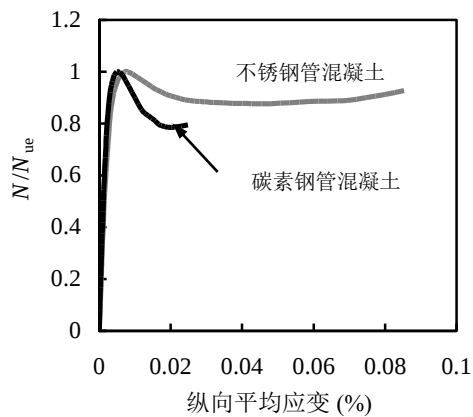
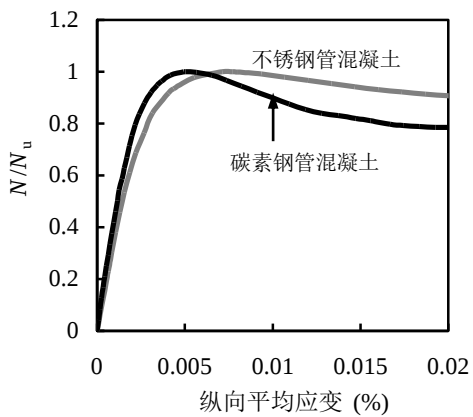


图 4.2.1-1 不锈钢管混凝土短柱典型轴压全过程曲线

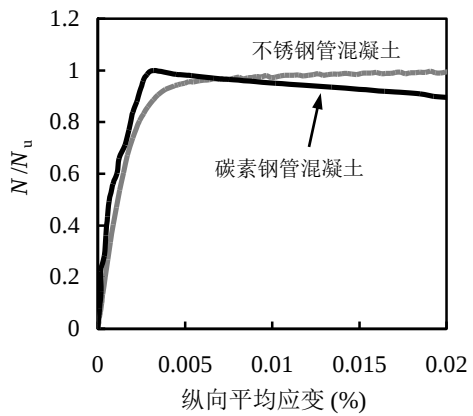
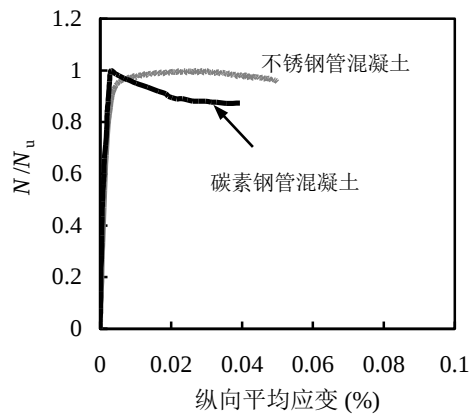


(1) 全过程曲线

(a) 圆形截面



(2) 初始阶段曲线



(1) 全过程曲线

(2) 初始阶段曲线

(b) 矩形截面

图 4.2.1-2 不锈钢管混凝土与碳素钢管混凝土短柱轴压荷载比-应变全过程曲线对比

对于圆不锈钢管混凝土短柱，收集了目前已有的 51 个试验数据，图 4.2.1.3 给出了这些数据的计算结果与试验结果对比。结果表明，对于目前已收集到的试验结果 ( $N_{ue}$ )，本规程公式对条文 4.1.4 参数范围内的构件全部给出偏于安全的计算结果 ( $N_{uc}$ )， $N_{uc}/N_{ue}$  的平均值  $\mu=0.821$ ，标准差  $\sigma=0.081$ 。

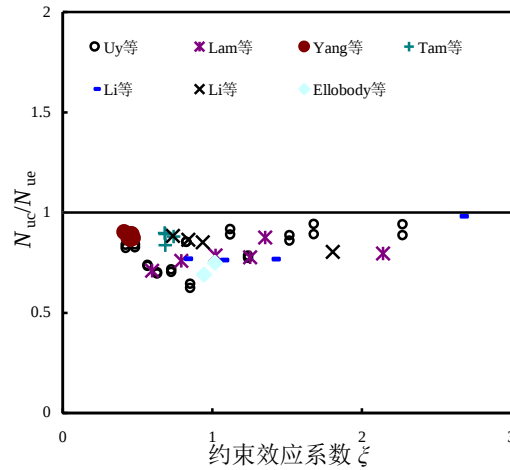


图 4.2.1.3 圆不锈钢管混凝土短柱承载力计算结果与试验结果对比

对于矩形不锈钢管混凝土短柱，收集了目前已有的 52 个试验数据，图 4.2.1.4 给出了这些数据的计算结果与试验结果对比。结果表明，对于已收集到的试验结果 ( $N_{ue}$ )，本规程公式对条文 4.1.4 参数范围内的构件全部给出偏于安全的计算结果 ( $N_{uc}$ )， $N_{uc}/N_{ue}$  的平均值  $\mu=0.860$ ，标准差  $\sigma=0.076$ 。

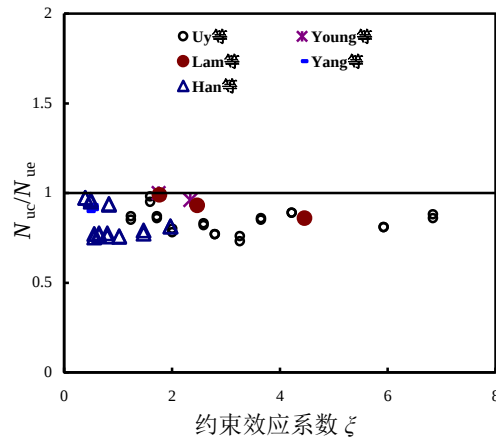


图 4.2.1.4 矩形不锈钢管混凝土短柱承载力计算结果与试验结果对比

4.2.2 不锈钢管混凝土构件组合截面的轴压刚度可按下式计算

$$(EA)_{sc} = E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c \quad (4.2.2)$$

式中:  $(EA)_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的轴压刚度 (N);

$E_s$ 、 $E_c$  —— 分别为不锈钢和混凝土的弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>);

$A_s$ 、 $A_c$  —— 分别为不锈钢管和混凝土的截面面积 (mm<sup>2</sup>)。

**4.2.3** 不锈钢管混凝土构件组合截面的弹性抗弯刚度可按下式计算:

$$(EI)_{sc} = E_s \cdot I_s + a \cdot E_c \cdot I_c \quad (4.2.3)$$

式中:  $(EI)_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的弹性抗弯刚度 (N·mm<sup>2</sup>);

$I_s$ 、 $I_c$  —— 分别为不锈钢管和核心混凝土的截面惯性矩 (mm<sup>4</sup>);

$a$  —— 混凝土刚度折减系数, 对于圆不锈钢管混凝土,  $a = 0.8$ ;  
对于矩形不锈钢管混凝土,  $a = 0.6$ 。

**【条文说明】4.2.2、4.2.3** 这两条规定参考了现行行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138 的相关条文。

**4.2.4** 不锈钢管混凝土组合截面的抗剪强度设计值可按下式计算:

$$f_{sv} = \begin{cases} (0.422 + 0.313\alpha_s^{2.33}) \cdot \xi_o^{0.134} \cdot f_{sc} & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ (0.455 + 0.313\alpha_s^{2.33}) \cdot \xi_o^{0.25} \cdot f_{sc} & \text{(矩形不锈钢管混凝土)} \end{cases} \quad (4.2.4)$$

式中:  $f_{sv}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的受剪强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>);

$\alpha_s$  —— 构件截面含钢率,  $\alpha_s = A_s/A_c$ 。

**【条文说明】4.2.4** 采用数值分析方法可以计算获得不锈钢管混凝土受纯剪切时的名义剪应力 ( $f_{sv} = T/W_{sr,t}$  或  $V/A_{sc}$ ) 和剪应变 ( $\gamma$ ) 关系曲线, 基于理论分析和试验研究结果, 可确定不锈钢管混凝土构件截面的组合受剪强度标准值  $f_{sv}$  的计算公式, 即式 (4.2.4)。

**4.2.5** 不锈钢管混凝土构件组合截面的弹性抗剪刚度可按下式计算:

$$(GA)_{sc} = G_s \cdot A_s + G_c \cdot A_c \quad (4.2.5)$$

式中:  $(GA)_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的弹性抗剪刚度 (N);

$G_s$ 、 $G_c$  —— 分别为不锈钢管和混凝土的剪变模量 (N/mm<sup>2</sup>)。

**4.2.6** 不锈钢管混凝土构件组合截面的弹性抗扭刚度可按下式计算:

$$G_{sc} \cdot I_{p,sc} = G_s \cdot I_{p,s} + G_c \cdot I_{p,c} \quad (4.2.6)$$

式中:  $I_{p,sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的极惯性矩 (mm<sup>4</sup>);

$I_{p,s}$ 、 $I_{p,c}$  —— 分别为不锈钢管和核心混凝土截面的极惯性矩 (mm<sup>4</sup>)。

## 4.3 构造要求

4.3.1 不锈钢管混凝土结构的构造设计应满足下列防腐要求：

- 1 焊接连接应使用全熔透焊缝，并应选用合理的焊接顺序或焊接后喷丸；
- 2 不锈钢与碳素钢材料及其他金属材料接触、紧固时，应避免不锈钢与碳素钢材料及其他金属直接接触，并应采用非金属的隔离材料；
- 3 应采取合理的节点构造措施和构件或板件放置方向，并应避免不锈钢表面积灰。

【条文说明】4.3.1 在进行不锈钢管混凝土结构构造设计时，为充分发挥不锈钢的耐腐蚀性能，应考虑合理的防腐蚀构造，以避免出现灰尘滞留、裂隙、特定环境中应力腐蚀开裂、点腐蚀与电偶腐蚀，保证充分发挥不锈钢优越的抗腐蚀性能。焊接后喷丸应选用淬火钢球，不得使用铁丸。当不锈钢与碳素钢材料及其他金属材料接触、紧固时，可选用非金属材料制成的垫圈、套圈等隔离材料。

4.3.2 在不锈钢管混凝土的管壁上可加焊支、吊架等配件，并应对焊接配件后的不锈钢管混凝土构件进行防腐设计。当在管壁上支承重量较大的支、吊架时，支、吊架宜采用加强环的形式与不锈钢管混凝土构件连接，并应验算管壁强度。

4.3.3 不锈钢管径厚比或宽厚比应满足施工阶段要求，不应大于表 4.3.3 中的限值，当不锈钢管混凝土截面的径厚比或宽厚比大于表 4.3.3 规定限值时，可在不锈钢管内壁焊接纵向加劲肋（图 4.3.3），但在进行构件承载力的计算过程中不应计入加劲肋的影响。加劲肋可选用不锈钢或碳素钢，当采用海砂混凝土时，应选用不锈钢加劲肋。不锈钢管中设置加劲肋时，应符合下列规定：

表4.3.3 施工阶段不锈钢管径厚比或宽厚比限值

| 不锈钢类型      | 圆形截面 | 矩形截面 |
|------------|------|------|
| 奥氏体型、铁素体型  | 90   | 45   |
| 奥氏体-铁素体双相型 | 50   | 30   |

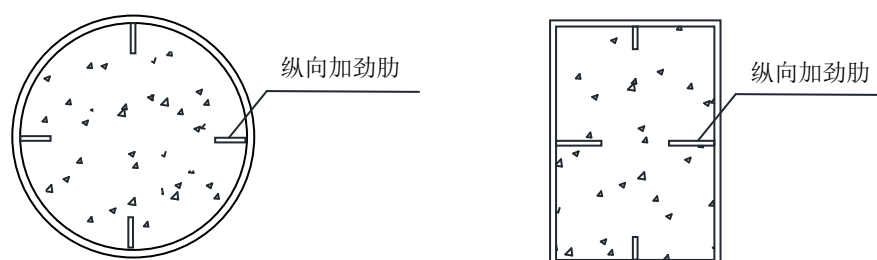


图 4.3.3 提高不锈钢管稳定性的构造措施示意图

- 1 矩形不锈钢管混凝土设置加劲肋后的肋间子板件的宽厚比 ( $\frac{b_0}{t}$ ) 应满足下式要求:

$$\frac{b_0}{t} \leq 45 \sqrt{\frac{235}{f_{0.2}} \frac{E_s}{206000}} \quad (4.3.3-1)$$

式中:  $b_0$  —— 矩形不锈钢管肋间子板件宽度 (mm);

$f_{0.2}$  —— 不锈钢的名义屈服强度 (N/mm<sup>2</sup>);

$t$  —— 矩形不锈钢管厚度 (mm)。

- 2 加劲肋的刚度 ( $I_{s,s}$ ) 应满足下式要求, 当采用圆形不锈钢管混凝土时,  $b_0$  应取为构件外直径的 1/2:

$$I_{s,s} \geq 3.1 \times 10^{-4} \cdot \left( \frac{b_0}{t} \right)^{3.5} \frac{f_{0.2}}{280} \cdot t^4 \quad (4.3.3-2)$$

式中:  $I_{s,s}$  —— 加劲肋的刚度 (mm<sup>4</sup>)。

**【条文说明】4.3.3** 当不锈钢管混凝土钢管的宽厚比超过空钢管宽厚比的限值时, 属于薄壁不锈钢管混凝土结构, 可通过设置纵向加劲肋使子板件和加劲肋满足式 (4.3.3-1) 和 (4.3.3-2), 从而提高整体稳定性。

由于不锈钢管内加劲肋或栓钉与不锈钢接触区域会被混凝土填充, 无法在接触区形成可供电子转移的电解质溶液, 故不会发生电偶腐蚀, 因此除不锈钢可作为加劲肋或栓钉材料选择外, 亦可选用碳素钢。但当使用海砂混凝土时, 则为避免电偶腐蚀的发生, 应使用不锈钢加劲肋。

## 5 构件承载力计算

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 本章适用于承受静力荷载或间接承受动力荷载作用的不锈钢管混凝土构件承载力计算。对直接承受动力荷载的构件应进行专门研究。

**【条文说明】5.1.1** 本章中不锈钢管混凝土构件的计算和设计规定，无论从理论推导还是试验分析，都是建立在静力荷载或间接动力荷载作用的基础上的。

**5.1.2** 不锈钢管混凝土框架柱的长细比不宜大于 80，其余受压构件的长细比不宜大于 150；不锈钢管混凝土受拉构件的长细比不宜大于 200。

**【条文说明】5.1.2** 本条规定主要是为了避免不锈钢管的柔度过大，在运输、安装过程中因自重过大而弯曲。不锈钢管混凝土构件的容许长细比应满足国家现行标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 和《不锈钢结构技术规程》CECS 410 的有关规定，其中《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 对容许长细比要求更严格，故宜按该标准执行。

**5.1.3** 在浇筑混凝土时，由施工阶段荷载引起的不锈钢管初始最大压应力值不应超过空不锈钢管稳定承载力对应的临界应力值的 35%。

**【条文说明】5.1.3** 建筑结构中钢管混凝土施工中多采用先安装钢管后浇灌混凝土的方式，在混凝土终凝前，应对独自承受施工荷载和混凝土自重初荷载的不锈钢管进行验算，其中施工荷载应根据现行国家规范《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定。在验算施工阶段空钢管结构时，不考虑地震组合。研究表明，施工阶段荷载在空钢管上引起的初始应力虽然对使用阶段不锈钢管混凝土构件的强度承载力影响不大，但会使其更早进入弹塑性阶段，从而改变该阶段的组合切线模量，最终影响构件的稳定承载力。根据对几十个钢管混凝土构件的试验结果分析和大量的理论计算，应控制截面的平均初始压应力不超过空钢管临界应力值的 35%。

### 5.2 轴心受力构件承载力计算

**5.2.1** 不锈钢管混凝土轴心受压构件的承载力应满足下列公式要求：

$$N \leq \varphi \cdot N_u \quad (5.2.1-1)$$

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

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

$$a = \frac{1 + (35 + 2\lambda_p - \lambda_0) \cdot e}{(\lambda_p - \lambda_0)^2} \quad (5.2.1-4)$$

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

$$c = 1 - a \cdot \lambda_0^2 - b \cdot \lambda_0 \quad (5.2.1-6)$$

$$e = \frac{-d}{(\lambda_p + 35)^3} \quad (5.2.1-7)$$

$$d = \begin{cases} [13000 + 4657 \ln(\frac{235}{f_{0.2}})] \cdot (\frac{25}{f_{ck} + 5})^{0.3} \cdot (\frac{\alpha_s}{0.1})^{0.05} & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ [13500 + 4810 \ln(\frac{235}{f_{0.2}})] \cdot (\frac{25}{f_{ck} + 5})^{0.3} \cdot (\frac{\alpha_s}{0.1})^{0.05} & \text{(矩形不锈钢管混凝土)} \end{cases} \quad (5.2.1-8)$$

$$\lambda_p = \begin{cases} \frac{1743}{\sqrt{f_{0.2}}} & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ \frac{1811}{\sqrt{f_{0.2}}} & \text{(矩形不锈钢管混凝土)} \end{cases} \quad (5.2.1-9)$$

$$\lambda_0 = \begin{cases} \pi \sqrt{\frac{420\xi_0 + 550}{(1.02\xi_0 + 1.14) \cdot f_{ck}}} & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ \pi \sqrt{\frac{220\xi_0 + 450}{(0.85\xi_0 + 1.18) \cdot f_{ck}}} & \text{(矩形不锈钢管混凝土)} \end{cases} \quad (5.2.1-10)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{4L_0}{D} & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ \frac{2\sqrt{3}L_0}{D} & \text{(矩形不锈钢管混凝土绕强轴弯曲)} \\ \frac{2\sqrt{3}L_0}{B} & \text{(矩形不锈钢管混凝土绕弱轴弯曲)} \end{cases} \quad (5.2.1-11)$$

式中:  $N_u$  —— 不锈钢管混凝土轴心受压构件的强度承载力 (N);  
 $A_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件的组合截面面积 (mm<sup>2</sup>);  
 $\varphi$  —— 轴心受压构件稳定系数;  
 $L_0$  —— 构件的计算长度 (mm);  
 $D$  —— 圆不锈钢管外直径或矩形不锈钢管长边边长 (mm);  
 $B$  —— 矩形不锈钢管宽边边长 (mm);  
 $\lambda$  —— 构件的长细比;  
 $\lambda_p$  —— 构件弹性失稳的界限长细比;  
 $\lambda_0$  —— 构件弹塑性失稳的界限长细比;

$a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  —— 系数。

**5.2.2** 不锈钢管混凝土轴心受拉构件的承载力 ( $N_t$ ) 不应小于轴力设计值 ( $N$ ), 并应按下列式计算:

$$N_t = \psi \cdot f \cdot A_s \quad (5.2.2)$$

式中：  $N_t$  —— 不锈钢管混凝土轴心受拉构件的承载力 (N)；  
 $\psi$  —— 计算系数，对圆不锈钢管混凝土取 1.1，对矩形不锈钢管混凝土取 1.05；  
 $f$  —— 不锈钢管抗拉强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)；  
 $A_s$  —— 不锈钢管的截面面积 (mm<sup>2</sup>)。

【条文说明】5.2.1 本条对轴心受力构件的计算作出了规定。

### 1 轴心受压构件

考虑初始弯曲  $L_0/1000$ ，按偏心受压构件的方法计算不锈钢管混凝土构件轴心受压时的临界应力  $\bar{\sigma}_\alpha$ ，与大量试验结果吻合良好。基于此方法得到了稳定系数  $\varphi = \bar{\sigma}_\alpha / f_{scy}$ 。经回归分析， $\varphi$  值可按式 (5.2.1-3) 计算。

编制组对不锈钢管混凝土长柱进行了轴压试验，结果表明：不锈钢管混凝土长柱在达到峰值载荷之前，跨中挠度很小。在达到峰值后，跨中挠度随着载荷的减小而快速增加。对于长细比较大的矩形构件，通常在两个垂直方向上观察到明显的弯曲变形，而长细比较小的方截面构件主要在一个方向上弯曲。在试验中，矩形柱绕其长轴的面积的二阶矩远大于绕短轴，因此观察到的挠度主要沿其长轴。通常，在初始加载阶段，挠度曲线由于初始整体缺陷的随机分布而并不完全对称。过峰值点后，挠度曲线近似呈正弦半波形状。试验结果表明，不锈钢管混凝土柱与碳素钢管混凝土柱在试验观察结果和破坏模态上没有明显区别。

为评估本条文的计算准确性，收集了 420 个圆形截面和 234 个矩形截面的碳素钢管混凝土数据、与 12 个圆截面和 12 个矩形截面的不锈钢管混凝土数据。表 5.2.1 给出了对各类构件的试验值  $N_{ue}$  与计算值  $N_{uc}$  比较结果，可以看出，与碳素钢管混凝土柱相比，本条给出的公式对不锈钢管混凝土给出的承载力预测偏于保守，但在计算结果的离散程度方面没有显著差异。

表5.2.1 不锈钢管混凝土计算结果与碳素钢管混凝土计算结果对比

| $N_{ue}/N_{uc}$ | 碳素钢管混凝土 |          | 不锈钢管混凝土 |          |
|-----------------|---------|----------|---------|----------|
| 圆截面             | 平均值     | 标准差      | 平均值     | 标准差      |
|                 | 1.080   | 0.189    | 1.255   | 0.181    |
| 矩形截面            | $\mu$   | $\sigma$ | $\mu$   | $\sigma$ |
|                 | 1.092   | 0.161    | 1.175   | 0.089    |

### 2 轴心受拉构件

不锈钢管混凝土轴心受拉时，钢管的径向变形将受到管内核心混凝土的制约。由于二者之间的相互作用使钢管处于复杂受力状态。经过试验研究和参数分析，可采用公式 (5.2.1-12) 偏于安全的计算轴心受拉构件的承载力。

## 5.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算

5.3.1 不锈钢管混凝土受弯构件的承载力应按下式计算：

$$M_u = \gamma_m \cdot W_{sc} \cdot f_{sc} \quad (5.3.1-1)$$

$$\gamma_m = \begin{cases} 1.1 + 0.48 \ln(\xi_0 + 0.1) & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ 1.04 + 0.48 \ln(\xi_0 + 0.1) & (\text{矩形不锈钢管混凝土}) \end{cases} \quad (5.3.1-2)$$

$$W_{sc} = \begin{cases} \frac{\pi D^3}{32} & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ \frac{B \cdot D^2}{6} & (\text{矩形不锈钢管混凝土绕强轴弯曲}) \\ \frac{B^2 \cdot D}{6} & (\text{矩形不锈钢管混凝土绕弱轴弯曲}) \end{cases} \quad (5.3.1-3)$$

式中：  $M$  —— 构件计算段范围内的最大弯矩设计值（N·mm）；  
 $M_u$  —— 构件的受弯承载力（N·mm）；  
 $\gamma_m$  —— 构件截面受弯塑性发展系数；  
 $W_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面受弯模量（mm<sup>3</sup>）。

【条文说明】5.3.1 编制组计算了不锈钢管混凝土纯弯构件的  $M/W_{sc}-\epsilon_{m,t}$ （截面纤维最大拉应变）关系曲线见图 5.3.1.1。可以看出，即使构件跨中截面拉区应变达到 0.02 以上时，不锈钢管混凝土受弯构件的弯矩仍有继续增大的趋势，表现出良好的塑性性能。截面含钢率、混凝土强度和不锈钢类型（名义屈服强度）对不锈钢管混凝土纯弯构件  $M/W_{sc}-\epsilon_{m,t}$  关系曲线的影响规律与其对碳素钢管混凝土构件的影响规律类似。

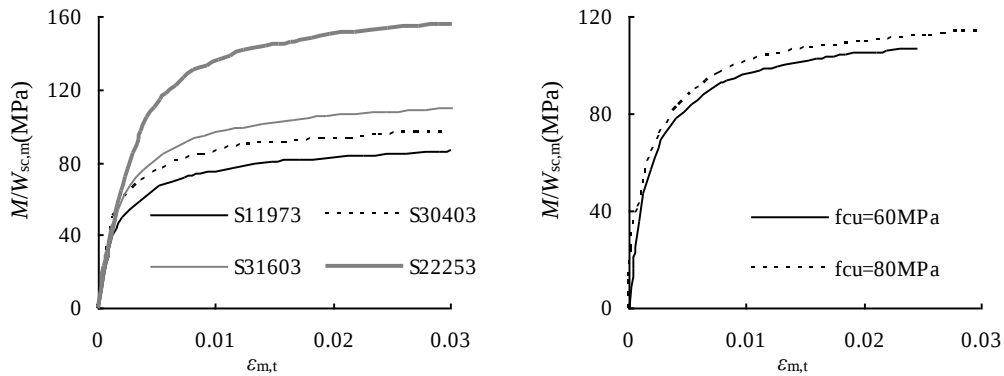


图 5.3.1.1 不锈钢管混凝土构件  $M/W_{sc}-\epsilon_{m,t}$  关系

考虑到受弯构件的受力特点和正常使用极限状态要求，参考碳素钢管混凝土的研究结果，取构件跨中截面拉区外缘应变（ $\epsilon_{m,t}$ ）为 0.01 时对应的弯矩为不锈钢管混凝土构件的受弯承载力。计算了不同含钢率和材料强度情况下不锈钢管混凝土受弯构件的承载力。通过对计算结果的分析发现，与碳素钢管混凝土纯弯构件类似，不锈钢管混凝土受弯构件的承载力  $M_u$  主要和构件截面受弯模量  $W_{sc}$ 、承载力指标  $f_{scy}$  和约束效应系数  $\xi_s$  有关。从图 5.3.1.2 中受弯构件承载力计算结果与试验结果比

值 ( $M_{uc}/M_{ue}$ ) 随  $\xi_s$  的变化可以看出, 对于不锈钢管混凝土受弯构件, 公式 (5.3.1-1) 给出了较为保守的计算结果。

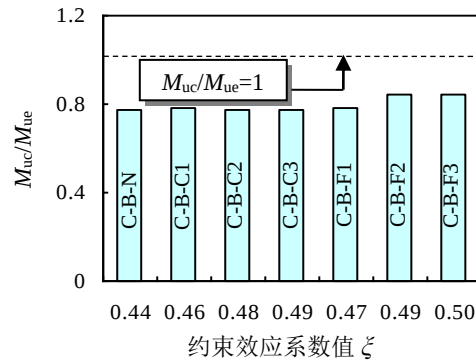


图 5.3.1.2 不锈钢管混凝土受弯构件的承载力计算值与试验值对比

5.3.2 矩形不锈钢管混凝土双向受弯构件的承载力应满足下式要求:

$$\left(\frac{M_x}{M_{ux}}\right)^{1.8} + \left(\frac{M_y}{M_{uy}}\right)^{1.8} \leq 1 \quad (5.3.2)$$

式中:  $M_x$ 、 $M_y$  —— 所计算构件段范围内绕强轴和弱轴的弯矩设计值 ( $N \cdot mm$ );

$M_{ux}$ 、 $M_{uy}$  —— 构件绕强轴和弱轴的受弯承载力 ( $N \cdot mm$ ), 按式 (5.3.1-1) 计算。

**【条文说明】5.3.2** 对于单向受弯构件考虑截面的塑性发展, 对于双向受弯构件考虑两个方向弯矩之间的相互作用。

5.3.3 不锈钢管混凝土构件在一个平面内承受轴力和弯矩共同作用时, 承载力应符合下列规定:

1 强度承载力应符合下列规定:

1) 当  $\frac{N}{N_u} \geq 2\eta_0$  时, 应满足下式要求:

$$\frac{N}{N_u} + \frac{a \cdot \beta_m \cdot M}{M_u} \leq 1 \quad (5.3.3-1)$$

2) 当  $\frac{N}{N_u} < 2\eta_0$  时, 应满足下式要求:

$$\frac{-b \cdot N^2}{N_u^2} - \frac{c \cdot N}{N_u} + \frac{\beta_m \cdot M}{M_u} \leq 1 \quad (5.3.3-2)$$

$$a = 1 - 2\eta_0 \quad (5.3.3-3)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_0}{\eta_0^2} \quad (5.3.3-4)$$

$$c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0} \quad (5.3.3-5)$$

$$\zeta_0 = \begin{cases} 1 + 0.18\zeta^{-1.15} & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ 1 + 0.14\zeta^{-1.3} & (\text{矩形不锈钢管混凝土}) \end{cases} \quad (5.3.3-6)$$

$$\eta_0 = \begin{cases} 0.1 + 0.14\zeta^{-0.84} & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ 0.1 + 0.13\zeta^{-0.81} & (\text{矩形不锈钢管混凝土}) \end{cases} \quad (5.3.3-7)$$

2 稳定承载力应符合下列规定：

1) 当  $\frac{N}{N_u} \geq 2\varphi^3 \cdot \eta_0$  时，应满足下式要求：

$$\frac{N}{\varphi \cdot N_u} + \left(\frac{a}{d}\right) \cdot \frac{\beta_m \cdot M}{M_u} \leq 1 \quad (5.3.3-8)$$

2) 当  $\frac{N}{N_u} < 2\varphi^3 \cdot \eta_0$  时，应满足下式要求：

$$\frac{-b \cdot N^2}{N_u^2} - \frac{c \cdot N}{N_u} + \left(\frac{1}{d}\right) \frac{\beta_m \cdot M}{M_u} \leq 1 \quad (5.3.3-9)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2 \cdot \eta_0 \quad (5.3.3-10)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_0}{\varphi^3 \cdot \eta_0^2} \quad (5.3.3-11)$$

$$c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0} \quad (5.3.3-12)$$

$$d = \begin{cases} 1 - 0.4\left(\frac{N}{N_E}\right) & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ 1 - 0.25\left(\frac{N}{N_E}\right) & (\text{矩形不锈钢管混凝土}) \end{cases} \quad (5.3.3-13)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{sc} \cdot A_{sc}}{\lambda^2} \quad (5.3.3-14)$$

式中：N —— 所计算构件段范围内的最大轴向压力设计值（N）；

$N_E$  —— 欧拉临界力（N）；

$\beta_m$  —— 等效弯矩系数，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定取值；

$\varphi$  —— 弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定系数，按本规程式（5.2.1-3）计算，或按本规程附录 A 确定。

**5.3.4** 对于绕强轴弯曲的矩形不锈钢管混凝土压弯构件，除应按本规程式（5.3.3-8）、式（5.3.3-9）验算弯矩作用平面内的整体稳定性外，还应按下式验算弯矩作用平面外的稳定性：

$$\frac{N}{\varphi \cdot N_u} + \frac{\beta_m \cdot M}{1.4 M_u} \leq 1 \quad (5.3.4)$$

式中： $\varphi$  —— 弯矩作用平面外的轴心受压构件稳定系数，按本规程式（5.2.1-3）计算，或按本规程附录 A 确定。

5.3.5 不锈钢管混凝土拉弯构件的承载力应符合下列规定：

$$\frac{N}{\psi \cdot f \cdot A_s} + \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (5.3.5)$$

式中：  $M_u$  —— 构件的受弯承载力（N·mm）；

$N$  —— 所计算构件段范围内的最大轴向拉力设计值（N）；

$\psi$  —— 抗拉强度承载力计算系数，圆不锈钢管混凝土取 1.1，矩形不锈钢管混凝土取 1.05；

$f$  —— 不锈钢的抗拉、抗压和抗弯强度设计值（N/mm<sup>2</sup>）；

$A_s$  —— 不锈钢管的截面面积（mm<sup>2</sup>）。

【条文说明】5.3.3~5.3.5 对于不锈钢管混凝土，在构件产生严重的变形后，可表现出很好的延性，从而提高结构整体的延性。图 5.3.5-1 给出了不锈钢管混凝土压弯构件典型  $N-M$  相关曲线。

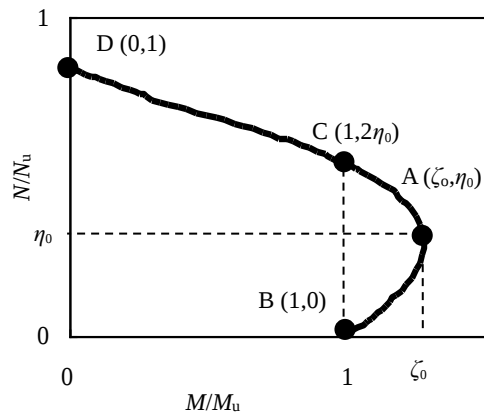


图 5.3.5-1 不锈钢管混凝土压弯构件典型  $N-M$  相关曲线

5.3.6 对于承受双向压弯或双向拉弯的矩形不锈钢管混凝土构件，可将本规程式（5.3.3-1）和式

（5.3.3-2）中的 “ $\frac{M}{M_u}$ ” 项以 “ $\left[ \left( \frac{M_x}{M_{ux}} \right)^{1.8} + \left( \frac{M_y}{M_{uy}} \right)^{1.8} \right]^{1/1.8}$ ” 代入进行验算。其中，构件绕强轴和弱轴

的受弯承载力（ $M_{ux}$  和  $M_{uy}$ ），可按本规程式（5.3.1）计算。

【条文说明】5.3.6 对于矩形不锈钢管混凝土双向压弯构件考虑轴力和两个方向弯矩之间的相互作用，将单轴压弯构件承载力验算公式加以推广可得到承载力验算公式。

## 5.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算

5.4.1 不锈钢管混凝土构件的受剪承载力（ $V_u$ ）不应小于剪力设计值（ $V$ ），并按下列公式计算：

$$V_u = \gamma_v \cdot A_{sc} \cdot f_{sv} \quad (5.4.1-1)$$

$$\gamma_v = \begin{cases} 0.97 + 0.2 \ln(\xi_0) & \text{（圆不锈钢管混凝土）} \\ 0.954 + 0.162 \ln(\xi_0) & \text{（矩形不锈钢管混凝土）} \end{cases} \quad (5.4.1-2)$$

式中：  $V_u$  —— 不锈钢管混凝土构件的受剪承载力 (N)；

$\gamma_v$  —— 不锈钢管混凝土受剪强度承载力计算系数；

$A_{sc}$  —— 不锈钢管混凝土构件的组合截面面积 (mm<sup>2</sup>)；

$f_{sv}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的剪切强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)。

**5.4.2** 不锈钢管混凝土构件的受扭承载力 ( $T_u$ ) 不应小于扭矩设计值 ( $T$ )，并按下列公式计算：

$$T_u = \gamma_t \cdot W_{sc,t} \cdot f_{sv} \quad (5.4.2-1)$$

$$\gamma_t = \begin{cases} 1.294 + 0.267 \ln(\xi_o) & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ 1.431 + 0.242 \ln(\xi_o) & (\text{矩形不锈钢管混凝土}) \end{cases} \quad (5.4.2-2)$$

$$W_{sc,t} = \begin{cases} \frac{\pi D^3}{16} & (\text{圆不锈钢管混凝土}) \\ 0.208 B \cdot D^2 & (\text{矩形不锈钢管混凝土}) \end{cases} \quad (5.4.2-3)$$

式中：  $T_u$  —— 不锈钢管混凝土构件的受扭承载力 (N·mm)；

$\gamma_t$  —— 不锈钢管混凝土受扭强度承载力计算系数；

$W_{sc,t}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的扭转抵抗矩 (mm<sup>3</sup>)；

$f_{sv}$  —— 不锈钢管混凝土构件组合截面的剪切强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)。

**5.4.3** 不锈钢管混凝土压扭构件的承载力应符合下列规定：

1 强度承载力应满足下式要求：

$$\left(\frac{N}{N_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.4.3-1)$$

式中：  $N_u$  —— 不锈钢管混凝土构件的轴压承载力 (N)，按本规程式 (5.2.1-2) 计算。

2 稳定承载力应满足下式要求：

$$\left(\frac{N}{\varphi \cdot N_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.4.3-2)$$

式中：  $\varphi$  —— 不锈钢管混凝土轴压稳定系数，按本规程式 (5.2.1-3) 计算，或按本规程附录 A 确定。

**5.4.4** 不锈钢管混凝土压弯扭构件的承载力应符合下列规定：

1 当  $N / N_u \geq 2\varphi^3 \eta_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_u}\right)^2\right]^{0.417}$  时，应满足下式要求：

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (5.4.4-1)$$

2 当  $N / N_u < 2\varphi^3 \eta_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_u} \right)^2 \right]^{0.417}$  时, 应满足下列公式要求:

$$[-b \cdot \left( \frac{N}{N_u} \right)^2 - c \cdot \left( \frac{N}{N_u} \right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}]^{2.4} + \left( \frac{T}{T_u} \right)^2 \leq 1 \quad (5.4.4-2)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2 \cdot \eta_0 \quad (5.4.4-3)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_e}{\varphi^3 \cdot \eta_e^2} \quad (5.4.4-4)$$

$$c = \frac{2(\zeta_e - 1)}{\eta_e} \quad (5.4.4-5)$$

$$d = \begin{cases} 1 - 0.4 \left( \frac{N}{N_E} \right) & \text{(圆不锈钢管混凝土)} \\ 1 - 0.25 \left( \frac{N}{N_E} \right) & \text{(矩形不锈钢管混凝土)} \end{cases} \quad (5.4.4-6)$$

$$\eta_e = (1 - \beta^2)^{0.417} \cdot \eta_0 \quad (5.4.4-7)$$

$$\zeta_e = (1 - \beta^2)^{0.417} \cdot \zeta_0 \quad (5.4.4-8)$$

$$\beta = \frac{T}{T_u} \quad (5.4.4-9)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{sc} \cdot A_{sc}}{\lambda^2} \quad (5.4.4-10)$$

式中:  $\zeta_0$ 、 $\eta_0$ ——系数, 按本规程的式 (5.3.3-6) 和式 (5.3.3-7) 计算。

5.4.5 不锈钢管混凝土压弯剪构件的承载力应符合下列规定:

1 当  $N / N_u \geq 2\varphi^3 \cdot \eta_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_u} \right)^2 \right]^{0.417}$  时, 应满足下式要求:

$$\left( \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u} \right)^{2.4} + \left( \frac{V}{V_u} \right)^2 \leq 1 \quad (5.4.5-1)$$

2 当  $N / N_u < 2\varphi^3 \cdot \eta_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_u} \right)^2 \right]^{0.417}$  时, 应满足下式要求:

$$[-b \cdot \left( \frac{N}{N_u} \right)^2 - c \cdot \left( \frac{N}{N_u} \right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}]^{2.4} + \left( \frac{V}{V_u} \right)^2 \leq 1 \quad (5.4.5-2)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ——系数, 按本规程第 5.4.4 条的规定确定。

## 5.5 长期荷载作用下的构件承载力计算

5.5.1 不锈钢管混凝土结构在长期荷载作用下的正常使用极限状态验算应采用荷载的准永久组合。

5.5.2 长期荷载作用下的不锈钢管混凝土轴压构件的轴心受压承载力应乘以长期荷载作用影响系数（ $k_{cr}$ ）进行折减，长期荷载作用影响系数（ $k_{cr}$ ）可按本规程附录 B 确定。

【条文说明】5.5.2 不锈钢管内混凝土产生的徐变将导致钢材和管中混凝土应力重分布，二者的模量发生变化，因而使构件的临界应力下降。下降率和永久荷载的大小、约束效应系数、构件长细比和荷载偏心率有关。在工程常用范围内，根据分析结果提出长期荷载作用影响系数  $k_{cr}$ 。

研究表明：不锈钢管中的核心混凝土徐变性能和碳素钢管混凝土相近。开展了 10 根不锈钢管混凝土轴压试验（包括 4 根一次加载构件和 6 根长期荷载作用构件，长期荷载比为 0.3 和 0.6）并进行了计算，结果如表 5.5.2 及图 5.5.2-1 所示，可见采用该计算方法得到的考虑长期荷载作用影响的构件极限承载力（ $N_{uc}$ ）和试验结果（ $N_{ue}$ ）总体上吻合较好，对于方形截面略偏于安全。

表5.5.2 不锈钢管混凝土长期荷载试验参数和结果

| 截面<br>类型 | 编号    | $D(B) \times t$<br>(mm) | $L$<br>(mm) | $L'$<br>(mm) | $\lambda$ | $n$ | $f_{0.2}$<br>(MPa) | $f_{cu}$<br>(MPa) | $N_{ue,长期}$<br>(kN) | $N_{ue,一次}$<br>(kN) | $k_{cr}$ | $N_{uc}$<br>(kN) | $N_{ue}/N_{uc}$ |
|----------|-------|-------------------------|-------------|--------------|-----------|-----|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------|------------------|-----------------|
| 圆形       | RCAC6 | 120×4                   | 982         | 1046.4       | 30        | 0.6 | 362                | 67.9              | 1167                | 1313                | 0.865    | 1135.75          | 1.028           |
|          | NCAC3 | 120×4                   | 982         | 1046.4       | 30        | 0.3 | 362                | 64.7              | 1121                | 1239                | 0.885    | 1096.52          | 1.022           |
|          | NCAC6 | 120×4                   | 982         | 1046.4       | 30        | 0.6 | 362                | 64.7              | 1160                | 1239                | 0.866    | 1072.97          | 1.081           |
| 矩形       | RCAS6 | 120×3.78                | 1123        | 1187.4       | 30        | 0.6 | 601                | 67.9              | 1631                | 1543                | 0.899    | 1387.16          | 1.176           |
|          | NCAS3 | 120×3.78                | 1121        | 1185.4       | 30        | 0.3 | 601                | 64.7              | 1488                | 1541                | 0.919    | 1416.18          | 1.051           |
|          | NCAS6 | 120×3.78                | 1121        | 1185.4       | 30        | 0.6 | 601                | 64.7              | 1585                | 1541                | 0.900    | 1386.90          | 1.143           |

注：  $N_{ue,长期}$  为经过长期荷载作用后构件的实测极限承载力，  $N_{ue,一次}$  为一次加载下构件的实测承载力，  $N_{uc}$  为  $N_{ue,一次}$  乘以长期荷载作用影响系数  $k_{cr}$  得的考虑长期荷载作用影响的承载力。

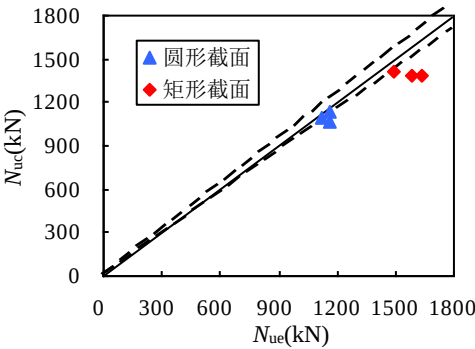


图 5.5.2-1 不锈钢管混凝土构件承载力计算结果与试验结果比较

5.6 抗撞击设计

5.6.1 不锈钢管混凝土墩柱遭受车辆、船只等撞击的作用设计值可按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 中的有关规定取值。

5.6.2 不锈钢管混凝土柱在侧向撞击荷载下的截面动力抗弯承载力 ( $M_{ud}$ ) 可按下式计算:

$$M_{ud} = M_u \quad (5.6.2)$$

式中:

$M_{ud}$  —— 不锈钢管混凝土动力抗弯承载力;

$M_u$  —— 不锈钢管混凝土静力抗弯承载力, 按本规程式 (5.3.1-1) 进行计算。

**【条文说明】5.6.2** 试验研究表明, 不锈钢管混凝土构件在侧向撞击下的力学性能与碳素钢管混凝土构件在侧向撞击下动力行为类似, 整个动力响应过程常可分为峰值阶段、平台值阶段和卸载阶段, 平台值阶段的撞击力值大小反映其截面动态抗弯承载能力。考虑材料动态应变率效应, 其动力抗弯承载力略高于相应的截面静态抗弯承载力。

由于不锈钢具有较好的延性和显著的强度硬化过程, 与碳素钢管混凝土不同, 不锈钢管混凝土构件在平台值阶段的撞击力时程曲线不断上扬, 但由于不锈钢与混凝土的界面粘接强度低于碳素钢管混凝土, 在平台值阶段后期会存在平台值不稳定现象。虽然材料动态应变率效应会提高截面抗弯承载力, 但由于不锈钢与混凝土的界面粘接强度对其平台值阶段存在不利影响, 为设计的安全性考虑, 其截面动态受弯承载力按本规范 (5.3.1-1) 取值。

## 5.7 抗震设计

5.7.1 在对不锈钢管混凝土构件的抗震性能进行分析时, 不锈钢材性应采用试验拉伸曲线, 混凝土的材料本构模型宜按本规程附录 C 和附录 D 确定。

**【条文说明】5.7.1** 采用本规程附录 C 和 D 提供的混凝土的材料本构模型, 建立的不锈钢管混凝土纤维模型可较好地预测往复荷载作用下不锈钢管混凝土构件的滞回性能。

5.7.2 不锈钢管混凝土房屋结构在多遇地震作用下, 按弹性方法计算的楼层层间最大水平位移与层高之比可根据现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》有关规定确定。

5.7.3 不锈钢管混凝土房屋结构在罕遇地震作用下的薄弱层弹塑性位移与层高之比应根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定确定。

## 6 节点和连接设计

**6.0.1** 不锈钢管混凝土结构节点和连接的设计应满足强度、刚度、稳定性和抗震的要求；节点和连接的设计应保证力的可靠传递、钢管和核心混凝土共同工作，并应便于制作、安装以及核心混凝土的浇灌施工。

**【条文说明】6.0.1** 本条明确了在不锈钢管混凝土结构中的节点和连接构造的基本要求。

**6.0.2** 不锈钢管混凝土结构的节点和连接构造宜简单，结构受力应明确，各受力杆件的形心线或螺栓准线宜汇交于一点。

**6.0.3** 当进行不锈钢管与混凝土界面粘结锚固相关计算时，不锈钢管与混凝土之间的粘结强度设计值（ $f_b$ ），对于圆不锈钢管混凝土，可取  $0.200\text{N/mm}^2$ ，对于矩形不锈钢管混凝土，可取  $0.050\text{N/mm}^2$ 。

当有可靠依据时，宜采用膨胀混凝土、焊接栓钉或环板等措施保证荷载可靠传递。

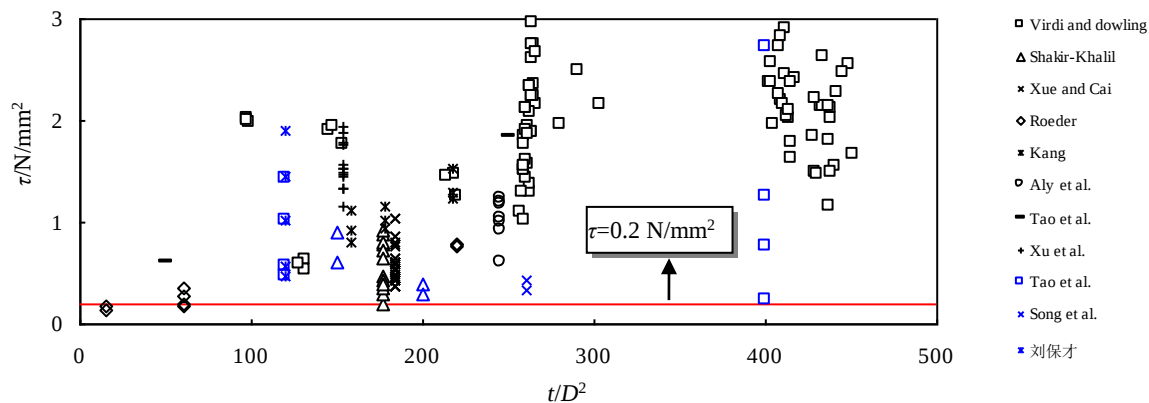
**【条文说明】6.0.3** 通过对搜集和整理的172个碳素圆钢管混凝土、35个碳素方钢管混凝土界面粘结强度进行的统计分析（参数范围： $f_{cu}=20\sim60\text{N/mm}^2$ ， $D(B)\leq600\text{mm}$ ， $D/t(B/t)\leq60$ ）表明，碳素钢管及其核心混凝土的界面粘结强度与钢管直径或边长及钢管直径或边长与厚度的比值相关。根据对试验结果的分析，建议了粘结强度的下限值，即对于碳素圆钢管混凝土， $f_b=0.225\text{N/mm}^2$ ；对于碳素方钢管混凝土， $f_b=0.15\text{N/mm}^2$ 。对于碳素矩形钢管混凝土，在本规程参数范围内，参考日本设计指南《钢管混凝土结构的设计和建造指针》AIJ(2008)，可认为碳素矩形钢管混凝土界面粘结强度的下限值与碳素方钢管混凝土保持一致。

该下限值提出所基于的数据库并未包括不锈钢管混凝土构件，为检验该值对不锈钢管混凝土的适用性，开展了两批不锈钢管混凝土柱推出滑移试验。试验参数包括截面类型、截面尺寸、混凝土类型、构件养护龄期与是否存在环板与栓钉。进一步搜集21个圆不锈钢管混凝土、17个方不锈钢管混凝土界面粘结强度试验数据，结果如图6.0.3所示。

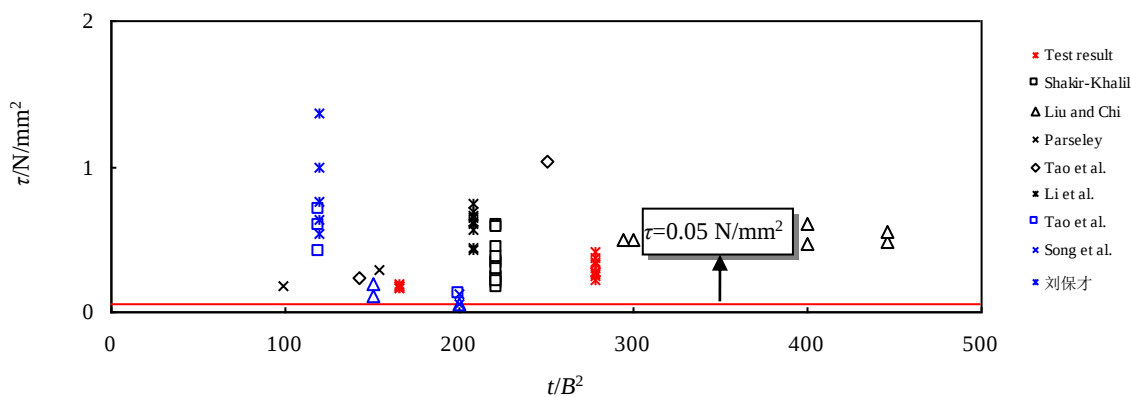
对试验结果考察可以发现，对于圆构件，粘结强度最小为 $0.23\text{N/mm}^2$ ，出于保守，将设计值取为 $0.200\text{N/mm}^2$ ；对于方形构件，取设计值为 $0.050\text{N/mm}^2$ 。

对不锈钢表面粗糙度进行量测，对于不锈钢管，经2B雾面处理，表面粗糙度可由 $5.79\mu\text{m}$ 降低至 $2.61\mu\text{m}$ 。碳素钢表面粗糙度均值为 $6.33\mu\text{m}$ ，相比不锈钢较大，因此不锈钢管混凝土在界面粘结强度中机械咬合部分会相应降低。

基于以上试验观察与数据，在本条中对粘结强度进行一定的修正，即对于圆不锈钢管混凝土， $f_b=0.200\text{N/mm}^2$ ；对于矩形不锈钢管混凝土， $f_b=0.050\text{N/mm}^2$ ；且规定若使用收缩较大的再生骨料混凝土时应采用一定的构造措施以保证荷载可靠传递。



(a) 圆不锈钢管混凝土



(b) 矩形不锈钢管混凝土

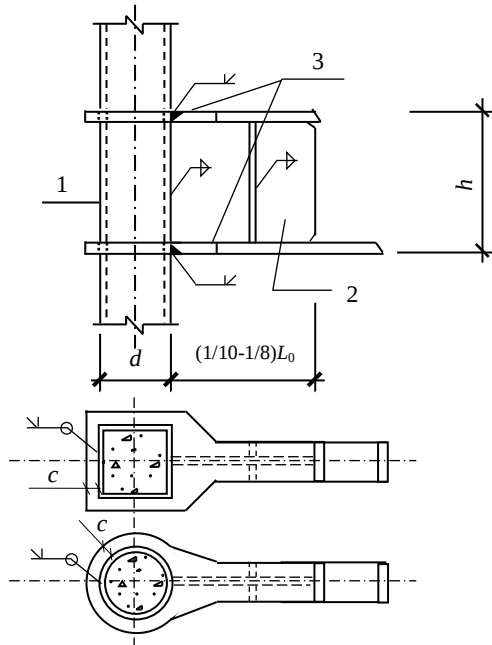
(蓝色点为不锈钢管混凝土试验结果)

图 6.0.3-1 不锈钢管混凝土构件承载力计算结果与试验结果比较

#### 6.0.4 框架结构的梁柱刚性节点宜采用加强环节点形式，并应符合下列规定：

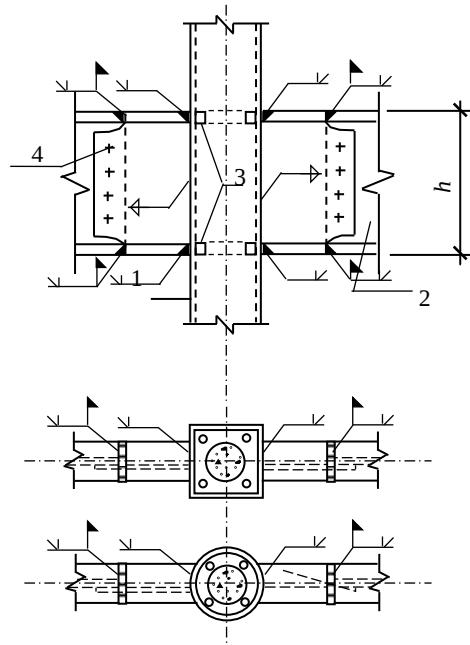
- 1 工字形截面钢梁或钢-混凝土组合梁与柱采用外加强环板式刚接节点时（图 6.0.4-1），钢梁翼缘应和环板焊接，外加强环的厚度不宜小于钢梁翼缘的厚度，宽度（ $c$ ）不宜小于钢梁翼缘宽度的 0.7 倍；
- 2 工字形截面钢梁或钢-混凝土组合梁与柱采用内加强环板式刚接节点时（图 6.0.4-2），钢管壁应和环板焊接。
- 3 钢梁腹板与牛腿腹板宜采用焊接，亦可采用摩擦型不锈钢高强螺栓、摩擦型达克罗高强螺栓或不锈钢环槽铆钉连接（图 6.0.4-3）。
- 4 采用高强螺栓摩擦型连接时，连接承载力及高强度螺栓预拉力应根据高强度螺栓性能等级按现行国家标准《钢结构设计标准》GB50017 确定，
- 5 采用所有摩擦型紧固件连接时，传力摩擦面需进行表面处理，一侧进行喷砂处理，一侧进行

超音速喷涂处理，连接面抗滑移系数  $\mu$  应取 0.45 或根据抗滑移试验确定。不锈钢高强螺栓安装过程中，施加预拉力时需在螺纹处涂抹专业润滑剂以保证预拉力的有效施加。高强螺栓连接副扭矩系数平均值应在 0.11-0.15 之间。宜采用扭矩法施加预拉力。



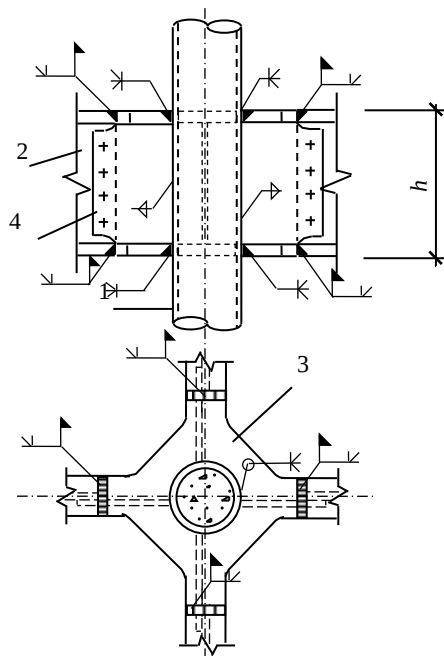
1—柱肢；2—梁端；3—外加强环  
 $d$ —柱截面直径； $h$ —梁截面高度； $L_0$ —梁长； $c$ —环宽

图 6.0.4-1 外加强环板式节点示意图

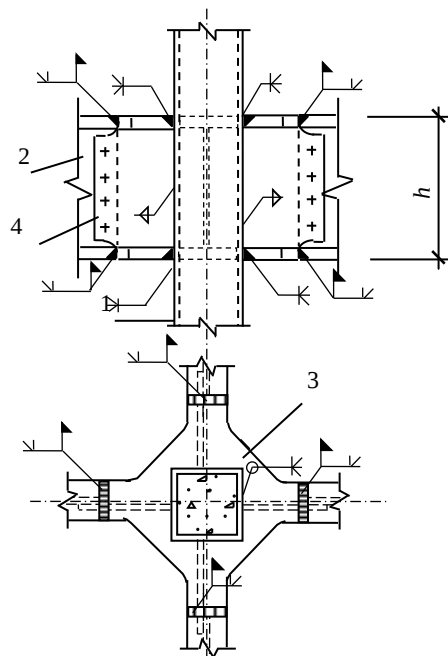


1—柱肢；2—梁端；3—内加强环；4—连接紧固件  
 $h$ —梁截面高度

图 6.0.4-2 内加强环板式节点示意图



(a) 圆形不锈钢管混凝土

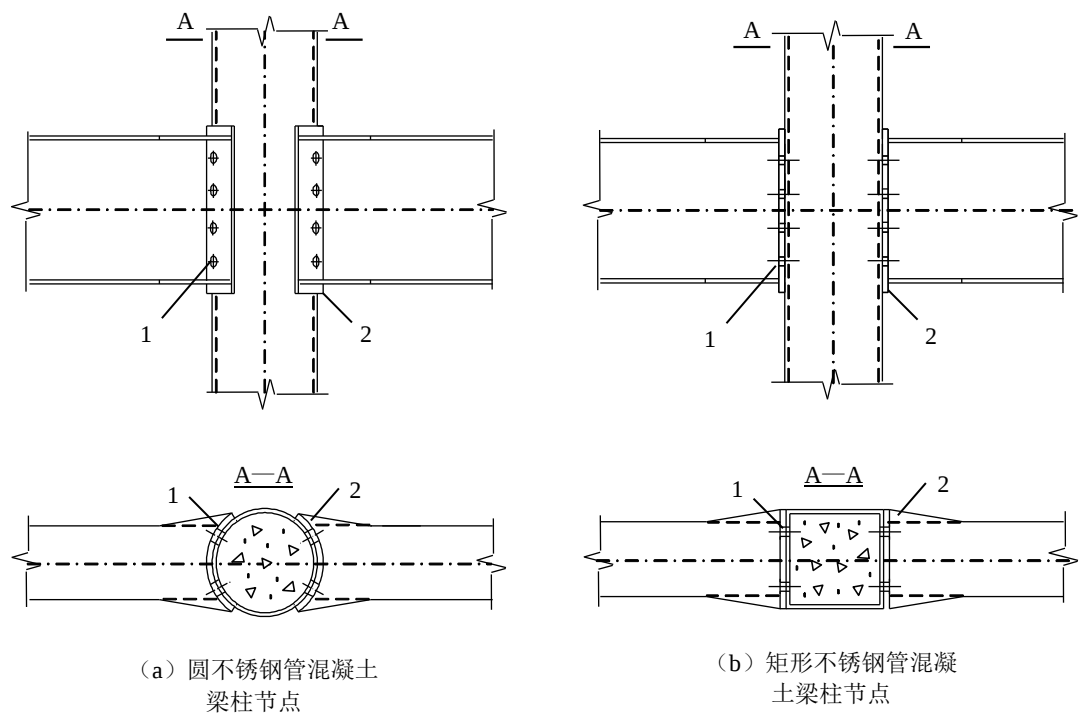


(b) 矩形不锈钢管混凝土

1—柱肢；2—梁端；3—上、下加强环；4—连接紧固件连接  $h$ —梁截面高度

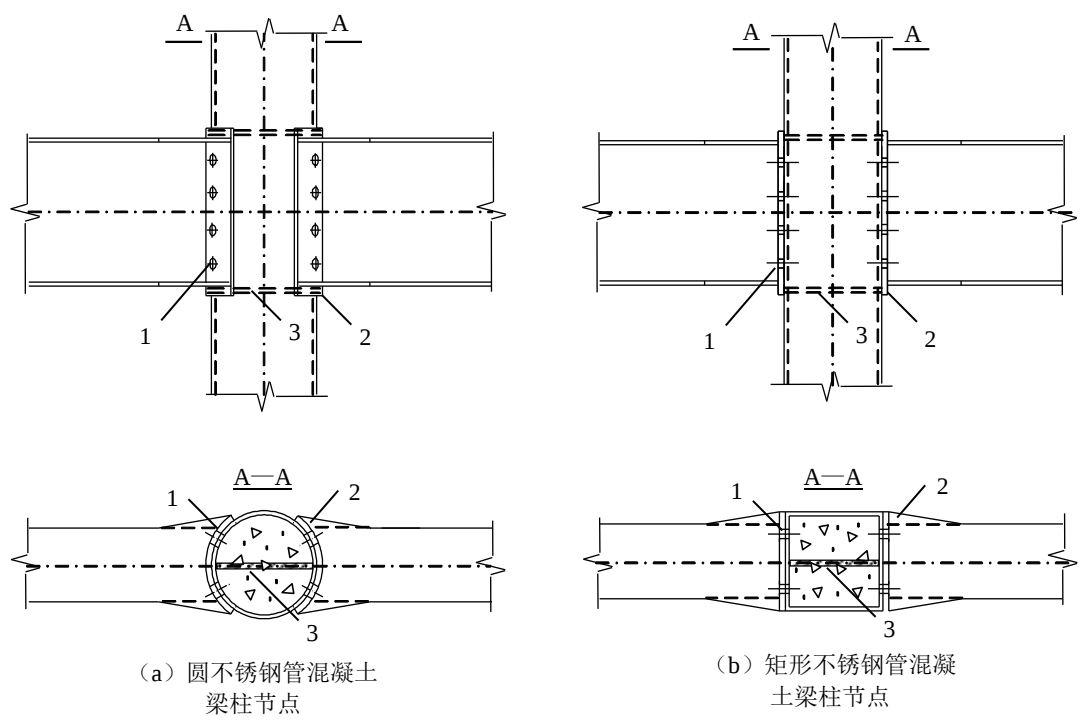
图 6.0.4-3 高强紧固件连接节点示意图

**6.0.5** 不锈钢管混凝土柱和钢梁间的半刚性连接节点可采用单边高强螺栓连接节点（图 6.0.5-1）或带拉结杆的单边高强螺栓连接节点（图 6.0.5-2）。



1—单边高强螺栓；2—端板组件

**图 6.0.5-1 单边高强螺栓连接节点构造示意图**



1—单边高强螺栓；2—端板组件；3—拉结杆

**图 6.0.5-2 带拉结杆的单边高强螺栓连接节点构造示意图**

**【条文说明】6.0.5** 采用螺栓连接的节点具有较好的施工便利性和可靠性，但由于钢管内部空间狭小，传统螺栓较难直接用于连接钢梁和不锈钢管混凝土柱。为此，编制组提出了一种不锈钢管混凝土柱-钢梁单边高强螺栓连接节点，对于管径较小且对现场施工有要求的结构，可以采用这种单边高强螺栓连接节点构造，在施工现场可以较方便地从钢管外侧进行安装，实现梁和柱的连接。

采用单边高强螺栓连接节点的构造和计算基本同于钢结构中的端板式连接节点。设计时应注意对节点的应力验算，防止管壁撕裂。根据工程经验和试验研究，可加设加强肋板或在钢管内部焊接拉结杆来对节点进行加强。拉结杆可通过在钢管壁上预留孔洞来进行定位和焊接，其两端必须与钢管壁焊接，使拉结杆和钢管成为整体共同工作。

**6.0.6** 加强环板应根据现行协会标准《钢管再生混凝土结构技术规程》T/CECS 625 进行设计计算，其中不锈钢管与混凝土之间的粘结强度应根据本规程 6.0.4 确定，应保证梁端等强过渡并符合构造要求，并应保证环板的设计承载力安全、可靠。圆不锈钢管混凝土结构的刚性节点加强环板可采用同心圆形板、直边形板、折线形板或内凹弧形板（图 6.0.6-1），矩形不锈钢管混凝土结构的刚性节点加强环板可采用直边形板或折线形板（图 6.0.6-2）。

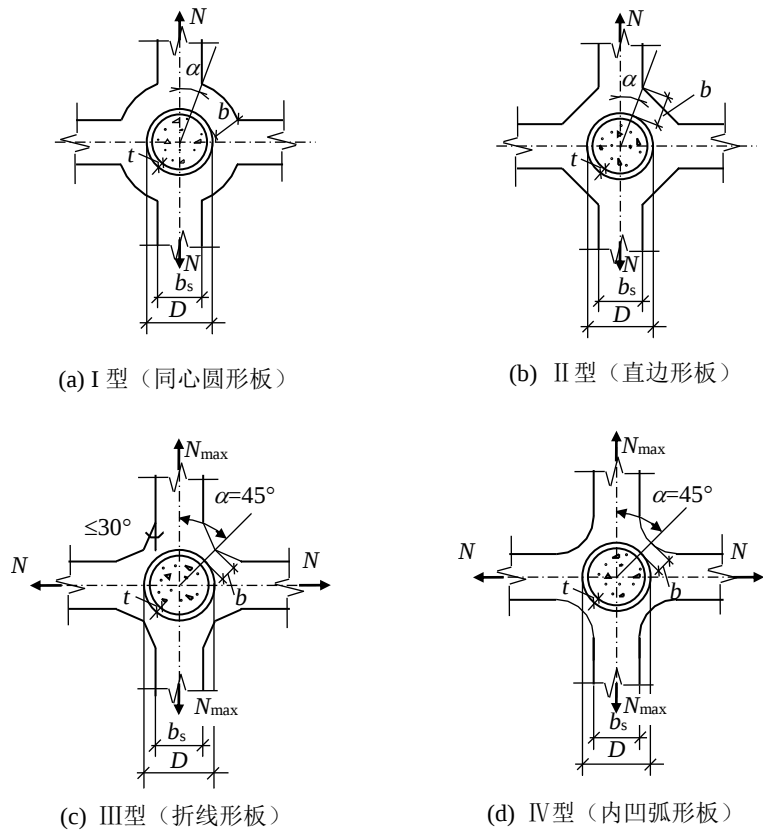


图 6.0.6-1 圆不锈钢管混凝土加强环板的类型示意图

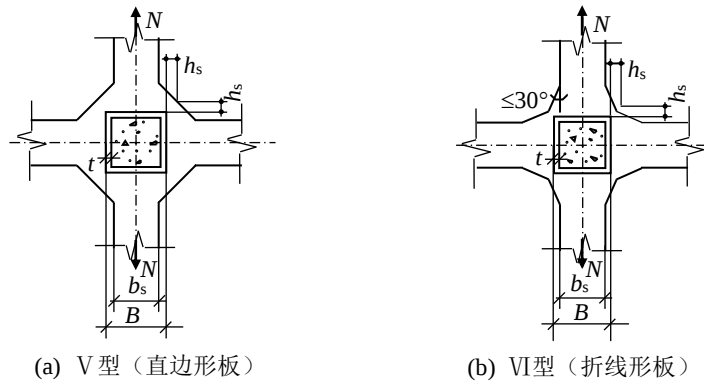


图 6.0.6-2 矩形不锈钢管混凝土加强环板的类型示意图

6.0.7 不锈钢管混凝土K形焊接节点（图6.0.7）构造应符合下列规定：

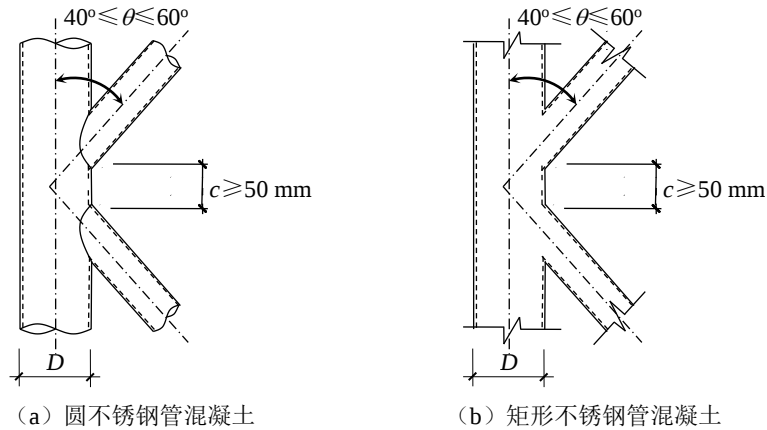
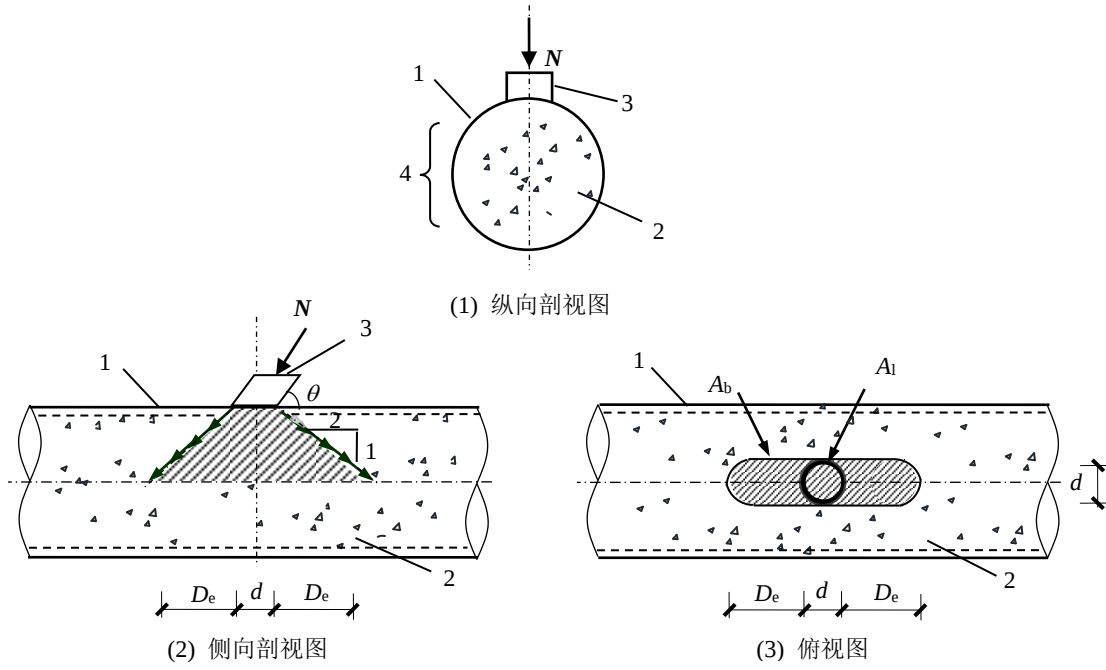


图 6.0.7 不锈钢管混凝土 K 形节点示意图

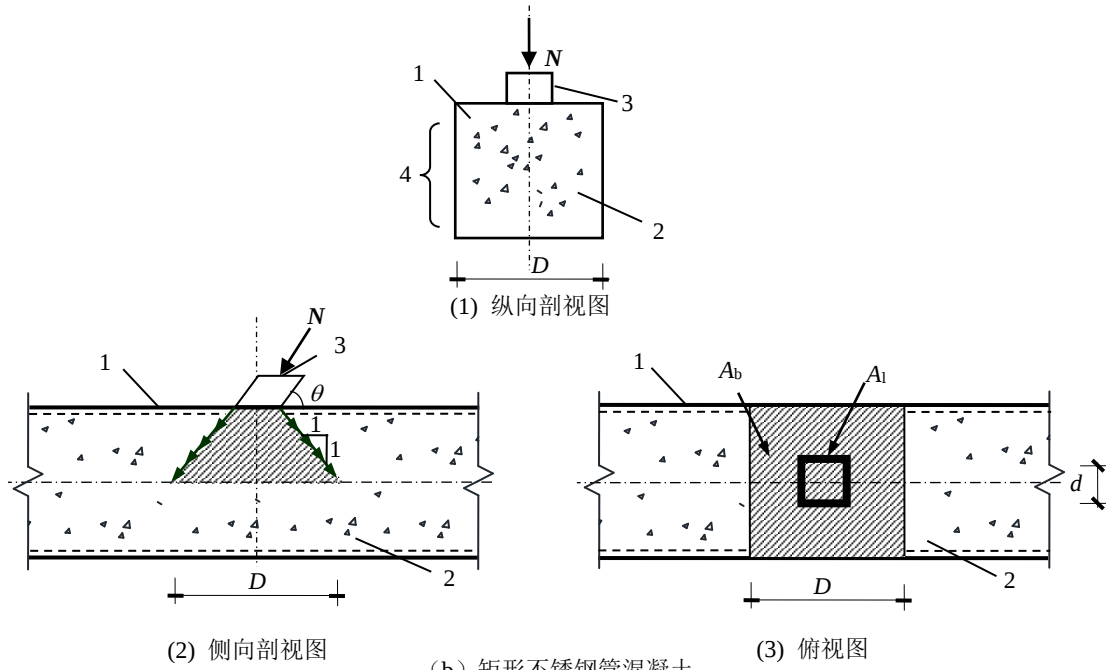
- 1 主管与支管外径及壁厚之比均不应小于 0.2，且不应大于 1.0，在支管与主管的连接处不得将支管插入主管内；
- 2 主管与支管轴线间夹角不宜小于  $40^\circ$ ，且不宜大于  $60^\circ$ ；
- 3 端部净距  $c$  不应小于两支管壁厚之和，且不宜小于 50 mm；
- 4 杆件轴线宜相交于节点中心，偏心时应考虑偏心的影响，且腹杆轴线交点与柱肢轴线距离  $e$  不宜大于  $D/4$ ， $D$  为不锈钢管外直径。

6.0.8 不锈钢管混凝土K形焊接节点承载力应符合下列规定：

- 1 不锈钢管混凝土K形连接节点的受压支管在管节点处的承载力、受拉支管在管节点处的承载力、支管在节点处的冲剪承载力应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017的有关规定进行验算。
- 2 节点区侧向局部受压的截面不锈钢管混凝土（图6.0.8）的侧向局部受压承载力应满足下列要求：



(a) 圆不锈钢管混凝土



(b) 矩形不锈钢管混凝土

1— 不锈钢管；2— 核心混凝土；3— 支管；4— 主管

图 6.0.8 节点区不锈钢管混凝土侧向局部受压传力示意图

1) 节点区侧向局部受压的圆截面不锈钢管混凝土的承载力应满足下式要求：

$$N_{LF} \leq N_{uLF} \quad (6.0.8-1)$$

$$N_{uLF} = \frac{\beta_k \cdot f_c \cdot A_l}{\sin \theta} \quad (6.0.8-2)$$

$$\beta_k = \beta_1 \cdot \beta_c \quad (6.0.8-3)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{A_b}{A_1}} \quad (6.0.8-4)$$

$$A_b = \frac{A_1}{\sin \theta} + 2d \cdot D_e \quad (6.0.8-5)$$

2) 节点区侧向局部受压的矩形截面不锈钢管混凝土的承载力应满足下式要求：

$$N_{LF} \leq N_{uLF} \quad (6.0.8-6)$$

$$N_{uLF} = \frac{\beta_k \cdot f_c \cdot A_b}{\sin \theta} \quad (6.0.8-7)$$

$$\beta_k = 0.214(1 + \beta_d)^A \quad (6.0.8-8)$$

$$\beta_d = \frac{d}{D} \quad (6.0.8-9)$$

$$A = 2.72 + \xi - 0.26\xi^2 \quad (6.0.8-10)$$

式中：  $N_{LF}$  — 作用在节点区不锈钢管混凝土的侧向局部压力设计值（N）；

$N_{uLF}$  — 不锈钢管混凝土的侧向局部受压承载力设计值（N）；

$f_c$  — 混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm<sup>2</sup>）；

$\theta$  — 传递侧向局部压力的支管与不锈钢管混凝土主管的夹角；

$\beta_k$  — 不锈钢管混凝土侧向局压承载力系数；

$\beta_d$  — 支管边长与主管边长的比值；

$\beta_1$  — 侧向局部受压时混凝土强度提高系数；

$A_1$  — 不锈钢管混凝土的局部受压面积（mm<sup>2</sup>），取为外径相等的实心支管的面积， $d$ 为传递侧向力的支管直径；

$A_b$  — 侧向局部受压的计算底面积（mm<sup>2</sup>），对于圆不锈钢管混凝土，按式（6.0.8-5）计算；对于矩形不锈钢管混凝土，应力在纵向和横向两个方向均按照 1 的斜率扩散至混凝土边缘，根据实际受力底面积计算；

$\beta_c$  — 侧向局部受压时混凝土强度影响系数，按表 6.0.8 确定。

**表 6.0.8 节点区侧向局部受压圆不锈钢管混凝土的混凝土强度影响系数  $\beta_c$**

|                     |      |      |      |      |      |            |
|---------------------|------|------|------|------|------|------------|
| 名义约束效应系数标准值 $\xi$   | 0.4  | 0.8  | 1.2  | 1.6  | 2.0  | $\geq 3.0$ |
| 混凝土强度提高系数 $\beta_c$ | 1.07 | 1.22 | 1.47 | 1.67 | 1.87 | 2.00       |

**6.0.9** 不锈钢管混凝土T形焊接节点（图6.0.9）的构造应符合下列规定：

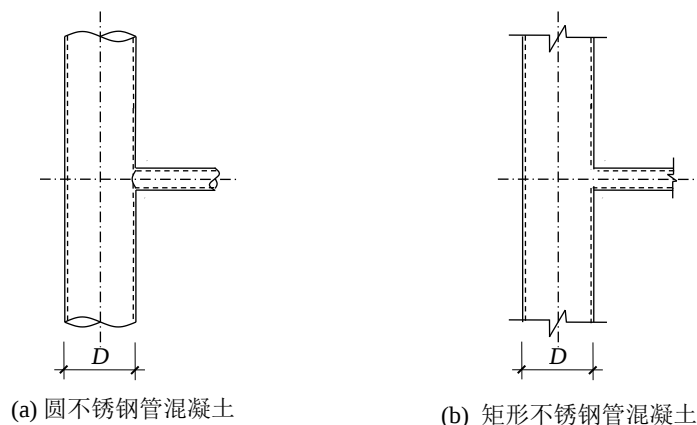


图 6.0.9 不锈钢管 T 形节点示意图

- 1 支管中心间距不应大于主管中心距离的四倍；
- 2 支管截面面积不宜小于单个主管不锈钢管截面面积的1/3；
- 3 支管长细比不宜大于单个主管长细比的1/2；
- 4 支管和主管应直接焊接，与支管相交部分的主管上不得开孔。

#### 6.0.10 不锈钢管混凝土T形焊接节点的承载力应符合下列规定：

- 1 不锈钢管混凝土T形连接节点的受压支管在管节点处的承载力、受拉支管在管节点处的承载力、支管在节点处的冲剪承载力与连接焊缝的强度，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；
- 2 对于不锈钢管混凝土T形节点区侧向局可能出现的混凝土局部承压破坏，应按6.0.8节进行侧向局部受压承载力验算，其中T形节点支管与钢管混凝土主管的夹角 $\theta$ 取为 $90^\circ$ 。

**【条文说明】6.0.7~6.0.10** 对不锈钢管混凝土K型或T型节点，其破坏模态主要表现为以下5类：

- 1 主管表面塑性失效，受拉支管将主管表面拉出；
- 2 受拉支管接头处沿支管四周主管表面冲剪失效；
- 3 受拉支管或焊缝的强度破坏；
- 4 受压支管的局部屈曲；
- 5 受压支管接头下弦杆内填充混凝土的局部压溃。

在设计此类节点时应根据节点可能出现的破坏模态，逐一进行验算。对于前4种破坏模态，可根据现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017按照空钢管节点进行验算，对于第5种破坏模态，应根据本规程进行验算。

**6.0.11** 柱脚可按国家现行标准《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 的有关规定进行设计。对于有抗震要求的柱脚，还应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 中对构造的有关规定。

## 7 抗火设计

### 7.1 一般规定

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

**7.1.2** 不锈钢管混凝土结构的设计文件中，应注明建筑的设计耐火等级、构件的设计耐火极限、构件的防火保护措施、防火保护材料的性能要求及设计指标。

**【条文说明】7.1.2** 本条规定了不锈钢管混凝土结构防火设计文件中应注明的基本事项，这些事项与不锈钢管混凝土结构防火工程的质量密切相关。防火保护措施及防火材料的性能要求、设计指标包括：防火保护层的等效热阻、防火保护材料的等效热传导系数、防火保护层的厚度、防火保护的构造等。

**7.1.3** 不锈钢管混凝土柱防火保护措施及防火涂料的选型应符合现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 的规定。设计耐火极限不超过 3 小时的不锈钢管混凝土构件可选用膨胀型防火涂料。在不锈钢管上涂刷防火涂料时，防火涂料涂层的附着力应有可靠证明文件。

**【条文说明】7.1.3** 与普通钢结构构件不同，钢管混凝土构件中的混凝土填充材料具有吸热与蓄热的作用，可以延缓钢管壁的升温过程，同时高温下钢材力学性能发生软化时柱截面钢管壁承担的内力可以通过重分布由温度相对较低的核心混凝土继续承载。因此，钢管混凝土构件具有较高的耐火极限，采用不锈钢管能进一步提高钢管混凝土柱的耐火极限。因防火材料自身性能的特点，膨胀型防火涂料用于普通钢结构构件时受到一定的限制。清华大学和中国建筑西南设计研究院有限公司开展的明火试验研究表明，膨胀型防火涂料用于碳素钢管混凝土柱的防火保护措施时，在受火时长 3~4 小时的条件下，试验完成后涂层基本完整，可保证碳素钢管混凝土构件达到 3 小时甚至更高的耐火极限。

图 7.1.3-1 为典型膨胀型防火涂料保护的碳素圆钢管混凝土柱（ $D=600\text{mm}$ ，偏压）在标准火灾条件下受火 3 小时后的状态，可见涂层基本完整地附着在试件上，试验结束时，该试件钢管壁温度不超过  $350^{\circ}\text{C}$ ，其轴向压缩变形和轴压变形速率均尚未达到耐火极限判别标准。考虑到不锈钢对构件抗火性能的进一步提升，耐火极限不超过 3 小时的不锈钢管混凝土柱采用膨胀型防火涂料作为防火保护措施能保证构件具有可靠的抗火性能。钢管混凝土柱采用膨胀型防火涂料作为防火保护措施时，宜采取合理的构造措施避免防火涂层膨胀裂缝的不利影响。



图 7.1.3-1 膨胀型防火涂料保护的钢管混凝土柱标准火灾试验：受火 3.0h 后

不锈钢虽然耐火性能优于普通碳素或低合金结构钢，但考虑到构件的尺寸、受力水平、受火工况的实际情况仍需要防火保护措施的保护，考虑到不锈钢较好的耐火性能其所需的防火保护较普通结构钢要省。但由于相关研究并不充分，目前仍建议直接参考普通钢结构的做法和数据。需要注意的是，由于钢材表面的差异，非膨胀型和膨胀型涂料在不锈钢上的附着力可靠性和加固措施等有待进一步研究和论证，故应提供关于防火涂料涂层可靠附着的证明文件。

当有可靠依据时，亦可在不锈钢管内部配钢筋和型钢提高不锈钢管混凝土柱的耐火极限。

**7.1.4** 当施工所用防火保护材料的等效导热系数与设计文件要求不一致时，应根据防火保护层的等效热阻相等的原则确定保护层的施用厚度，并应经设计单位认可。对于非膨胀型钢结构防火涂料、防火板，可按现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 确定防火保护层的施用厚度；对于膨胀型防火涂料，可根据涂层的等效热阻直接确定其施用厚度。

**【条文说明】7.1.4** 非膨胀防火涂料、防火板等防火保护材料的等效热阻或等效热传导系数仅与自身材料性能有关，可采用基于非不锈钢构件在标准火灾条件下的试验推导的数据，且符合现行国家标准《钢结构防火涂料》GB 14907和《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978膨胀型防火涂料的等效热阻与基材、防火涂层干膜厚度、升温时长等诸多因素有关，膨胀型防火涂料用于不锈钢管混凝土柱的防火保护措施时，为充分反映不锈钢和混凝土对结构防火的贡献，宜基于不锈钢管混凝土开展标准火灾试验，并符合现行国家标准《建筑构件耐火试验方法》GB9978的有关规定。

**7.1.5** 不锈钢管混凝土结构防火保护的构造应符合现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 的要求，采用防火涂料作为防火保护时，应在涂层内合理设置与构件相连的镀锌铁丝网或玻璃纤维布。

## 7.2 抗火计算

**7.2.1** 当不锈钢选用 S30408、S31608、S11873、S22253 牌号时，无防火保护的不锈钢管混凝土柱的耐火极限可按表 7.2.1 确定，不锈钢管混凝土柱的火灾荷载比 ( $n_f$ ) 应按《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 的有关规定确定。

**表7.2.1 不锈钢管混凝土柱的耐火极限 (min)**

|    | 长细比 $\lambda$ | 截面直径 $D$ (mm)   | 火灾荷载比 $n_f$ |     |     |     |
|----|---------------|-----------------|-------------|-----|-----|-----|
|    |               |                 | 0.3         | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 圆形 | 20            | 300             | 110         | 70  | 45  | 25  |
|    |               | 600             | 170         | 95  | 75  | 40  |
|    |               | 900             | 240         | 140 | 90  | 50  |
|    | 40            | 300             | 80          | 55  | 35  | 25  |
|    |               | 600             | 125         | 75  | 50  | 35  |
|    |               | 900             | 150         | 90  | 60  | 45  |
|    | 60            | 300             | 65          | 45  | 30  | 20  |
|    |               | 600             | 80          | 50  | 40  | 30  |
|    |               | 900             | 100         | 60  | 50  | 40  |
|    | 长细比 $\lambda$ | 截面宽边边长 $B$ (mm) | 火灾荷载比 $n$   |     |     |     |
|    |               |                 | 0.3         | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 矩形 | 17            | 200             | 70          | 45  | 30  | 15  |
|    |               | 300             | 110         | 70  | 45  | 25  |
|    |               | 600             | 170         | 95  | 60  | 35  |
|    |               | 900             | 220         | 120 | 75  | 45  |
|    | 34            | 200             | 60          | 30  | 30  | 15  |
|    |               | 300             | 95          | 65  | 45  | 25  |
|    |               | 600             | 145         | 80  | 55  | 35  |
|    |               | 900             | 160         | 95  | 65  | 45  |
|    | 51            | 200             | 50          | 30  | 20  | 10  |
|    |               | 300             | 75          | 50  | 35  | 20  |
|    |               | 600             | 95          | 65  | 45  | 30  |
|    |               | 900             | 125         | 85  | 60  | 40  |

**【条文说明】7.2.1** 编制组结合实际结构常用的钢管混凝土柱的尺寸，共进行了五根不锈钢管混凝土试件在轴压荷载和按ISO 834标准升温曲线进行升温的火灾共同作用下的试验研究。通过对试验现象和结果进行分析发现，在试验参数范围内，不锈钢管混凝土柱的耐火极限随柱截面尺寸的增大而增大，随火灾荷载比的减小而增大。

图7.2.1所示为典型无保护轴压不锈钢管混凝土柱标准火灾试验后的破坏模态。圆形试件柱表现为受压破坏，伴有轻微侧向挠曲，其中钢管表现为在薄弱位置形成单一“象脚”形鼓曲，而混凝土则表现为局部截面压溃，火灾荷载比较大时还出现了斜向劈裂破坏；方形试件破坏模式整体同样表现为受压破坏，其中钢管在四面沿长度方向出现多个鼓曲半波，且局部焊缝开裂破坏，核心混凝土伴有压碎破坏现象。



(a) 圆不锈钢管混凝土柱

(b) 焊接矩形不锈钢管混凝土柱

图 7.2.1 轴压不锈钢管混凝土柱标准火灾试验后的破坏模式

与碳素钢管混凝土柱不同，由于不锈钢在升温初期强度降低较多，不锈钢管混凝土柱在火灾下的轴向膨胀很小（膨胀量均未超过 2mm）。

试验结果与基于结果的采用顺序热力耦合分析方法的有限元分析模型分析结果表明：火灾荷载比、长细比以及构件的外截面尺寸是影响不锈钢管混凝土柱耐火极限的主要因素，其中以火灾荷载比的影响最为明显。基于涵盖奥氏体型、铁素体型和双相型不锈钢的5种牌号不锈钢进行参数分析，提出表7.2.1。

若选用其他牌号不锈钢，应基于具体不锈钢高温下材性进行有限元研究以确定其耐火极限。

无防火保护的不锈钢管混凝土柱标准火灾下的承载力系数  $k_T$  可按表 7.2.1-1 确定：

表7.2.1-1 标准火灾下不锈钢管混凝土柱的承载力系数 $k_T$

| 长细比 | 截面直径<br>或宽边边长<br>(mm) | 受火时间(h)   |      |      |      |      |      |            |      |      |      |      |      |
|-----|-----------------------|-----------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|
|     |                       | 圆不锈钢管混凝土柱 |      |      |      |      |      | 矩形不锈钢管混凝土柱 |      |      |      |      |      |
|     |                       | 0.5       | 1    | 1.5  | 2    | 2.5  | 3    | 0.5        | 1    | 1.5  | 2    | 2.5  | 3    |
| 20  | 300                   | 0.58      | 0.44 | 0.35 | 0.28 | 0.20 | 0.13 | 0.58       | 0.44 | 0.35 | 0.28 | 0.20 | 0.13 |
|     | 600                   | 0.63      | 0.54 | 0.43 | 0.37 | 0.33 | 0.29 | 0.62       | 0.50 | 0.41 | 0.37 | 0.33 | 0.29 |
|     | 900                   | 0.65      | 0.58 | 0.50 | 0.44 | 0.39 | 0.36 | 0.65       | 0.55 | 0.47 | 0.40 | 0.37 | 0.34 |
| 40  | 300                   | 0.55      | 0.38 | 0.26 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.58       | 0.43 | 0.32 | 0.22 | 0.12 | 0.00 |
|     | 600                   | 0.63      | 0.46 | 0.37 | 0.31 | 0.25 | 0.00 | 0.63       | 0.48 | 0.38 | 0.34 | 0.29 | 0.25 |
|     | 900                   | 0.70      | 0.50 | 0.40 | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.68       | 0.53 | 0.42 | 0.36 | 0.32 | 0.27 |
| 60  | 300                   | 0.50      | 0.33 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.53       | 0.36 | 0.24 | 0.12 | 0.00 | 0.00 |
|     | 600                   | 0.60      | 0.37 | 0.27 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.60       | 0.43 | 0.32 | 0.22 | 0.12 | 0.00 |
|     | 900                   | 0.70      | 0.40 | 0.33 | 0.25 | 0.18 | 0.10 | 0.65       | 0.50 | 0.39 | 0.31 | 0.24 | 0.16 |

7.2.2 当无防火保护的不锈钢钢管混凝土柱的耐火极限不满足本规程 7.1.1 条规定的防火设计要求时，应对外钢管采用喷涂防火涂料或其它有效外包覆防火措施。采用金属网抹 M5 水泥砂浆或非膨

胀钢结构防火涂料时，防火保护层厚度可根据现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 中碳素钢管混凝土的有关规定进行设计。

**【条文说明】7.2.2** 按碳素钢管混凝土柱确定的不锈钢管混凝土柱防火保护层厚度偏于安全，根据现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB51249 计算不锈钢管混凝土柱非膨胀型防火涂料保护层的厚度时，防火涂料的热传导系数取  $0.10\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

### 7.3 防火构造措施

**7.3.1** 每个楼层的不锈钢管混凝土柱均应设置直径为 20mm 的排气孔。排气孔宜在柱与楼板相交位置的上、下方 100mm 处各布置 1 个，并应沿柱身反对称布置（图 7.3.1）。当楼层高度超过 6m 时，应增设排气孔，且排气孔纵向间距不宜超过 6m。

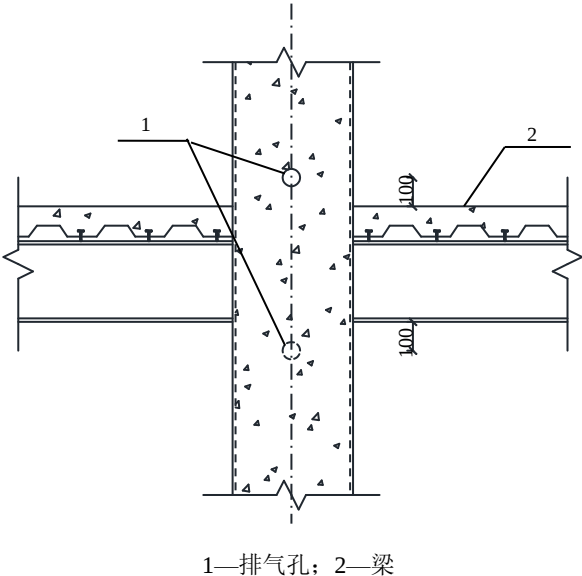


图 7.3.1 排气孔位置示意图（尺寸单位：mm）

**7.3.2** 当不锈钢管混凝土柱与钢梁连接时，节点区域的防火保护层厚度应取钢梁和不锈钢管混凝土柱防火保护层厚度的较大值。

**7.3.3** 当采用不锈钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓连接节点时，单边螺栓内的橡胶垫圈宜替换为等效的弹簧钢垫圈。

**【条文说明】7.3.3** 为提高单边高强螺栓预紧力，单边高强螺栓在出厂时均标配橡胶垫圈，编制组通过试验研究发现：单边高强螺栓中的橡胶垫圈在火灾温度达到  $800^{\circ}\text{C}$  时会变为粉末完全失去作用，从而造成火灾后单边高强螺栓预紧力降低 77%，而通过将单边高强螺栓中的橡胶垫圈替换为等效的弹簧钢垫圈后，火灾后单边高强螺栓的预紧力降低减少为 44%。因此，为提高单边高强螺栓在火灾下的工作性能，应该将其原厂配置的橡胶垫圈替换为等效的弹簧钢垫圈。

试验结果表明：1) 单边高强螺栓在火灾下能够可靠地连接钢梁和不锈钢管混凝土柱，没有出现节点区钢梁端板和钢管壁脱离或单边高强螺栓被拔出现象，节点破坏主要由钢梁或不锈钢管混凝土柱达到极限状态破坏而造成；2) 在没有防火保护的情况下，该类节点的耐火极限只有 22min，节点破坏由钢梁的局部屈曲破坏造成，但对钢梁进行防火保护后，节点的耐火极限可增加到 70-90min，

其破坏仍然由钢梁破坏引起。因此在对该类不锈钢管混凝土柱-钢梁单边高强螺栓连接节点进行抗火设计时，节点区域的防火保护层厚度参考 7.3.2 条即可。

## 8 制作、施工和验收

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 不锈钢管混凝土结构的制作、施工和验收除应符合本规程的规定外，尚应符合现行国家标准《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628 和《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

**【条文说明】8.1.1** 本本章针对不锈钢结构工程的制作与施工标准提出了特定要求。执行本规程时，还应遵守相关的现行国家和行业标准。

**8.1.2** 不锈钢管混凝土结构在施工前，施工单位应根据施工图设计文件及钢结构制作详图要求，编制有针对性的专项施工方案。

**8.1.3** 不锈钢管结构的施工单位应根据现行行业标准《建筑钢结构焊接规范》JGJ 181 设计要求对构造复杂的构件进行工艺试验评定，并应根据试验评定制定相应的施工工艺或方案。

**【条文说明】8.1.3** 钢管结构的制作单位应在必要时对构造复杂的构件进行工艺试验。主要考虑到复杂构件的加工工艺参数必须从工艺试验中取得，如加工、装配、焊接的变形控制、尺寸精度的控制，通过试验，可以获得合理的工艺参数，用以指导构件的批量生产，保证构件制作质量。

**8.1.4** 不锈钢管混凝土结构中所使用的焊接材料和连接材料的性能，应具有质量合格证明书，并应符合本规程规定和设计文件的要求。

**【条文说明】8.1.4** 不锈钢管混凝土目前在国内较少作为结构构件使用，为保证结构质量，应对焊接与连接材料进行严格控制，保证构件耐腐蚀性能。

### 8.2 不锈钢管的制作与施工

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

**【条文说明】8.2.1** 不锈钢管混凝土构件常用作各种柱子，构造较为复杂，应根据工程特点，结合制作厂的条件编制制作工艺。制作工艺包括：制作所依据的标准，制作厂的质量保证体系，成品的质量保证体系和为保证成品达到规定的要求而制定的措施。工艺中还包括：生产场地的布置，采用的加工、焊接设备和工艺装备及检测设备，焊工和检验人员资质证明，各类检查项目表格，生产进度计划表及运输计划表等。

**8.2.2** 不锈钢构件加工应有专用的加工场地，应使用不锈钢专用设备。加工制作的允许偏差应按国家现行标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539/《结构用冷弯空心型钢尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 6728 和《钢管混凝土结构设计规范》GB 50936

的有关规定采用。

**【条文说明】8.2.2** 不锈钢管的加工包装、标志、运输、贮存阶段的要求应参考现行行业标准《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 的相关要求，以避免不锈钢构件表面受到碳素钢的污染。对于冷弯不锈钢管角部外圆弧半径  $R$  值的要求应符合现行国家标准《结构用冷弯空心型钢尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 6728 中的要求。

不锈钢管的加工过程与碳素钢相比，应注意在加工过程中对管件表面的保护，保持良好的表面外观以保证钢材的耐腐蚀性能。

若使用焊接不锈钢管，应注意控制加工和焊接引起的变形。不锈钢相比碳素钢在弯曲后回弹倾向大，且热膨胀系数较高、导热率较低，故在不锈钢管卷制焊接过程后应使用机械矫正以保证焊接不锈钢管达到国家现行规范的要求。

**8.2.3** 不锈钢管制作过程中的切割加工应按现行协会标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 中的有关规定进行，需边缘加工的零件宜采用精密切割。

**【条文说明】8.2.3** 对不锈钢的切割加工应避免采用火焰切割方式，以避免热输入引起较大的变形。

**8.2.4** 不锈钢管构件组装前，各零、部件应经检查合格，组装的允许偏差应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

**8.2.5** 不锈钢管的接长应采用对接熔透焊缝，焊缝质量等级、制作单元接头及最短拼接长度应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 和《钢结构焊接规范》GB 50661 的有关规定。

**8.2.6** 不锈钢管混凝土节点区域出现两种不同强度级别的同类不锈钢焊接时，宜采用与主体金属强度较低一种钢材相适应的焊接材料。

**8.2.7** 不锈钢的焊接应符合现行协会标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 和现行行业标准《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 的有关规定。

**8.2.8** 不锈钢管制作、运输和施工过程中应进行表面保护，不锈钢应进行酸洗处理。对有表面要求的不锈钢管混凝土结构，可对不锈钢表面进行特殊处理。

### 8.3 混凝土施工

**8.3.1** 用于不锈钢管中的混凝土力学性能指标和质量标准，应符合本规程第 3.2 节的有关规定和设计要求，并应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 中的有关规定。

**8.3.2** 不锈钢管内混凝土浇筑应在不锈钢构件安装验收合格后进行，且在浇筑过程中应对不锈钢管

外表面采取保护措施。

**8.3.3** 不锈钢管内混凝土的浇筑方式可采用泵送顶升浇筑法、高位抛落免振捣法和人工逐段浇捣法，施工时应符合下列规定：

- 1 采用泵送顶升浇筑法时，应符合下列规定：
  - 1) 不锈钢管的尺寸宜大于或等于进料管的两倍；
  - 2) 混凝土应满足可泵性的要求；
  - 3) 对泵送顶升浇筑的柱下部入口处的管壁应进行强度验算。
- 2 采用高位抛落免振捣法时，应符合下列规定：
  - 1) 高位抛落免振捣法宜用于管截面最小边长或管径大于 350mm、高度不小于 4m 的情况；
  - 2) 高位抛落免振捣法可采用泵管输送或料斗抛落的方式进行，下料口的尺寸应比不锈钢管截面最小边长或管径小 100mm~200mm；
  - 3) 随混凝土浇筑进程，对于抛落高度低于 4m 的区段，应用内部振捣器振实；
  - 4) 当采用料斗抛落方式时，一次抛落的混凝土量宜在 0.7m<sup>3</sup> 左右；
  - 5) 抛落浇筑到位的混凝土应无泌水和离析现象。
- 3 采用人工逐段浇捣法时，应符合下列规定：
  - 1) 混凝土应自不锈钢管上口灌入，并应用振捣器捣实；
  - 2) 不锈钢管截面最小边长或管径大于 350mm 时，应采用内部振捣器进行振捣，每次振捣时间宜为 15s~30s，一次浇灌高度不宜大于 2m；
  - 3) 不锈钢管截面最小边长或管径小于 350mm 时，可采用附着在不锈钢管外部的振捣器进行振捣，外部振捣的位置应随混凝土浇筑进展加以调整；
  - 4) 人工逐段浇捣法一次浇筑的高度不应大于振捣器的有效工作范围。

**【条文说明】8.3.3** 泵送顶升浇筑法、高位抛落免振捣法和人工逐段浇捣等混凝土浇筑方法是目前国内钢管混凝土工程施工中较为成熟的方法，其中以泵送顶升浇筑法的质量最易控制。无论采用哪种工艺，都不仅要保证混凝土强度，还要保证混凝土的密实度和匀质性。对于重要工程应预留工程中所用不锈钢管混凝土构件作为质量检测的参照试件。

**8.3.4** 混凝土的配合比除应满足强度指标外，还应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定。

**8.3.5** 不锈钢管内混凝土的浇筑宜连续进行，若采用间歇浇筑时，间隔时间不应超过混凝土的初凝时间。当不锈钢管混凝土构件需设置施工缝时，应将管口封闭。

**8.3.6** 每次采用高抛法浇筑混凝土前，应先浇灌一层厚度为 100mm~150mm 的与混凝土同配比的砂浆。

【条文说明】8.3.6 在底部浇灌同配比砂浆以免高处自由抛落的粗骨料弹跳而出现离析。

8.3.7 当混凝土浇灌至不锈钢管顶端且混凝土稍微溢出后，应将留有排气孔的层间横隔板或封顶板紧压在管端，随即进行点焊，待混凝土强度达到设计值的 50%以后，再将横隔板或封顶板按设计要求进行补焊。

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

8.3.9 钢管混凝土结构内部混凝土浇筑质量宜采用人工敲击与超声波检测相结合的办法，并应符合下列要求：

- 1 检测次数不少于 3 次，宜为浇注 7 天后、28 天后和验收前；
- 2 人工敲击检查可沿钢管周边选取等距离的若干点，沿钢管混凝土构件长度方向进行。人工敲击检查结果异常时，应加大检测密度，确定超声波检测范围；
- 3 超声波检测发现异常时，应进行钻孔复检。

8.3.10 不锈钢管混凝土作为承重构件时不允许出现图 8.3.10（a）所示的沿核心混凝土周长均匀分布的环向脱空缺陷。当检测出图 8.3.10（b）所示的球冠形脱空缺陷，应按式(8.3.10-1)—(8.3.10-12)进行考虑缺陷影响的承载能力极限状态验算。对于不满足要求的情况，应对带缺陷的不锈钢管混凝土构件进行内部灌浆补强或外部加固。

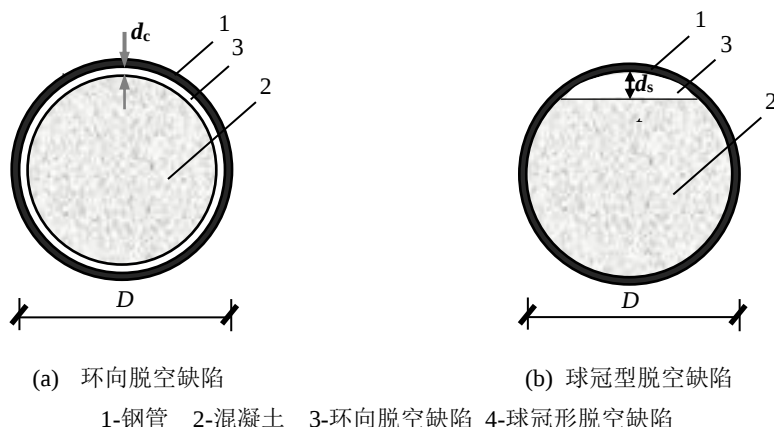


图 8.3.10 钢管混凝土的脱空缺陷

- 1 承受轴压荷载时应满足下式要求：

$$N \leq k N_u \quad (8.3.10-1)$$

$$k = 1 - f(\xi) \cdot \chi \leq 1 \quad (8.3.10-2)$$

$$f(\xi) = 1.42\xi + 0.44 \quad (\xi \leq 1.24) \quad (8.3.10-3)$$

$$f(\xi) = 4.66 - 1.97\xi \quad (\xi > 1.24) \quad (8.3.10-4)$$

2 承受压弯荷载时应满足下式要求:

当  $N/N_u \geq 2\eta_0$  时

$$\frac{N}{N_u} + \frac{a \cdot \beta_m \cdot M}{M_u} \leq k \quad (8.3.10-5)$$

当  $N/N_u < 2\eta_0$  时

$$\frac{-b \cdot N^2}{N_u^2} - \frac{c \cdot N}{N_u} + \frac{\beta_m \cdot M}{M_u} \leq k \quad (8.3.10-6)$$

$$k = 1 - 2.06\chi \quad (8.3.10-7)$$

3 承受拉弯荷载时应满足下式要求:

$$\frac{N}{1.1fA_s} + \frac{M}{M_u} \leq k \quad (8.3.10-8)$$

$$k = 1 - 1.15\chi \quad (8.3.10-9)$$

4 承受压弯扭复合荷载时应满足下式要求:

当  $N/N_u \geq 2\varphi^3\eta_0\sqrt[2.4]{1-(T/T_u)^2}$  时:

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq k \quad (8.3.10-10)$$

当  $N/N_u < 2\varphi^3\eta_0\sqrt[2.4]{1-(T/T_u)^2}$  时:

$$\left[-b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq k \quad (8.3.10-11)$$

$$k = 1 - 2.48\chi \quad (8.3.10-12)$$

式中:  $\chi$ —脱空率,  $\chi=2d_s/D$ ;

$d_s$ —球冠形脱空值;

$k$ —考虑脱空影响的承载力折减系数;

$N_u$ —钢管混凝土构件的轴压承载力设计值;

$M_u$ —钢管混凝土构件的抗弯承载力设计值;

$T_u$ —钢管混凝土构件的抗扭承载力设计值;

$f(\xi)$ —与约束效应系数相关的系数。

**【条文说明】8.3.10** 环向脱空主要存在于竖向承载的钢管混凝土构件(如柱、桥墩等),其成因主要为配合比不当引起核心混凝土过大收缩,或户外服役条件下的温差引起钢管和混凝土之间的膨胀变形差异。目前一些钢管混凝土重要工程,如北京中国尊大厦中的钢管混凝土巨形柱,已采用预埋传感器的方式来监测施工和服役过程中的环向脱空情况。编制组的研究结果表明:环向脱空率

( $\chi=d_c/D$ ,  $d_c$ 为环向脱空值,如图8.3.10所示,  $D$ 为钢管外径)在0.05%以内时,脱空对钢管混凝土

土构件在多数受荷工况（包括：轴压、抗弯、压弯、压弯剪）下的约束效应无显著影响，构件承载力因脱空而降低的幅度在 5%以内。但是，一旦钢管混凝土构件受到扭转作用，则脱空率超过 1%时，环向脱空对钢管混凝土的承载力影响幅度就达到 5%。因此，鉴于钢管混凝土在结构中一般作为重要承力构件，建议对于环向脱空缺陷要严格控制。

球冠形脱空主要存在于水平跨越的钢管混凝土构件（如桁梁等），其成因主要为：泵送顶升法施工时易在混凝土截面顶部产生沉缩和气腔，由此导致球冠形脱空缺陷。编制组开展了带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土构件在轴压、纯弯、压弯、拉弯、压弯扭作用下的试验研究和理论分析，结果表明：球冠形脱空对约束效应的影响是局部的，随脱空率的增大其影响程度趋于显著。球冠形脱空率在 2%以内时，脱空的影响尚不显著，由此导致的构件承载力下降幅度在 5%以内。编制组在系统的参数分析基础上，回归了各种荷载工况下的考虑脱空缺陷影响的钢管混凝土构件承载力验算公式。

## **8.4 验收**

**8.4.1** 不锈钢管混凝土结构工程的质量验收应符合国家现行标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB 50628 和《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539 的有关规定。

**8.4.2** 不锈钢管混凝土子分部工程验收时应提供下列文件和记录：

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

**8.4.3** 不锈钢管混凝土结构内部混凝土浇灌质量可采用敲击不锈钢管的方式检查混凝土密实度，重

要构件或部位宜采用超声波或冲击回波进行检测。

**8.4.3** 应对不锈钢管混凝土构件表面质量缺陷是否达到耐腐蚀要求进行检验验收。

**8.4.4** 不锈钢管混凝土防火保护工程应进行消防验收。消防验收时，建设单位应提供下列资料：

- 1 消防机构或建设部门的审批文件、竣工图及相关文件；
- 2 建筑工程消防验收申请表；
- 3 消防监理单位的监理报告；
- 4 隐蔽工程验收记录、现场施工质量记录；
- 5 产品质量合格证明文件；
- 6 抽检产品粘结强度、抗压强度检测报告及材料的燃烧性能检测报告等相关文件；
- 7 其他必要文件和记录。

## 附录 A 稳定系数 $\varphi$ 值表

表 A.0.1 圆不锈钢管混凝土构件的稳定系数 $\varphi$ 值

| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S30408<br>S31608 | C40 | 0.06       | 1.000     | 0.960 | 0.904 | 0.850 | 0.799 | 0.750 | 0.704 | 0.660 | 0.619 | 0.580 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.961 | 0.906 | 0.854 | 0.804 | 0.757 | 0.711 | 0.668 | 0.627 | 0.588 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.962 | 0.910 | 0.860 | 0.812 | 0.765 | 0.721 | 0.679 | 0.638 | 0.599 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.963 | 0.913 | 0.864 | 0.817 | 0.772 | 0.728 | 0.686 | 0.646 | 0.607 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.964 | 0.915 | 0.867 | 0.821 | 0.777 | 0.734 | 0.692 | 0.652 | 0.614 |
|                  | C50 | 0.06       | 1.000     | 0.947 | 0.887 | 0.829 | 0.775 | 0.723 | 0.675 | 0.630 | 0.588 | 0.549 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.948 | 0.889 | 0.833 | 0.780 | 0.729 | 0.682 | 0.637 | 0.596 | 0.557 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.950 | 0.893 | 0.839 | 0.787 | 0.738 | 0.691 | 0.647 | 0.606 | 0.568 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.951 | 0.896 | 0.843 | 0.792 | 0.744 | 0.698 | 0.655 | 0.614 | 0.575 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.952 | 0.898 | 0.846 | 0.796 | 0.749 | 0.704 | 0.661 | 0.620 | 0.581 |
|                  | C60 | 0.06       | 1.000     | 0.934 | 0.868 | 0.805 | 0.746 | 0.692 | 0.641 | 0.594 | 0.551 | 0.513 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.937 | 0.874 | 0.814 | 0.758 | 0.705 | 0.656 | 0.610 | 0.568 | 0.529 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.939 | 0.878 | 0.820 | 0.765 | 0.713 | 0.665 | 0.620 | 0.578 | 0.540 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.940 | 0.880 | 0.823 | 0.770 | 0.719 | 0.672 | 0.627 | 0.585 | 0.547 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.941 | 0.882 | 0.827 | 0.774 | 0.724 | 0.677 | 0.632 | 0.591 | 0.553 |
| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                  |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S30408<br>S31608 | C40 | 0.06       | 0.544     | 0.510 | 0.450 | 0.400 | 0.358 | 0.323 | 0.292 | 0.265 | 0.242 | 0.222 |
|                  |     | 0.08       | 0.551     | 0.517 | 0.457 | 0.406 | 0.364 | 0.327 | 0.296 | 0.269 | 0.246 | 0.225 |
|                  |     | 0.12       | 0.562     | 0.528 | 0.466 | 0.415 | 0.371 | 0.334 | 0.302 | 0.275 | 0.251 | 0.230 |
|                  |     | 0.16       | 0.570     | 0.535 | 0.473 | 0.421 | 0.376 | 0.339 | 0.307 | 0.279 | 0.254 | 0.233 |
|                  |     | 0.20       | 0.577     | 0.541 | 0.478 | 0.425 | 0.381 | 0.343 | 0.310 | 0.282 | 0.257 | 0.236 |
|                  | C50 | 0.06       | 1.000     | 0.947 | 0.887 | 0.829 | 0.775 | 0.723 | 0.675 | 0.630 | 0.588 | 0.549 |
|                  |     | 0.08       | 0.521     | 0.488 | 0.432 | 0.384 | 0.343 | 0.309 | 0.280 | 0.254 | 0.232 | 0.213 |
|                  |     | 0.12       | 0.532     | 0.498 | 0.440 | 0.391 | 0.350 | 0.315 | 0.285 | 0.259 | 0.237 | 0.217 |
|                  |     | 0.16       | 0.539     | 0.505 | 0.447 | 0.397 | 0.355 | 0.320 | 0.289 | 0.263 | 0.240 | 0.220 |
|                  |     | 0.20       | 0.545     | 0.511 | 0.452 | 0.402 | 0.359 | 0.323 | 0.293 | 0.266 | 0.243 | 0.223 |
|                  | C60 | 0.06       | 0.487     | 0.456 | 0.403 | 0.358 | 0.321 | 0.289 | 0.261 | 0.238 | 0.217 | 0.199 |
|                  |     | 0.08       | 0.494     | 0.463 | 0.409 | 0.364 | 0.325 | 0.293 | 0.265 | 0.241 | 0.220 | 0.202 |
|                  |     | 0.12       | 0.504     | 0.472 | 0.417 | 0.371 | 0.332 | 0.299 | 0.270 | 0.246 | 0.225 | 0.206 |
|                  |     | 0.16       | 0.511     | 0.479 | 0.424 | 0.377 | 0.337 | 0.303 | 0.274 | 0.249 | 0.228 | 0.209 |
|                  |     | 0.20       | 0.517     | 0.484 | 0.428 | 0.381 | 0.341 | 0.307 | 0.277 | 0.252 | 0.230 | 0.211 |

续表 A.0.1

| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S30403<br>S31603 | C40 | 0.06       | 1.000     | 0.958 | 0.901 | 0.846 | 0.793 | 0.744 | 0.697 | 0.653 | 0.612 | 0.573 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.959 | 0.903 | 0.849 | 0.798 | 0.749 | 0.703 | 0.660 | 0.619 | 0.581 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.960 | 0.906 | 0.854 | 0.804 | 0.757 | 0.712 | 0.669 | 0.629 | 0.591 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.961 | 0.908 | 0.858 | 0.809 | 0.763 | 0.719 | 0.676 | 0.637 | 0.599 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.962 | 0.910 | 0.860 | 0.813 | 0.767 | 0.724 | 0.682 | 0.642 | 0.605 |
|                  | C50 | 0.06       | 1.000     | 0.946 | 0.885 | 0.826 | 0.771 | 0.719 | 0.671 | 0.625 | 0.583 | 0.545 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.947 | 0.887 | 0.830 | 0.775 | 0.724 | 0.676 | 0.632 | 0.590 | 0.551 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.949 | 0.890 | 0.834 | 0.782 | 0.732 | 0.685 | 0.641 | 0.600 | 0.561 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.949 | 0.892 | 0.838 | 0.786 | 0.737 | 0.691 | 0.647 | 0.607 | 0.569 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.950 | 0.894 | 0.841 | 0.790 | 0.741 | 0.696 | 0.653 | 0.612 | 0.574 |
|                  | C60 | 0.06       | 1.000     | 0.935 | 0.870 | 0.809 | 0.751 | 0.697 | 0.647 | 0.601 | 0.558 | 0.519 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.936 | 0.873 | 0.812 | 0.755 | 0.702 | 0.653 | 0.607 | 0.564 | 0.526 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.938 | 0.876 | 0.817 | 0.761 | 0.709 | 0.661 | 0.615 | 0.574 | 0.535 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.939 | 0.878 | 0.820 | 0.766 | 0.715 | 0.667 | 0.622 | 0.580 | 0.542 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.940 | 0.880 | 0.823 | 0.769 | 0.719 | 0.671 | 0.627 | 0.585 | 0.547 |
| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                  |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S30403<br>S31603 | C40 | 0.06       | 0.538     | 0.505 | 0.474 | 0.422 | 0.377 | 0.340 | 0.307 | 0.279 | 0.255 | 0.234 |
|                  |     | 0.08       | 0.545     | 0.512 | 0.481 | 0.428 | 0.383 | 0.345 | 0.312 | 0.283 | 0.259 | 0.237 |
|                  |     | 0.12       | 0.556     | 0.522 | 0.491 | 0.437 | 0.391 | 0.352 | 0.318 | 0.289 | 0.264 | 0.242 |
|                  |     | 0.16       | 0.563     | 0.530 | 0.498 | 0.443 | 0.396 | 0.357 | 0.323 | 0.293 | 0.268 | 0.246 |
|                  |     | 0.20       | 0.569     | 0.536 | 0.504 | 0.448 | 0.401 | 0.361 | 0.326 | 0.297 | 0.271 | 0.248 |
|                  | C50 | 0.06       | 0.509     | 0.477 | 0.448 | 0.398 | 0.356 | 0.321 | 0.290 | 0.264 | 0.241 | 0.221 |
|                  |     | 0.08       | 0.516     | 0.484 | 0.454 | 0.404 | 0.362 | 0.325 | 0.294 | 0.268 | 0.244 | 0.224 |
|                  |     | 0.12       | 0.526     | 0.494 | 0.464 | 0.412 | 0.369 | 0.332 | 0.300 | 0.273 | 0.249 | 0.229 |
|                  |     | 0.16       | 0.533     | 0.501 | 0.470 | 0.418 | 0.374 | 0.337 | 0.305 | 0.277 | 0.253 | 0.232 |
|                  |     | 0.20       | 0.539     | 0.506 | 0.476 | 0.423 | 0.378 | 0.341 | 0.308 | 0.280 | 0.256 | 0.235 |
|                  | C60 | 0.06       | 0.484     | 0.453 | 0.425 | 0.378 | 0.338 | 0.304 | 0.275 | 0.250 | 0.228 | 0.209 |
|                  |     | 0.08       | 0.490     | 0.459 | 0.431 | 0.383 | 0.343 | 0.308 | 0.279 | 0.254 | 0.232 | 0.212 |
|                  |     | 0.12       | 0.500     | 0.468 | 0.440 | 0.391 | 0.350 | 0.315 | 0.285 | 0.259 | 0.236 | 0.217 |
|                  |     | 0.16       | 0.507     | 0.475 | 0.446 | 0.397 | 0.355 | 0.319 | 0.289 | 0.263 | 0.240 | 0.220 |
|                  |     | 0.20       | 0.512     | 0.480 | 0.451 | 0.401 | 0.359 | 0.323 | 0.292 | 0.266 | 0.243 | 0.222 |

续表 A.0.1

| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S11873 | C40 | 0.06       | 1.000     | 0.959 | 0.903 | 0.849 | 0.798 | 0.749 | 0.703 | 0.659 | 0.618 | 0.579 |
|        |     | 0.08       | 1.000     | 0.960 | 0.906 | 0.853 | 0.803 | 0.755 | 0.710 | 0.667 | 0.626 | 0.587 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.962 | 0.909 | 0.859 | 0.810 | 0.764 | 0.720 | 0.677 | 0.637 | 0.598 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.962 | 0.912 | 0.863 | 0.816 | 0.770 | 0.727 | 0.685 | 0.645 | 0.606 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.963 | 0.914 | 0.866 | 0.820 | 0.775 | 0.732 | 0.691 | 0.651 | 0.612 |
|        | C50 | 0.06       | 1.000     | 0.947 | 0.886 | 0.829 | 0.774 | 0.723 | 0.674 | 0.629 | 0.587 | 0.549 |
|        |     | 0.08       | 1.000     | 0.948 | 0.889 | 0.832 | 0.779 | 0.728 | 0.681 | 0.636 | 0.595 | 0.556 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.950 | 0.892 | 0.838 | 0.786 | 0.737 | 0.690 | 0.646 | 0.605 | 0.567 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.951 | 0.895 | 0.842 | 0.791 | 0.743 | 0.697 | 0.654 | 0.613 | 0.574 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.952 | 0.897 | 0.845 | 0.795 | 0.748 | 0.702 | 0.659 | 0.619 | 0.580 |
|        | C60 | 0.06       | 1.000     | 0.936 | 0.871 | 0.810 | 0.753 | 0.699 | 0.649 | 0.603 | 0.561 | 0.522 |
|        |     | 0.08       | 1.000     | 0.937 | 0.874 | 0.814 | 0.757 | 0.705 | 0.655 | 0.610 | 0.568 | 0.529 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.939 | 0.877 | 0.819 | 0.764 | 0.713 | 0.664 | 0.619 | 0.577 | 0.539 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.940 | 0.880 | 0.823 | 0.769 | 0.718 | 0.671 | 0.626 | 0.585 | 0.546 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.941 | 0.882 | 0.826 | 0.773 | 0.723 | 0.676 | 0.632 | 0.590 | 0.552 |
| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|        |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S11873 | C40 | 0.06       | 0.543     | 0.509 | 0.454 | 0.404 | 0.361 | 0.325 | 0.294 | 0.268 | 0.244 | 0.224 |
|        |     | 0.08       | 0.551     | 0.516 | 0.461 | 0.410 | 0.367 | 0.330 | 0.299 | 0.271 | 0.248 | 0.227 |
|        |     | 0.12       | 0.562     | 0.527 | 0.470 | 0.418 | 0.374 | 0.337 | 0.305 | 0.277 | 0.253 | 0.232 |
|        |     | 0.16       | 0.569     | 0.535 | 0.477 | 0.424 | 0.379 | 0.342 | 0.309 | 0.281 | 0.257 | 0.235 |
|        |     | 0.20       | 0.576     | 0.541 | 0.482 | 0.429 | 0.384 | 0.345 | 0.313 | 0.284 | 0.259 | 0.238 |
|        | C50 | 0.06       | 0.513     | 0.481 | 0.429 | 0.381 | 0.341 | 0.307 | 0.278 | 0.253 | 0.231 | 0.211 |
|        |     | 0.08       | 0.520     | 0.488 | 0.435 | 0.387 | 0.346 | 0.312 | 0.282 | 0.256 | 0.234 | 0.215 |
|        |     | 0.12       | 0.531     | 0.498 | 0.444 | 0.395 | 0.353 | 0.318 | 0.288 | 0.262 | 0.239 | 0.219 |
|        |     | 0.16       | 0.538     | 0.505 | 0.450 | 0.400 | 0.358 | 0.323 | 0.292 | 0.265 | 0.242 | 0.222 |
|        |     | 0.20       | 0.544     | 0.510 | 0.456 | 0.405 | 0.362 | 0.326 | 0.295 | 0.268 | 0.245 | 0.225 |
|        | C60 | 0.06       | 0.487     | 0.456 | 0.407 | 0.361 | 0.323 | 0.291 | 0.263 | 0.239 | 0.219 | 0.200 |
|        |     | 0.08       | 0.494     | 0.462 | 0.413 | 0.367 | 0.328 | 0.295 | 0.267 | 0.243 | 0.222 | 0.203 |
|        |     | 0.12       | 0.504     | 0.472 | 0.421 | 0.374 | 0.335 | 0.301 | 0.273 | 0.248 | 0.226 | 0.208 |
|        |     | 0.16       | 0.511     | 0.479 | 0.427 | 0.380 | 0.340 | 0.306 | 0.277 | 0.252 | 0.230 | 0.211 |
|        |     | 0.20       | 0.516     | 0.484 | 0.432 | 0.384 | 0.344 | 0.309 | 0.280 | 0.254 | 0.232 | 0.213 |

续表 A.0.1

| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S11972 | C40 | 0.06       | 1.000     | 0.963 | 0.911 | 0.860 | 0.811 | 0.764 | 0.718 | 0.673 | 0.630 | 0.588 |
|        |     | 0.08       | 1.000     | 0.964 | 0.914 | 0.865 | 0.818 | 0.771 | 0.726 | 0.681 | 0.638 | 0.596 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.966 | 0.919 | 0.873 | 0.827 | 0.782 | 0.738 | 0.694 | 0.651 | 0.608 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.967 | 0.922 | 0.878 | 0.834 | 0.790 | 0.746 | 0.703 | 0.660 | 0.617 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.968 | 0.925 | 0.882 | 0.839 | 0.796 | 0.753 | 0.710 | 0.667 | 0.624 |
|        | C50 | 0.06       | 1.000     | 0.963 | 0.911 | 0.860 | 0.811 | 0.764 | 0.718 | 0.673 | 0.630 | 0.588 |
|        |     | 0.08       | 1.000     | 0.951 | 0.895 | 0.841 | 0.789 | 0.740 | 0.692 | 0.647 | 0.604 | 0.563 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.953 | 0.900 | 0.848 | 0.798 | 0.750 | 0.704 | 0.659 | 0.616 | 0.574 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.955 | 0.903 | 0.853 | 0.805 | 0.757 | 0.712 | 0.667 | 0.624 | 0.583 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.956 | 0.906 | 0.857 | 0.810 | 0.763 | 0.718 | 0.674 | 0.631 | 0.589 |
|        | C60 | 0.06       | 1.000     | 0.937 | 0.874 | 0.814 | 0.758 | 0.705 | 0.655 | 0.609 | 0.566 | 0.526 |
|        |     | 0.08       | 1.000     | 0.939 | 0.878 | 0.819 | 0.764 | 0.712 | 0.663 | 0.617 | 0.574 | 0.534 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.941 | 0.882 | 0.826 | 0.772 | 0.722 | 0.673 | 0.628 | 0.585 | 0.545 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.943 | 0.886 | 0.831 | 0.779 | 0.729 | 0.681 | 0.636 | 0.593 | 0.553 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.944 | 0.888 | 0.835 | 0.783 | 0.734 | 0.687 | 0.642 | 0.599 | 0.559 |
| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|        |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S11972 | C40 | 0.06       | 0.529     | 0.463 | 0.409 | 0.363 | 0.325 | 0.293 | 0.265 | 0.241 | 0.220 | 0.201 |
|        |     | 0.08       | 0.537     | 0.470 | 0.415 | 0.369 | 0.330 | 0.297 | 0.269 | 0.244 | 0.223 | 0.204 |
|        |     | 0.12       | 0.548     | 0.479 | 0.423 | 0.376 | 0.337 | 0.303 | 0.274 | 0.249 | 0.228 | 0.209 |
|        |     | 0.16       | 0.556     | 0.486 | 0.429 | 0.382 | 0.341 | 0.307 | 0.278 | 0.253 | 0.231 | 0.212 |
|        |     | 0.20       | 0.562     | 0.492 | 0.434 | 0.386 | 0.345 | 0.311 | 0.281 | 0.256 | 0.233 | 0.214 |
|        | C50 | 0.06       | 0.500     | 0.437 | 0.386 | 0.343 | 0.307 | 0.276 | 0.250 | 0.227 | 0.208 | 0.190 |
|        |     | 0.08       | 0.507     | 0.444 | 0.391 | 0.348 | 0.311 | 0.280 | 0.254 | 0.231 | 0.211 | 0.193 |
|        |     | 0.12       | 0.517     | 0.453 | 0.399 | 0.355 | 0.318 | 0.286 | 0.259 | 0.235 | 0.215 | 0.197 |
|        |     | 0.16       | 0.525     | 0.459 | 0.405 | 0.360 | 0.322 | 0.290 | 0.263 | 0.239 | 0.218 | 0.200 |
|        |     | 0.20       | 0.531     | 0.464 | 0.410 | 0.364 | 0.326 | 0.293 | 0.265 | 0.241 | 0.220 | 0.202 |
|        | C60 | 0.06       | 0.474     | 0.415 | 0.366 | 0.325 | 0.291 | 0.262 | 0.237 | 0.215 | 0.197 | 0.180 |
|        |     | 0.08       | 0.481     | 0.421 | 0.371 | 0.330 | 0.295 | 0.266 | 0.240 | 0.219 | 0.200 | 0.183 |
|        |     | 0.12       | 0.490     | 0.429 | 0.379 | 0.337 | 0.301 | 0.271 | 0.245 | 0.223 | 0.204 | 0.187 |
|        |     | 0.16       | 0.498     | 0.435 | 0.384 | 0.342 | 0.306 | 0.275 | 0.249 | 0.226 | 0.207 | 0.189 |
|        |     | 0.20       | 0.503     | 0.440 | 0.389 | 0.345 | 0.309 | 0.278 | 0.252 | 0.229 | 0.209 | 0.192 |

续表 A.0.1

| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S22053<br>S22253 | C50 | 0.06       | 1.000     | 0.955 | 0.901 | 0.847 | 0.794 | 0.740 | 0.687 | 0.634 | 0.547 | 0.469 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.957 | 0.906 | 0.854 | 0.802 | 0.749 | 0.696 | 0.643 | 0.555 | 0.475 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.960 | 0.913 | 0.864 | 0.814 | 0.763 | 0.710 | 0.656 | 0.566 | 0.485 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.963 | 0.918 | 0.871 | 0.823 | 0.772 | 0.720 | 0.666 | 0.574 | 0.492 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.965 | 0.922 | 0.877 | 0.830 | 0.780 | 0.728 | 0.673 | 0.581 | 0.498 |
|                  | C60 | 0.06       | 1.000     | 0.940 | 0.879 | 0.819 | 0.762 | 0.706 | 0.653 | 0.601 | 0.518 | 0.444 |
|                  |     | 0.08       | 1.000     | 0.942 | 0.883 | 0.826 | 0.770 | 0.715 | 0.662 | 0.610 | 0.526 | 0.451 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.946 | 0.890 | 0.836 | 0.781 | 0.728 | 0.675 | 0.622 | 0.537 | 0.460 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.949 | 0.896 | 0.843 | 0.790 | 0.737 | 0.684 | 0.631 | 0.544 | 0.467 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.951 | 0.900 | 0.848 | 0.796 | 0.744 | 0.691 | 0.638 | 0.550 | 0.472 |
|                  | C70 | 0.06       | 0.998     | 0.928 | 0.861 | 0.798 | 0.737 | 0.680 | 0.626 | 0.576 | 0.497 | 0.426 |
|                  |     | 0.08       | 0.998     | 0.930 | 0.866 | 0.804 | 0.745 | 0.689 | 0.635 | 0.584 | 0.504 | 0.432 |
|                  |     | 0.12       | 0.997     | 0.934 | 0.873 | 0.814 | 0.756 | 0.701 | 0.647 | 0.596 | 0.514 | 0.441 |
|                  |     | 0.16       | 0.997     | 0.937 | 0.878 | 0.820 | 0.764 | 0.710 | 0.656 | 0.605 | 0.522 | 0.447 |
|                  |     | 0.20       | 0.997     | 0.939 | 0.882 | 0.826 | 0.771 | 0.717 | 0.664 | 0.612 | 0.528 | 0.452 |
|                  | C80 | 0.06       | 0.992     | 0.916 | 0.844 | 0.777 | 0.714 | 0.655 | 0.602 | 0.552 | 0.476 | 0.408 |
|                  |     | 0.08       | 0.992     | 0.919 | 0.849 | 0.783 | 0.721 | 0.664 | 0.610 | 0.560 | 0.483 | 0.414 |
|                  |     | 0.12       | 0.992     | 0.922 | 0.856 | 0.792 | 0.732 | 0.675 | 0.622 | 0.572 | 0.493 | 0.423 |
|                  |     | 0.16       | 0.992     | 0.925 | 0.860 | 0.799 | 0.740 | 0.684 | 0.630 | 0.580 | 0.500 | 0.429 |
|                  |     | 0.20       | 0.992     | 0.927 | 0.864 | 0.804 | 0.746 | 0.690 | 0.637 | 0.586 | 0.506 | 0.434 |
| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                  |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S22053<br>S22253 | C50 | 0.06       | 0.406     | 0.356 | 0.314 | 0.279 | 0.250 | 0.225 | 0.203 | 0.185 | 0.169 | 0.155 |
|                  |     | 0.08       | 0.412     | 0.361 | 0.318 | 0.283 | 0.253 | 0.228 | 0.206 | 0.187 | 0.171 | 0.157 |
|                  |     | 0.12       | 0.421     | 0.368 | 0.325 | 0.289 | 0.258 | 0.233 | 0.210 | 0.191 | 0.175 | 0.160 |
|                  |     | 0.16       | 0.427     | 0.373 | 0.330 | 0.293 | 0.262 | 0.236 | 0.213 | 0.194 | 0.177 | 0.162 |
|                  |     | 0.20       | 0.431     | 0.378 | 0.333 | 0.296 | 0.265 | 0.239 | 0.216 | 0.196 | 0.179 | 0.164 |
|                  | C60 | 0.06       | 0.385     | 0.337 | 0.297 | 0.264 | 0.237 | 0.213 | 0.193 | 0.175 | 0.160 | 0.147 |
|                  |     | 0.08       | 0.391     | 0.342 | 0.302 | 0.268 | 0.240 | 0.216 | 0.195 | 0.178 | 0.162 | 0.149 |
|                  |     | 0.12       | 0.399     | 0.349 | 0.308 | 0.274 | 0.245 | 0.220 | 0.199 | 0.181 | 0.166 | 0.152 |
|                  |     | 0.16       | 0.404     | 0.354 | 0.312 | 0.278 | 0.248 | 0.224 | 0.202 | 0.184 | 0.168 | 0.154 |
|                  |     | 0.20       | 0.409     | 0.358 | 0.316 | 0.281 | 0.251 | 0.226 | 0.205 | 0.186 | 0.170 | 0.156 |
|                  | C70 | 0.06       | 0.369     | 0.323 | 0.285 | 0.253 | 0.227 | 0.204 | 0.185 | 0.168 | 0.153 | 0.141 |
|                  |     | 0.08       | 0.374     | 0.328 | 0.289 | 0.257 | 0.230 | 0.207 | 0.187 | 0.170 | 0.156 | 0.143 |
|                  |     | 0.12       | 0.382     | 0.334 | 0.295 | 0.262 | 0.235 | 0.211 | 0.191 | 0.174 | 0.159 | 0.145 |
|                  |     | 0.16       | 0.388     | 0.339 | 0.299 | 0.266 | 0.238 | 0.214 | 0.194 | 0.176 | 0.161 | 0.148 |
|                  |     | 0.20       | 0.392     | 0.343 | 0.303 | 0.269 | 0.241 | 0.217 | 0.196 | 0.178 | 0.163 | 0.149 |
|                  | C80 | 0.06       | 0.354     | 0.310 | 0.273 | 0.243 | 0.217 | 0.196 | 0.177 | 0.161 | 0.147 | 0.135 |
|                  |     | 0.08       | 0.359     | 0.314 | 0.277 | 0.246 | 0.221 | 0.198 | 0.180 | 0.163 | 0.149 | 0.137 |
|                  |     | 0.12       | 0.366     | 0.321 | 0.283 | 0.252 | 0.225 | 0.203 | 0.183 | 0.167 | 0.152 | 0.139 |
|                  |     | 0.16       | 0.372     | 0.325 | 0.287 | 0.255 | 0.228 | 0.206 | 0.186 | 0.169 | 0.154 | 0.141 |
|                  |     | 0.20       | 0.376     | 0.329 | 0.290 | 0.258 | 0.231 | 0.208 | 0.188 | 0.171 | 0.156 | 0.143 |

注：表内中间值可采用插值法求得。

表 A.0.2 矩形不锈钢混凝土构件的稳定系数 $\varphi$ 值

| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S30408<br>S31608 | C40 | 0.10       | 1.000     | 0.949 | 0.894 | 0.841 | 0.791 | 0.744 | 0.698 | 0.655 | 0.615 | 0.577 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.950 | 0.896 | 0.844 | 0.794 | 0.747 | 0.702 | 0.660 | 0.619 | 0.582 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.950 | 0.898 | 0.848 | 0.799 | 0.753 | 0.709 | 0.667 | 0.627 | 0.589 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.951 | 0.900 | 0.850 | 0.803 | 0.758 | 0.714 | 0.673 | 0.633 | 0.595 |
|                  | C50 | 0.10       | 1.000     | 0.938 | 0.878 | 0.822 | 0.768 | 0.718 | 0.671 | 0.626 | 0.585 | 0.547 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.938 | 0.880 | 0.824 | 0.771 | 0.721 | 0.675 | 0.631 | 0.590 | 0.551 |
|                  |     | 0.16       | 0.999     | 0.939 | 0.882 | 0.828 | 0.776 | 0.727 | 0.681 | 0.637 | 0.597 | 0.559 |
|                  |     | 0.20       | 0.999     | 0.940 | 0.884 | 0.831 | 0.780 | 0.731 | 0.686 | 0.643 | 0.602 | 0.564 |
|                  | C60 | 0.10       | 1.000     | 0.938 | 0.878 | 0.822 | 0.768 | 0.718 | 0.671 | 0.626 | 0.585 | 0.547 |
|                  |     | 0.12       | 0.994     | 0.928 | 0.865 | 0.806 | 0.751 | 0.699 | 0.650 | 0.605 | 0.563 | 0.525 |
|                  |     | 0.16       | 0.993     | 0.929 | 0.868 | 0.810 | 0.755 | 0.704 | 0.656 | 0.611 | 0.570 | 0.532 |
|                  |     | 0.20       | 0.993     | 0.930 | 0.870 | 0.813 | 0.759 | 0.708 | 0.661 | 0.616 | 0.575 | 0.537 |
| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                  |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S30408<br>S31608 | C40 | 0.10       | 0.541     | 0.508 | 0.463 | 0.411 | 0.368 | 0.331 | 0.300 | 0.273 | 0.249 | 0.228 |
|                  |     | 0.12       | 0.546     | 0.513 | 0.467 | 0.415 | 0.371 | 0.334 | 0.303 | 0.275 | 0.251 | 0.230 |
|                  |     | 0.16       | 0.554     | 0.520 | 0.474 | 0.421 | 0.377 | 0.339 | 0.307 | 0.279 | 0.255 | 0.234 |
|                  |     | 0.20       | 0.560     | 0.526 | 0.479 | 0.426 | 0.381 | 0.343 | 0.310 | 0.282 | 0.258 | 0.236 |
|                  | C50 | 0.10       | 0.512     | 0.480 | 0.437 | 0.388 | 0.348 | 0.313 | 0.283 | 0.257 | 0.235 | 0.215 |
|                  |     | 0.12       | 0.516     | 0.484 | 0.441 | 0.392 | 0.351 | 0.316 | 0.286 | 0.260 | 0.237 | 0.217 |
|                  |     | 0.16       | 0.524     | 0.491 | 0.447 | 0.398 | 0.356 | 0.320 | 0.290 | 0.263 | 0.241 | 0.221 |
|                  |     | 0.20       | 0.529     | 0.497 | 0.452 | 0.402 | 0.360 | 0.324 | 0.293 | 0.266 | 0.243 | 0.223 |
|                  | C60 | 0.10       | 0.486     | 0.455 | 0.414 | 0.368 | 0.330 | 0.297 | 0.268 | 0.244 | 0.223 | 0.204 |
|                  |     | 0.12       | 0.490     | 0.459 | 0.418 | 0.372 | 0.333 | 0.299 | 0.271 | 0.246 | 0.225 | 0.206 |
|                  |     | 0.16       | 0.497     | 0.466 | 0.424 | 0.377 | 0.337 | 0.304 | 0.275 | 0.250 | 0.228 | 0.209 |
|                  |     | 0.20       | 0.502     | 0.471 | 0.429 | 0.381 | 0.341 | 0.307 | 0.278 | 0.253 | 0.231 | 0.211 |

续表 A.0.2

| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S30403<br>S31603 | C40 | 0.10       | 1.000     | 0.948 | 0.892 | 0.838 | 0.787 | 0.738 | 0.692 | 0.649 | 0.609 | 0.571 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.948 | 0.893 | 0.840 | 0.789 | 0.741 | 0.696 | 0.653 | 0.613 | 0.575 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.949 | 0.895 | 0.843 | 0.793 | 0.746 | 0.702 | 0.660 | 0.620 | 0.582 |
|                  |     | 0.20       | 1.000     | 0.949 | 0.896 | 0.845 | 0.797 | 0.750 | 0.706 | 0.665 | 0.625 | 0.588 |
|                  | C50 | 0.10       | 1.000     | 0.937 | 0.877 | 0.820 | 0.766 | 0.715 | 0.667 | 0.623 | 0.581 | 0.543 |
|                  |     | 0.12       | 1.000     | 0.938 | 0.878 | 0.822 | 0.768 | 0.718 | 0.671 | 0.626 | 0.585 | 0.547 |
|                  |     | 0.16       | 1.000     | 0.938 | 0.880 | 0.825 | 0.772 | 0.723 | 0.676 | 0.633 | 0.592 | 0.554 |
|                  |     | 0.20       | 0.999     | 0.939 | 0.882 | 0.827 | 0.775 | 0.727 | 0.681 | 0.637 | 0.597 | 0.559 |
|                  | C60 | 0.10       | 0.994     | 0.927 | 0.864 | 0.803 | 0.747 | 0.694 | 0.645 | 0.599 | 0.557 | 0.518 |
|                  |     | 0.12       | 0.994     | 0.928 | 0.865 | 0.805 | 0.749 | 0.697 | 0.648 | 0.603 | 0.561 | 0.522 |
|                  |     | 0.16       | 0.994     | 0.929 | 0.867 | 0.808 | 0.753 | 0.702 | 0.653 | 0.609 | 0.567 | 0.529 |
|                  |     | 0.20       | 0.993     | 0.929 | 0.868 | 0.811 | 0.757 | 0.705 | 0.658 | 0.613 | 0.572 | 0.534 |
| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                  |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S30403<br>S31603 | C40 | 0.10       | 0.536     | 0.503 | 0.474 | 0.434 | 0.388 | 0.349 | 0.316 | 0.287 | 0.262 | 0.241 |
|                  |     | 0.12       | 0.540     | 0.508 | 0.478 | 0.438 | 0.392 | 0.353 | 0.319 | 0.290 | 0.265 | 0.243 |
|                  |     | 0.16       | 0.548     | 0.515 | 0.485 | 0.444 | 0.397 | 0.358 | 0.324 | 0.294 | 0.269 | 0.246 |
|                  |     | 0.20       | 0.553     | 0.521 | 0.490 | 0.449 | 0.402 | 0.362 | 0.327 | 0.298 | 0.272 | 0.249 |
|                  | C50 | 0.10       | 0.508     | 0.476 | 0.447 | 0.410 | 0.367 | 0.330 | 0.299 | 0.271 | 0.248 | 0.227 |
|                  |     | 0.12       | 0.512     | 0.480 | 0.451 | 0.413 | 0.370 | 0.333 | 0.301 | 0.274 | 0.250 | 0.229 |
|                  |     | 0.16       | 0.519     | 0.487 | 0.458 | 0.419 | 0.375 | 0.338 | 0.306 | 0.278 | 0.254 | 0.233 |
|                  |     | 0.20       | 0.524     | 0.492 | 0.463 | 0.424 | 0.380 | 0.342 | 0.309 | 0.281 | 0.257 | 0.235 |
|                  | C60 | 0.10       | 0.483     | 0.452 | 0.424 | 0.388 | 0.348 | 0.313 | 0.283 | 0.257 | 0.235 | 0.215 |
|                  |     | 0.12       | 0.487     | 0.456 | 0.428 | 0.392 | 0.351 | 0.316 | 0.286 | 0.260 | 0.237 | 0.217 |
|                  |     | 0.16       | 0.494     | 0.462 | 0.434 | 0.398 | 0.356 | 0.320 | 0.290 | 0.263 | 0.241 | 0.221 |
|                  |     | 0.20       | 0.499     | 0.467 | 0.439 | 0.402 | 0.360 | 0.324 | 0.293 | 0.266 | 0.243 | 0.223 |

续表 A.0.2

| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S11873 | C40 | 0.10       | 1.000     | 0.949 | 0.894 | 0.841 | 0.790 | 0.743 | 0.697 | 0.654 | 0.614 | 0.576 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.949 | 0.895 | 0.843 | 0.793 | 0.746 | 0.701 | 0.659 | 0.618 | 0.581 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.950 | 0.897 | 0.847 | 0.798 | 0.752 | 0.708 | 0.666 | 0.626 | 0.588 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.951 | 0.899 | 0.850 | 0.802 | 0.756 | 0.713 | 0.671 | 0.632 | 0.594 |
|        | C50 | 0.10       | 1.000     | 0.938 | 0.878 | 0.821 | 0.768 | 0.717 | 0.670 | 0.626 | 0.584 | 0.546 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.938 | 0.879 | 0.824 | 0.771 | 0.721 | 0.674 | 0.630 | 0.589 | 0.551 |
|        |     | 0.16       | 0.999     | 0.939 | 0.882 | 0.827 | 0.775 | 0.726 | 0.680 | 0.637 | 0.596 | 0.558 |
|        |     | 0.20       | 0.999     | 0.940 | 0.884 | 0.830 | 0.779 | 0.731 | 0.685 | 0.642 | 0.601 | 0.564 |
|        | C60 | 0.10       | 0.994     | 0.927 | 0.864 | 0.804 | 0.748 | 0.695 | 0.646 | 0.600 | 0.559 | 0.520 |
|        |     | 0.12       | 0.994     | 0.928 | 0.865 | 0.806 | 0.750 | 0.698 | 0.650 | 0.604 | 0.563 | 0.525 |
|        |     | 0.16       | 0.993     | 0.929 | 0.868 | 0.810 | 0.755 | 0.704 | 0.656 | 0.611 | 0.569 | 0.531 |
|        |     | 0.20       | 0.993     | 0.930 | 0.869 | 0.812 | 0.758 | 0.708 | 0.660 | 0.616 | 0.575 | 0.537 |
| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|        |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S11873 | C40 | 0.10       | 0.540     | 0.507 | 0.467 | 0.415 | 0.371 | 0.334 | 0.302 | 0.275 | 0.251 | 0.230 |
|        |     | 0.12       | 0.545     | 0.512 | 0.471 | 0.419 | 0.375 | 0.337 | 0.305 | 0.277 | 0.253 | 0.232 |
|        |     | 0.16       | 0.553     | 0.519 | 0.478 | 0.425 | 0.380 | 0.342 | 0.310 | 0.281 | 0.257 | 0.236 |
|        |     | 0.20       | 0.559     | 0.525 | 0.483 | 0.430 | 0.384 | 0.346 | 0.313 | 0.285 | 0.260 | 0.238 |
|        | C50 | 0.10       | 0.511     | 0.479 | 0.441 | 0.392 | 0.351 | 0.316 | 0.285 | 0.260 | 0.237 | 0.217 |
|        |     | 0.12       | 0.516     | 0.484 | 0.445 | 0.395 | 0.354 | 0.318 | 0.288 | 0.262 | 0.239 | 0.219 |
|        |     | 0.16       | 0.523     | 0.491 | 0.451 | 0.401 | 0.359 | 0.323 | 0.292 | 0.266 | 0.243 | 0.222 |
|        |     | 0.20       | 0.529     | 0.496 | 0.456 | 0.406 | 0.363 | 0.327 | 0.296 | 0.269 | 0.245 | 0.225 |
|        | C60 | 0.10       | 0.486     | 0.454 | 0.418 | 0.371 | 0.332 | 0.299 | 0.271 | 0.246 | 0.225 | 0.206 |
|        |     | 0.12       | 0.490     | 0.459 | 0.422 | 0.375 | 0.335 | 0.302 | 0.273 | 0.248 | 0.227 | 0.208 |
|        |     | 0.16       | 0.497     | 0.465 | 0.428 | 0.380 | 0.340 | 0.306 | 0.277 | 0.252 | 0.230 | 0.211 |
|        |     | 0.20       | 0.502     | 0.470 | 0.433 | 0.384 | 0.344 | 0.310 | 0.280 | 0.255 | 0.233 | 0.213 |

续表 A.0.2

| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S11972 | C40 | 0.10       | 1.000     | 0.952 | 0.900 | 0.850 | 0.801 | 0.755 | 0.709 | 0.666 | 0.624 | 0.583 |
|        |     | 0.12       | 1.000     | 0.953 | 0.902 | 0.853 | 0.805 | 0.759 | 0.714 | 0.671 | 0.629 | 0.589 |
|        |     | 0.16       | 1.000     | 0.954 | 0.905 | 0.858 | 0.811 | 0.766 | 0.722 | 0.679 | 0.638 | 0.597 |
|        |     | 0.20       | 1.000     | 0.955 | 0.908 | 0.862 | 0.816 | 0.772 | 0.728 | 0.686 | 0.644 | 0.604 |
|        | C50 | 0.10       | 1.000     | 0.940 | 0.882 | 0.827 | 0.775 | 0.725 | 0.678 | 0.633 | 0.591 | 0.551 |
|        |     | 0.12       | 0.999     | 0.940 | 0.884 | 0.830 | 0.778 | 0.729 | 0.682 | 0.638 | 0.596 | 0.556 |
|        |     | 0.16       | 0.998     | 0.942 | 0.887 | 0.835 | 0.784 | 0.736 | 0.690 | 0.646 | 0.604 | 0.564 |
|        |     | 0.20       | 0.998     | 0.943 | 0.890 | 0.838 | 0.789 | 0.741 | 0.696 | 0.652 | 0.610 | 0.570 |
|        | C60 | 0.10       | 0.994     | 0.928 | 0.865 | 0.806 | 0.751 | 0.699 | 0.650 | 0.604 | 0.562 | 0.523 |
|        |     | 0.12       | 0.993     | 0.929 | 0.867 | 0.809 | 0.754 | 0.703 | 0.654 | 0.609 | 0.567 | 0.528 |
|        |     | 0.16       | 0.993     | 0.930 | 0.870 | 0.814 | 0.760 | 0.709 | 0.661 | 0.616 | 0.574 | 0.535 |
|        |     | 0.20       | 0.992     | 0.931 | 0.873 | 0.817 | 0.764 | 0.714 | 0.667 | 0.622 | 0.580 | 0.541 |
| 不锈钢    | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|        |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S11972 | C40 | 0.10       | 0.542     | 0.474 | 0.418 | 0.372 | 0.333 | 0.300 | 0.271 | 0.246 | 0.225 | 0.206 |
|        |     | 0.12       | 0.547     | 0.478 | 0.422 | 0.375 | 0.336 | 0.302 | 0.274 | 0.249 | 0.227 | 0.208 |
|        |     | 0.16       | 0.555     | 0.485 | 0.428 | 0.381 | 0.341 | 0.307 | 0.278 | 0.252 | 0.230 | 0.211 |
|        |     | 0.20       | 0.561     | 0.491 | 0.433 | 0.385 | 0.345 | 0.310 | 0.281 | 0.255 | 0.233 | 0.214 |
|        | C50 | 0.10       | 0.512     | 0.448 | 0.395 | 0.351 | 0.314 | 0.283 | 0.256 | 0.233 | 0.212 | 0.195 |
|        |     | 0.12       | 0.516     | 0.452 | 0.399 | 0.354 | 0.317 | 0.285 | 0.258 | 0.235 | 0.214 | 0.197 |
|        |     | 0.16       | 0.524     | 0.458 | 0.404 | 0.360 | 0.322 | 0.290 | 0.262 | 0.238 | 0.218 | 0.199 |
|        |     | 0.20       | 0.530     | 0.464 | 0.409 | 0.364 | 0.325 | 0.293 | 0.265 | 0.241 | 0.220 | 0.202 |
|        | C60 | 0.10       | 0.485     | 0.424 | 0.375 | 0.333 | 0.298 | 0.268 | 0.243 | 0.221 | 0.201 | 0.185 |
|        |     | 0.12       | 0.489     | 0.428 | 0.378 | 0.336 | 0.301 | 0.271 | 0.245 | 0.223 | 0.203 | 0.186 |
|        |     | 0.16       | 0.497     | 0.435 | 0.383 | 0.341 | 0.305 | 0.275 | 0.248 | 0.226 | 0.206 | 0.189 |
|        |     | 0.20       | 0.502     | 0.439 | 0.388 | 0.345 | 0.308 | 0.278 | 0.251 | 0.228 | 0.209 | 0.191 |

续表 A.0.2

| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |     |            | 10        | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| S22053<br>S22253 | C50 | 0.10       | 0.998     | 0.943 | 0.888 | 0.833 | 0.780 | 0.728 | 0.676 | 0.626 | 0.555 | 0.476 |
|                  |     | 0.12       | 0.998     | 0.944 | 0.891 | 0.838 | 0.785 | 0.733 | 0.682 | 0.631 | 0.560 | 0.480 |
|                  |     | 0.16       | 0.997     | 0.946 | 0.895 | 0.844 | 0.793 | 0.742 | 0.691 | 0.640 | 0.568 | 0.487 |
|                  |     | 0.20       | 0.997     | 0.948 | 0.899 | 0.850 | 0.800 | 0.749 | 0.699 | 0.647 | 0.575 | 0.493 |
|                  | C60 | 0.10       | 0.993     | 0.928 | 0.866 | 0.807 | 0.750 | 0.695 | 0.643 | 0.593 | 0.526 | 0.451 |
|                  |     | 0.12       | 0.992     | 0.930 | 0.869 | 0.811 | 0.755 | 0.700 | 0.648 | 0.599 | 0.531 | 0.455 |
|                  |     | 0.16       | 0.992     | 0.932 | 0.874 | 0.817 | 0.762 | 0.709 | 0.657 | 0.607 | 0.539 | 0.462 |
|                  |     | 0.20       | 0.992     | 0.934 | 0.877 | 0.822 | 0.768 | 0.716 | 0.664 | 0.614 | 0.545 | 0.467 |
|                  | C70 | 0.10       | 0.987     | 0.917 | 0.850 | 0.786 | 0.726 | 0.670 | 0.618 | 0.569 | 0.504 | 0.432 |
|                  |     | 0.12       | 0.987     | 0.918 | 0.852 | 0.790 | 0.731 | 0.675 | 0.623 | 0.574 | 0.509 | 0.436 |
|                  |     | 0.16       | 0.987     | 0.921 | 0.857 | 0.796 | 0.738 | 0.684 | 0.631 | 0.582 | 0.516 | 0.443 |
|                  |     | 0.20       | 0.987     | 0.922 | 0.861 | 0.801 | 0.744 | 0.690 | 0.638 | 0.589 | 0.522 | 0.448 |
|                  | C80 | 0.10       | 0.982     | 0.905 | 0.834 | 0.767 | 0.704 | 0.647 | 0.594 | 0.545 | 0.484 | 0.415 |
|                  |     | 0.12       | 0.982     | 0.907 | 0.836 | 0.770 | 0.709 | 0.651 | 0.599 | 0.550 | 0.488 | 0.418 |
|                  |     | 0.16       | 0.982     | 0.909 | 0.841 | 0.776 | 0.716 | 0.659 | 0.607 | 0.558 | 0.495 | 0.424 |
|                  |     | 0.20       | 0.982     | 0.911 | 0.844 | 0.781 | 0.721 | 0.665 | 0.613 | 0.565 | 0.501 | 0.429 |
| 不锈钢              | 混凝土 | $\alpha_s$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                  |     |            | 110       | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   | 180   | 190   | 200   |
| S22053<br>S22253 | C50 | 0.10       | 0.413     | 0.361 | 0.319 | 0.283 | 0.253 | 0.228 | 0.206 | 0.188 | 0.171 | 0.157 |
|                  |     | 0.12       | 0.416     | 0.364 | 0.322 | 0.286 | 0.256 | 0.230 | 0.208 | 0.189 | 0.173 | 0.159 |
|                  |     | 0.16       | 0.422     | 0.370 | 0.326 | 0.290 | 0.260 | 0.234 | 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 |
|                  | C60 | 0.10       | 0.391     | 0.342 | 0.302 | 0.269 | 0.240 | 0.216 | 0.196 | 0.178 | 0.162 | 0.149 |
|                  |     | 0.12       | 0.395     | 0.345 | 0.305 | 0.271 | 0.243 | 0.218 | 0.197 | 0.180 | 0.164 | 0.150 |
|                  |     | 0.16       | 0.400     | 0.350 | 0.309 | 0.275 | 0.246 | 0.221 | 0.200 | 0.182 | 0.166 | 0.152 |
|                  |     | 0.20       | 0.405     | 0.354 | 0.313 | 0.278 | 0.249 | 0.224 | 0.203 | 0.184 | 0.168 | 0.154 |
|                  | C70 | 0.10       | 0.375     | 0.328 | 0.290 | 0.257 | 0.230 | 0.207 | 0.188 | 0.171 | 0.156 | 0.143 |
|                  |     | 0.12       | 0.378     | 0.331 | 0.292 | 0.260 | 0.232 | 0.209 | 0.189 | 0.172 | 0.157 | 0.144 |
|                  |     | 0.16       | 0.384     | 0.336 | 0.296 | 0.263 | 0.236 | 0.212 | 0.192 | 0.175 | 0.159 | 0.146 |
|                  |     | 0.20       | 0.388     | 0.340 | 0.300 | 0.266 | 0.238 | 0.215 | 0.194 | 0.177 | 0.161 | 0.148 |
|                  | C80 | 0.10       | 0.359     | 0.315 | 0.278 | 0.247 | 0.221 | 0.199 | 0.180 | 0.163 | 0.149 | 0.137 |
|                  |     | 0.12       | 0.363     | 0.317 | 0.280 | 0.249 | 0.223 | 0.201 | 0.181 | 0.165 | 0.151 | 0.138 |
|                  |     | 0.16       | 0.368     | 0.322 | 0.284 | 0.253 | 0.226 | 0.203 | 0.184 | 0.167 | 0.153 | 0.140 |
|                  |     | 0.20       | 0.372     | 0.326 | 0.287 | 0.255 | 0.229 | 0.206 | 0.186 | 0.169 | 0.155 | 0.142 |

注：表内中间值可采用插值法求得。

## 附录 B 长期荷载作用影响系数 $k_{cr}$ 值

表 B.0.1 圆不锈钢管混凝土构件长期荷载作用影响系数  $k_{cr}$  值

| $n$ | $e/r$ | $\zeta$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |         | 10        | 30    | 50    | 70    | 90    | 110   | 130   | 150   |
| 0.1 | 0     | 0.6     | 0.949     | 0.873 | 0.825 | 0.802 | 0.794 | 0.802 | 0.815 | 0.823 |
|     |       | 0.8     | 0.944     | 0.862 | 0.810 | 0.788 | 0.780 | 0.788 | 0.801 | 0.809 |
|     |       | 1.2     | 0.953     | 0.884 | 0.839 | 0.815 | 0.807 | 0.815 | 0.829 | 0.837 |
|     |       | 1.6     | 0.957     | 0.898 | 0.856 | 0.832 | 0.824 | 0.832 | 0.846 | 0.855 |
|     |       | 2.0     | 0.961     | 0.908 | 0.868 | 0.844 | 0.836 | 0.844 | 0.859 | 0.867 |
|     |       | 2.4     | 0.964     | 0.915 | 0.878 | 0.854 | 0.845 | 0.854 | 0.868 | 0.877 |
|     |       | 2.8     | 0.966     | 0.921 | 0.886 | 0.861 | 0.853 | 0.861 | 0.876 | 0.885 |
|     |       | 3.2     | 0.968     | 0.927 | 0.893 | 0.868 | 0.860 | 0.868 | 0.883 | 0.892 |
|     |       | 3.6     | 0.969     | 0.931 | 0.899 | 0.874 | 0.865 | 0.874 | 0.889 | 0.897 |
|     |       | 4.0     | 0.971     | 0.936 | 0.904 | 0.879 | 0.870 | 0.879 | 0.894 | 0.903 |
|     | 0.2   | 0.6     | 0.957     | 0.897 | 0.853 | 0.826 | 0.814 | 0.819 | 0.830 | 0.836 |
|     |       | 0.8     | 0.961     | 0.909 | 0.868 | 0.840 | 0.828 | 0.833 | 0.844 | 0.850 |
|     |       | 1.2     | 0.966     | 0.923 | 0.886 | 0.857 | 0.845 | 0.850 | 0.862 | 0.868 |
|     |       | 1.6     | 0.970     | 0.933 | 0.898 | 0.869 | 0.857 | 0.862 | 0.874 | 0.880 |
|     |       | 2.0     | 0.972     | 0.940 | 0.908 | 0.879 | 0.867 | 0.872 | 0.884 | 0.890 |
|     |       | 2.4     | 0.975     | 0.947 | 0.917 | 0.887 | 0.875 | 0.880 | 0.892 | 0.898 |
|     |       | 2.8     | 0.977     | 0.952 | 0.924 | 0.894 | 0.882 | 0.887 | 0.899 | 0.905 |
|     |       | 3.2     | 0.978     | 0.957 | 0.930 | 0.900 | 0.887 | 0.893 | 0.905 | 0.911 |
|     |       | 3.6     | 0.980     | 0.961 | 0.936 | 0.905 | 0.893 | 0.898 | 0.910 | 0.917 |
|     |       | 4.0     | 0.981     | 0.965 | 0.940 | 0.910 | 0.897 | 0.903 | 0.915 | 0.922 |
|     | 0.4   | 0.6     | 0.963     | 0.912 | 0.870 | 0.840 | 0.826 | 0.830 | 0.840 | 0.844 |
|     |       | 0.8     | 0.967     | 0.923 | 0.885 | 0.855 | 0.840 | 0.844 | 0.854 | 0.858 |
|     |       | 1.2     | 0.972     | 0.937 | 0.903 | 0.872 | 0.858 | 0.861 | 0.871 | 0.876 |
|     |       | 1.6     | 0.975     | 0.948 | 0.916 | 0.885 | 0.870 | 0.873 | 0.884 | 0.888 |
|     |       | 2.0     | 0.978     | 0.956 | 0.927 | 0.895 | 0.880 | 0.883 | 0.894 | 0.898 |
|     |       | 2.4     | 0.980     | 0.962 | 0.935 | 0.903 | 0.888 | 0.891 | 0.902 | 0.906 |
|     |       | 2.8     | 0.982     | 0.968 | 0.942 | 0.910 | 0.895 | 0.898 | 0.909 | 0.913 |
|     |       | 3.2     | 0.983     | 0.973 | 0.949 | 0.916 | 0.901 | 0.904 | 0.915 | 0.920 |
|     |       | 3.6     | 0.985     | 0.977 | 0.954 | 0.921 | 0.906 | 0.909 | 0.920 | 0.925 |
|     |       | 4.0     | 0.986     | 0.981 | 0.959 | 0.926 | 0.911 | 0.914 | 0.925 | 0.930 |
|     | 0.6   | 0.6     | 0.966     | 0.921 | 0.881 | 0.850 | 0.835 | 0.836 | 0.845 | 0.849 |
|     |       | 0.8     | 0.970     | 0.933 | 0.896 | 0.864 | 0.849 | 0.850 | 0.859 | 0.863 |
|     |       | 1.2     | 0.975     | 0.947 | 0.915 | 0.882 | 0.866 | 0.868 | 0.877 | 0.881 |
|     |       | 1.6     | 0.978     | 0.957 | 0.928 | 0.895 | 0.878 | 0.880 | 0.890 | 0.893 |
|     |       | 2.0     | 0.981     | 0.965 | 0.939 | 0.905 | 0.888 | 0.890 | 0.900 | 0.904 |
|     |       | 2.4     | 0.983     | 0.972 | 0.947 | 0.913 | 0.896 | 0.898 | 0.908 | 0.912 |
|     |       | 2.8     | 0.985     | 0.978 | 0.954 | 0.920 | 0.903 | 0.905 | 0.915 | 0.919 |
|     |       | 3.2     | 0.987     | 0.983 | 0.961 | 0.926 | 0.909 | 0.911 | 0.921 | 0.925 |
|     |       | 3.6     | 0.988     | 0.987 | 0.967 | 0.932 | 0.915 | 0.917 | 0.927 | 0.930 |
|     |       | 4.0     | 0.990     | 0.991 | 0.972 | 0.937 | 0.920 | 0.922 | 0.932 | 0.935 |
|     | 0.8   | 0.6     | 0.968     | 0.927 | 0.889 | 0.856 | 0.840 | 0.841 | 0.849 | 0.852 |
|     |       | 0.8     | 0.972     | 0.939 | 0.904 | 0.871 | 0.854 | 0.855 | 0.864 | 0.867 |
|     |       | 1.2     | 0.977     | 0.954 | 0.923 | 0.889 | 0.872 | 0.873 | 0.881 | 0.884 |
|     |       | 1.6     | 0.981     | 0.964 | 0.936 | 0.901 | 0.884 | 0.885 | 0.894 | 0.897 |
|     |       | 2.0     | 0.984     | 0.972 | 0.947 | 0.912 | 0.894 | 0.895 | 0.904 | 0.907 |
|     |       | 2.4     | 0.986     | 0.979 | 0.955 | 0.920 | 0.902 | 0.903 | 0.912 | 0.915 |
|     |       | 2.8     | 0.988     | 0.984 | 0.963 | 0.927 | 0.909 | 0.910 | 0.919 | 0.923 |
|     |       | 3.2     | 0.989     | 0.989 | 0.969 | 0.933 | 0.915 | 0.917 | 0.926 | 0.929 |
|     |       | 3.6     | 0.991     | 0.994 | 0.975 | 0.939 | 0.921 | 0.922 | 0.931 | 0.934 |
|     |       | 4.0     | 0.992     | 0.998 | 0.980 | 0.944 | 0.926 | 0.927 | 0.936 | 0.939 |
|     | 1.0   | 0.6     | 0.970     | 0.932 | 0.895 | 0.861 | 0.844 | 0.844 | 0.852 | 0.854 |
|     |       | 0.8     | 0.974     | 0.944 | 0.910 | 0.875 | 0.858 | 0.859 | 0.866 | 0.869 |
|     |       | 1.2     | 0.979     | 0.958 | 0.928 | 0.893 | 0.876 | 0.876 | 0.884 | 0.887 |
|     |       | 1.6     | 0.983     | 0.969 | 0.942 | 0.906 | 0.888 | 0.889 | 0.897 | 0.900 |
|     |       | 2.0     | 0.985     | 0.977 | 0.952 | 0.916 | 0.898 | 0.899 | 0.907 | 0.910 |
|     |       | 2.4     | 0.988     | 0.984 | 0.961 | 0.925 | 0.906 | 0.907 | 0.915 | 0.918 |
|     |       | 2.8     | 0.989     | 0.989 | 0.969 | 0.932 | 0.913 | 0.914 | 0.922 | 0.925 |
|     |       | 3.2     | 0.991     | 0.994 | 0.975 | 0.938 | 0.920 | 0.920 | 0.929 | 0.931 |
|     |       | 3.6     | 0.993     | 0.999 | 0.981 | 0.944 | 0.925 | 0.926 | 0.934 | 0.937 |
|     |       | 4.0     | 0.994     | 1.003 | 0.986 | 0.949 | 0.930 | 0.930 | 0.939 | 0.942 |

续表 B.0.1

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30    | 50    | 70    | 90    | 110   | 130   | 150   |
| 0.3 | 0     | 0.6   | 0.935     | 0.861 | 0.813 | 0.791 | 0.783 | 0.791 | 0.804 | 0.812 |
|     |       | 0.8   | 0.931     | 0.849 | 0.799 | 0.777 | 0.769 | 0.777 | 0.790 | 0.798 |
|     |       | 1.2   | 0.939     | 0.872 | 0.827 | 0.804 | 0.796 | 0.804 | 0.818 | 0.826 |
|     |       | 1.6   | 0.944     | 0.885 | 0.844 | 0.821 | 0.813 | 0.821 | 0.835 | 0.843 |
|     |       | 2.0   | 0.947     | 0.895 | 0.856 | 0.832 | 0.824 | 0.833 | 0.847 | 0.855 |
|     |       | 2.4   | 0.950     | 0.902 | 0.866 | 0.842 | 0.834 | 0.842 | 0.857 | 0.865 |
|     |       | 2.8   | 0.952     | 0.908 | 0.874 | 0.849 | 0.841 | 0.850 | 0.864 | 0.873 |
|     |       | 3.2   | 0.954     | 0.914 | 0.881 | 0.856 | 0.848 | 0.856 | 0.871 | 0.880 |
|     |       | 3.6   | 0.956     | 0.918 | 0.886 | 0.862 | 0.853 | 0.862 | 0.877 | 0.886 |
|     |       | 4.0   | 0.957     | 0.922 | 0.892 | 0.867 | 0.858 | 0.867 | 0.882 | 0.891 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.944     | 0.885 | 0.841 | 0.814 | 0.803 | 0.808 | 0.819 | 0.825 |
|     |       | 0.8   | 0.948     | 0.896 | 0.856 | 0.828 | 0.817 | 0.822 | 0.833 | 0.839 |
|     |       | 1.2   | 0.953     | 0.910 | 0.873 | 0.845 | 0.833 | 0.838 | 0.850 | 0.856 |
|     |       | 1.6   | 0.956     | 0.919 | 0.886 | 0.857 | 0.845 | 0.851 | 0.862 | 0.868 |
|     |       | 2.0   | 0.959     | 0.927 | 0.896 | 0.867 | 0.855 | 0.860 | 0.872 | 0.878 |
|     |       | 2.4   | 0.961     | 0.933 | 0.904 | 0.875 | 0.863 | 0.868 | 0.880 | 0.886 |
|     |       | 2.8   | 0.963     | 0.939 | 0.911 | 0.882 | 0.869 | 0.875 | 0.887 | 0.893 |
|     |       | 3.2   | 0.964     | 0.944 | 0.917 | 0.888 | 0.875 | 0.881 | 0.893 | 0.899 |
|     |       | 3.6   | 0.966     | 0.948 | 0.922 | 0.893 | 0.880 | 0.886 | 0.898 | 0.904 |
|     |       | 4.0   | 0.967     | 0.952 | 0.927 | 0.898 | 0.885 | 0.890 | 0.903 | 0.909 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.949     | 0.899 | 0.858 | 0.829 | 0.815 | 0.818 | 0.828 | 0.833 |
|     |       | 0.8   | 0.953     | 0.910 | 0.873 | 0.843 | 0.829 | 0.832 | 0.842 | 0.847 |
|     |       | 1.2   | 0.958     | 0.924 | 0.891 | 0.860 | 0.846 | 0.849 | 0.859 | 0.864 |
|     |       | 1.6   | 0.961     | 0.934 | 0.904 | 0.872 | 0.858 | 0.861 | 0.872 | 0.876 |
|     |       | 2.0   | 0.964     | 0.942 | 0.914 | 0.882 | 0.868 | 0.871 | 0.882 | 0.886 |
|     |       | 2.4   | 0.966     | 0.949 | 0.922 | 0.890 | 0.876 | 0.879 | 0.890 | 0.894 |
|     |       | 2.8   | 0.968     | 0.954 | 0.929 | 0.897 | 0.882 | 0.886 | 0.897 | 0.901 |
|     |       | 3.2   | 0.970     | 0.959 | 0.935 | 0.903 | 0.888 | 0.892 | 0.903 | 0.907 |
|     |       | 3.6   | 0.971     | 0.963 | 0.941 | 0.909 | 0.894 | 0.897 | 0.908 | 0.913 |
|     |       | 4.0   | 0.972     | 0.967 | 0.946 | 0.913 | 0.898 | 0.902 | 0.913 | 0.918 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.952     | 0.908 | 0.869 | 0.838 | 0.823 | 0.825 | 0.834 | 0.838 |
|     |       | 0.8   | 0.956     | 0.920 | 0.884 | 0.852 | 0.837 | 0.839 | 0.848 | 0.852 |
|     |       | 1.2   | 0.961     | 0.934 | 0.902 | 0.870 | 0.854 | 0.856 | 0.865 | 0.869 |
|     |       | 1.6   | 0.965     | 0.944 | 0.915 | 0.882 | 0.866 | 0.868 | 0.878 | 0.882 |
|     |       | 2.0   | 0.967     | 0.952 | 0.925 | 0.892 | 0.876 | 0.878 | 0.888 | 0.891 |
|     |       | 2.4   | 0.970     | 0.958 | 0.934 | 0.900 | 0.884 | 0.886 | 0.896 | 0.900 |
|     |       | 2.8   | 0.971     | 0.964 | 0.941 | 0.907 | 0.891 | 0.893 | 0.903 | 0.907 |
|     |       | 3.2   | 0.973     | 0.969 | 0.947 | 0.913 | 0.897 | 0.899 | 0.909 | 0.913 |
|     |       | 3.6   | 0.974     | 0.973 | 0.953 | 0.919 | 0.902 | 0.904 | 0.914 | 0.918 |
|     |       | 4.0   | 0.976     | 0.977 | 0.958 | 0.924 | 0.907 | 0.909 | 0.919 | 0.923 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.955     | 0.914 | 0.877 | 0.844 | 0.828 | 0.829 | 0.838 | 0.841 |
|     |       | 0.8   | 0.959     | 0.926 | 0.892 | 0.859 | 0.842 | 0.843 | 0.852 | 0.855 |
|     |       | 1.2   | 0.964     | 0.940 | 0.910 | 0.876 | 0.860 | 0.861 | 0.869 | 0.872 |
|     |       | 1.6   | 0.967     | 0.950 | 0.923 | 0.889 | 0.872 | 0.873 | 0.882 | 0.885 |
|     |       | 2.0   | 0.970     | 0.958 | 0.933 | 0.899 | 0.882 | 0.883 | 0.892 | 0.895 |
|     |       | 2.4   | 0.972     | 0.965 | 0.942 | 0.907 | 0.890 | 0.891 | 0.900 | 0.903 |
|     |       | 2.8   | 0.974     | 0.971 | 0.949 | 0.914 | 0.897 | 0.898 | 0.907 | 0.910 |
|     |       | 3.2   | 0.975     | 0.975 | 0.956 | 0.920 | 0.903 | 0.904 | 0.913 | 0.916 |
|     |       | 3.6   | 0.977     | 0.980 | 0.961 | 0.926 | 0.908 | 0.909 | 0.918 | 0.922 |
|     |       | 4.0   | 0.978     | 0.984 | 0.966 | 0.931 | 0.913 | 0.914 | 0.923 | 0.927 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.956     | 0.919 | 0.882 | 0.849 | 0.832 | 0.833 | 0.841 | 0.843 |
|     |       | 0.8   | 0.960     | 0.931 | 0.897 | 0.863 | 0.846 | 0.847 | 0.855 | 0.857 |
|     |       | 1.2   | 0.965     | 0.945 | 0.915 | 0.881 | 0.864 | 0.864 | 0.872 | 0.875 |
|     |       | 1.6   | 0.969     | 0.955 | 0.929 | 0.894 | 0.876 | 0.877 | 0.885 | 0.888 |
|     |       | 2.0   | 0.971     | 0.963 | 0.939 | 0.904 | 0.886 | 0.887 | 0.895 | 0.898 |
|     |       | 2.4   | 0.974     | 0.970 | 0.948 | 0.912 | 0.894 | 0.895 | 0.903 | 0.906 |
|     |       | 2.8   | 0.975     | 0.975 | 0.955 | 0.919 | 0.901 | 0.902 | 0.910 | 0.913 |
|     |       | 3.2   | 0.977     | 0.980 | 0.961 | 0.925 | 0.907 | 0.908 | 0.916 | 0.919 |
|     |       | 3.6   | 0.979     | 0.985 | 0.967 | 0.931 | 0.912 | 0.913 | 0.922 | 0.924 |
|     |       | 4.0   | 0.980     | 0.989 | 0.972 | 0.936 | 0.917 | 0.918 | 0.926 | 0.929 |

续表 B.0.1

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30    | 50    | 70    | 90    | 110   | 130   | 150   |
| 0.5 | 0     | 0.6   | 0.922     | 0.848 | 0.802 | 0.780 | 0.772 | 0.780 | 0.794 | 0.801 |
|     |       | 0.8   | 0.918     | 0.837 | 0.788 | 0.766 | 0.758 | 0.766 | 0.780 | 0.787 |
|     |       | 1.2   | 0.926     | 0.859 | 0.815 | 0.793 | 0.785 | 0.793 | 0.807 | 0.815 |
|     |       | 1.6   | 0.930     | 0.873 | 0.832 | 0.809 | 0.801 | 0.809 | 0.824 | 0.832 |
|     |       | 2.0   | 0.934     | 0.882 | 0.844 | 0.821 | 0.813 | 0.821 | 0.835 | 0.844 |
|     |       | 2.4   | 0.936     | 0.889 | 0.854 | 0.830 | 0.822 | 0.830 | 0.845 | 0.853 |
|     |       | 2.8   | 0.939     | 0.895 | 0.861 | 0.838 | 0.830 | 0.838 | 0.853 | 0.861 |
|     |       | 3.2   | 0.940     | 0.901 | 0.868 | 0.844 | 0.836 | 0.844 | 0.859 | 0.868 |
|     |       | 3.6   | 0.942     | 0.905 | 0.874 | 0.850 | 0.842 | 0.850 | 0.865 | 0.874 |
|     |       | 4.0   | 0.943     | 0.909 | 0.879 | 0.855 | 0.846 | 0.855 | 0.870 | 0.879 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.930     | 0.872 | 0.829 | 0.803 | 0.792 | 0.797 | 0.808 | 0.814 |
|     |       | 0.8   | 0.934     | 0.883 | 0.843 | 0.817 | 0.805 | 0.810 | 0.822 | 0.828 |
|     |       | 1.2   | 0.939     | 0.897 | 0.861 | 0.833 | 0.822 | 0.827 | 0.839 | 0.844 |
|     |       | 1.6   | 0.942     | 0.906 | 0.873 | 0.845 | 0.834 | 0.839 | 0.851 | 0.857 |
|     |       | 2.0   | 0.945     | 0.914 | 0.883 | 0.855 | 0.843 | 0.848 | 0.860 | 0.866 |
|     |       | 2.4   | 0.947     | 0.920 | 0.891 | 0.863 | 0.851 | 0.856 | 0.868 | 0.874 |
|     |       | 2.8   | 0.949     | 0.925 | 0.898 | 0.869 | 0.857 | 0.863 | 0.875 | 0.881 |
|     |       | 3.2   | 0.951     | 0.930 | 0.904 | 0.875 | 0.863 | 0.868 | 0.881 | 0.887 |
|     |       | 3.6   | 0.952     | 0.934 | 0.909 | 0.880 | 0.868 | 0.874 | 0.886 | 0.892 |
|     |       | 4.0   | 0.953     | 0.938 | 0.914 | 0.885 | 0.873 | 0.878 | 0.891 | 0.897 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.935     | 0.886 | 0.846 | 0.817 | 0.803 | 0.807 | 0.817 | 0.821 |
|     |       | 0.8   | 0.939     | 0.897 | 0.860 | 0.831 | 0.817 | 0.821 | 0.831 | 0.835 |
|     |       | 1.2   | 0.944     | 0.911 | 0.878 | 0.848 | 0.834 | 0.837 | 0.848 | 0.852 |
|     |       | 1.6   | 0.948     | 0.921 | 0.891 | 0.860 | 0.846 | 0.849 | 0.860 | 0.865 |
|     |       | 2.0   | 0.950     | 0.929 | 0.901 | 0.870 | 0.856 | 0.859 | 0.869 | 0.874 |
|     |       | 2.4   | 0.952     | 0.935 | 0.909 | 0.878 | 0.863 | 0.867 | 0.877 | 0.882 |
|     |       | 2.8   | 0.954     | 0.940 | 0.916 | 0.885 | 0.870 | 0.874 | 0.884 | 0.889 |
|     |       | 3.2   | 0.956     | 0.945 | 0.922 | 0.890 | 0.876 | 0.879 | 0.890 | 0.895 |
|     |       | 3.6   | 0.957     | 0.949 | 0.928 | 0.896 | 0.881 | 0.885 | 0.895 | 0.900 |
|     |       | 4.0   | 0.958     | 0.953 | 0.932 | 0.900 | 0.886 | 0.889 | 0.900 | 0.905 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.939     | 0.895 | 0.857 | 0.826 | 0.811 | 0.813 | 0.822 | 0.826 |
|     |       | 0.8   | 0.943     | 0.906 | 0.871 | 0.840 | 0.825 | 0.827 | 0.836 | 0.840 |
|     |       | 1.2   | 0.947     | 0.920 | 0.889 | 0.857 | 0.842 | 0.844 | 0.853 | 0.857 |
|     |       | 1.6   | 0.951     | 0.930 | 0.902 | 0.870 | 0.854 | 0.856 | 0.866 | 0.870 |
|     |       | 2.0   | 0.954     | 0.938 | 0.912 | 0.880 | 0.864 | 0.866 | 0.876 | 0.879 |
|     |       | 2.4   | 0.956     | 0.945 | 0.921 | 0.888 | 0.872 | 0.874 | 0.884 | 0.887 |
|     |       | 2.8   | 0.958     | 0.950 | 0.928 | 0.894 | 0.879 | 0.881 | 0.890 | 0.894 |
|     |       | 3.2   | 0.959     | 0.955 | 0.934 | 0.900 | 0.884 | 0.887 | 0.896 | 0.900 |
|     |       | 3.6   | 0.961     | 0.959 | 0.939 | 0.906 | 0.890 | 0.892 | 0.902 | 0.906 |
|     |       | 4.0   | 0.962     | 0.963 | 0.944 | 0.911 | 0.894 | 0.897 | 0.906 | 0.910 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.941     | 0.901 | 0.864 | 0.833 | 0.817 | 0.818 | 0.826 | 0.829 |
|     |       | 0.8   | 0.945     | 0.913 | 0.879 | 0.847 | 0.831 | 0.832 | 0.840 | 0.843 |
|     |       | 1.2   | 0.950     | 0.927 | 0.897 | 0.864 | 0.848 | 0.849 | 0.857 | 0.861 |
|     |       | 1.6   | 0.953     | 0.937 | 0.910 | 0.876 | 0.860 | 0.861 | 0.870 | 0.873 |
|     |       | 2.0   | 0.956     | 0.945 | 0.920 | 0.886 | 0.870 | 0.871 | 0.880 | 0.883 |
|     |       | 2.4   | 0.958     | 0.951 | 0.928 | 0.894 | 0.877 | 0.879 | 0.888 | 0.891 |
|     |       | 2.8   | 0.960     | 0.957 | 0.936 | 0.901 | 0.884 | 0.886 | 0.895 | 0.898 |
|     |       | 3.2   | 0.961     | 0.962 | 0.942 | 0.907 | 0.890 | 0.892 | 0.901 | 0.904 |
|     |       | 3.6   | 0.963     | 0.966 | 0.948 | 0.913 | 0.895 | 0.897 | 0.906 | 0.909 |
|     |       | 4.0   | 0.964     | 0.970 | 0.953 | 0.917 | 0.900 | 0.902 | 0.911 | 0.914 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.943     | 0.906 | 0.869 | 0.837 | 0.820 | 0.821 | 0.829 | 0.832 |
|     |       | 0.8   | 0.947     | 0.917 | 0.884 | 0.851 | 0.834 | 0.835 | 0.843 | 0.846 |
|     |       | 1.2   | 0.951     | 0.931 | 0.902 | 0.868 | 0.852 | 0.852 | 0.860 | 0.863 |
|     |       | 1.6   | 0.955     | 0.942 | 0.915 | 0.881 | 0.864 | 0.865 | 0.873 | 0.876 |
|     |       | 2.0   | 0.957     | 0.949 | 0.926 | 0.891 | 0.874 | 0.874 | 0.883 | 0.885 |
|     |       | 2.4   | 0.960     | 0.956 | 0.934 | 0.899 | 0.882 | 0.882 | 0.891 | 0.894 |
|     |       | 2.8   | 0.962     | 0.961 | 0.941 | 0.906 | 0.888 | 0.889 | 0.898 | 0.900 |
|     |       | 3.2   | 0.963     | 0.966 | 0.948 | 0.912 | 0.894 | 0.895 | 0.904 | 0.906 |
|     |       | 3.6   | 0.965     | 0.971 | 0.953 | 0.918 | 0.900 | 0.900 | 0.909 | 0.912 |
|     |       | 4.0   | 0.966     | 0.974 | 0.958 | 0.922 | 0.904 | 0.905 | 0.914 | 0.917 |

续表 B.0.1

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30    | 50    | 70    | 90    | 110   | 130   | 150   |
| 0.7 | 0     | 0.6   | 0.908     | 0.836 | 0.790 | 0.768 | 0.761 | 0.769 | 0.783 | 0.790 |
|     |       | 0.8   | 0.904     | 0.825 | 0.776 | 0.755 | 0.748 | 0.755 | 0.769 | 0.776 |
|     |       | 1.2   | 0.912     | 0.847 | 0.804 | 0.781 | 0.774 | 0.782 | 0.796 | 0.804 |
|     |       | 1.6   | 0.917     | 0.860 | 0.820 | 0.797 | 0.790 | 0.798 | 0.812 | 0.820 |
|     |       | 2.0   | 0.920     | 0.869 | 0.832 | 0.809 | 0.801 | 0.810 | 0.824 | 0.832 |
|     |       | 2.4   | 0.923     | 0.876 | 0.841 | 0.818 | 0.810 | 0.819 | 0.833 | 0.842 |
|     |       | 2.8   | 0.925     | 0.883 | 0.849 | 0.826 | 0.818 | 0.826 | 0.841 | 0.849 |
|     |       | 3.2   | 0.927     | 0.888 | 0.856 | 0.832 | 0.824 | 0.833 | 0.847 | 0.856 |
|     |       | 3.6   | 0.928     | 0.892 | 0.861 | 0.838 | 0.830 | 0.838 | 0.853 | 0.862 |
|     |       | 4.0   | 0.930     | 0.896 | 0.866 | 0.842 | 0.835 | 0.843 | 0.858 | 0.867 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.917     | 0.859 | 0.817 | 0.791 | 0.781 | 0.786 | 0.797 | 0.802 |
|     |       | 0.8   | 0.921     | 0.870 | 0.831 | 0.805 | 0.794 | 0.799 | 0.810 | 0.816 |
|     |       | 1.2   | 0.925     | 0.884 | 0.848 | 0.821 | 0.810 | 0.815 | 0.827 | 0.833 |
|     |       | 1.6   | 0.929     | 0.893 | 0.861 | 0.833 | 0.822 | 0.827 | 0.839 | 0.845 |
|     |       | 2.0   | 0.931     | 0.901 | 0.870 | 0.843 | 0.831 | 0.836 | 0.848 | 0.854 |
|     |       | 2.4   | 0.933     | 0.907 | 0.878 | 0.850 | 0.839 | 0.844 | 0.856 | 0.862 |
|     |       | 2.8   | 0.935     | 0.912 | 0.885 | 0.857 | 0.845 | 0.851 | 0.863 | 0.869 |
|     |       | 3.2   | 0.937     | 0.917 | 0.891 | 0.863 | 0.851 | 0.856 | 0.868 | 0.875 |
|     |       | 3.6   | 0.938     | 0.921 | 0.896 | 0.868 | 0.856 | 0.861 | 0.874 | 0.880 |
|     |       | 4.0   | 0.939     | 0.924 | 0.901 | 0.872 | 0.860 | 0.866 | 0.878 | 0.885 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.922     | 0.873 | 0.834 | 0.805 | 0.792 | 0.795 | 0.805 | 0.810 |
|     |       | 0.8   | 0.926     | 0.884 | 0.848 | 0.819 | 0.806 | 0.809 | 0.819 | 0.824 |
|     |       | 1.2   | 0.930     | 0.898 | 0.865 | 0.836 | 0.822 | 0.826 | 0.836 | 0.841 |
|     |       | 1.6   | 0.934     | 0.907 | 0.878 | 0.848 | 0.834 | 0.838 | 0.848 | 0.853 |
|     |       | 2.0   | 0.936     | 0.915 | 0.888 | 0.857 | 0.844 | 0.847 | 0.857 | 0.862 |
|     |       | 2.4   | 0.939     | 0.921 | 0.896 | 0.865 | 0.851 | 0.855 | 0.865 | 0.870 |
|     |       | 2.8   | 0.940     | 0.927 | 0.903 | 0.872 | 0.858 | 0.861 | 0.872 | 0.877 |
|     |       | 3.2   | 0.942     | 0.931 | 0.909 | 0.878 | 0.864 | 0.867 | 0.878 | 0.883 |
|     |       | 3.6   | 0.943     | 0.936 | 0.914 | 0.883 | 0.869 | 0.872 | 0.883 | 0.888 |
|     |       | 4.0   | 0.945     | 0.939 | 0.919 | 0.888 | 0.873 | 0.877 | 0.888 | 0.893 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.925     | 0.882 | 0.845 | 0.814 | 0.800 | 0.802 | 0.811 | 0.814 |
|     |       | 0.8   | 0.929     | 0.893 | 0.859 | 0.828 | 0.814 | 0.816 | 0.825 | 0.828 |
|     |       | 1.2   | 0.934     | 0.907 | 0.876 | 0.845 | 0.830 | 0.832 | 0.842 | 0.845 |
|     |       | 1.6   | 0.937     | 0.917 | 0.889 | 0.857 | 0.842 | 0.844 | 0.854 | 0.858 |
|     |       | 2.0   | 0.940     | 0.925 | 0.899 | 0.867 | 0.852 | 0.854 | 0.863 | 0.867 |
|     |       | 2.4   | 0.942     | 0.931 | 0.907 | 0.875 | 0.859 | 0.862 | 0.871 | 0.875 |
|     |       | 2.8   | 0.944     | 0.936 | 0.914 | 0.882 | 0.866 | 0.868 | 0.878 | 0.882 |
|     |       | 3.2   | 0.945     | 0.941 | 0.920 | 0.888 | 0.872 | 0.874 | 0.884 | 0.888 |
|     |       | 3.6   | 0.947     | 0.945 | 0.926 | 0.893 | 0.877 | 0.879 | 0.889 | 0.893 |
|     |       | 4.0   | 0.948     | 0.949 | 0.931 | 0.898 | 0.882 | 0.884 | 0.894 | 0.898 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.927     | 0.888 | 0.852 | 0.820 | 0.805 | 0.806 | 0.815 | 0.818 |
|     |       | 0.8   | 0.931     | 0.900 | 0.866 | 0.834 | 0.819 | 0.820 | 0.829 | 0.832 |
|     |       | 1.2   | 0.936     | 0.913 | 0.884 | 0.852 | 0.836 | 0.837 | 0.846 | 0.849 |
|     |       | 1.6   | 0.939     | 0.923 | 0.897 | 0.864 | 0.848 | 0.849 | 0.858 | 0.861 |
|     |       | 2.0   | 0.942     | 0.931 | 0.907 | 0.874 | 0.857 | 0.859 | 0.867 | 0.871 |
|     |       | 2.4   | 0.944     | 0.937 | 0.915 | 0.882 | 0.865 | 0.867 | 0.875 | 0.879 |
|     |       | 2.8   | 0.946     | 0.943 | 0.922 | 0.888 | 0.872 | 0.873 | 0.882 | 0.886 |
|     |       | 3.2   | 0.948     | 0.948 | 0.928 | 0.894 | 0.878 | 0.879 | 0.888 | 0.891 |
|     |       | 3.6   | 0.949     | 0.952 | 0.934 | 0.900 | 0.883 | 0.884 | 0.893 | 0.897 |
|     |       | 4.0   | 0.950     | 0.956 | 0.939 | 0.904 | 0.887 | 0.889 | 0.898 | 0.901 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.929     | 0.893 | 0.857 | 0.825 | 0.809 | 0.809 | 0.817 | 0.820 |
|     |       | 0.8   | 0.933     | 0.904 | 0.871 | 0.839 | 0.823 | 0.823 | 0.831 | 0.834 |
|     |       | 1.2   | 0.938     | 0.918 | 0.889 | 0.856 | 0.839 | 0.840 | 0.848 | 0.851 |
|     |       | 1.6   | 0.941     | 0.928 | 0.902 | 0.868 | 0.852 | 0.852 | 0.861 | 0.864 |
|     |       | 2.0   | 0.944     | 0.936 | 0.912 | 0.878 | 0.861 | 0.862 | 0.870 | 0.873 |
|     |       | 2.4   | 0.946     | 0.942 | 0.921 | 0.886 | 0.869 | 0.870 | 0.878 | 0.881 |
|     |       | 2.8   | 0.948     | 0.948 | 0.928 | 0.893 | 0.876 | 0.877 | 0.885 | 0.888 |
|     |       | 3.2   | 0.949     | 0.952 | 0.934 | 0.899 | 0.882 | 0.883 | 0.891 | 0.894 |
|     |       | 3.6   | 0.951     | 0.957 | 0.940 | 0.904 | 0.887 | 0.888 | 0.896 | 0.899 |
|     |       | 4.0   | 0.952     | 0.960 | 0.945 | 0.909 | 0.892 | 0.892 | 0.901 | 0.904 |

表 B.0.2 矩形不锈钢管混凝土构件长期荷载作用影响系数  $k_{cr}$  值

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30    | 50    | 70    | 90    | 110   | 130   | 150   |
| 0.1 | 0     | 0.6   | 0.966     | 0.911 | 0.869 | 0.844 | 0.829 | 0.825 | 0.833 | 0.841 |
|     |       | 0.8   | 0.964     | 0.906 | 0.861 | 0.833 | 0.816 | 0.809 | 0.815 | 0.823 |
|     |       | 1.2   | 0.967     | 0.915 | 0.876 | 0.854 | 0.842 | 0.840 | 0.850 | 0.858 |
|     |       | 1.6   | 0.969     | 0.921 | 0.885 | 0.866 | 0.857 | 0.859 | 0.871 | 0.879 |
|     |       | 2.0   | 0.970     | 0.925 | 0.891 | 0.875 | 0.869 | 0.873 | 0.886 | 0.895 |
|     |       | 2.4   | 0.972     | 0.928 | 0.896 | 0.882 | 0.877 | 0.884 | 0.898 | 0.907 |
|     |       | 2.8   | 0.972     | 0.931 | 0.900 | 0.887 | 0.885 | 0.892 | 0.908 | 0.917 |
|     |       | 3.2   | 0.973     | 0.933 | 0.904 | 0.892 | 0.891 | 0.900 | 0.916 | 0.925 |
|     |       | 3.6   | 0.974     | 0.935 | 0.907 | 0.896 | 0.896 | 0.907 | 0.924 | 0.933 |
|     |       | 4.0   | 0.974     | 0.936 | 0.909 | 0.900 | 0.901 | 0.913 | 0.930 | 0.939 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.970     | 0.922 | 0.881 | 0.853 | 0.836 | 0.830 | 0.838 | 0.845 |
|     |       | 0.8   | 0.971     | 0.926 | 0.888 | 0.863 | 0.849 | 0.846 | 0.855 | 0.862 |
|     |       | 1.2   | 0.973     | 0.932 | 0.897 | 0.876 | 0.865 | 0.865 | 0.876 | 0.883 |
|     |       | 1.6   | 0.974     | 0.936 | 0.904 | 0.885 | 0.876 | 0.879 | 0.891 | 0.899 |
|     |       | 2.0   | 0.975     | 0.939 | 0.909 | 0.892 | 0.885 | 0.889 | 0.903 | 0.911 |
|     |       | 2.4   | 0.976     | 0.942 | 0.913 | 0.897 | 0.892 | 0.898 | 0.913 | 0.921 |
|     |       | 2.8   | 0.977     | 0.944 | 0.917 | 0.902 | 0.898 | 0.906 | 0.921 | 0.929 |
|     |       | 3.2   | 0.978     | 0.946 | 0.920 | 0.906 | 0.904 | 0.913 | 0.929 | 0.937 |
|     |       | 3.6   | 0.978     | 0.948 | 0.922 | 0.910 | 0.909 | 0.919 | 0.935 | 0.943 |
|     |       | 4.0   | 0.979     | 0.949 | 0.925 | 0.913 | 0.913 | 0.924 | 0.941 | 0.949 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.972     | 0.928 | 0.889 | 0.859 | 0.841 | 0.833 | 0.840 | 0.847 |
|     |       | 0.8   | 0.973     | 0.933 | 0.896 | 0.869 | 0.854 | 0.849 | 0.857 | 0.864 |
|     |       | 1.2   | 0.975     | 0.939 | 0.905 | 0.882 | 0.869 | 0.868 | 0.878 | 0.885 |
|     |       | 1.6   | 0.977     | 0.943 | 0.912 | 0.891 | 0.881 | 0.882 | 0.894 | 0.901 |
|     |       | 2.0   | 0.978     | 0.946 | 0.917 | 0.898 | 0.889 | 0.893 | 0.906 | 0.913 |
|     |       | 2.4   | 0.979     | 0.948 | 0.921 | 0.903 | 0.897 | 0.902 | 0.916 | 0.923 |
|     |       | 2.8   | 0.979     | 0.951 | 0.925 | 0.908 | 0.903 | 0.910 | 0.924 | 0.932 |
|     |       | 3.2   | 0.980     | 0.953 | 0.928 | 0.912 | 0.908 | 0.916 | 0.932 | 0.939 |
|     |       | 3.6   | 0.981     | 0.954 | 0.930 | 0.916 | 0.913 | 0.922 | 0.938 | 0.946 |
|     |       | 4.0   | 0.981     | 0.956 | 0.933 | 0.920 | 0.918 | 0.928 | 0.944 | 0.952 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.973     | 0.933 | 0.893 | 0.863 | 0.843 | 0.836 | 0.842 | 0.848 |
|     |       | 0.8   | 0.975     | 0.937 | 0.901 | 0.873 | 0.856 | 0.851 | 0.859 | 0.866 |
|     |       | 1.2   | 0.977     | 0.943 | 0.910 | 0.885 | 0.872 | 0.871 | 0.880 | 0.887 |
|     |       | 1.6   | 0.978     | 0.947 | 0.917 | 0.894 | 0.884 | 0.884 | 0.896 | 0.902 |
|     |       | 2.0   | 0.979     | 0.950 | 0.922 | 0.901 | 0.892 | 0.895 | 0.908 | 0.915 |
|     |       | 2.4   | 0.980     | 0.953 | 0.926 | 0.907 | 0.900 | 0.904 | 0.918 | 0.925 |
|     |       | 2.8   | 0.981     | 0.955 | 0.930 | 0.912 | 0.906 | 0.912 | 0.926 | 0.933 |
|     |       | 3.2   | 0.982     | 0.957 | 0.933 | 0.916 | 0.912 | 0.919 | 0.934 | 0.941 |
|     |       | 3.6   | 0.982     | 0.959 | 0.935 | 0.920 | 0.916 | 0.925 | 0.940 | 0.947 |
|     |       | 4.0   | 0.983     | 0.960 | 0.938 | 0.924 | 0.921 | 0.930 | 0.946 | 0.953 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.974     | 0.935 | 0.897 | 0.865 | 0.845 | 0.837 | 0.843 | 0.849 |
|     |       | 0.8   | 0.976     | 0.940 | 0.904 | 0.875 | 0.858 | 0.853 | 0.860 | 0.867 |
|     |       | 1.2   | 0.978     | 0.946 | 0.914 | 0.888 | 0.874 | 0.872 | 0.882 | 0.888 |
|     |       | 1.6   | 0.979     | 0.950 | 0.920 | 0.897 | 0.886 | 0.886 | 0.897 | 0.903 |
|     |       | 2.0   | 0.980     | 0.953 | 0.925 | 0.904 | 0.894 | 0.897 | 0.909 | 0.916 |
|     |       | 2.4   | 0.981     | 0.956 | 0.930 | 0.910 | 0.902 | 0.906 | 0.919 | 0.926 |
|     |       | 2.8   | 0.982     | 0.958 | 0.933 | 0.915 | 0.908 | 0.914 | 0.928 | 0.934 |
|     |       | 3.2   | 0.983     | 0.960 | 0.936 | 0.919 | 0.914 | 0.921 | 0.935 | 0.942 |
|     |       | 3.6   | 0.983     | 0.962 | 0.939 | 0.923 | 0.918 | 0.926 | 0.942 | 0.948 |
|     |       | 4.0   | 0.984     | 0.963 | 0.941 | 0.926 | 0.923 | 0.932 | 0.948 | 0.954 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.975     | 0.937 | 0.899 | 0.867 | 0.847 | 0.838 | 0.844 | 0.850 |
|     |       | 0.8   | 0.977     | 0.942 | 0.907 | 0.877 | 0.860 | 0.854 | 0.861 | 0.867 |
|     |       | 1.2   | 0.979     | 0.948 | 0.916 | 0.890 | 0.876 | 0.873 | 0.882 | 0.889 |
|     |       | 1.6   | 0.980     | 0.952 | 0.923 | 0.899 | 0.887 | 0.887 | 0.898 | 0.904 |
|     |       | 2.0   | 0.981     | 0.955 | 0.928 | 0.906 | 0.896 | 0.898 | 0.910 | 0.916 |
|     |       | 2.4   | 0.982     | 0.958 | 0.932 | 0.912 | 0.903 | 0.907 | 0.920 | 0.926 |
|     |       | 2.8   | 0.983     | 0.960 | 0.936 | 0.917 | 0.910 | 0.915 | 0.928 | 0.935 |
|     |       | 3.2   | 0.983     | 0.962 | 0.939 | 0.921 | 0.915 | 0.922 | 0.936 | 0.943 |
|     |       | 3.6   | 0.984     | 0.964 | 0.941 | 0.925 | 0.920 | 0.928 | 0.943 | 0.949 |
|     |       | 4.0   | 0.984     | 0.965 | 0.944 | 0.928 | 0.924 | 0.933 | 0.949 | 0.955 |

续表 B.0.2

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30    | 50    | 70    | 90    | 110   | 130   | 150   |
| 0.3 | 0     | 0.6   | 0.952     | 0.898 | 0.857 | 0.832 | 0.818 | 0.814 | 0.822 | 0.830 |
|     |       | 0.8   | 0.950     | 0.893 | 0.849 | 0.822 | 0.805 | 0.798 | 0.804 | 0.812 |
|     |       | 1.2   | 0.953     | 0.903 | 0.864 | 0.842 | 0.830 | 0.829 | 0.839 | 0.847 |
|     |       | 1.6   | 0.955     | 0.908 | 0.872 | 0.854 | 0.846 | 0.847 | 0.859 | 0.868 |
|     |       | 2.0   | 0.957     | 0.912 | 0.879 | 0.863 | 0.857 | 0.861 | 0.874 | 0.883 |
|     |       | 2.4   | 0.958     | 0.915 | 0.884 | 0.869 | 0.865 | 0.871 | 0.886 | 0.895 |
|     |       | 2.8   | 0.959     | 0.918 | 0.888 | 0.875 | 0.872 | 0.880 | 0.896 | 0.905 |
|     |       | 3.2   | 0.959     | 0.920 | 0.891 | 0.880 | 0.878 | 0.888 | 0.904 | 0.913 |
|     |       | 3.6   | 0.960     | 0.922 | 0.894 | 0.884 | 0.884 | 0.894 | 0.911 | 0.920 |
|     |       | 4.0   | 0.961     | 0.923 | 0.897 | 0.887 | 0.888 | 0.900 | 0.918 | 0.927 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.956     | 0.909 | 0.869 | 0.841 | 0.825 | 0.819 | 0.826 | 0.833 |
|     |       | 0.8   | 0.957     | 0.913 | 0.876 | 0.851 | 0.837 | 0.834 | 0.843 | 0.850 |
|     |       | 1.2   | 0.959     | 0.919 | 0.885 | 0.864 | 0.853 | 0.853 | 0.864 | 0.871 |
|     |       | 1.6   | 0.961     | 0.923 | 0.891 | 0.872 | 0.864 | 0.867 | 0.879 | 0.887 |
|     |       | 2.0   | 0.962     | 0.926 | 0.896 | 0.879 | 0.873 | 0.877 | 0.891 | 0.899 |
|     |       | 2.4   | 0.963     | 0.928 | 0.900 | 0.885 | 0.880 | 0.886 | 0.901 | 0.908 |
|     |       | 2.8   | 0.963     | 0.931 | 0.904 | 0.890 | 0.886 | 0.894 | 0.909 | 0.917 |
|     |       | 3.2   | 0.964     | 0.932 | 0.907 | 0.894 | 0.891 | 0.900 | 0.916 | 0.924 |
|     |       | 3.6   | 0.964     | 0.934 | 0.910 | 0.897 | 0.896 | 0.906 | 0.923 | 0.931 |
|     |       | 4.0   | 0.965     | 0.936 | 0.912 | 0.901 | 0.900 | 0.911 | 0.929 | 0.937 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.958     | 0.915 | 0.876 | 0.847 | 0.829 | 0.822 | 0.829 | 0.836 |
|     |       | 0.8   | 0.960     | 0.920 | 0.883 | 0.857 | 0.842 | 0.838 | 0.846 | 0.853 |
|     |       | 1.2   | 0.961     | 0.925 | 0.892 | 0.869 | 0.857 | 0.857 | 0.867 | 0.874 |
|     |       | 1.6   | 0.963     | 0.929 | 0.899 | 0.878 | 0.868 | 0.870 | 0.882 | 0.889 |
|     |       | 2.0   | 0.964     | 0.933 | 0.904 | 0.885 | 0.877 | 0.881 | 0.894 | 0.901 |
|     |       | 2.4   | 0.965     | 0.935 | 0.908 | 0.891 | 0.884 | 0.890 | 0.903 | 0.911 |
|     |       | 2.8   | 0.966     | 0.937 | 0.912 | 0.896 | 0.891 | 0.897 | 0.912 | 0.919 |
|     |       | 3.2   | 0.966     | 0.939 | 0.915 | 0.900 | 0.896 | 0.904 | 0.919 | 0.927 |
|     |       | 3.6   | 0.967     | 0.941 | 0.917 | 0.903 | 0.901 | 0.910 | 0.926 | 0.933 |
|     |       | 4.0   | 0.967     | 0.942 | 0.920 | 0.907 | 0.905 | 0.915 | 0.932 | 0.939 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.960     | 0.919 | 0.881 | 0.851 | 0.832 | 0.824 | 0.831 | 0.837 |
|     |       | 0.8   | 0.961     | 0.924 | 0.888 | 0.861 | 0.845 | 0.840 | 0.848 | 0.854 |
|     |       | 1.2   | 0.963     | 0.930 | 0.897 | 0.873 | 0.860 | 0.859 | 0.868 | 0.875 |
|     |       | 1.6   | 0.964     | 0.934 | 0.904 | 0.882 | 0.871 | 0.872 | 0.884 | 0.890 |
|     |       | 2.0   | 0.965     | 0.937 | 0.909 | 0.889 | 0.880 | 0.883 | 0.895 | 0.902 |
|     |       | 2.4   | 0.966     | 0.939 | 0.913 | 0.895 | 0.887 | 0.892 | 0.905 | 0.912 |
|     |       | 2.8   | 0.967     | 0.942 | 0.917 | 0.899 | 0.894 | 0.900 | 0.914 | 0.921 |
|     |       | 3.2   | 0.968     | 0.943 | 0.920 | 0.904 | 0.899 | 0.906 | 0.921 | 0.928 |
|     |       | 3.6   | 0.968     | 0.945 | 0.922 | 0.907 | 0.904 | 0.912 | 0.928 | 0.935 |
|     |       | 4.0   | 0.969     | 0.947 | 0.925 | 0.911 | 0.908 | 0.918 | 0.933 | 0.941 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.961     | 0.922 | 0.884 | 0.853 | 0.834 | 0.826 | 0.832 | 0.838 |
|     |       | 0.8   | 0.962     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 1.2   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 1.6   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.0   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.4   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.8   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 3.2   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 3.6   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 4.0   | 0.959     | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.961     | 0.924 | 0.887 | 0.855 | 0.835 | 0.827 | 0.833 | 0.839 |
|     |       | 0.8   | 0.963     | 0.929 | 0.894 | 0.865 | 0.848 | 0.842 | 0.850 | 0.856 |
|     |       | 1.2   | 0.965     | 0.935 | 0.903 | 0.878 | 0.864 | 0.861 | 0.871 | 0.877 |
|     |       | 1.6   | 0.966     | 0.939 | 0.910 | 0.886 | 0.875 | 0.875 | 0.886 | 0.892 |
|     |       | 2.0   | 0.967     | 0.942 | 0.915 | 0.893 | 0.884 | 0.886 | 0.898 | 0.904 |
|     |       | 2.4   | 0.968     | 0.944 | 0.919 | 0.899 | 0.891 | 0.895 | 0.907 | 0.914 |
|     |       | 2.8   | 0.969     | 0.947 | 0.922 | 0.904 | 0.897 | 0.902 | 0.916 | 0.923 |
|     |       | 3.2   | 0.969     | 0.948 | 0.926 | 0.908 | 0.903 | 0.909 | 0.923 | 0.930 |
|     |       | 3.6   | 0.970     | 0.950 | 0.928 | 0.912 | 0.907 | 0.915 | 0.930 | 0.937 |
|     |       | 4.0   | 0.971     | 0.952 | 0.931 | 0.915 | 0.912 | 0.920 | 0.936 | 0.942 |

续表 B.0.2

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |        |        |       |        |        |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30     | 50     | 70    | 90     | 110    | 130   | 150   |
| 0.5 | 0     | 0.6   | 0.9385    | 0.885  | 0.844  | 0.82  | 0.8065 | 0.802  | 0.81  | 0.818 |
|     |       | 0.8   | 0.937     | 0.880  | 0.837  | 0.810 | 0.794  | 0.787  | 0.793 | 0.801 |
|     |       | 1.2   | 0.940     | 0.890  | 0.851  | 0.830 | 0.819  | 0.817  | 0.827 | 0.835 |
|     |       | 1.6   | 0.942     | 0.895  | 0.860  | 0.842 | 0.834  | 0.836  | 0.848 | 0.856 |
|     |       | 2.0   | 0.943     | 0.899  | 0.866  | 0.851 | 0.845  | 0.849  | 0.862 | 0.871 |
|     |       | 2.4   | 0.944     | 0.902  | 0.871  | 0.857 | 0.853  | 0.859  | 0.874 | 0.883 |
|     |       | 2.8   | 0.945     | 0.904  | 0.875  | 0.863 | 0.860  | 0.868  | 0.884 | 0.892 |
|     |       | 3.2   | 0.946     | 0.907  | 0.878  | 0.867 | 0.866  | 0.876  | 0.892 | 0.901 |
|     |       | 3.6   | 0.946     | 0.908  | 0.881  | 0.871 | 0.871  | 0.882  | 0.899 | 0.908 |
|     |       | 4.0   | 0.947     | 0.910  | 0.884  | 0.875 | 0.876  | 0.888  | 0.905 | 0.914 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.942     | 0.8955 | 0.8565 | 0.829 | 0.813  | 0.8075 | 0.815 | 0.822 |
|     |       | 0.8   | 0.944     | 0.900  | 0.864  | 0.839 | 0.826  | 0.823  | 0.832 | 0.839 |
|     |       | 1.2   | 0.945     | 0.906  | 0.872  | 0.851 | 0.841  | 0.841  | 0.852 | 0.860 |
|     |       | 1.6   | 0.947     | 0.910  | 0.879  | 0.860 | 0.852  | 0.855  | 0.867 | 0.875 |
|     |       | 2.0   | 0.948     | 0.913  | 0.884  | 0.867 | 0.861  | 0.865  | 0.879 | 0.886 |
|     |       | 2.4   | 0.949     | 0.915  | 0.888  | 0.872 | 0.868  | 0.874  | 0.888 | 0.896 |
|     |       | 2.8   | 0.949     | 0.917  | 0.891  | 0.877 | 0.874  | 0.881  | 0.896 | 0.904 |
|     |       | 3.2   | 0.950     | 0.919  | 0.894  | 0.881 | 0.879  | 0.888  | 0.904 | 0.912 |
|     |       | 3.6   | 0.951     | 0.921  | 0.897  | 0.885 | 0.884  | 0.894  | 0.910 | 0.918 |
|     |       | 4.0   | 0.951     | 0.922  | 0.899  | 0.888 | 0.888  | 0.899  | 0.916 | 0.924 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.971     | 0.912  | 0.867  | 0.839 | 0.822  | 0.814  | 0.821 | 0.829 |
|     |       | 0.8   | 0.946     | 0.907  | 0.871  | 0.845 | 0.830  | 0.826  | 0.834 | 0.841 |
|     |       | 1.2   | 0.948     | 0.912  | 0.880  | 0.857 | 0.845  | 0.845  | 0.855 | 0.862 |
|     |       | 1.6   | 0.949     | 0.916  | 0.886  | 0.866 | 0.856  | 0.858  | 0.870 | 0.877 |
|     |       | 2.0   | 0.950     | 0.919  | 0.891  | 0.873 | 0.865  | 0.869  | 0.881 | 0.889 |
|     |       | 2.4   | 0.951     | 0.922  | 0.895  | 0.878 | 0.872  | 0.878  | 0.891 | 0.898 |
|     |       | 2.8   | 0.952     | 0.924  | 0.899  | 0.883 | 0.878  | 0.885  | 0.899 | 0.907 |
|     |       | 3.2   | 0.952     | 0.926  | 0.902  | 0.887 | 0.883  | 0.892  | 0.907 | 0.914 |
|     |       | 3.6   | 0.953     | 0.927  | 0.904  | 0.891 | 0.888  | 0.897  | 0.913 | 0.921 |
|     |       | 4.0   | 0.953     | 0.929  | 0.907  | 0.894 | 0.892  | 0.903  | 0.919 | 0.926 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.946     | 0.906  | 0.869  | 0.839 | 0.820  | 0.813  | 0.819 | 0.825 |
|     |       | 0.8   | 0.947     | 0.911  | 0.876  | 0.849 | 0.833  | 0.828  | 0.836 | 0.842 |
|     |       | 1.2   | 0.949     | 0.916  | 0.885  | 0.861 | 0.848  | 0.847  | 0.857 | 0.863 |
|     |       | 1.6   | 0.951     | 0.920  | 0.891  | 0.870 | 0.859  | 0.860  | 0.871 | 0.878 |
|     |       | 2.0   | 0.952     | 0.923  | 0.896  | 0.876 | 0.868  | 0.871  | 0.883 | 0.890 |
|     |       | 2.4   | 0.952     | 0.926  | 0.900  | 0.882 | 0.875  | 0.880  | 0.893 | 0.900 |
|     |       | 2.8   | 0.953     | 0.928  | 0.904  | 0.887 | 0.881  | 0.887  | 0.901 | 0.908 |
|     |       | 3.2   | 0.954     | 0.930  | 0.907  | 0.891 | 0.886  | 0.894  | 0.908 | 0.916 |
|     |       | 3.6   | 0.954     | 0.932  | 0.909  | 0.895 | 0.891  | 0.900  | 0.915 | 0.922 |
|     |       | 4.0   | 0.955     | 0.933  | 0.912  | 0.898 | 0.895  | 0.905  | 0.921 | 0.928 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.947     | 0.909  | 0.872  | 0.841 | 0.822  | 0.815  | 0.820 | 0.826 |
|     |       | 0.8   | 0.948     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 1.2   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 1.6   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.0   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.4   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.8   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 3.2   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 3.6   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 4.0   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.948     | 0.911  | 0.874  | 0.843 | 0.823  | 0.816  | 0.821 | 0.827 |
|     |       | 0.8   | 0.949     | 0.916  | 0.881  | 0.853 | 0.836  | 0.831  | 0.838 | 0.844 |
|     |       | 1.2   | 0.951     | 0.921  | 0.890  | 0.865 | 0.851  | 0.849  | 0.859 | 0.865 |
|     |       | 1.6   | 0.952     | 0.925  | 0.897  | 0.874 | 0.863  | 0.863  | 0.874 | 0.880 |
|     |       | 2.0   | 0.953     | 0.928  | 0.902  | 0.881 | 0.871  | 0.874  | 0.885 | 0.892 |
|     |       | 2.4   | 0.954     | 0.931  | 0.906  | 0.886 | 0.878  | 0.882  | 0.895 | 0.902 |
|     |       | 2.8   | 0.955     | 0.933  | 0.909  | 0.891 | 0.885  | 0.890  | 0.903 | 0.910 |
|     |       | 3.2   | 0.956     | 0.935  | 0.912  | 0.895 | 0.890  | 0.897  | 0.911 | 0.917 |
|     |       | 3.6   | 0.956     | 0.937  | 0.915  | 0.899 | 0.895  | 0.902  | 0.917 | 0.924 |
|     |       | 4.0   | 0.957     | 0.938  | 0.917  | 0.902 | 0.899  | 0.908  | 0.923 | 0.930 |

续表 B.0.2

| $n$ | $e/r$ | $\xi$ | $\lambda$ |        |        |       |        |        |       |       |
|-----|-------|-------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
|     |       |       | 10        | 30     | 50     | 70    | 90     | 110    | 130   | 150   |
| 0.7 | 0     | 0.6   | 0.9385    | 0.885  | 0.844  | 0.82  | 0.8065 | 0.802  | 0.81  | 0.818 |
|     |       | 0.8   | 0.937     | 0.880  | 0.837  | 0.810 | 0.794  | 0.787  | 0.793 | 0.801 |
|     |       | 1.2   | 0.940     | 0.890  | 0.851  | 0.830 | 0.819  | 0.817  | 0.827 | 0.835 |
|     |       | 1.6   | 0.942     | 0.895  | 0.860  | 0.842 | 0.834  | 0.836  | 0.848 | 0.856 |
|     |       | 2.0   | 0.943     | 0.899  | 0.866  | 0.851 | 0.845  | 0.849  | 0.862 | 0.871 |
|     |       | 2.4   | 0.944     | 0.902  | 0.871  | 0.857 | 0.853  | 0.859  | 0.874 | 0.883 |
|     |       | 2.8   | 0.945     | 0.904  | 0.875  | 0.863 | 0.860  | 0.868  | 0.884 | 0.892 |
|     |       | 3.2   | 0.946     | 0.907  | 0.878  | 0.867 | 0.866  | 0.876  | 0.892 | 0.901 |
|     |       | 3.6   | 0.946     | 0.908  | 0.881  | 0.871 | 0.871  | 0.882  | 0.899 | 0.908 |
|     |       | 4.0   | 0.947     | 0.910  | 0.884  | 0.875 | 0.876  | 0.888  | 0.905 | 0.914 |
|     | 0.2   | 0.6   | 0.942     | 0.8955 | 0.8565 | 0.829 | 0.813  | 0.8075 | 0.815 | 0.822 |
|     |       | 0.8   | 0.944     | 0.900  | 0.864  | 0.839 | 0.826  | 0.823  | 0.832 | 0.839 |
|     |       | 1.2   | 0.945     | 0.906  | 0.872  | 0.851 | 0.841  | 0.841  | 0.852 | 0.860 |
|     |       | 1.6   | 0.947     | 0.910  | 0.879  | 0.860 | 0.852  | 0.855  | 0.867 | 0.875 |
|     |       | 2.0   | 0.948     | 0.913  | 0.884  | 0.867 | 0.861  | 0.865  | 0.879 | 0.886 |
|     |       | 2.4   | 0.949     | 0.915  | 0.888  | 0.872 | 0.868  | 0.874  | 0.888 | 0.896 |
|     |       | 2.8   | 0.949     | 0.917  | 0.891  | 0.877 | 0.874  | 0.881  | 0.896 | 0.904 |
|     |       | 3.2   | 0.950     | 0.919  | 0.894  | 0.881 | 0.879  | 0.888  | 0.904 | 0.912 |
|     |       | 3.6   | 0.951     | 0.921  | 0.897  | 0.885 | 0.884  | 0.894  | 0.910 | 0.918 |
|     |       | 4.0   | 0.951     | 0.922  | 0.899  | 0.888 | 0.888  | 0.899  | 0.916 | 0.924 |
|     | 0.4   | 0.6   | 0.971     | 0.912  | 0.867  | 0.839 | 0.822  | 0.814  | 0.821 | 0.829 |
|     |       | 0.8   | 0.946     | 0.907  | 0.871  | 0.845 | 0.830  | 0.826  | 0.834 | 0.841 |
|     |       | 1.2   | 0.948     | 0.912  | 0.880  | 0.857 | 0.845  | 0.845  | 0.855 | 0.862 |
|     |       | 1.6   | 0.949     | 0.916  | 0.886  | 0.866 | 0.856  | 0.858  | 0.870 | 0.877 |
|     |       | 2.0   | 0.950     | 0.919  | 0.891  | 0.873 | 0.865  | 0.869  | 0.881 | 0.889 |
|     |       | 2.4   | 0.951     | 0.922  | 0.895  | 0.878 | 0.872  | 0.878  | 0.891 | 0.898 |
|     |       | 2.8   | 0.952     | 0.924  | 0.899  | 0.883 | 0.878  | 0.885  | 0.899 | 0.907 |
|     |       | 3.2   | 0.952     | 0.926  | 0.902  | 0.887 | 0.883  | 0.892  | 0.907 | 0.914 |
|     |       | 3.6   | 0.953     | 0.927  | 0.904  | 0.891 | 0.888  | 0.897  | 0.913 | 0.921 |
|     |       | 4.0   | 0.953     | 0.929  | 0.907  | 0.894 | 0.892  | 0.903  | 0.919 | 0.926 |
|     | 0.6   | 0.6   | 0.946     | 0.906  | 0.869  | 0.839 | 0.820  | 0.813  | 0.819 | 0.825 |
|     |       | 0.8   | 0.947     | 0.911  | 0.876  | 0.849 | 0.833  | 0.828  | 0.836 | 0.842 |
|     |       | 1.2   | 0.949     | 0.916  | 0.885  | 0.861 | 0.848  | 0.847  | 0.857 | 0.863 |
|     |       | 1.6   | 0.951     | 0.920  | 0.891  | 0.870 | 0.859  | 0.860  | 0.871 | 0.878 |
|     |       | 2.0   | 0.952     | 0.923  | 0.896  | 0.876 | 0.868  | 0.871  | 0.883 | 0.890 |
|     |       | 2.4   | 0.952     | 0.926  | 0.900  | 0.882 | 0.875  | 0.880  | 0.893 | 0.900 |
|     |       | 2.8   | 0.953     | 0.928  | 0.904  | 0.887 | 0.881  | 0.887  | 0.901 | 0.908 |
|     |       | 3.2   | 0.954     | 0.930  | 0.907  | 0.891 | 0.886  | 0.894  | 0.908 | 0.916 |
|     |       | 3.6   | 0.954     | 0.932  | 0.909  | 0.895 | 0.891  | 0.900  | 0.915 | 0.922 |
|     |       | 4.0   | 0.955     | 0.933  | 0.912  | 0.898 | 0.895  | 0.905  | 0.921 | 0.928 |
|     | 0.8   | 0.6   | 0.947     | 0.909  | 0.872  | 0.841 | 0.822  | 0.815  | 0.820 | 0.826 |
|     |       | 0.8   | 0.948     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 1.2   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 1.6   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.0   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.4   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 2.8   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 3.2   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 3.6   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     |       | 4.0   | 0.959     | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959  | 0.959  | 0.959 | 0.959 |
|     | 1.0   | 0.6   | 0.948     | 0.911  | 0.874  | 0.843 | 0.823  | 0.816  | 0.821 | 0.827 |
|     |       | 0.8   | 0.949     | 0.916  | 0.881  | 0.853 | 0.836  | 0.831  | 0.838 | 0.844 |
|     |       | 1.2   | 0.951     | 0.921  | 0.890  | 0.865 | 0.851  | 0.849  | 0.859 | 0.865 |
|     |       | 1.6   | 0.952     | 0.925  | 0.897  | 0.874 | 0.863  | 0.863  | 0.874 | 0.880 |
|     |       | 2.0   | 0.953     | 0.928  | 0.902  | 0.881 | 0.871  | 0.874  | 0.885 | 0.892 |
|     |       | 2.4   | 0.954     | 0.931  | 0.906  | 0.886 | 0.878  | 0.882  | 0.895 | 0.902 |
|     |       | 2.8   | 0.955     | 0.933  | 0.909  | 0.891 | 0.885  | 0.890  | 0.903 | 0.910 |
|     |       | 3.2   | 0.956     | 0.935  | 0.912  | 0.895 | 0.890  | 0.897  | 0.911 | 0.917 |
|     |       | 3.6   | 0.956     | 0.937  | 0.915  | 0.899 | 0.895  | 0.902  | 0.917 | 0.924 |
|     |       | 4.0   | 0.957     | 0.938  | 0.917  | 0.902 | 0.899  | 0.908  | 0.923 | 0.930 |

## 附录 C 静力荷载下混凝土本构模型

**C.0.1** 使用纤维模型法进行不锈钢混凝土结构整体分析时，核心混凝土宜采用考虑外不锈钢管约束效应的本构模型，并满足下列要求：

1 圆形不锈钢管混凝土本构模型可按下列公式确定：

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (\text{C.0.1-1})$$

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

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (\text{C.0.1-3})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (\text{C.0.1-4})$$

$$\sigma_0 = [1 + (-0.054\xi_s^2 + 0.4\xi_s) \cdot (\frac{24}{f_c'})^{0.45}] \cdot f_c' \quad (\text{C.0.1-5})$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + [1400 + 800(\frac{f_c'}{24} - 1)] \cdot \xi_s^{0.2} \quad (\mu\varepsilon) \quad (\text{C.0.1-6})$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5 f_c' \quad (\mu\varepsilon) \quad (\text{C.0.1-7})$$

$$q = \frac{\xi_s^{0.745}}{2 + \xi_s} \quad (\text{C.0.1-8})$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi_s - 0.5)^7]} \cdot f_c'^2 \cdot 3.51 \times 10^{-4} \quad (\text{C.0.1-9})$$

2 矩形不锈钢管混凝土可本构模型可按下列公式确定：

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (\text{C.0.1-10})$$

$$y = \frac{x}{\beta \cdot (x-1)^\eta + x} \quad (x > 1) \quad (\text{C.0.1-11})$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (\text{C.0.1-12})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (\text{C.0.1-13})$$

$$\sigma_0 = [1 + (-0.0135\xi_s^2 + 0.1\xi_s) \cdot (\frac{24}{f_c'})^{0.45}] \cdot f_c' \quad (\text{C.0.1-14})$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + [1330 + 760(\frac{f_c'}{24} - 1)] \cdot \xi_s^{0.2} \quad (\mu\varepsilon) \quad (\text{C.0.1-15})$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5 f_c' \quad (\mu\varepsilon) \quad (\text{C.0.1-16})$$

$$\eta = 1.6 + 1.5/x \quad (\text{C.0.1-17})$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{(f_c')^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi}} & (\xi \leq 3.0) \\ \frac{(f_c')^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi} \cdot (\xi - 2)^2} & (\xi > 3.0) \end{cases} \quad (\text{C.0.1-18})$$

表 C.0.2 混凝土强度等级与圆柱体抗压强度间的近似对应关系

| 强度等级                        | C40 | C50 | C60 | C70 | C80 |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 33  | 41  | 51  | 60  | 70  |

**【条文说明】C.0.1** 研究表明，对于不锈钢管混凝土，不锈钢管对核心混凝土的约束效应类似于碳素钢管对其核心混凝土的约束效应。通过大量的计算分析确定了不锈钢管混凝土的核心混凝土的本构模型，利用该模型预测的不锈钢管混凝土构件的力学性能与试验结果较为符合。

## 附录 D 循环荷载下混凝土本构模型

**D.0.1** 不锈钢管内核心混凝土单调受拉应力 ( $\sigma$ ) -应变 ( $\varepsilon$ ) 关系宜按下列公式确定:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{0.31\sigma_p^2 \cdot (x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (\text{D.0.1-1})$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} \quad (\text{D.0.1-2})$$

$$y = \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \quad (\text{D.0.1-3})$$

$$\sigma_p = 0.26(1.25 f'_c)^{2/3} \quad (\text{D.0.1-4})$$

$$\varepsilon_p = 43.1 \sigma_p \quad (\text{D.0.1-5})$$

式中:  $\varepsilon_p$  —— 峰值拉应力时的应变( $\mu\varepsilon$ );  
 $\sigma_p$  —— 峰值拉应力( $\text{N/mm}^2$ );  
 $f'_c$  —— 混凝土圆柱体抗压强度( $\text{N/mm}^2$ ), 按本规程表 C.0.2 换算。

**D.0.2** 不锈钢管内核心混凝土在反复荷载作用下的应力-应变关系(图 D.0.2)与受压卸载、再加载路径宜按下列公式确定:

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma_o \cdot \varepsilon_A - \sigma_A \cdot \varepsilon_1}{\sigma_o + \sigma_A} \quad (\text{D.0.2-1})$$

$$\varepsilon_1 = 0.5\varepsilon_o \quad (\text{D.0.2-1})$$

$$\sigma_C = \frac{0.75\sigma_o}{0.75\varepsilon_1 + \varepsilon_B} \cdot (\varepsilon_A - \varepsilon_B) \quad (\text{D.0.2-2})$$

$$\varepsilon_D = \frac{D_1 \cdot \varepsilon_A - D_2 \cdot \varepsilon_B - \sigma_C}{D_1 - D_2} \quad (\text{D.0.2-3})$$

$$\sigma_D = D_2 \cdot (\varepsilon_D - \varepsilon_B) \quad (\text{D.0.2-4})$$

$$D_1 = \frac{3\sigma_o + \sigma_C}{3\varepsilon_1 + \varepsilon_A} \quad (\text{D.0.2-5})$$

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

式中:  $\varepsilon_B$  —— 卸载至应力为零时的残余应变( $\mu\varepsilon$ );  
 $\sigma_C$  —— 再加载过程中 C 点应力( $\text{N/mm}^2$ );  
 $\varepsilon_D$  —— 卸载过程中 D 点应力( $\text{N/mm}^2$ );  
 $\sigma_D$  —— 卸载过程中 C 点应力( $\text{N/mm}^2$ )。

$$\varepsilon_H = \varepsilon_G \cdot \left( 0.1 + \frac{0.9\varepsilon_0}{\varepsilon_0 + |\varepsilon_G|} \right) \quad (D.0.2-7)$$

$$\sigma_{con} = 0.3\sigma_w \cdot \left( 2 + \frac{|\varepsilon_H|/\varepsilon_0 - 4}{|\varepsilon_H|/\varepsilon_0 + 2} \right) \quad (D.0.2-8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \sigma_0 & \varepsilon_h \leq \varepsilon_0 & \text{按G-I-J加卸载} \\ \sigma_w &= \sigma_A & \varepsilon_h > \varepsilon_0 & \text{按G-I'-C-E加卸载} \end{aligned} \quad (D.0.2-9)$$

$$\sigma = \sigma_{con} \cdot \left( 1 - \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_H + \varepsilon} \right) \quad (\varepsilon_H \leq \varepsilon < 0) \quad (D.0.2-10)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{con} \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) + \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0 + \varepsilon} \cdot \sigma_0 & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_0 & \text{按G-I-J加卸载} \\ \sigma &= \sigma_{con} \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_A} \right) + \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_A + \varepsilon} \cdot \sigma_C & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_A & \text{按G-I'-C-E加卸载} \end{aligned} \quad (D.0.2-11)$$

式中：  $\varepsilon_H$  —— 开始产生裂面效应的起始点 H 的应变( $\mu\varepsilon$ )；  
 $\sigma_{con}$  —— 再加载过程中应变为零点 I 或 I' 的应力(N/mm<sup>2</sup>)；  
 $\varepsilon_h$  —— 历史最大压应变( $\mu\varepsilon$ )。

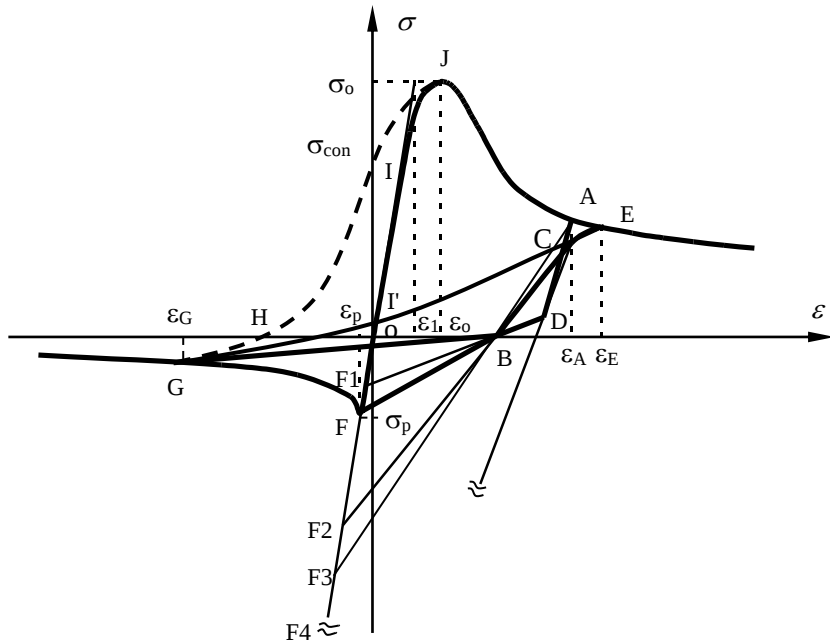


图 D.0.2 钢管内核心混凝土应力-应变滞回关系曲线示意图

## 本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
  - 1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
  - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

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 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 2 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 3 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 4 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 5 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 6 《工业建筑防腐蚀设计规范》 GB 50046
- 7 《混凝土质量控制标准》 GB 50164
- 8 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 9 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
- 10 《建筑工程施工质量验收统一标准》 GB 50300
- 11 《钢管混凝土工程施工质量验收规范》 GB 50628
- 12 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 13 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 14 《钢结构工程施工规范》 GB 50755
- 15 《钢-混凝土组合结构施工规范》 GB 50901
- 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 《钢结构用高强度大六角头螺栓》 GB/T 1228
- 19 《钢结构用高强度大六角螺母》 GB/T 1229
- 20 《埋弧焊用不锈钢焊丝-焊剂组合分类要求》 GB/T 17854
- 21 《钢结构用高强度垫圈》 GB/T 1230
- 22 《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
- 23 《于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596
- 24 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》 GB/T 3632
- 25 《合金钢及细晶粒钢焊条》 GB/T 5117
- 26 《厚度方向性能钢板》 GB/T 5313

- 27 《六角头螺栓 C级》GB/T 5780
- 28 《六角头螺栓》GB/T 5782
- 29 《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》GB/T 8110
- 30 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923
- 31 《钢结构防火涂料通用技术条件》GB 14907
- 32 《层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3
- 33 《层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99
- 34 《筑工程冬期施工规程》JGJ 104
- 35 《合结构设计规范》JGJ 138
- 36 《筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539
- 37 《路桥涵设计通用规范》JTG D60
- 38 《钢结构防火涂料应用技术规范》CECS 24
- 39 《钢管再生混凝土结构技术规程》T/CECS 625
- 40 《不锈钢结构技术规范》CECS 410