

中国工程建设标准化协会标准

钢管再生混凝土结构技术规程

**Technical specification for recycled aggregate concrete-filled
steel tubular structures**

(征求意见稿)

2023 年 10 月 27 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2022 年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2022] 040 号）的要求，规程编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内标准和国外先进标准，并在广泛征求意见基础上，修订了《钢管再生混凝土结构技术规程》T/CECS 625-2019。

本规程共分 10 章和 3 个附录，主要技术内容包括：总则，术语和符号，基本规定，材料，结构分析，构件承载力计算，构造设计，节点和连接设计，防护设计，制作、施工、验收、维护和拆除等。

本规程主要修改内容：1. 扩大了适用范围，在原规程适用范围的基础上，还适用于采用 Q500、Q550、Q620、Q690、Q500GJ、Q550GJ、Q620GJ、Q690GJ 钢的高强钢管再生混凝土；2. 补充了钢管再生混凝土结构的设计内容与设计方法；3. 补充、修改了再生混凝土材料导热系数及收缩应变和徐变应变的计算方法；4. 补充了钢管再生混凝土柱和钢梁间的半刚性连接节点的设计计算要求；5. 补充了钢管再生混凝土抗弯框架核心区柱腹板区域受剪承载力的验算方法；6. 补充、修改了钢管再生混凝土外包式柱脚、埋入式柱脚和外露式柱脚的设计方法；7. 补充、修改了钢管再生混凝土防火设计、防腐设计、防撞击设计与抗爆设计的技术要求；8. 补充了钢管再生混凝土结构的维护和拆除的相关内容。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口管理，由清华大学负责具体技术内容的解释。本规程在执行过程中，如有需要修改和补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市海淀区清华大学（何善衡楼）；邮政编码：100084），以供修订时参考。

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语.....	2
2.2	符号.....	2
3	基本规定	5
3.1	一般规定.....	5
3.2	作用和作用组合.....	5
3.3	构造规定.....	6
4	材 料	7
4.1	钢材.....	7
4.2	再生混凝土.....	7
4.3	连接材料.....	9
5	结构分析	11
5.1	一般规定.....	11
5.2	计算指标.....	12
5.3	分析方法.....	13
6	构件承载力计算	15
6.1	一般规定.....	15
6.2	轴心受力构件承载力计算.....	15
6.3	受弯、压弯和拉弯构件承载力计算.....	17
6.4	受剪、受扭和压扭构件承载力计算.....	20
6.5	局部受压构件承载力计算.....	22
7	构造设计	24
8	节点设计	27
8.1	一般规定.....	27
8.2	梁柱节点.....	27
8.3	桁式混合结构节点.....	36
8.4	柱脚节点.....	36
9	防护设计	38
9.1	一般规定.....	38
9.2	防腐设计.....	38
9.3	防火设计.....	39
9.4	防撞击设计.....	40
9.5	抗爆设计.....	43
10	施工、验收、维护和拆除	44
10.1	一般规定.....	44
10.2	制作与安装.....	44
10.3	钢管内再生混凝土施工.....	45
10.4	检测与验收.....	46
10.5	维护和拆除.....	47
附录 A	钢管再生混凝土结构的材料本构模型	49

附录 B 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变计算	55
附录 C 稳定系数 φ 值表	57
本规程用词说明	69
引用标准名录	70
条文说明	73
1 总 则	76
3 基本规定	77
3.1 一般规定	77
3.2 作用和作用组合	77
3.3 构造规定	77
4 材 料	79
4.1 钢材	79
4.2 再生混凝土	79
5 结构分析	82
5.1 一般规定	82
5.2 计算指标	82
6 构件承载力计算	84
6.1 一般规定	84
6.2 轴心受力构件承载力计算	85
6.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算	85
6.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算	86
6.5 局部受压构件承载力计算	87
7 构造设计	88
8 节点和连接设计	89
8.1 一般规定	89
8.2 梁柱节点	89
8.3 桁式混合结构节点	90
8.4 柱脚节点	90
9 防护设计	92
9.1 一般规定	92
9.2 防腐设计	93
9.3 防火设计	93
9.4 防撞击设计	94
9.5 抗爆设计	94
10 施工、验收、维护和拆除	96
10.1 一般规定	96
10.2 制作与安装	96
10.3 钢管内再生混凝土施工	96
10.4 检测与验收	97
附录 A 钢管再生混凝土结构的材料本构模型	98
附录 B 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变计算	101

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	2
3	Basic Requirements	5
3.1	General Requirements	5
3.2	Actions and Combinations of Actions	5
3.3	Detailing Requirements	6
4	Materials	7
4.1	Steel	7
4.2	Recycled Aggregate Concrete (RAC)	7
4.3	Connection Materials	9
5	Structural Analysis	11
5.1	General Requirements	11
5.2	Design Indices	12
5.3	Analysis Methods	13
6	Ultimate Limit States	15
6.1	General Requirements	15
6.2	Resistances of Members for Axial Loading	15
6.3	Resistances of Members for Compression, Bending and Combined Effects	17
6.4	Resistances of Members for Shear, Torsion and Combined Effects	20
6.5	Resistances of Members under Local Bearing	22
7	Design of Constructional Details	24
8	Design of Joints	27
8.1	General Requirements	27
8.2	Beam-to-column Joints	27
8.3	Joints of Truesd Hybrid Structures	36
8.4	Pedestal Footing Joints	36
9	Protective Design	38
9.1	General Requirements	38
9.2	Design of Corrosion Resistance	38
9.3	Design of Fire Resistance	39
9.4	Design of Impact Resistance	40
9.5	Design of Blast Resistance	43
10	Construction, Acceptance, Maintenance and Demolition	44

10.1	General Requirements	44
10.2	Fabrication and Erection of Steel Tubes	44
10.3	Construction of Recycled Aggregate Concrete	45
10.4	Inspection and Acceptance	46
10.5	Maintenance and Demolition	47
Appendix A	Constitutive Models for Materials in Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular Structures	49
Appendix B	Calculation of Shrinkage and Creep Strains of Recycled Aggregate Concrete	55
Appendix C	Table of Reduction Factor (ϕ) due to Flexural Buckling	57
	Explanation of Wording in This Specification	69
	List of Quoted Standards	70
	Addition: Explanation of Provisions	73

1 总 则

1.0.1 为在钢管再生混凝土结构的设计、施工、验收及维护和拆除中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、绿色环保、经济合理，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于房屋建筑、铁路、公路、电力、港口等工程中钢管再生混凝土结构的设计、施工、验收及维护和拆除。

1.0.3 钢管再生混凝土结构的设计、施工、验收及维护和拆除除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准和中国工程建设标准化协会标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 钢管再生混凝土构件 recycled aggregate concrete-filled steel tubular member

钢管内填充再生混凝土形成钢管与再生混凝土共同受力的组合构件，截面可为圆形或矩形。

2.1.2 钢管再生混凝土结构 recycled aggregate concrete-filled steel tubular structure

以钢管再生混凝土构件为主要受力单元的结构。

2.1.3 再生混凝土 recycled aggregate concrete (RAC)

掺用再生粗骨料配制而成的混凝土，本规程再生混凝土为采用天然细骨料的再生粗骨料混凝土。

2.1.4 再生粗骨料 recycled coarse aggregate (RCA)

由建(构)筑废弃物中的混凝土、砂浆、石加工而成，用于配制混凝土的、粒径大于 4.75mm 的颗粒。

2.1.5 再生粗骨料取代率 replacement ratio of recycled coarse aggregate

再生混凝土中再生粗骨料用量占粗骨料总用量的质量百分比。

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

钢管再生混凝土构件在钢管与再生混凝土共同工作前钢管应力的容许值。

2.1.7 截面含钢率 steel ratio

钢管截面面积与钢管内再生混凝土截面面积的比值。

2.1.8 约束效应系数 confinement factor

钢管截面与钢管内再生混凝土截面的名义轴心受压承载力的比值。

2.2 符号

2.2.1 作用、作用效应和抗力

M —— 弯矩设计值；

M_u —— 受弯承载力；

N —— 轴力设计值；

N_0 —— 截面的受压承载力；

N_u —— 构件的轴心受压承载力；

T —— 扭矩设计值；

T_u —— 受扭承载力；

V —— 剪力设计值；

V_u —— 受剪承载力。

2.2.2 材料力学性能

$E_{c,r}$ —— 再生混凝土的弹性模量；

E_s —— 钢材的弹性模量；

f —— 钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

f_b	——	钢管和再生混凝土粘结强度设计值；
$f_{c,r}$	——	再生混凝土的轴心抗压强度设计值；
$f_{ck,r}$	——	再生混凝土的轴心抗压强度标准值；
f_l	——	纵筋的抗拉强度设计值；
$f_{sc,r}$	——	钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度设计值；
$f_{scy,r}$	——	钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度标准值；
$f_{sv,r}$	——	钢管再生混凝土截面的抗剪强度设计值；
$f_{t,r}$	——	再生混凝土的轴心抗拉强度设计值；
$f_{tk,r}$	——	再生混凝土的轴心抗拉强度标准值；
f_y	——	钢材的屈服强度；
$G_{c,r}$	——	再生混凝土的剪变模量；
G_s	——	钢材的剪变模量；
RC30	——	立方体抗压强度标准值为 30N/mm^2 的再生混凝土强度等级；
W_{sc}	——	钢管再生混凝土构件的截面抗弯模量；
$\nu_{c,r}$	——	再生混凝土的泊松比。

2.2.3 几何参数

A_c	——	钢管内再生混凝土的截面面积；
A_l	——	纵向受力钢筋的截面面积；
A_{lc}	——	轴向局部受压面积；
A_s	——	钢管的截面面积；
A_{sc}	——	钢管再生混凝土的截面面积；
A_{se}	——	腐蚀后钢管的截面面积；
A_w	——	桁式混合结构中单根腹杆空钢管的截面面积；
B	——	方形钢管再生混凝土的截面外边长；矩形钢管再生混凝土的截面宽度；
B_e	——	腐蚀后方形钢管再生混凝土的截面外边长；腐蚀后矩形钢管再生混凝土的截面宽度；
D	——	圆形钢管再生混凝土的截面外直径；
D_e	——	腐蚀后圆形钢管再生混凝土的截面外直径；
H	——	矩形钢管再生混凝土的截面高度；
H_e	——	腐蚀后矩形钢管再生混凝土的截面高度；
I_c	——	钢管内再生混凝土的截面惯性矩；
$I_{p,c}$	——	钢管内再生混凝土的截面极惯性矩；
$I_{p,s}$	——	钢管的截面极惯性矩；
I_s	——	钢管的截面惯性矩；
l_0	——	构件的计算长度；
t	——	钢管或钢板厚度；
t_e	——	腐蚀后钢管壁厚；
Δt	——	腐蚀后钢管的平均壁厚损失值；
θ	——	斜腹杆与弦杆的夹角。

2.2.4 计算系数及其他

k_{cr}	——	长期荷载作用影响系数；
----------	----	-------------

n	——	轴压比；
n_L	——	长期荷载比；
r_c	——	再生粗骨料取代率；
R	——	火灾下的荷载比；
R_d	——	撞击动力影响系数；
V_0	——	撞击物速度；
α_e	——	腐蚀后名义截面含钢率；
α_s	——	截面含钢率；
α_σ	——	再生混凝土强度折减系数；
γ_m	——	截面抗弯塑性发展系数；
γ_{sc}	——	钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度分项系数；
γ_v	——	受剪承载力计算系数；
φ	——	轴心受压构件的稳定系数；
λ	——	构件的长细比；结构的换算长细比；
λ_o	——	构件弹塑性失稳的界限长细比；
λ_p	——	构件弹性失稳的界限长细比；
ξ_e	——	腐蚀后名义约束效应系数；
ξ_r	——	约束效应系数；
ϕ	——	钢管内再生混凝土的徐变系数。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 钢管再生混凝土结构设计应包括下列内容：

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

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

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

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

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

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

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

3.1.7 钢管再生混凝土结构应结合施工技术与实际工程条件，选择合理施工方法，并制定技术要求。

3.1.8 钢管再生混凝土结构的维护工作应遵守预防为主、防治结合的原则。

3.1.9 钢管再生混凝土结构拆除应按短暂工况进行结构分析。

3.2 作用和作用组合

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

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

3.3 构造规定

3.3.1 圆形钢管再生混凝土构件的截面直径不宜小于 180mm，壁厚不应小于 4mm。矩形钢管再生混凝土构件的截面边长不宜小于 150mm，壁厚不应小于 4mm。

3.3.2 钢管再生混凝土构件的截面含钢率应符合下列规定：

1 圆形钢管再生混凝土构件截面含钢率不宜小于 0.04，且不宜大于 0.20；矩形钢管再生混凝土构件截面含钢率不宜小于 0.05，且不宜大于 0.20。截面含钢率应按下式计算：

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_c} \quad (3.3.2)$$

式中： α_s —— 截面含钢率；

A_s —— 钢管的截面面积（mm²）；

A_c —— 钢管内再生混凝土的截面面积（mm²）。

2 当圆形钢管再生混凝土构件的截面含钢率小于 0.06 或矩形钢管再生混凝土构件截面含钢率小于 0.10 时，构件承载力计算中不宜计入钢管对管内再生混凝土约束作用的有利影响。

3.3.3 矩形钢管再生混凝土构件的钢管截面高宽比（ H/B ）不应大于 2。

3.3.4 圆形钢管再生混凝土构件的约束效应系数不应小于 0.6，且不应大于 4.0；矩形钢管再生混凝土构件的约束效应系数不应小于 1.0，且不应大于 4.0。约束效应系数应按下列公式计算：

$$\xi_r = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck,r}} \quad (3.3.4)$$

式中： ξ_r —— 约束效应系数；

A_c —— 钢管内再生混凝土的截面面积（mm²）；

A_s —— 钢管的截面面积（mm²）；

f_y —— 钢管钢材的屈服强度（N/mm²）；

$f_{ck,r}$ —— 再生混凝土轴心抗压强度标准值（N/mm²）。

4 材 料

4.1 钢材

4.1.1 钢管宜采用 Q355、Q390、Q420、Q460 和 Q355GJ、Q390GJ、Q420GJ、Q460GJ 钢，可采用 Q500、Q550、Q620、Q690 和 Q500GJ、Q550GJ、Q620GJ、Q690GJ 钢，也可采用 Q235 和 Q235GJ 钢，钢材的质量应符合国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017、《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《建筑结构用钢板》GB/T 19879 和《高强钢结构设计标准》JGJ/T 483 的有关规定。

4.1.2 进行抗震设计的钢管再生混凝土结构，所采用的钢材应符合下列规定：

1 Q235~Q420 和 Q235GJ~Q420GJ 钢材屈强比不应大于 0.85，Q460~Q690 和 Q460GJ~Q690GJ 钢材屈强比不应大于 0.9；

2 Q235~Q420 和 Q235GJ~Q420GJ 钢材应有明显的屈服台阶，且伸长率不应小于 20%，Q460~Q690 和 Q460GJ~Q690GJ 钢材伸长率不应小于 16%。

4.1.3 承重结构的钢管可采用焊接钢管、热轧无缝钢管，不宜选用输送流体用的螺旋焊接钢管。当采用无缝钢管时，钢管质量应符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB/T 8162 的有关规定。矩形钢管可采用焊接钢管，也可采用冷成型钢管。当采用冷弯矩形钢管时，应符合现行行业标准《建筑结构用冷弯矩形钢管》JG/T 178 中 I 级产品的有关规定。直接承受动荷载或低温环境下的外露结构，不宜采用冷弯矩形钢管。当螺旋焊接钢管的常用规格不能满足要求时，可采用钢板卷制成的直缝焊接钢管，应采用对接坡口焊缝，不应采用钢板搭接的角焊缝。焊缝应达到二级质量检验标准，和母材等强度。当有可靠依据时，也可根据工程实际需要，采用不锈钢管。

4.1.4 焊接承重结构采用 Z 向钢时，Z 向钢的材质应符合现行国家标准《厚度方向性能钢板》GB/T 5313 的有关规定。

4.1.5 结构构件中的钢筋应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。纵向受力普通钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋，也可采用 HPB300 钢筋。

4.2 再生混凝土

4.2.1 再生混凝土用水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定。当采用通用硅酸盐水泥以外其他品种的水泥时，应进行工程性能验证。

4.2.2 本规程适用的再生混凝土应为掺加天然细骨料的再生粗骨料混凝土；再生粗骨料应符合国家现行标准《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177 和《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240 的有关规定。

4.2.3 再生混凝土用砂应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 的有关规定。

4.2.4 再生混凝土用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的有关规定。

4.2.5 矿物掺合料应符合下列规定：

1 粉煤灰应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的有关规定；磨细粉煤灰应符合现行国家标准《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 的有关规定；

2 粒化高炉矿渣粉应符合现行国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的有关规定；

3 硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土中用硅灰》GB/T 27690 的有关规定；

4 石灰石粉应符合国家现行标准《石灰石粉混凝土》GB/T 30190 和《石灰石粉在混凝土中应用技术规程》JGJ/T 318 的有关规定。

4.2.6 外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 的有关规定。

4.2.7 再生混凝土的强度等级应按立方体抗压强度标准值确定，强度等级不宜高于 RC50，且不宜低于 RC30，水胶比不应大于 0.45，再生粗骨料取代率不应大于 70%。

4.2.8 钢管再生混凝土构件中的再生混凝土强度等级与钢材牌号的组合关系可按表 4.2.8 采用。

表4.2.8 再生混凝土与钢管材料组合关系

钢材牌号	Q235、Q235GJ	Q355、Q355GJ	Q390~Q690、Q390GJ~Q690GJ
再生混凝土强度等级	RC30	RC30~RC50	RC50

4.2.9 仅掺用 I 类再生粗骨料的再生混凝土，强度指标应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

4.2.10 掺用 II 类、III 类再生粗骨料时，再生混凝土的轴心抗压强度标准值 $f_{ck,r}$ 、轴心抗拉强度标准值 $f_{tk,r}$ 、轴心抗压强度设计值 $f_{c,r}$ 、轴心抗拉强度设计值 $f_{t,r}$ 、轴心抗压疲劳强度设计值 $f_{c,r}^f$ 、轴心抗拉疲劳强度设计值 $f_{t,r}^f$ ，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 取值乘再生混凝土强度折减系数 α_σ 的方法确定。对于掺入 II 类、III 类再生粗骨料制备的混凝土，当再生粗骨料取代率为 0% 时 α_σ 宜取 1.00，当再生粗骨料取代率为 30% 时 α_σ 宜取 0.94，当再生粗骨料取代率为 70% 时 α_σ 宜取 0.87，对于其他再生粗骨料取代率，可按线性内插法确定 α_σ 的取值。

4.2.11 再生混凝土弹性模量 $E_{c,r}$ 宜通过试验确定；当缺乏试验资料时，再生混凝土的弹性模量可按表 4.2.11 采用。

表4.2.11 再生混凝土的弹性模量（×10⁴N/mm²）

再生粗骨料类型	再生粗骨料取代率	强度等级				
		RC30	RC35	RC40	RC45	RC50
I类	10%	2.97	3.12	3.21	3.31	3.41
	70%	2.77	2.91	3.00	3.09	3.18
II类、III类	10%	2.90	3.05	3.15	3.24	3.34
	70%	2.47	2.59	2.67	2.76	2.84

注：表内中间值按线性内插法确定。

4.2.12 再生混凝土的剪变模量 $G_{c,r}$ 可按相应再生混凝土弹性模量值的 40% 采用；再生混凝土泊

松比 $\nu_{c,r}$ 可按 0.2 采用。

4.2.13 高温下再生混凝土的热膨胀系数、比热容和热传导系数宜通过试验测定。

4.2.14 再生混凝土在高温下和高温后的轴心抗压强度、弹性模量、峰值应变等力学性能指标宜通过试验确定。当缺乏试验条件或技术资料时，可按本规程附录 A 计算。

4.2.15 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变可按本规程附录 B 计算。

4.3 连接材料

4.3.1 用于钢管再生混凝土构件的焊接材料应符合下列规定：

1 手工焊接所用的焊条应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117 的有关规定，当采用 Q460、Q460GJ 及以上牌号钢材时还应符合现行国家标准《热强钢焊条》GB/T 5118 的有关规定，选用的焊条型号应与主体金属力学性能相适应；

2 自动焊或半自动焊用焊丝应符合现行国家标准《熔化焊用钢丝》GB/T 14957、《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》GB/T 8110、《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》GB/T 10045 和《热强钢药芯焊丝》GB/T 17493 的有关规定；

3 埋弧焊用焊丝和焊剂应符合现行国家标准《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 5293 和《埋弧焊用热强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 12470 的有关规定。

4.3.2 钢管再生混凝土构件焊缝的强度应符合国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《高强度钢结构设计标准》JGJ/T 483 的有关规定。

4.3.3 用于钢管再生混凝土构件的连接紧固件应符合下列规定：

1 4.6 级与 4.8 级的 C 级普通螺栓及 5.6 级与 8.8 级的 A 级或 B 级普通螺栓的质量应符合现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1 和《紧固件公差 螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3103.1 的有关规定；C 级螺栓的规格和尺寸应符合现行国家标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 的有关规定，A 级、B 级螺栓的规格和尺寸应符合现行国家标准《六角头螺栓》GB/T 5782 的有关规定；

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

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

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

4.3.5 自锁式单向高强螺栓的螺杆质量应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228 和《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 的有关

规定。

5 结构分析

5.1 一般规定

5.1.1 钢管再生混凝土结构可用于框架结构、框架-剪力墙结构、部分框支-剪力墙结构、框架-支撑结构、框架-核心筒结构和杆塔结构等结构体系。

5.1.2 多层和高层钢管再生混凝土结构的平面和竖向布置及规则性要求应符合国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的有关规定。

5.1.3 钢管再生混凝土结构构件应按空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、《钢结构焊接规范》GB 50661、《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。

5.1.4 钢管再生混凝土结构乙类和丙类建筑的最大适用高度应符合表 5.1.4 的规定。对平面和竖向均不规则的结构，表中最大适用高度宜适当降低；对甲类建筑，抗震设防烈度为 6 度~8 度时应按本地区设防烈度提高一度后符合表中的规定，9 度时应专门研究；当房屋高度超过表中数值时，结构设计应进行专门研究和论证，并应采取有效加强措施。当框架-核心筒结构采用钢梁、钢-混凝土组合梁及型钢混凝土梁时，应按表中确定最大适用高度；当采用钢筋混凝土梁时，最大适用高度应按钢筋混凝土结构确定。

表5.1.4 钢管再生混凝土结构乙类和丙类建筑的最大适用高度（m）

结构类型	抗震设防烈度				
	6 度	7 度	8 度		9 度
			0.2g	0.3g	
框架	60	50	40	30	20
部分框支-剪力墙	120	80	50	40	不应采用
框架-剪力墙	140	120	100	80	40
框架-支撑	200	180	150	120	90
框架-核心筒	190	150	130	110	60

注：房屋高度指室外地面至房屋主要屋面的高度，不包括突出屋面的电梯机房、水箱、构架等高度。

5.1.5 抗震设计时，钢管再生混凝土柱的轴压比应按下式计算，且不宜大于表 5.1.5 中的限值。

$$n = \frac{N}{\varphi N_0} \quad (5.1.5)$$

式中：N —— 考虑地震组合时钢管再生混凝土柱的轴向压力设计值（N）；

N_0 —— 钢管再生混凝土柱的截面受压承载力（N），应按本规程式（6.2.1-3）计算；

φ —— 钢管再生混凝土轴心受压构件的稳定系数，应按本规程式（6.2.1-4）计算，也可根据本规程附录 C 确定。

表 5.1.5 钢管再生混凝土柱轴压比限值

结构类型	柱类型	圆形钢管再生混凝土	矩形钢管再生混凝土
		抗震等级	

		一级	二级	三、四级	一级	二级	三、四级
框架	框架柱	0.70	0.80	0.90	0.65	0.75	0.85
部分框支-剪力墙	转换柱	0.65	0.75	-	0.60	0.70	-
框架-剪力墙	框架柱	0.75	0.85	0.95	0.70	0.80	0.90
框架-支撑	框架柱	0.75	0.85	0.95	0.70	0.80	0.90
框架-核心筒	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。

5.1.6 钢管再生混凝土结构的高宽比限值，应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

5.1.7 钢管再生混凝土结构的抗震等级应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定，钢管再生混凝土构件的承载力抗震调整系数应符合表 5.1.7 的规定。

表 5.1.7 钢管再生混凝土结构的抗震调整系数

正截面承载力验算		斜截面承载力验算	节点板件、连接焊缝、连接螺栓	
钢管再生混凝土柱	支撑		强度验算	稳定验算
0.80	0.80	0.85	0.75	0.80

5.1.8 钢管再生混凝土结构在风荷载或多遇地震作用下，按弹性方法计算的楼层最大层间位移与层高之比应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

5.1.9 钢管再生混凝土结构在罕遇地震作用下的薄弱层弹塑性层间位移与层高之比应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

5.1.10 房屋高度大于 150m 的钢管再生混凝土结构应满足风振舒适度要求，结构顶点的顺风向和横风向振动最大加速度计算及加速度限值应符合国家现行标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 和《组合结构设计规范》JGJ 138 的有关规定。

5.1.11 钢管再生混凝土结构在多遇地震作用下抗震计算的阻尼比选取应符合国家现行标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 和《组合结构设计规范》JGJ 138 的有关规定，并应根据实际情况确定。

5.2 计算指标

5.2.1 钢管再生混凝土构件截面的轴压强度设计值宜按下式计算：

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

$$f_{scy,r} = \begin{cases} (1.14 + 1.02\xi_r) f_{ck,r} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ (1.18 + 0.85\xi_r) f_{ck,r} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (5.2.1-2)$$

式中： $f_{sc,r}$ —— 钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

$f_{scy,r}$ —— 钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

ξ_r —— 约束效应系数，应按本规程式（3.3.4）计算；

$f_{ck,r}$ —— 再生混凝土轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

γ_{sc} —— 钢管再生混凝土轴心抗压强度分项系数，对于房屋建筑结构、公

路桥涵结构、铁路桥涵结构、电力塔架结构和港口工程应分别取 1.20、1.40、1.45、1.20 和 1.20。

5.2.2 钢管再生混凝土截面的弹性抗压刚度可按下式计算

$$(EA)_c = E_s A_s + E_{c,r} A_c \quad (5.2.2)$$

式中：\$(EA)_c\$ —— 钢管再生混凝土截面的弹性抗压刚度 (N)；

\$E_{c,r}\$ —— 钢管内再生混凝土的弹性模量 (N/mm²)，宜按本规程第 4.2.11 条的规定确定；

\$E_s\$ —— 钢管钢材的弹性模量 (N/mm²)，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定确定；

\$A_c\$ —— 钢管内再生混凝土的截面面积 (mm²)；

\$A_s\$ —— 钢管的截面面积 (mm²)。

5.2.3 钢管再生混凝土截面的弹性抗弯刚度可按下式计算：

$$EI = E_s I_s + E_{c,r} I_c \quad (5.2.3)$$

式中：\$EI\$ —— 钢管再生混凝土截面的弹性抗弯刚度 (N·mm²)；

\$I_c\$ —— 钢管内再生混凝土的截面惯性矩 (mm⁴)；

\$I_s\$ —— 钢管的截面惯性矩 (mm⁴)。

5.2.4 钢管再生混凝土截面的抗剪强度设计值可按下式计算：

$$f_{sv,r} = \begin{cases} \left((0.422 + 0.313\alpha_s^{2.33}) \xi_r^{0.134} f_{sc,r} \right) & \text{(圆形钢管再生混凝土)} \\ \left((0.455 + 0.313\alpha_s^{2.33}) \xi_r^{0.25} f_{sc,r} \right) & \text{(矩形钢管再生混凝土)} \end{cases} \quad (5.2.4)$$

式中：\$f_{sv,r}\$ —— 钢管再生混凝土截面的抗剪强度设计值 (N/mm²)；

\$\alpha_s\$ —— 截面含钢率，应按本规程式 (3.3.2) 计算。

5.2.5 钢管再生混凝土截面的弹性抗剪刚度可按下式计算：

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

式中：\$GA\$ —— 钢管再生混凝土截面的弹性抗剪刚度 (N)；

\$G_{c,r}\$ —— 钢管内再生混凝土的剪变模量 (N/mm²)；

\$G_s\$ —— 钢管钢材的剪变模量 (N/mm²)。

5.2.6 钢管再生混凝土截面的弹性抗扭刚度可按下式计算：

$$GI = G_s I_{p,s} + G_{c,r} I_{p,c} \quad (5.2.6)$$

式中：\$GI\$ —— 钢管再生混凝土截面的弹性抗扭刚度 (N·mm²)；

\$I_{p,c}\$ —— 钢管内再生混凝土的截面极惯性矩 (mm⁴)；

\$I_{p,s}\$ —— 钢管的截面极惯性矩 (mm⁴)。

5.2.7 长期荷载作用下钢管再生混凝土截面的弹性抗压刚度和弹性抗弯刚度，可将第 5.2.2、5.2.3 条中的 \$E_{c,r}\$ 改用 \$E_{c,r}/[1+\phi(t_s, t_0)]\$ 进行计算。其中，徐变系数 \$\phi(t_s, t_0)\$ 可根据本规程附录 B 计算。

5.3 分析方法

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

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

5.3.3 采用有限元法进行钢管再生混凝土结构的弹塑性分析时，可采用本规程附录 A 中的材料本构模型。

6 构件承载力计算

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于承受静力荷载或间接承受动力荷载作用的钢管再生混凝土构件承载力计算。

6.1.2 钢管再生混凝土构件的容许长细比应按现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定确定。

6.1.3 由施工过程引起的钢管初应力限值应为空钢管承载力对应临界应力值的 35%。当钢管再生混凝土中由施工过程引起的钢管初应力小于限值时，可忽略施工过程对构件承载力计算的影响。当钢管再生混凝土中由施工过程引起的钢管初应力大于或等于限值时，应计入施工过程对构件承载力计算的影响。

6.2 轴心受力构件承载力计算

6.2.1 钢管再生混凝土构件的轴心受压承载力应符合下列规定：

1 不计入荷载长期作用影响时，钢管再生混凝土构件的轴心受压承载力应符合式（6.2.1-1）的规定，且宜按式（6.2.1-2）计算：

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

$$N_u = \varphi N_0 \quad (6.2.1-2)$$

$$N_0 = f_{sc,r} A_{sc} \quad (6.2.1-3)$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_0) \\ a\lambda^2 + b\lambda + c & (\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p) \\ d/(\lambda + 35)^2 & (\lambda > \lambda_p) \end{cases} \quad (6.2.1-4)$$

$$a = \frac{1 + (35 + 2\lambda_p - \lambda_0)e}{(\lambda_p - \lambda_0)^2} \quad (6.2.1-5)$$

$$b = e - 2a\lambda_p \quad (6.2.1-6)$$

$$c = 1 - a\lambda_0^2 - b\lambda_0 \quad (6.2.1-7)$$

$$d = \begin{cases} \left[13000 + 4657 \ln \left(\frac{235}{f_y} \right) \right] \cdot \left(\frac{25}{f_{ck,r} + 5} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{\alpha_s}{0.1} \right)^{0.05} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ \left[13500 + 4810 \ln \left(\frac{235}{f_y} \right) \right] \cdot \left(\frac{25}{f_{ck,r} + 5} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{\alpha_s}{0.1} \right)^{0.05} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.2.1-8)$$

$$e = \frac{-d}{(\lambda_p + 35)^3} \quad (6.2.1-9)$$

$$\lambda_p = \begin{cases} \frac{1743}{\sqrt{f_y}} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ \frac{1811}{\sqrt{f_y}} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.2.1-10)$$

$$\lambda_0 = \begin{cases} \pi \sqrt{\frac{420\xi_r + 550}{(1.02\xi_r + 1.14)f_{ck,r}}} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ \pi \sqrt{\frac{220\xi_r + 450}{(0.85\xi_r + 1.18)f_{ck,r}}} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.2.1-11)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{4l_0}{D} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ \frac{2\sqrt{3}l_0}{H} & (\text{矩形钢管再生混凝土绕强轴}) \\ \frac{2\sqrt{3}l_0}{B} & (\text{矩形钢管再生混凝土绕弱轴}) \end{cases} \quad (6.2.1-12)$$

式中：\$N\$ —— 轴向压力设计值（N）；

\$N_0\$ —— 钢管再生混凝土构件的截面受压承载力（N）；

\$N_u\$ —— 钢管再生混凝土构件的轴心受压承载力（N）；

\$A_{sc}\$ —— 钢管再生混凝土构件的截面面积（mm²）；

\$\xi_r\$ —— 约束效应系数，应按本规程式（3.3.4）计算；

\$\varphi\$ —— 轴心受压构件的稳定系数，应按式（6.2.1-4）计算，也可根据本规程附录 C 确定；

\$f_{sc,r}\$ —— 钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度设计值（N/mm²），应按本规程式（5.2.1-1）计算；

\$f_{ck,r}\$ —— 再生混凝土的轴心抗压强度标准值（N/mm²）；

\$f_y\$ —— 钢管钢材的屈服强度（N/mm²）；

\$l_0\$ —— 构件的计算长度（mm），应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定；

\$D\$ —— 圆形钢管再生混凝土的截面外直径（mm）；

\$B\$ —— 矩形钢管再生混凝土的截面宽度（mm）；

\$H\$ —— 矩形钢管再生混凝土的截面高度（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。

2 对长细比大于 40 的钢管再生混凝土构件，当永久荷载引起的轴向压力占全部轴向压力的 50%及以上时，应计入长期荷载对稳定承载力的影响，并应对钢管再生混凝土构件的轴心受压承载力乘以长期荷载影响系数，长期荷载影响系数可按下列公式计算：

$$k_{cr} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq 40) \\ 1 - k_1 k_2 k_3 & (\lambda > 40) \end{cases} \quad (6.2.1-13)$$

$$k_1 = 0.4 \left(\frac{\lambda}{100} \right)^{2.4} \quad (6.2.1-14)$$

$$k_2 = n_L^{2.5} \left(\alpha_s \cdot \frac{f_y}{235} \right)^{-\frac{\lambda}{100} + 0.55} \quad (6.2.1-15)$$

$$k_3 = r_c + 1.25 \quad (6.2.1-16)$$

$$n_L = \frac{N_l}{\varphi N_0} \quad (6.2.1-17)$$

式中： k_{cr} —— 长期荷载影响系数；

n_L —— 长期荷载比；

N_l —— 作用于钢管再生混凝土构件的长期轴向压力 (N)，应按准永久组合确定；

N_0 —— 钢管再生混凝土构件的截面受压承载力 (N)；

r_c —— 再生粗骨料取代率；

λ —— 构件长细比，应按式 (6.2.1-12) 计算。

6.2.2 钢管再生混凝土构件的轴心受拉承载力应符合式 (6.2.2-1) 的规定，且宜按式 (6.2.2-2) 计算：

$$N \leq N_t \quad (6.2.2-1)$$

$$N_t = \psi f A_s \quad (6.2.2-2)$$

式中： N —— 轴向拉力设计值 (N)；

N_t —— 钢管再生混凝土构件的截面受拉承载力 (N)；

ψ —— 受拉承载力计算系数，圆形钢管再生混凝土取 1.1，矩形钢管再生混凝土取 1.05；

f —— 钢管钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

A_s —— 钢管的截面面积 (mm²)。

6.2.3 圆形钢管再生混凝土桁式混合结构轴心受压承载力应符合式 (6.2.1-1) 的规定，结构的受压稳定系数宜按公式 (6.2.1-4) 计算，也可根据本规程附录 C 确定。结构的换算长细比应通过结构整体分析确定，轴心受压结构的换算长细比也可按现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定确定。

6.2.4 钢管再生混凝土桁式混合结构轴心受压时除按式 (6.2.1-1) 验算整体稳定性外，还应验算单根弦杆稳定承载力。当单根弦杆长细比满足下列条件时，可不验算单根弦杆稳定承载力：

$$\lambda_1 \leq 40 \text{ 及 } \lambda_1 \leq 0.5\lambda_{\max} \quad (\text{平腹杆}) \quad (6.2.4-1)$$

$$\lambda_1 \leq 0.7\lambda_{\max} \quad (\text{斜腹杆}) \quad (6.2.4-2)$$

式中： λ_1 —— 单根弦杆长细比；

$\lambda_{\max}$ —— 结构在 x - x 和 y - y 方向换算长细比的较大值。

6.2.5 平腹杆钢管再生混凝土桁式混合结构轴心受压时剪力由所有腹杆共同分担，并可按下式计算：

$$V = \frac{\sum A_{sc} \cdot f_{sc,r}}{85} \quad (6.2.5)$$

式中： V —— 腹杆剪力设计值之和 (N)；

$f_{sc,r}$ —— 钢管再生混凝土截面的轴心抗压强度设计值 (N/mm²)。

6.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算

6.3.1 钢管再生混凝土构件的受弯承载力应符合式 (6.3.1-1) 的规定，且宜按式 (6.3.1-2) 计算：

$$M \leq M_u \quad (6.3.1-1)$$

$$M_u = \gamma_m W_{sc} f_{sc,r} \quad (6.3.1-2)$$

$$\gamma_m = \begin{cases} 1.1 + 0.48 \ln(\xi_r + 0.1) & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 1.04 + 0.48 \ln(\xi_r + 0.1) & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.3.1-3)$$

$$W_{sc} = \begin{cases} \frac{\pi D^3}{32} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ \frac{BH^2}{6} & (\text{矩形钢管再生混凝土绕强轴弯曲}) \\ \frac{B^2 H}{6} & (\text{矩形钢管再生混凝土绕弱轴弯曲}) \end{cases} \quad (6.3.1-4)$$

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

M_u —— 钢管再生混凝土构件的受弯承载力 ($\text{N}\cdot\text{mm}$);

γ_m —— 截面抗弯塑性发展系数;

W_{sc} —— 钢管再生混凝土构件的截面抗弯模量 (mm^3)。

6.3.2 矩形钢管再生混凝土构件双向受弯时, 承载力应满足下式要求:

$$\left(\frac{M_x}{M_{ux}} \right)^{1.8} + \left(\frac{M_y}{M_{uy}} \right)^{1.8} \leq 1 \quad (6.3.2)$$

式中: M_x 、 M_y —— 绕强轴和弱轴的弯矩设计值 ($\text{N}\cdot\text{mm}$);

M_{ux} 、 M_{uy} —— 绕强轴和弱轴的受弯承载力 ($\text{N}\cdot\text{mm}$), 宜按式 (6.3.1-2) 计算。

6.3.3 钢管再生混凝土构件在一个平面内受压、弯荷载共同作用时, 承载力应符合下列规定:

1 截面承载力应符合下列规定:

1) 当 $\frac{N}{N_0} \geq 2\eta_0$ 时:

$$\frac{N}{N_0} + \frac{a\beta_m M}{M_u} \leq 1 \quad (6.3.3-1)$$

2) 当 $\frac{N}{N_0} < 2\eta_0$ 时:

$$\frac{-bN^2}{N_0^2} - \frac{cN}{N_0} + \frac{\beta_m M}{M_u} \leq 1 \quad (6.3.3-2)$$

$$a = 1 - 2\eta_0 \quad (6.3.3-3)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_0}{\eta_0^2} \quad (6.3.3-4)$$

$$c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0} \quad (6.3.3-5)$$

$$\zeta_0 = \begin{cases} 1 + 0.18 \xi_r^{-1.15} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 1 + 0.14 \xi_r^{-1.3} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.3.3-6)$$

$$\eta_0 = \begin{cases} 0.1 + 0.14 \xi_r^{-0.84} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 0.1 + 0.13 \xi_r^{-0.81} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.3.3-7)$$

2 稳定承载力应符合下列规定:

1) 当 $\frac{N}{N_0} \geq 2\varphi^3\eta_o$ 时:

$$\frac{N}{\varphi N_0} + \frac{a}{d} \cdot \frac{\beta_m M}{M_u} \leq 1 \quad (6.3.3-8)$$

2) 当 $\frac{N}{N_0} < 2\varphi^3\eta_o$ 时:

$$\frac{-bN^2}{N_0^2} - \frac{cN}{N_0} + \frac{1}{d} \cdot \frac{\beta_m M}{M_u} \leq 1 \quad (6.3.3-9)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2\eta_o \quad (6.3.3-10)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_o}{\varphi^3\eta_o^2} \quad (6.3.3-11)$$

$$c = \frac{2(\zeta_o - 1)}{\eta_o} \quad (6.3.3-12)$$

$$d = \begin{cases} 1 - 0.4 \frac{N}{N_E} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 1 - 0.25 \frac{N}{N_E} & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.3.3-13)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 (EA)_c}{\lambda^2} \quad (6.3.3-14)$$

式中: N —— 轴向压力设计值 (N);

N_E —— 欧拉临界力 (N);

β_m —— 等效弯矩系数, 按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定取值;

φ —— 弯矩作用平面内轴心受压构件的稳定系数, 应按式 (6.2.1-4) 计算, 也可根据本规程附录 C 确定。

6.3.4 矩形钢管再生混凝土构件受压、弯荷载共同作用且绕强轴弯曲时, 除应按式 (6.3.3-8)、式 (6.3.3-9) 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:

$$\frac{N}{\varphi N_0} + \frac{\beta_m M}{1.4 M_u} \leq 1 \quad (6.3.4)$$

式中: φ —— 弯矩作用平面外轴心受压构件的稳定系数, 应按式 (6.2.1-4) 计算, 也可根据本规程附录 C 确定。

6.3.5 钢管再生混凝土构件受拉、弯荷载共同作用时, 承载力应符合下列规定:

$$\frac{N}{\psi f A_s} + \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (6.3.5)$$

式中: M_u —— 构件的受弯承载力 (N·mm);

ψ —— 受拉承载力计算系数, 圆形钢管再生混凝土取 1.1, 矩形钢管再生混凝土取 1.05;

f —— 钢管钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²);

A_s —— 钢管的截面面积 (mm²)。

6.3.6 矩形钢管再生混凝土构件受双向压、弯荷载或双向拉、弯荷载共同作用时, 可将式 (6.3.3-1)

和式 (6.3.3-2) 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，绕强轴和弱轴的受弯承载力 (M_{ux} 和 M_{uy})，宜按式 (6.3.1-2) 计算。

6.3.7 钢管再生混凝土桁式混合结构受压、弯荷载共同作用时，弯矩作用平面内的整体稳定承载力应符合下列规定：

$$\frac{N}{\varphi N_0} + \frac{\beta_m M}{W_{sc}(1-\varphi N/N_E)f_{sc,r}} \leq 1 \quad (6.3.7)$$

式中： φ —— 按换算长细比确定的验算平面内的轴心受压构件稳定系数，应按式 (6.2.1-4) 计算，也可根据本规程附录 C 确定；

N_E —— 欧拉临界力 (N)，应按式 (6.3.3-14) 计算。

1 对平腹杆钢管再生混凝土桁式混合结构的单根弦杆，应计入由剪力引起的局部弯矩影响，可按偏压构件计算；

2 腹杆所受剪力应取实际剪力和按式 (6.2.5) 计算剪力中的较大值。

6.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算

6.4.1 钢管再生混凝土构件的受剪承载力应满足式 (6.4.1-1) 的规定，且宜按式 (6.4.1-2) 计算：

$$V \leq V_u \quad (6.4.1-1)$$

$$V_u = \gamma_v A_{sc} f_{sv,r} \quad (6.4.1-2)$$

$$\gamma_v = \begin{cases} 0.97 + 0.2 \ln \xi_r & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 0.954 + 0.162 \ln \xi_r & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.4.1-3)$$

式中：V —— 剪力设计值 (N)；

V_u —— 钢管再生混凝土构件的受剪承载力 (N)；

γ_v —— 受剪承载力计算系数；

A_{sc} —— 钢管再生混凝土构件的截面面积 (mm^2)；

$f_{sv,r}$ —— 钢管再生混凝土截面的抗剪强度设计值 (N/mm^2)。

6.4.2 钢管再生混凝土构件的受扭承载力应符合式 (6.4.2-1) 的规定，且宜按式 (6.4.2-2) 计算：

$$T \leq T_u \quad (6.4.2-1)$$

$$T_u = \gamma_t W_{sc,t} f_{sv,r} \quad (6.4.2-2)$$

$$\gamma_t = \begin{cases} 1.294 + 0.267 \ln \xi_r & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 1.431 + 0.242 \ln \xi_r & (\text{方形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.4.2-3)$$

$$W_{sc,t} = \begin{cases} \frac{\pi D^3}{16} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 0.208 B^3 & (\text{方形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (6.4.2-4)$$

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

T_u —— 钢管再生混凝土构件的受扭承载力 ($\text{N}\cdot\text{mm}$)；

γ_t —— 受扭承载力计算系数；

$W_{sc,t}$ —— 钢管再生混凝土构件的截面扭转抵抗矩 (mm^3)。

6.4.3 钢管再生混凝土构件受压、扭荷载共同作用时，承载力应符合下列规定：

1 截面承载力应满足下式要求:

$$\left(\frac{N}{N_0}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (6.4.3-1)$$

式中: N_0 —— 钢管再生混凝土截面的受压承载力 (N), 应按式 (6.2.1-3) 计算。

2 稳定承载力应满足下式要求:

$$\left(\frac{N}{\varphi N_0}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (6.4.3-2)$$

式中: φ —— 钢管再生混凝土轴心受压构件的稳定系数, 应按式 (6.2.1-4) 计算, 也可根据本规程附录 C 确定。

6.4.4 钢管再生混凝土构件受压、弯、扭荷载共同作用时, 承载力应符合下列规定:

1 当 $N/N_0 \geq 2\varphi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_u}\right)^2\right]^{0.417}$ 时:

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_0} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (6.4.4-1)$$

2 当 $N/N_0 < 2\varphi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_u}\right)^2\right]^{0.417}$ 时:

$$\left[-b\left(\frac{N}{N_0}\right)^2 - c\left(\frac{N}{N_0}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 \leq 1 \quad (6.4.4-2)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2\eta_0 \quad (6.4.4-3)$$

$$b = \frac{1 - \zeta_e}{\varphi^3\eta_e^2} \quad (6.4.4-4)$$

$$c = \frac{2(\zeta_e - 1)}{\eta_e} \quad (6.4.4-5)$$

$$d = \begin{cases} 1 - 0.4 \frac{N}{N_E} & \text{(圆形钢管再生混凝土)} \\ 1 - 0.25 \frac{N}{N_E} & \text{(矩形钢管再生混凝土)} \end{cases} \quad (6.4.4-6)$$

$$\eta_e = \eta_0 (1 - \beta^2)^{0.417} \quad (6.4.4-7)$$

$$\zeta_e = \zeta_0 (1 - \beta^2)^{0.417} \quad (6.4.4-8)$$

$$\beta = \frac{T}{T_u} \quad (6.4.4-9)$$

式中: N_E —— 欧拉临界力 (N), 应按式 (6.3.3-14) 计算;

ζ_0 —— 系数, 应按式 (6.3.3-6) 计算;

η_0 —— 系数, 应按式 (6.3.3-7) 计算。

6.4.5 钢管再生混凝土构件受压、弯、剪荷载共同作用时, 承载力应符合下列规定:

1 当 $N/N_0 \geq 2\varphi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{V}{V_u}\right)^2\right]^{0.417}$ 时:

$$\left(\frac{1}{\phi} \cdot \frac{N}{N_0} + \frac{a}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^2 \leq 1 \quad (6.4.5-1)$$

2 当 $N/N_0 < 2\phi^3\eta_0 \left[1 - \left(\frac{V}{V_u}\right)^2\right]^{0.417}$ 时, 应满足下式要求:

$$\left[-b\left(\frac{N}{N_0}\right)^2 - c\left(\frac{N}{N_0}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^2 \leq 1 \quad (6.4.5-2)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d ——系数, 按第 6.4.4 条的规定确定。

6.5 局部受压构件承载力计算

6.5.1 带端板钢管再生混凝土构件的轴向局部受压承载力应符合式 (6.5.1-1) 的规定, 并直接式 (6.5.1-2) 计算:

$$N_L \leq N_{uL} \quad (6.5.1-1)$$

$$N_{uL} = K_{LC} N_0 \quad (6.5.1-2)$$

式中: N_L —— 钢管再生混凝土轴心受压构件所受局部压力 (N);

N_{uL} —— 钢管再生混凝土轴心受压构件的轴向局部受压承载力 (N);

N_0 —— 钢管再生混凝土轴心受压构件的截面承载力 (N), 应按式 (6.2.1-3) 计算;

K_{LC} —— 钢管再生混凝土局压承载力折减系数, 应按第 6.5.3、6.5.4 条计算。

6.5.2 钢管再生混凝土构件承受轴向局部压力作用时, 局压面积比可按式计算:

$$\beta = \frac{A_c}{A_{lc}} \quad (6.5.2)$$

式中: A_c —— 钢管内再生混凝土的截面面积 (mm^2);

A_{lc} —— 轴向局部受压面积 (mm^2)。

6.5.3 带端板圆形钢管再生混凝土构件的局压承载力折减系数应按下列公式计算:

$$K_{LC} = (A_0\beta + B_0\beta^{0.5} + C_0)(D_0R_e^2 + E_0R_e + 1) \leq 1 \quad (6.5.3-1)$$

$$R_e = 1.1 \left(\frac{E_s t_a^3}{E_{sc} D^3} \right)^{0.25} \quad (6.5.3-2)$$

$$E_{sc} = \frac{(EA)_c}{A_{sc}} \quad (6.5.3-3)$$

式中: K_{LC} —— 局压承载力折减系数;

R_e —— 相对刚度半径;

E_s —— 端板的弹性模量 (N/mm^2);

E_{sc} —— 钢管再生混凝土截面的弹性模量 (N/mm^2);

$(EA)_c$ —— 钢管再生混凝土截面的弹性抗压刚度 (N), 应按本规程式 (5.2.2) 计算;

A_{sc} —— 钢管再生混凝土的截面面积 (mm^2);

D —— 圆形钢管再生混凝土的截面外直径 (mm);

t_a —— 端板厚度 (mm);

A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 —— 计算系数, 分别按表 6.5.3-1、表 6.5.3-2 取值。

表 6.5.3-1 系数 A_0 、 B_0 、 C_0 值

ζ_r		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
系数	A_0	0.040	0.019	0.004	-0.004	-0.009	-0.010	-0.010	-0.008
	B_0	-0.411	-0.275	-0.187	-0.140	-0.122	-0.124	-0.134	-0.144
	C_0	1.360	1.257	1.192	1.159	1.147	1.150	1.159	1.166

注: 表内中间值按线性内插法确定。

表 6.5.3-2 系数 D_0 、 E_0 值

β		2	4	6	8	10	12	14	16
系数	D_0	-0.314	-0.641	-0.895	-1.110	-1.301	-1.474	-1.635	-1.785
	E_0	0.327	0.810	1.209	1.564	1.891	2.198	2.490	2.770

注: 表内中间值按线性内插法确定。

6.5.4 带端板矩形钢管再生混凝土构件的局压承载力折减系数应按下式计算:

$$K_{LC} = (A_0 \beta^{-1} + B_0 \beta^{-0.5} + C_0) \cdot (D_0 R_e + 1) \leq 1 \quad (6.5.4)$$

式中: A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 ——系数, 分别按表 6.5.4-1、6.5.4-2 取值。

表 6.5.4-1 系数 A_0 、 B_0 、 C_0 值

ζ_r		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
系数	A_0	0.440	0.617	0.795	0.972	1.149	1.326	1.504	1.681
	B_0	0.543	0.340	0.137	-0.067	-0.270	-0.473	-0.676	-0.879
	C_0	0.017	0.043	0.069	0.095	0.121	0.147	0.173	0.199

注: 表内中间值按线性内插法确定。

表 6.5.4-2 系数 D_0 值

β		2	4	6	8	10	12	14	16
系数	D_0	0.928	1.533	1.997	2.388	2.732	3.044	3.330	3.597

注: 表内中间值按线性内插法确定。

7 构造设计

7.0.1 偏心受压的钢管再生混凝土桁式混合结构宜采用斜腹杆形式；当弦杆间距较小或有使用要求时，也可采用平腹杆形式。可不计算弦杆在腹杆连接处的受压承载力，弦杆与腹杆连接构造、焊缝计算及弦杆与腹杆在连接处的受拉承载力计算应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定，并应符合下列规定：

1 斜腹杆钢管再生混凝土桁式混合结构（图 7.0.1）应符合下列规定：

- 1) 斜腹杆与弦杆轴线间夹角宜取 $40^\circ \sim 60^\circ$ ；
- 2) 杆件轴线宜交于节点中心；腹杆轴线交点与弦杆轴线的距离不宜大于 $D/4$ 或 $H/4$ ($B/4$)，当大于 $D/4$ 或 $H/4$ ($B/4$) 时，应计入杆件偏心影响；
- 3) 腹杆端部净距不宜小于 50mm，且不应小于两腹杆壁厚之和。

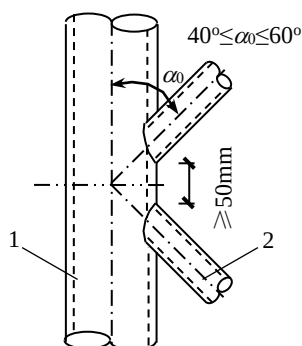


图 7.0.1 斜腹杆节点示意图

1—弦杆；2—斜腹杆

2 平腹杆钢管再生混凝土桁式混合结构应符合下列规定：

- 1) 腹杆中心距离不应大于弦杆中心距的 4 倍；
- 2) 腹杆空钢管截面面积不宜小于一个弦杆钢管截面面积的 1/4；
- 3) 腹杆的长细比不宜大于单个弦杆长细比的 1/2。

3 腹杆应采用空钢管。

4 腹杆和弦杆应直接焊接，弦杆钢管上不应开孔。

7.0.2 对三肢和四肢钢管再生混凝土桁式混合结构，在承受较大水平力处和运送单元的端部应设置横隔，横隔的间距不应大于柱截面较大宽度的 9 倍和 8m 的较大值。

7.0.3 在桁架和网架中，受压弦杆可采用钢管再生混凝土杆件，其他杆件可采用空钢管。杆件之间可采用直接焊接连接或节点板、球节点连接。

7.0.4 在钢管再生混凝土的管壁上可加焊支、吊架等配件。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钢管再生混凝土构件连接，并应对管壁强度进行验算。

7.0.5 当采用钢筋混凝土剪力墙和钢管再生混凝土边框柱时，混凝土剪力墙与钢管再生混凝土框架的连接构造应保证强度连接可靠，变形协调一致。

7.0.6 矩形钢管再生混凝土截面的宽厚比或高厚比应符合现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的相关规定；当不满足限值要求时，可通过在钢管内壁焊接纵向加劲肋来增强钢管稳定性（图 7.0.6），每边的加劲肋数可为一道或多道，并应对施工阶段矩形钢管壁的面外变形值进行验算。当设置加劲肋时，应符合下列规定：

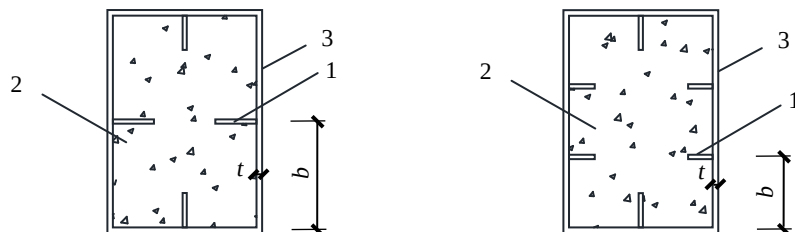


图 7.0.6 提高钢管稳定性的构造措施示意图

1—纵向加劲肋；2—核心再生混凝土；3—矩形钢管

- 1 设置加劲肋后的肋间子板件的宽厚比 $\frac{b}{t}$ 应满足下式要求：

$$\frac{b}{t} \leq 40 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (7.0.6-1)$$

- 2 加劲肋的刚度 $I_{s,s}$ 应满足下式要求：

$$I_{s,s} \geq 3.1 \times 10^{-4} \left(\frac{b}{t} \right)^{3.5} \cdot \frac{f_y}{280} t^4 \quad (7.0.6-2)$$

7.0.7 钢管再生混凝土斜柱和变截面柱对接时，宜在对接钢管柱之间设置连接钢管（图 7.0.7-1 和图 7.0.7-2），变径段的斜度不宜大于 1:6，连接钢管的上下两端均宜设置环形隔板，环形隔板内直径为外直径或外边长的 40%~70%。

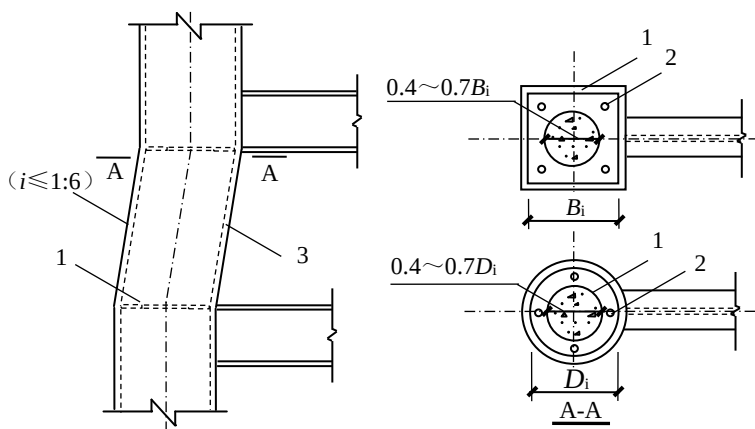


图 7.0.7-1 钢管再生混凝土斜柱连接构造示意图

1—内隔板；2—排气孔；3—连接钢管； i —斜度； D_i —环形隔板外直径； B_i —环形隔板外边长

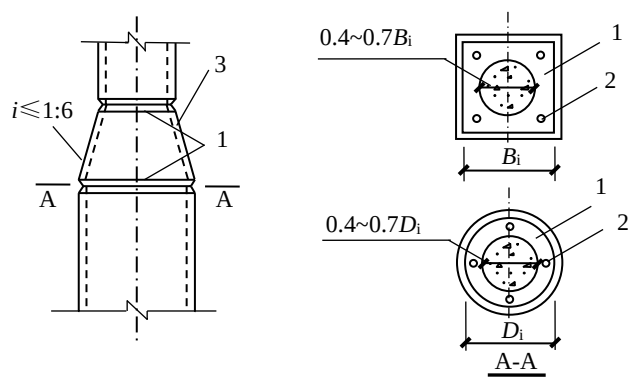


图 7.0.7-2 钢管再生混凝土变截面柱连接构造示意图

1—内隔板；2—排气孔；3—连接钢管； i —斜度； D_i —环形隔板外直径； B_i —环形隔板外边长

8 节点设计

8.1 一般规定

8.1.1 钢管再生混凝土结构节点和连接的设计应满足强度、刚度、稳定性和抗震的要求；节点和连接的设计应保证力的传递、钢管和管内再生混凝土共同工作，并应便于制作、安装和管内再生混凝土的施工。

8.1.2 钢管再生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。

8.1.3 当进行钢管与再生混凝土界面粘结锚固相关计算时，钢管与再生混凝土之间的粘结强度设计值(f_b)，对于圆形钢管再生混凝土可取 0.225N/mm^2 ，对于矩形钢管再生混凝土可取 0.150N/mm^2 。

8.2 梁柱节点

8.2.1 框架结构的梁柱刚接节点，宜采用外加强环节点形式。当钢管直径较大时，也可采用内加强环节点形式，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 8.2.1-1），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；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 8.2.1-2），钢管壁应和环板焊接。钢梁腹板与牛腿腹板宜采用摩擦型高强螺栓连接或焊接（图 8.2.1-3）。节点计算应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定；

2 现浇钢筋混凝土梁与柱的连接可采用连续双梁节点（图 8.2.1-4a），也可采用梁端局部加宽、纵向钢筋连续绕过钢管的构造（图 8.2.1-4b）。梁端加宽的斜度不应大于 $1/6$ 。在梁端变宽度的起始位置应设置附加箍筋。现浇钢筋混凝土梁与柱的连接还可采用承重销式节点（图 8.2.1-5），在柱外侧可设置承重销，钢筋混凝土梁的受力主筋可焊接于承重销的翼缘上，梁端箍筋应沿承重销全长范围布置；

3 钢管再生混凝土桁式混合结构柱的刚性节点应采取保证节点的整体刚度的措施。二肢结构的节点处，应在两侧加焊贴板封闭（图 8.2.1-6），贴板的稳定性应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 进行验算。

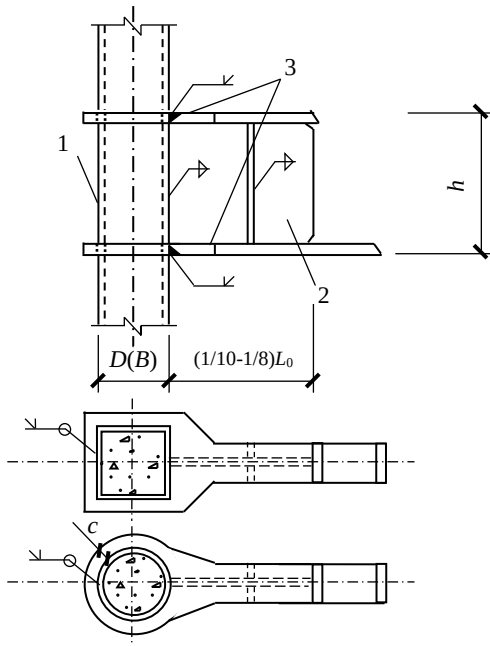


图 8.2.1-1 外加强环板式节点示意图

1—柱肢；2—梁端；3—上、下加强环

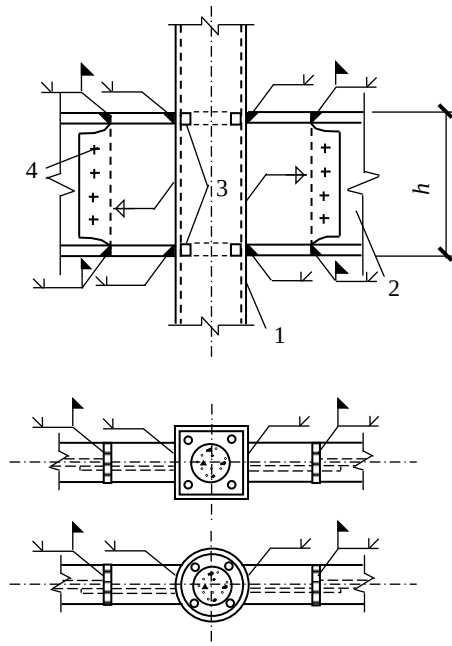
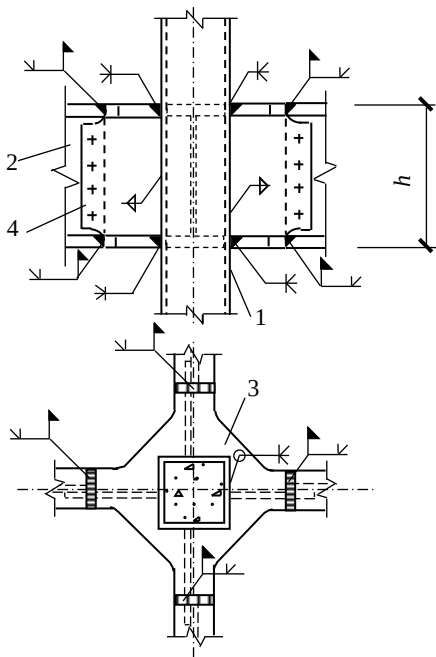
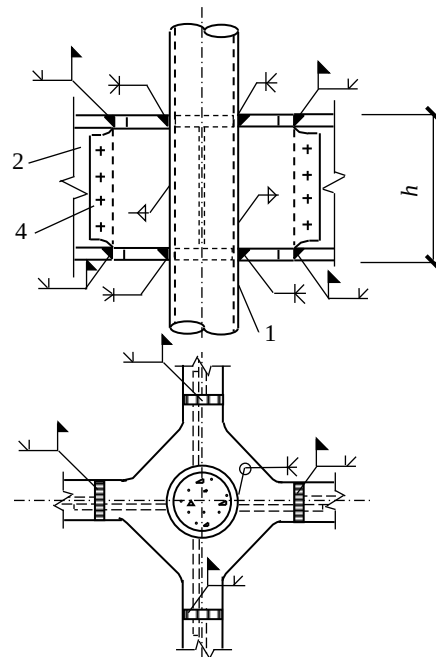


图 8.2.1-2 内加强环板式节点示意图

1—柱肢；2—梁端；3—内加强环；4—高强螺栓



(a) 矩形钢管再生混凝土柱肢



(b) 圆形钢管再生混凝土柱肢

图 8.2.1-3 高强螺栓连接节点示意图

1—柱肢；2—梁端；3—上、下加强环；4—高强螺栓

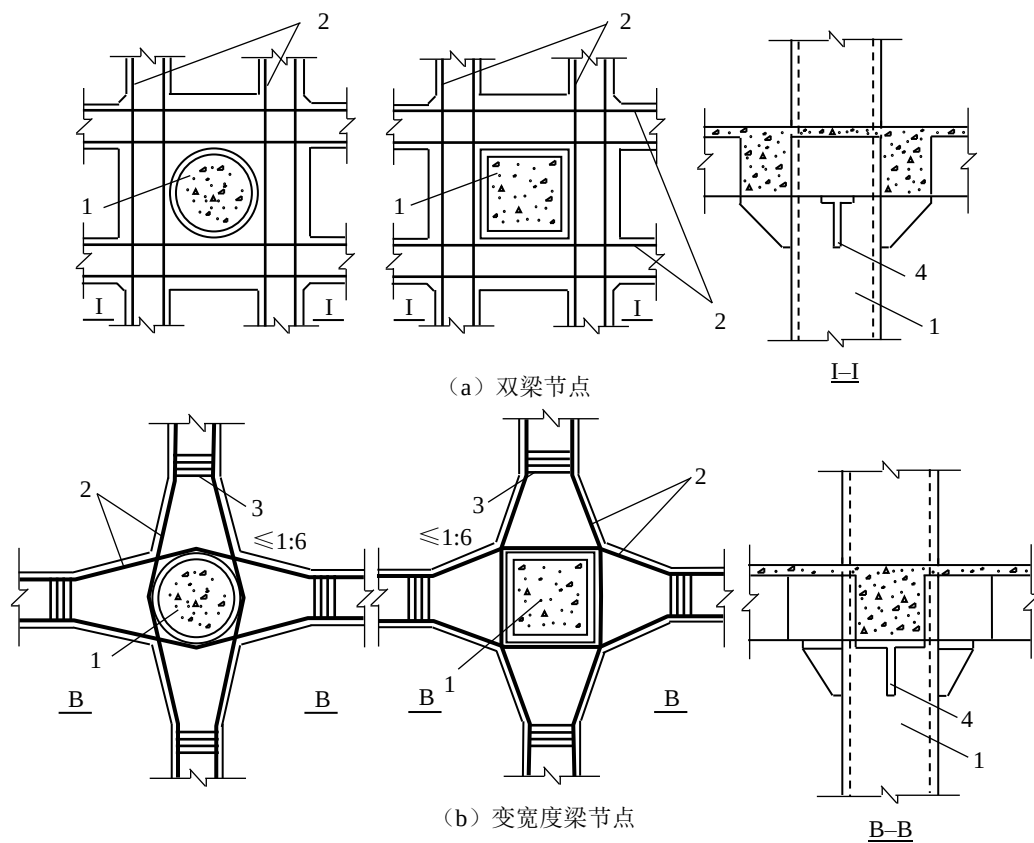


图 8.2.1-4 现浇钢筋混凝土梁节点示意图

1—柱肢；2—钢筋；3—箍筋；4—明牛腿

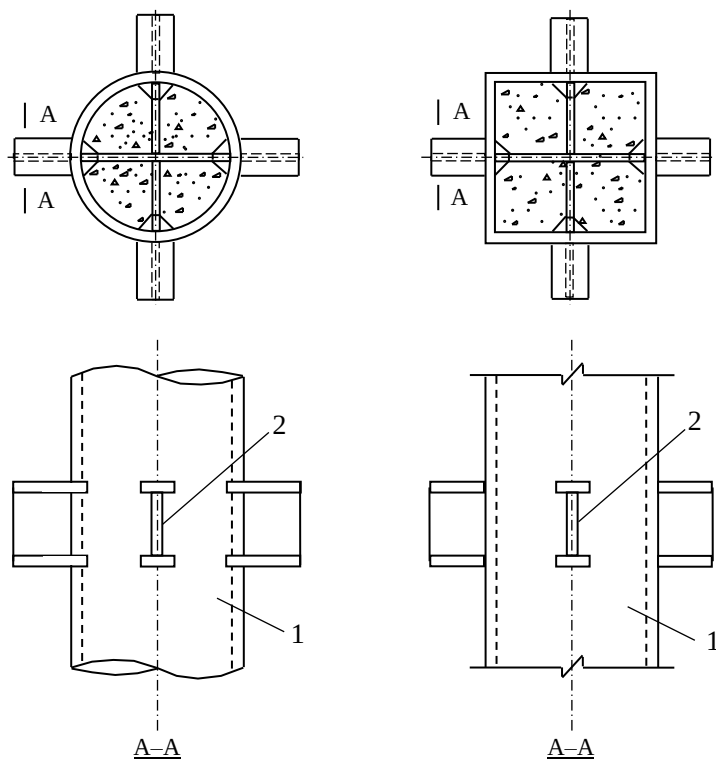


图 8.2.1-5 承重销刚接节点示意图

1—柱肢；2—承重销

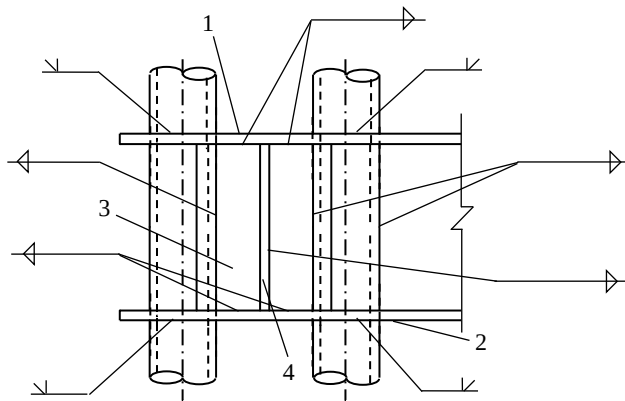


图 8.2.1-6 二肢结构节点示意图

1— 上加强环；2— 下加强环；3— 贴板；4— 中间加劲肋

8.2.2 钢管再生混凝土柱与钢梁半刚性连接可采用单边高强螺栓连接节点，且宜符合下列规定：

- 1 单边高强螺栓连接节点宜采用外伸端板连接，如图 8.2.2 所示；
- 2 单边高强螺栓宜采用对称布置形式，其中单边螺栓的规格和布置应符合现行行业标准《矩形钢管构件自锁式单向高强螺栓连接设计标准》T/CECS 605 的有关规定；
- 3 采用矩形钢管再生混凝土柱与钢梁单边高强螺栓连接节点时，节点设计可采用矩形钢管柱与钢梁半刚性连接节点的设计方法，应按照现行行业标准《矩形钢管构件自锁式单向高强螺栓连接设计标准》T/CECS 605 中的有关规定进行设计；
- 4 采用圆形钢管再生混凝土柱与钢梁单边高强螺栓连接节点时，可将圆弧形柱壁和端板等效展开为平面，再按照矩形钢管再生混凝土柱与钢梁单边高强螺栓连接节点进行设计。

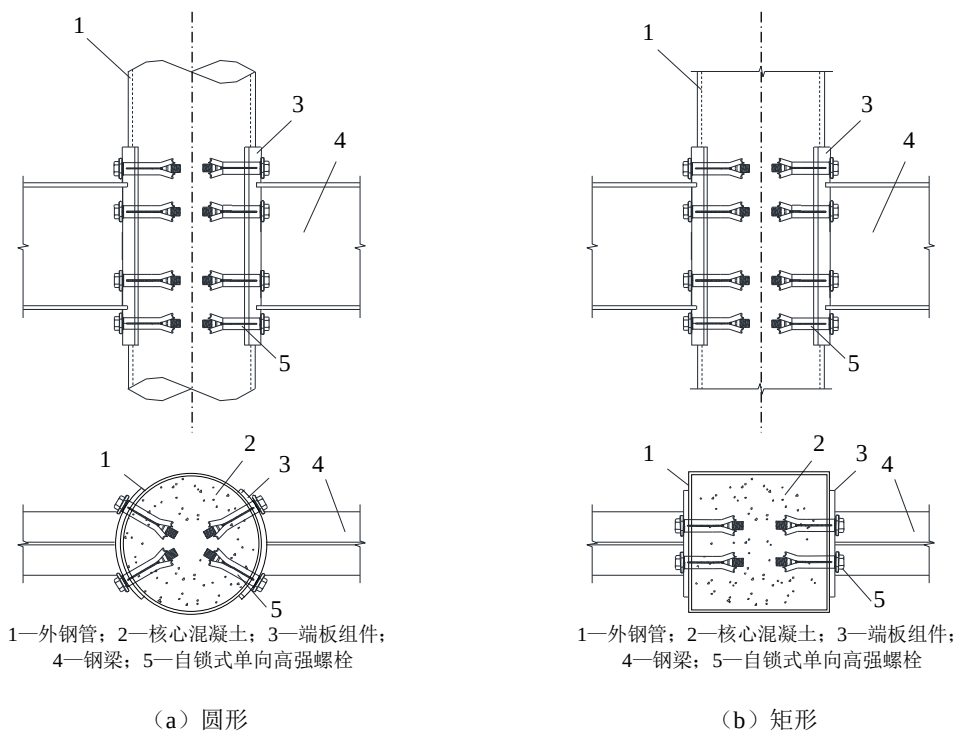


图8.2.2 单边高强螺栓连接节点示意图

8.2.3 排架结构的梁柱铰接节点，应能传递剪力和轴向力。铰接节点可采用明牛腿形式（图 8.2.3-1）或节点板形式（图 8.2.3-2）。采用明牛腿节点时，牛腿和钢管壁应焊接；采用板式铰节点时，节点板、加劲板和钢管壁应焊接。明牛腿节点可用于排架梁柱连接，板式节点可用于柱间支撑连接。节点计算可按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。柱间支撑钢管也可采用与柱肢直接焊接的连接形式。

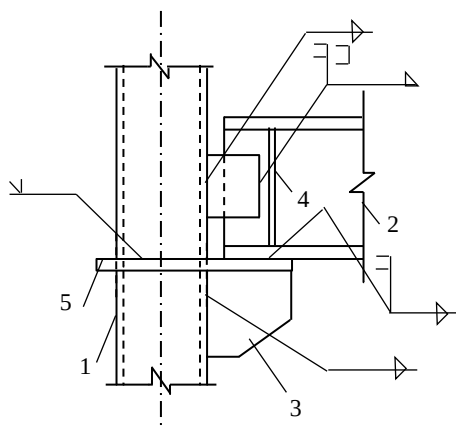


图 8.2.3-1 明牛腿铰接节点示意图

1—柱肢；2—钢梁；3—牛腿；4—加劲肋；5—环板

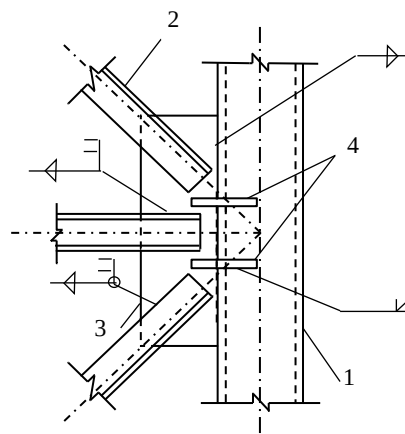


图 8.2.3-2 板式铰接节点示意图

1—柱肢；2—型钢支撑；3—节点板；4—加劲板

8.2.4 承受吊车梁支座压力的肩梁不宜插入柱肢上端，可与钢管以角焊缝连接，角焊缝应能承受支座压力，并应满足下式要求：

$$N \leq 0.7h_t f_t^w \sum l_j \quad (8.2.4)$$

式中： h_t —— 角焊缝焊脚高度（mm）；

$\sum l_j$ —— 角焊缝总计算长度（mm）；

f_t^w —— 角焊缝抗剪强度设计值（N/mm²）。

8.2.5 由柱顶承受集中荷载的柱，应加厚柱顶板、增设肩梁和加劲肋，并应在柱头盖板留设注浆孔进行压浆，管中混凝土与柱顶板应紧密接触。柱顶直接承受压力的钢管再生混凝土柱，柱顶板厚度不宜小于 16mm，并应设置肩梁板和加劲肋（图 8.2.5-1），顶板应设置压浆孔（图 8.2.5-2），压浆孔直径宜为 50mm。柱顶荷载宜作用于截面形心处。肩梁、隔板焊缝可按式（8.2.4）计算。

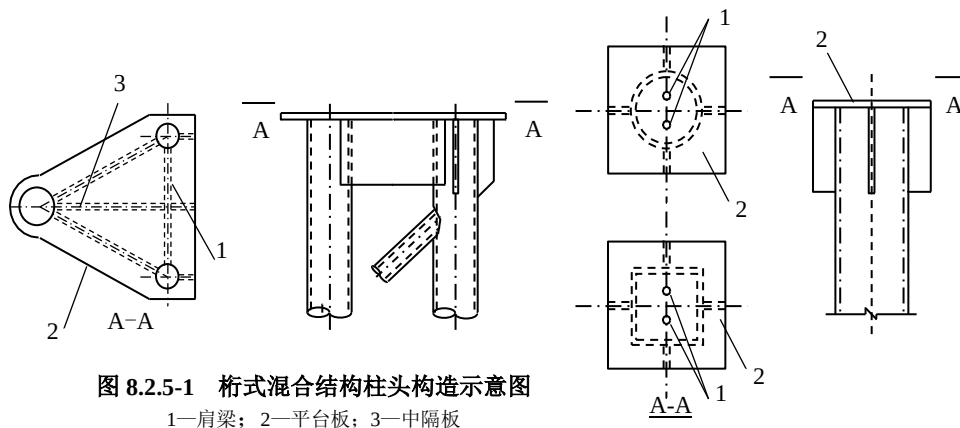


图 8.2.5-1 桁式混合结构柱头构造示意图
1—肩梁；2—平台板；3—中隔板

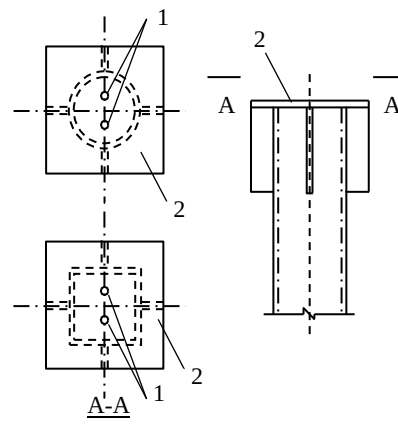


图 8.2.5-2 单肢柱柱头构造示意图
1— $\Phi 50$ 二次压浆孔；2—平台板

8.2.6 加强环板的设计计算，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。圆形钢管再生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 8.2.6-1），矩形钢管再生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 8.2.6-2），加强环板的几何尺寸与构造要求应符合下列规定：

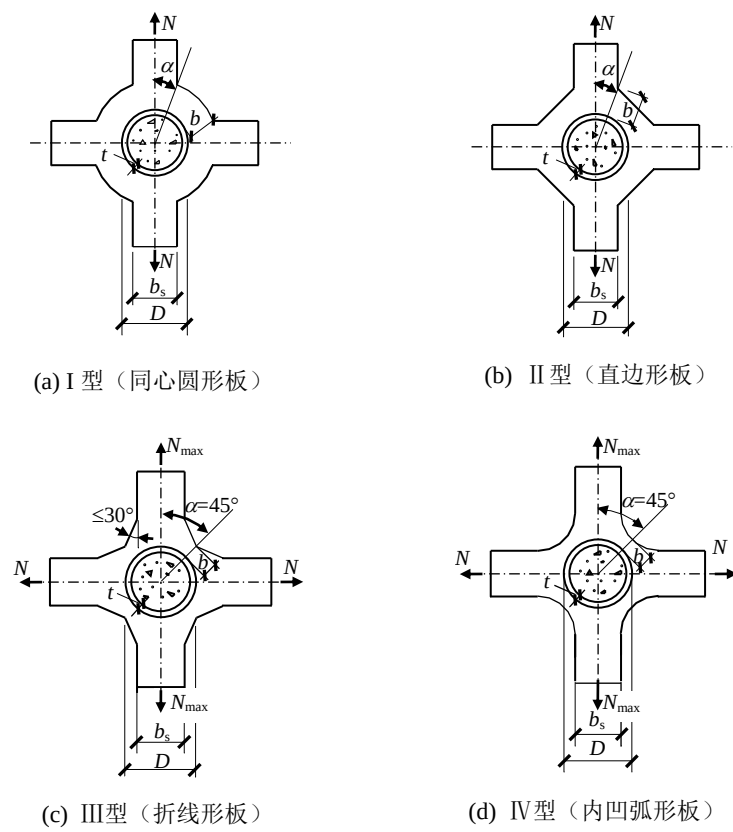


图 8.2.6-1 圆形钢管再生混凝土加强环板类型示意图

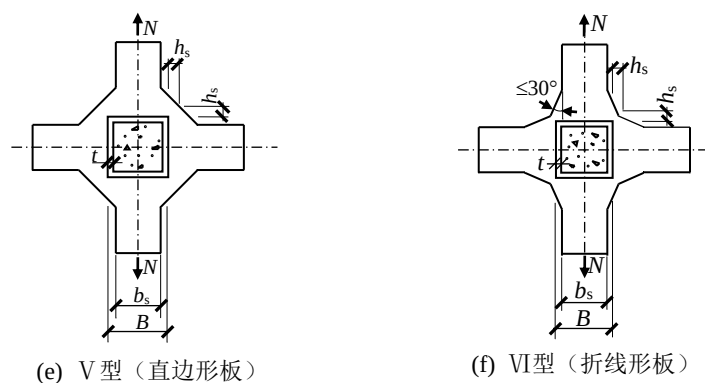


图 8.2.6-2 矩形钢管再生混凝土加强环板的类型示意图

1 加强环板在梁方向受拉力作用时，拉力 N 可按下式计算：

$$N = \frac{M}{h} + \frac{N_b}{2} \quad (8.2.6-1)$$

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

N_b —— 梁轴向力 (N)；

h —— 梁端截面高度 (mm)。

2 加强环板宽度 b_s 和厚度 t_1 的计算应符合下列规定：

1) 连接普通混凝土梁的上环板宽度 b_s 宜比梁宽小 20mm~40mm；下环板宽宜比梁宽大 20mm~40mm；连接钢梁的环板宽度 b_s 宜与梁翼缘等宽。

2) 连接普通混凝土梁的钢板厚度 t_1 可按下式计算，并应验算焊缝强度：

$$t_1 = \frac{A_f f_s}{b_s f_1} \quad (8.2.6-2)$$

式中： A_f —— 梁端全部负弯矩钢筋面积 (mm^2)；

f_s —— 梁端负弯矩钢筋抗拉强度设计值 (N/mm^2)；

f_1 —— 加强环板钢材抗拉强度设计值 (N/mm^2)。

3 加强环板控制截面宽度 b 的计算应符合下列规定：

1) I 型和 II 型加强环板，可按下列公式计算：

$$b \geq F_1(\alpha) \frac{N}{t_1 f_1} - F_2(\alpha) b_e \frac{t f}{t_1 f_1} \quad (8.2.6-3)$$

$$F_1(\alpha) = \frac{0.93}{\sqrt{2 \sin^2 \alpha + 1}} \quad (8.2.6-4)$$

$$F_2(\alpha) = \frac{1.74 \sin \alpha}{\sqrt{2 \sin^2 \alpha + 1}} \quad (8.2.6-5)$$

$$b_e = \left(0.63 + 0.88 \frac{b_s}{d} \right) \sqrt{dt} + t_1 \quad (8.2.6-6)$$

式中： α —— 拉力 N 作用方向与计算截面的夹角 ($^\circ$)；

b_e —— 柱肢管壁参与加强环工作的有效宽度 (mm) (图 8.2.6-3)；

t —— 柱肢管壁厚度 (mm)；

f —— 柱肢钢材强度设计值 (N/mm²)。

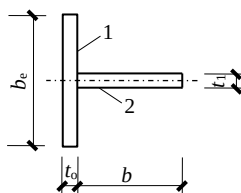


图 8.2.6-3 圆形柱管壁的有效宽度示意图

1—管壁；2—加强环板

2) III型和IV型加强环板，可按下列公式计算：

$$b \geq (1.44 + \beta) \frac{0.392 N_{x,\max}}{t_1 f_1} - 0.864 b_e \frac{t f}{t_1 f_1} \quad (8.2.6-7)$$

$$\beta = \frac{N_y}{N_{x,\max}} \leq 1 \quad (8.2.6-8)$$

式中： β —— 加强环同时受垂直双向拉力的比值，当加强环单向受拉时， $\beta = 0$ ；

$N_{x,\max}$ —— x 方向由最不利效应组合产生的最大拉力 (N)；

N_y —— y 方向与 $N_{x,\max}$ 同时作用的拉力 (N)。

3) V 型加强环板， h_s (图 8.2.6-2) 的选择应满足下式要求：

$$\frac{4}{\sqrt{3}} h_s t_1 f_1 + 2 t f (4 t + t_1) \geq N \quad (8.2.6-9)$$

4) VI型加强环板， h_s (图 8.2.6-2) 除应满足式 (8.2.6-9) 外，还应满足下式要求：

$$2.62 d^2 \left(\frac{t}{d} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{t_1}{t + h_s} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{t + h_s}{d} \right) \cdot \frac{f_1}{0.58} \geq N \quad (8.2.6-10)$$

4 加强环板的构造要求应符合下列规定：

1) 加强环板宽度 b_s 与圆形钢管再生混凝土的截面外直径 D 或矩形钢管再生混凝土的截面高度 H 之比应满足下式要求：

$$0.25 \leq b_s / D \leq 0.75 \quad (8.2.6-11)$$

$$0.25 \leq b_s / H \leq 0.75 \quad (8.2.6-12)$$

2) 对于圆形钢管再生混凝土，加强环板控制截面宽度 b 与截面外直径 D 及加强环板厚度 t_1 之比应满足下列公式要求：

$$0.10 \leq b / D \leq 0.35 \quad (8.2.6-13)$$

$$b / t_1 \leq 10 \quad (8.2.6-14)$$

3) 对于矩形钢管再生混凝土， h_s (图 8.2.6-2) 与截面高度 (H) 之比应满足下式要求：

$$h_s / H \geq \begin{cases} 0.15 t_b / t_1 & (\text{V型加强环板}) \\ 0.1 t_b / t_1 & (\text{VI型加强环板}) \end{cases} \quad (8.2.6-14)$$

式中： t_b —— 与环板连接的钢梁翼缘厚度。

4) 节点部分柱段长度应由上下加强环板算起各不小于柱肢的直径或柱截面最小边长。

8.2.7 圆形钢管再生混凝土柱-钢梁外加强环板连接节点的受剪承载力应按下式计算：

1 当 $n_p \leq 0.5$ 时：

$$V_u = \left[(1 + 0.1n_p)(0.11\xi_{p,o} + 0.20)f_{c,r}A_{c,p} + \frac{1.26f_{A_{v,p}}}{\sqrt{3}} \right] \cdot (1.1 - 0.1\text{tg}\theta_p) \quad (8.2.7-1)$$

2 当 $n_p > 0.5$ 时：

$$V_u = \left[(1 + 0.1n_p)(0.11\xi_{p,o} + 0.20)f_{c,r}A_{c,p} + (1.167 - 0.333n_p)\frac{1.26f_{A_{v,p}}}{\sqrt{3}} \right] \cdot (1.1 - 0.1\text{tg}\theta_p) \quad (8.2.7-2)$$

$$n_p = \frac{N}{N_{u,p}} \quad (8.2.7-3)$$

$$N_{u,p} = (1.14 + 1.02\xi_{p,o})f_{c,r}A_{s,c,p} \quad (8.2.7-4)$$

$$A_{v,p} = \frac{2A_{s,p}}{\pi} \quad (8.2.7-5)$$

式中： V_u —— 受剪承载力 (N)；

$f_{c,r}$ —— 核心区再生混凝土抗压强度设计值 (N/mm²)；

$A_{c,p}$ —— 核心区再生混凝土的截面面积 (mm²)；

f —— 核心区钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²)；

$A_{v,p}$ —— 钢管剪切面积 (mm²)；

$A_{s,p}$ —— 钢管的截面面积 (mm²)；

$\xi_{p,o}$ —— 核心区以材料设计值计算的约束效应系数；

n_p —— 核心区轴压比；

θ_p —— 核心区对角线和水平线的夹角；

N —— 钢管再生混凝土柱轴向压力设计值 (N)；

$N_{u,p}$ —— 核心区钢管再生混凝土柱截面承载力 (N)；

$A_{s,c,p}$ —— 核心区钢管再生混凝土构件的截面面积 (mm²)。

8.2.8 框架节点的抗震设计应符合下列规定：

1 采用混凝土梁节点时，梁端设计应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定；

2 加强环板的抗震验算应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定；

3 加强环板的外形应曲线光滑，无裂纹、刻痕；

4 节点管段与柱管间的焊缝应采用全熔透对接焊缝，焊缝质量等级应为二级；

5 加强环板与钢梁翼缘的的焊缝应采用全熔透对接焊缝，焊缝质量等级应为二级；

6 可能产生塑性铰的最大应力区内不宜布置焊接缝。

8.3 桁式混合结构节点

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

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

8.3.3 钢管再生混凝土桁式混合结构的节点应符合现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 的有关规定。

8.3.4 钢管再生混凝土桁式混合结构 K 形节点在保证弦腹杆连接焊缝强度的同时，应通过合理的焊接顺序与退火手段消除焊接残余应力的影响，并加强对焊缝区域的防腐保护。

8.3.5 钢管再生混凝土桁式混合结构 K 形节点腹杆与弦杆直径比 β_w 不宜小于 0.3 或大于 0.7。

8.4 柱脚节点

8.4.1 钢管再生混凝土柱脚宜采用外包式柱脚和埋入式柱脚，也可采用外露式柱脚。

8.4.2 埋入式柱脚和外露式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。

8.4.3 钢管再生混凝土柱脚的受弯承载力应符合式 (8.4.3-1) 的规定，且宜按式 (8.4.3-2) 计算 (图 8.4.3)：

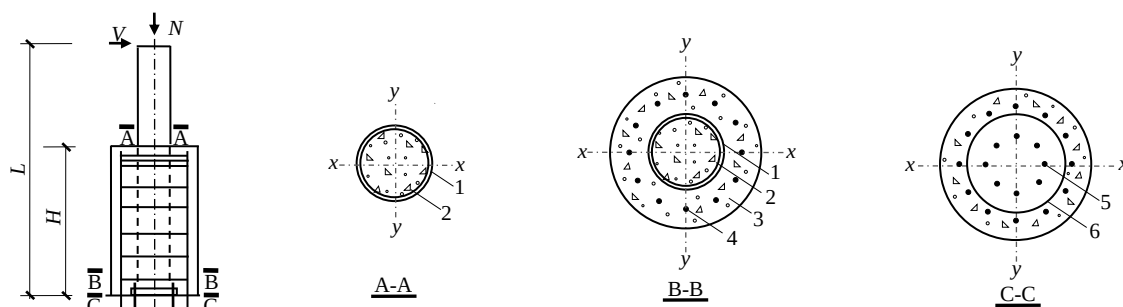


图 8.4.3 圆形外包式柱脚计算示意图

1—钢管；2—核心混凝土；3—外包混凝土；4—纵筋；5—锚栓；6—底板；N—轴向压力；V—剪力

$$M \leq M_u \quad (8.4.3-1)$$

$$M_u = \min \left\{ \frac{M_{uc}}{1 - H/L}, M_{uc} + M_{uen}, M_{upc} + M_{ur} \right\} \quad (8.4.3-2)$$

式中： M —— 弯矩设计值 (N·mm)；

M_u —— 柱脚的的受弯承载力 (N·mm)；

M_{uc} —— 柱截面的受弯承载力 (N·mm)，可按本规程 6.3.3 条规定计算；

M_{uen} —— 钢管外包钢筋混凝土的受弯承载力 ($N \cdot mm$), 可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算;

M_{upc} —— 底板锚栓连接部分的受弯承载力 ($N \cdot mm$), 可按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定计算;

M_{ur} —— 底板底截面上外包混凝土部分的受弯承载力 ($N \cdot mm$), 可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算;

H —— 外包混凝土高度 (mm);

L —— 水平荷载到基础顶面的距离 (mm)。

8.4.4 抗震设计时, 钢管再生混凝土柱脚与基础的连接极限承载力应符合下式规定:

$$M_u \geq \alpha M_{uc} \quad (8.4.4)$$

式中: α —— 连接系数, 可按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定取值。

8.4.5 外包式柱脚中外包混凝土厚度不宜小于 180mm, 同时不宜小于柱截面高度的 30%。外包式柱脚中外包混凝土的高度不宜小于 3 倍的柱截面宽度。

8.4.6 外包混凝土顶部应设置加密箍筋, 外包混凝土底部应设置箍筋加密区, 加密区的长度满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

8.4.7 底板锚栓连接部分应配置锚栓, 并满足柱脚抗弯的要求。在满足锚栓锚固的要求下, 外包式柱脚应尽可能减小底板外伸宽度, 宜设置加劲肋。当外包式柱脚在底板底截面上抗剪不足时, 应在底板底部设置抗剪件。

8.4.8 外包式柱脚应按照国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017、《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的相关规定在钢管外设置抗剪连接件。

9 防护设计

9.1 一般规定

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

- 1 防腐设计年限应根据建筑物的重要性、环境腐蚀条件、施工和维修条件等要求确定；
- 2 防腐设计应符合环保节能的要求；
- 3 除必须采取防腐蚀措施外，尚应避免加速腐蚀的不良设计；
- 4 防腐设计应便于结构全寿命期内的检查、维护和大修。

9.1.2 钢管再生混凝土结构防腐设计除应符合本规程的规定，尚应符合现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446、《钢结构设计标准》GB 50017、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的有关规定。

9.1.3 钢管再生混凝土结构的设计耐火极限应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 和《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 中的有关规定。

9.1.4 钢管再生混凝土结构遭受车辆、船只等撞击时，撞击荷载作用设计值可按现行行业标准《公路桥梁抗撞设计规范》JTG/T 3360-02 的有关规定执行。

9.2 防腐设计

9.2.1 在腐蚀环境中发生外钢管壁均匀腐蚀的钢管再生混凝土构件，腐蚀后的承载力应按腐蚀后钢管的有效截面计算。

9.2.2 腐蚀后钢管再生混凝土构件的计算参数可按下列公式计算：

$$\xi_e = \frac{A_{se} f_y}{A_c f_{ck,r}} \quad (9.2.2-1)$$

$$\alpha_e = \frac{A_{se}}{A_c} \quad (9.2.2-2)$$

$$A_{se} = \begin{cases} \frac{\pi}{4} [D_e^2 - (D_e - 2t_e)^2] & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ B_e H_e - (B_e - 2t_e)(H_e - 2t_e) & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (9.2.2-2)$$

$$D_e = D - 2\Delta t \quad (9.2.2-4)$$

$$H_e = H - 2\Delta t \quad (9.2.2-5)$$

$$B_e = B - 2\Delta t \quad (9.2.2-6)$$

$$t_e = t - 2\Delta t \quad (9.2.2-7)$$

式中： Δt —— 外钢管管壁在腐蚀作用下的平均壁厚损失（mm）；

t_e —— 腐蚀后外钢管管壁厚度（mm）；

D_e —— 腐蚀后圆形钢管再生混凝土构件的截面外直径（mm）；

H_e —— 腐蚀后矩形钢管再生混凝土构件的截面高度（mm）；

B_e —— 腐蚀后矩形钢管再生混凝土构件的截面宽度 (mm);
 A_{se} —— 腐蚀后外钢管的截面面积 (mm²);
 ξ_e —— 腐蚀后名义约束效应系数。

9.3 防火设计

9.3.1 火灾下钢管再生混凝土构件的荷载比应按下列公式计算:

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

式中: R —— 火灾下钢管再生混凝土构件的荷载比;

N —— 火灾下钢管再生混凝土构件的轴向压力设计值 (N);

N_u —— 常温下受长细比影响的钢管再生混凝土构件轴心受压承载力 (N), 对于轴心受压钢管再生混凝土构件, 宜按本规程公式 (6.2.1-2) 计算。

9.3.2 钢管再生混凝土结构的防火构造措施应符合下列规定:

1 钢管再生混凝土桁式混合结构的弦杆均应设置直径不小于 20mm 的排气孔。排气孔应沿弦杆反对称布置, 且应避开节点区域。排气孔的纵向间距不宜超过 4m (图 9.3.2-1);

2 各楼层的柱均应设置直径不小于 20mm 的排气孔。排气孔宜在柱与楼板相交位置上方及下方 100~200mm 处各布置 1 个, 并应沿柱身反对称布置 (图 9.3.2-2)。当楼层高度大于 6m 时, 应增设排气孔, 且排气孔沿柱高度方向间距不宜大于 6m;

3 当钢管再生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钢管再生混凝土柱防火保护层厚度的较大值。

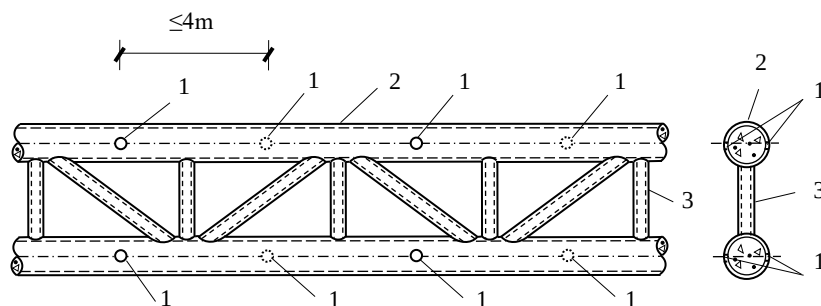


图 9.3.2-1 钢管混凝土桁式混合结构排气孔位置示意

1—排气孔; 2—钢管再生混凝土弦杆; 3—腹杆

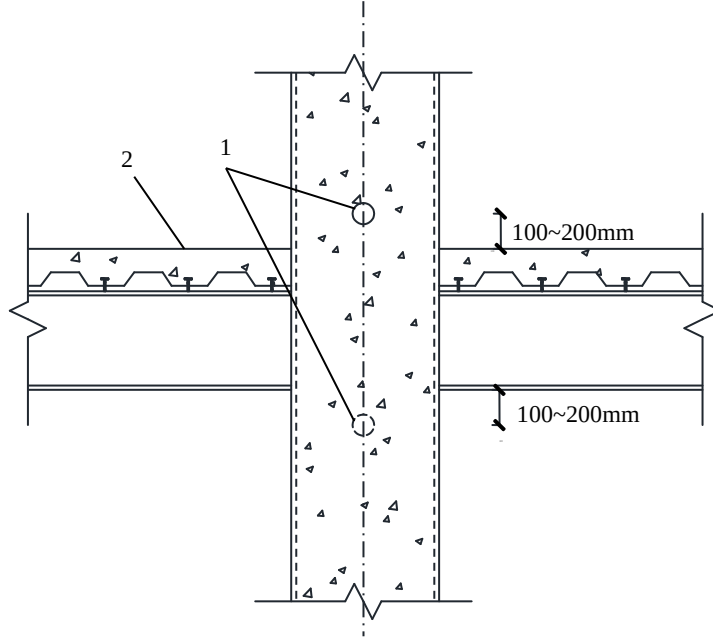


图 9.3.2-2 排气孔位置示意图

1—排气孔；2—楼板

9.4 防撞击设计

9.4.1 当以撞击作用作为钢管再生混凝土结构设计的主导作用时，应考虑撞击作用发生时和撞击作用发生后两种工况，应进行构件抗撞击极限承载状态设计，宜验算撞击作用发生时构件最大变形与撞击作用发生后剩余承载力。在允许结构出现局部构件破坏的情况下，应保证结构不致因局部破坏引起连续倒塌。

9.4.2 对于安全等级为一级的结构，宜专门进行结构受撞击动力分析，钢材与再生混凝土的应变率效应模型可按附录 A 采用。

9.4.3 侧向撞击作用下钢管再生混凝土构件的动力受弯承载力应符合式（9.4.3-1）的规定，且宜按式（9.4.3-2）计算：

$$M_d \leq M_{ud} \quad (9.4.3-1)$$

$$M_{ud} = R_d M_u \quad (9.4.3-2)$$

$$R_d = \begin{cases} 1.4983 f(f) f(f_{cu,r}) f(\alpha_s) f(m_0) f(V_0) & \text{(圆形再生钢管混凝土)} \\ 1.3187 f(f) f(f_{cu,r}) f(\alpha_s) f(m_0) f(V_0) & \text{(方形再生钢管混凝土)} \end{cases} \quad (9.4.3-3)$$

$$f(f) = \begin{cases} 1.30 \times 10^{-6} f^2 - 1.32 \times 10^{-3} f + 1.29 & \text{(圆形再生钢管混凝土)} \\ 6.08 \times 10^{-7} f^2 - 5.44 \times 10^{-4} f + 1.08 & \text{(方形再生钢管混凝土)} \end{cases} \quad (9.4.2-4)$$

$$f(f_{cu,r}) = \begin{cases} -1.70 \times 10^{-5} f_{cu,r}^2 + 1.76 \times 10^{-4} f_{cu,r} + 1.05 & \text{(圆形再生钢管混凝土)} \\ 2.23 \times 10^{-5} f_{cu,r}^2 - 2.31 \times 10^{-3} f_{cu,r} + 1.06 & \text{(方形再生钢管混凝土)} \end{cases} \quad (9.4.3-5)$$

$$f(\alpha_s) = \begin{cases} -8.40 \alpha_s^2 + 0.99 \alpha_s + 1.01 & \text{(圆形再生钢管混凝土)} \\ -8.52 \alpha_s^2 + 1.40 \alpha_s + 0.98 & \text{(方形再生钢管混凝土)} \end{cases} \quad (9.4.3-6)$$

$$f(m_0) = \begin{cases} -1.29 \times 10^{-8} m_0^2 + 8.46 \times 10^{-5} m_0 + 0.88 & (\text{圆形再生钢管混凝土}) \\ -1.22 \times 10^{-8} m_0^2 + 7.90 \times 10^{-5} m_0 + 0.90 & (\text{方形再生钢管混凝土}) \end{cases} \quad (9.4.3-7)$$

$$f(V_0) = \begin{cases} -4.25 \times 10^{-5} V_0^2 + 1.06 \times 10^{-2} V_0 + 0.88 & (\text{圆形再生钢管混凝土}) \\ 7.48 \times 10^{-5} V_0^2 + 3.68 \times 10^{-4} V_0 + 0.99 & (\text{方形再生钢管混凝土}) \end{cases} \quad (9.4.3-8)$$

式中: M_d —— 侧向撞击作用下钢管再生混凝土构件的弯矩设计值 (N·mm);

M_{ud} —— 钢管再生混凝土构件的动力受弯承载力 (N·mm);

R_d —— 撞击动力影响系数;

M_u —— 钢管再生混凝土构件的受弯承载力 (N·mm), 可按本规程公式 (6.3.1-1) 计算;

f —— 钢管钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值 (N/mm²);

$f_{cu,r}$ —— 再生混凝土立方体抗压强度设计值 (N/mm²);

α_s —— 截面含钢率, 应按本规程式 (3.3.2) 计算;

m_0 —— 撞击物质量 (kg);

V_0 —— 撞击物速度 (m/s)。

9.4.4 圆形钢管再生混凝土构件在侧向撞击作用下的动态稳定性应符合式 (9.4.4-1) 的规定, 临界轴压比宜按式 (9.4.4-2) 计算:

$$n = N/N_u \leq n_{cr} \quad (9.4.4-1)$$

$$n_{cr} = f(K_M)m_0^2 - f(K_{MV})m_0V_0 + f(K_V)V_0 + 1 \quad (9.4.4-2)$$

$$f(K_M) = 0.4K_{MV} - 8 \times 10^{-5} \quad (9.4.4-3)$$

$$f(K_{MV}) = 0.04K_{MV} + 1.2 \times 10^{-4} \quad (9.4.4-4)$$

$$f(K_V) = 0.38K_V - 0.011 \quad (9.4.4-5)$$

$$K_M = \frac{1/D^5}{(1+\xi)^{1.6} f_{cu}^{1.6}} \quad (9.4.4-6)$$

$$K_{MV} = \frac{L/D^4}{(1+\xi)^{1.7} f_{cu}} \quad (9.4.4-7)$$

$$K_V = \frac{1+\xi}{f_y} \left(\frac{L}{D} \right)^{0.5} \quad (9.4.4-8)$$

式中: n —— 轴压比;

n_{cr} —— 临界轴压比;

N —— 圆形钢管再生混凝土构件所承受的轴向荷载 (N);

N_u —— 圆形钢管再生混凝土构件的轴心受压承载力 (N), 应按本规程式 (6.2.1-2) 计算;

D —— 圆形钢管再生混凝土构件的截面外直径 (m);

K_M 、 K_{MV} 、 K_V —— 计算系数。

9.4.5 圆形钢管再生混凝土构件在侧向撞击作用发生时的最大变形应符合式 (9.4.5-1) 的规定,

宜按式 (9.4.5-2) 计算:

$$u_m \leq [u_m] \quad (9.4.5-1)$$

$$u_m = \frac{E_i L}{4R_d M_u} + \frac{R_d M_u}{2(\pi/L)^2 EI} \quad (9.4.5-2)$$

式中: u_m —— 圆形钢管再生混凝土构件最大受撞变形 (m);

$[u_m]$ —— 圆形钢管再生混凝土构件最大受撞变形允许值 (m);

E_i —— 撞击能量 (J), $E_i = m_0 V_0^2 / 2$;

L —— 圆形钢管再生混凝土构件长度 (m);

EI —— 圆形钢管再生混凝土截面的弹性抗弯刚度, 应按本规程式 (5.2.3) 计算。

9.4.6 圆形钢管再生混凝土构件在侧向撞击作用发生后的轴心受压承载力剩余率应符合式 (9.4.6-1) 的规定, 宜按式 (9.4.6-2) 计算:

$$R_r = N_r / N_u \geq [R_r] \quad (9.4.6-1)$$

$$R_r = \frac{f(E_i^*) f(V_0) f(n) f(\alpha_s) f(D)}{f(f_y) f(f_{cu,r}) f(L)} \quad (9.4.6-2)$$

$$f(E_i^*) = -0.0023e^{-5.7 \times 10^{-8} E_i^*} \quad (9.4.6-3)$$

$$f(V) = 0.01V_0^2 - 0.7V_0 - 55 \quad (9.4.6-4)$$

$$f(n) = 8.5n^2 - 0.14n - 50 \quad (9.4.6-5)$$

$$f(f_y) = 0.005 f_y + 24 \quad (9.4.6-6)$$

$$f(f_{cu,r}) = 0.02 f_{cu,r} - 13 \quad (9.4.6-7)$$

$$f(\alpha_s) = 5\alpha_s + 7.8 \quad (9.4.6-8)$$

$$f(D) = 21D^2 - 48D + 93 \quad (9.4.6-9)$$

$$f(L) = 0.03L^2 - 0.7L + 16.8 \quad (9.4.6-10)$$

$$E_i^* = \frac{E_i L}{\xi_r D^4} \sqrt{\frac{E_i}{M_u^* \times 10^6}} \quad (9.4.6-11)$$

$$M_u^* = \frac{DV^{0.8}}{L_0} M_u \times 10^{-6} \quad (9.4.6-12)$$

式中: R_r —— 圆形钢管再生混凝土构件的轴向承载力剩余率;

$[R_r]$ —— 圆形钢管再生混凝土构件的轴向承载力剩余率允许值;

N_r —— 圆形钢管再生混凝土构件的剩余承载力 (N);

E_i^* 、 M_u^* —— 计算系数。

9.4.7 钢管再生混凝土桁式混合结构 K 形节点弦杆跨中受撞击荷载作用时, 其受弯承载力可按下式计算:

$$M_{\text{udj}} = f(\beta_w) M_{\text{ud}} \quad (9.4.7-1)$$

$$f(\beta_w) = \begin{cases} 3.15 \times 10^{-2} \beta_w^2 + 1.55 \times 10^{-2} \beta_w + 1.00 & (\text{圆形钢管混凝土}) \\ 2.65 \times 10^{-2} \beta_w^2 + 3.45 \times 10^{-2} \beta_w + 1.00 & (\text{方形钢管混凝土}) \end{cases} \quad (9.4.7-2)$$

式中： M_{udj} —— 钢管再生混凝土桁式混合结构 K 形节点弦杆的动力受弯承载力 (N·mm)；

β_w —— 钢管再生混凝土桁式混合结构 K 形节点腹杆与弦杆直径之比；

M_{ud} —— 钢管再生混凝土构件的动力受弯承载力 (N·mm)，按式 (9.4.3-2) 计算。

9.5 抗爆设计

9.5.1 钢管再生混凝土结构遭受的设计爆炸荷载，爆炸作用设计值可执行现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 中的有关规定；对规定之外的情况，宜根据爆炸风险分析、防爆措施以及业主需求等共同确定。

9.5.2 钢管再生混凝土结构抗爆设计应对构件进行抗爆分析，可采用等效静载法、等效单自由度模型、超压-冲量图法和有限元分析法等方法进行设计。

9.5.3 近场爆炸、接触爆炸条件下，应根据试验或有限元分析确定钢管再生混凝土结构的抗爆性能。

9.5.4 结构抗爆分析的材料动态特性可执行现行国家标准《人民防空地下室设计规范》GB 50038 和《抗爆间室结构设计规范》GB 50907 中的有关规定；对规定之外的材料，宜根据材料静、动态力学性能试验确定。

9.5.5 钢管再生混凝土结构的抗爆设计构造措施宜与第 7 节的构造一体化设计，如有其他构造措施，应采用试验或有限元分析验证。

10 施工、验收、维护和拆除

10.1 一般规定

10.1.1 钢管再生混凝土结构施工可分为结构的制作与安装及钢管内再生混凝土浇筑。除应符合本规程的规定外，钢管再生混凝土结构的施工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、《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 和《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定。

10.1.2 钢管再生混凝土结构施工前，应有施工组织设计及专项施工方案等技术文件。施工方案应符合结构制作与安装及钢管内再生混凝土浇筑阶段结构的安全性要求。钢管再生混凝土结构的施工应符合国家环境保护有关法律法规的要求。

10.1.3 钢管构件施工应根据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。

10.1.4 宜根据钢管再生混凝土结构的安全等级、结构类型、设计工作年限及使用环境，建立全寿命周期内的结构使用与维护管理制度。

10.1.5 钢管再生混凝土结构在拆除前应根据分析计算编制拆除施工方案与安全操作规程，确保结构拆除过程中的安全性。

10.2 制作与安装

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

10.2.2 钢管构件应根据钢结构制作详图进行放样，放样与号料应预留焊接收缩量 and 切割、端铣等加工余量，对于高层框架柱还应预留弹性压缩量。

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

10.2.4 需边缘加工的零件，宜采用精密切割；焊接坡口加工宜采用自动切割、半自动切割、坡口机、刨边机等方法进行，并应用样板控制坡口角度和尺寸。

10.2.5 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标准》GB 50205 的有关规定。

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

10.2.7 钢管再生混凝土的钢管外侧应采取除锈后涂覆油漆或金属镀层的防腐措施，防锈和防腐

蚀采用的涂料、钢材表面的除锈等级以及防腐蚀对钢结构的构造要求等，应符合现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046 和《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定 第 1 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》GB/T 8923.1 的有关规定。钢管再生混凝土柱涂装防火涂料前应进行柱表面除锈及防锈底漆涂装，并应符合设计要求和现行国家标准《钢结构防火涂料》GB 14907 的有关规定。

10.2.8 钢管再生混凝土柱防火涂料的粘结强度、抗压强度等性能指标应符合国家现行标准《钢结构防火涂料》GB 14907 和《钢结构防火涂料应用技术规程》T/CECS 24 的有关规定。检验方法应符合现行国家标准《建筑构件耐火试验方法》GB/T 9978 的有关规定。

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

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

10.2.11 钢管构件在吊装时应控制吊装荷载作用下的变形，吊点的设置应根据钢管构件自身的承载力和稳定性计算后确定。

10.2.12 吊装钢管构件时，应将构件管口封闭。

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

10.2.14 钢管构件吊装就位后应立即进行校正、可靠固定。

10.2.15 钢管采用现场焊接拼接时，应采取可靠的施焊工艺，力求减少焊接残余应力和残余变形。

10.3 钢管内再生混凝土施工

10.3.1 钢管管内再生混凝土浇筑应在钢构件安装验收合格后进行，浇筑混凝土之前应清除钢管内异物和积水，且应清理附在钢管外壁的新浇混凝土。

10.3.2 用于钢管中再生混凝土的原材料、强度等级、力学性能指标和质量标准，应符合本规程第 4.2 节的有关规定和设计要求；再生混凝土的制备与运输尚应符合现行行业标准《再生混凝土结构技术标准》JGJ/T 443 中的有关规定。

10.3.3 钢管内再生混凝土的浇筑方式宜采用泵送顶升法、人工浇捣法、埋管输入法和高位抛落法，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) 钢管的尺寸宜大于或等于进料管的两倍；
- 2) 再生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 采用人工浇捣法时，应符合下列规定：

- 1) 混凝土应自钢管上口灌入，并应用振捣器捣实；
- 2) 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，一次浇筑高度不宜大于 2m；
- 3) 钢管截面最小边长或管径小于 350mm 时，可采用附着在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) 人工浇捣法一次浇筑的高度不应大于振捣器的有效工作范围，且不应大于 2m。

3 采用高位抛落法时，应符合下列规定：

- 1) 高位抛落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 0.7m³ 左右；
- 5) 抛落浇筑到位的混凝土应无泌水和离析现象。

10.3.4 再生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。再生混凝土配合比应根据同配比普通混凝土强度等级进行计算并通过试验后确定。对于泵送顶升浇筑法，混凝土的配合比还应满足可泵性要求。

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

10.3.6 每次采用高抛法浇筑再生混凝土前，应先浇灌一层厚度为 100mm~200mm 的与再生混凝土同配比的砂浆。

10.3.7 当混凝土浇筑至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。

10.3.8 冬季施工应采取防止钢管再生混凝土发生冻胀的措施，并应满足再生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/T 104 的有关规定。

10.4 检测与验收

10.4.1 钢管再生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标准》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《再生混凝土结构技术标准》JGJ/T 443 中的有关规定。

10.4.2 钢管再生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件及性能检测报告;
- 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。

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

- 1 检测次数不应少于 4 次，宜为浇筑后 3d、7d、28d 及验收前；
- 2 人工敲击检查可根据工程实际情况确定检查点。人工敲击检查结果异常时，应加大检测点密度，确定超声波检测范围；
- 3 超声波检测发现异常时，应进行钻孔复检。

10.4.4 钢管再生混凝土柱防火保护工程消防验收应由建设单位组织设计、施工、监理单位及消防主管部门进行专项验收。

10.4.5 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。

10.5 维护和拆除

10.5.1 钢管再生混凝土结构应进行日常维护和定期检测，且应符合下列规定：

- 1 日常维护应检查钢管再生混凝土结构损伤、荷载组合的变化等情况；

2 外观应重点检查挠度、钢管腐蚀、保护层脱落、渗漏水、不均匀沉降以及人为开洞、破损等损伤，对钢筋混凝土部分还应包括裂缝、冻融和钢筋锈蚀等损伤；

3 对于二、三、四和五类环境中的钢管再生混凝土结构，宜制定针对性维护方案；受侵蚀介质作用的结构以及在使用年限内不能重新涂装的结构部位，应采取封包覆的防护措施。

10.5.2 钢管再生混凝土结构拆除过程中应考虑可能出现的最不利情况，且应符合下列规定：

1 拆除的每一个阶段均应考虑构件约束条件的改变，分析剩余结构的稳定性及安全风险，并调整和确定下一个阶段的拆除方案；

2 拆除现场不应进行结构的解体，拆除施工中应采取保证剩余结构稳定的措施；

3 局部拆除影响结构安全时，应先加固后拆除；

4 拆除大型、复杂结构时，应进行拆除施工仿真模拟和计算分析。

10.5.3 钢管再生混凝土结构拆除过程应满足环保要求，且对可重复利用的钢管再生混凝土结构构件，应考虑其使用寿命和维护方法；对切割的块体，宜重复利用或再生利用；对破碎的混凝土，宜拟定再生利用计划；对拆除的钢管和钢筋，应回收再生利用。

附录 A 钢管再生混凝土结构的材料本构模型

A.1 再生混凝土

A.1.1 常温下钢管内再生混凝土在单调荷载作用下的受压应力 (σ)-应变 (ε) 关系宜按下列公式确定:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0 \cdot (x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (\text{A.1.1-1})$$

$$\sigma_0 = f'_{c,r} \quad (\text{A.1.1-2})$$

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

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

$$\varepsilon_0 = (\varepsilon_c + 800\xi_r^{0.2} \times 10^{-6}) \cdot \left(1 + \frac{r}{\beta}\right) \quad (\text{A.1.1-5})$$

$$\xi_r = \frac{A_s f_y}{A_c f_{c,r}} \quad (\text{A.1.1-6})$$

$$\beta = 65.715r^2 - 109.43r + 48.989 \quad (\text{A.1.1-7})$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6} \quad (\text{A.1.1-8})$$

$$\eta = \begin{cases} 2 & (\text{圆形再生钢管混凝土}) \\ 1.6 + 1.5/x & (\text{矩形再生钢管混凝土}) \end{cases} \quad (\text{A.1.1-9})$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\xi_r - 0.5)^7} \cdot (f'_{c,r})^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12 & (\text{圆形再生钢管混凝土}) \\ \frac{(f'_{c,r})^{0.1}}{1.2\sqrt{1 + \xi_r}} & (\text{矩形再生钢管混凝土}) \end{cases} \quad (\text{A.1.1-10})$$

式中: σ —— 应力 (N/mm^2);
 ε —— 应变;
 α_s —— 截面含钢率, 应按本规程式 (3.3.2) 计算;
 ξ_r —— 约束效应系数;
 $f'_{c,r}$ —— 再生混凝土圆柱体抗压强度 (N/mm^2);
 $f_{c,r}$ —— 再生混凝土轴心抗压强度标准值 (N/mm^2);
 f_y —— 钢管钢材的屈服强度 (N/mm^2);
 A_s —— 钢管的截面面积 (mm^2);
 A_c —— 管内再生混凝土的截面面积 (mm^2);
 r —— 管内再生混凝土的再生粗骨料取代率。

A.1.2 常温下钢管内再生混凝土在反复荷载作用下的应力 (σ)-应变 (ε) 关系 (图 A.1.2) 可引入损伤指标对弹性刚度矩阵进行折减, 且宜按下列公式计算:

$$\sigma = E_d (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (\text{A.1.2-1})$$

$$\mathbf{E}_d = (1-d)\mathbf{E}_0 \quad (\text{A.1.2-2})$$

$$(1-d) = (1-s_c d_t)(1-s_t d_c) \quad (\text{A.1.2-3})$$

$$s_t = 1 - \omega_t r^*(\bar{\sigma}_{11}) \quad (\text{A.1.2-4})$$

$$s_c = 1 - \omega_c [1 - r^*(\bar{\sigma}_{11})] \quad (\text{A.1.2-5})$$

$$r^*(\bar{\sigma}_{11}) = \begin{cases} 1 & \bar{\sigma}_{11} > 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (\text{A.1.2-6})$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}$ —— 塑性应变矩阵;
 $\bar{\sigma}_{11}$ —— 单轴有效应力 (N/mm^2);
 $\mathbf{E}_0$ —— 初始 (未考虑损伤) 弹性刚度矩阵 (N/mm^2);
 d_c —— 再生混凝土受压损伤指标;
 d_t —— 再生混凝土受拉损伤指标;
 ω_c —— 受压刚度恢复系数, $0 \leq \omega_c \leq 1$;
 ω_t —— 受拉刚度恢复系数, $0 \leq \omega_t \leq 1$ 。

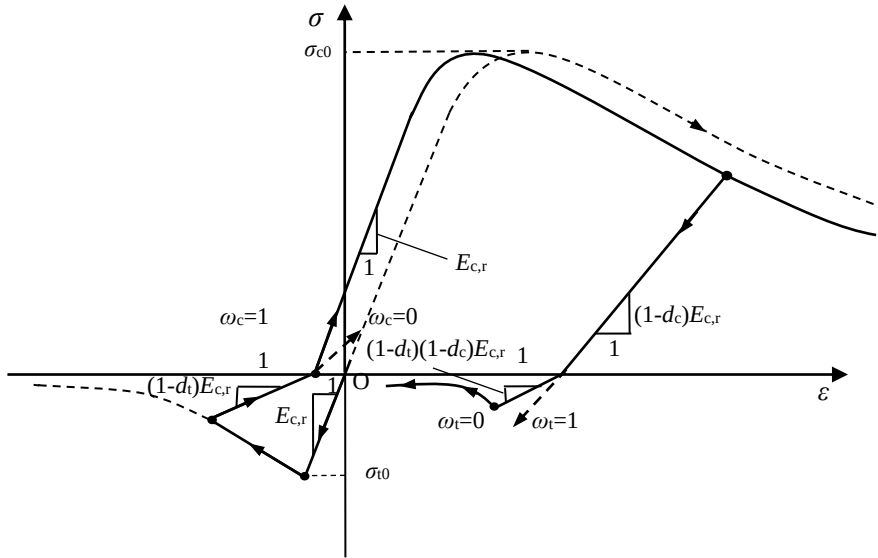


图 A.1.2 常温下钢管内再生混凝土在反复荷载作用下的单轴应力-应变关系

A.1.3 高温下钢管内再生混凝土在单调荷载作用下的受压应力 (σ)-应变 (ε) 关系宜按 A.1.1 节和下列公式确定:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o^T} \quad (\text{A.1.3-1})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_o^T} \quad (\text{A.1.3-2})$$

$$\sigma_o^T = \frac{\sigma_o}{1 + 1.986(T - 20)^{3.21} \times 10^{-9}} \quad (\text{A.1.3-3})$$

$$\varepsilon_o^T = \varepsilon_o \left[1 + 3.6 \times 10^{-4}(T - 20) + 4.22 \times 10^{-6}(T - 20)^2 \right] \quad (\text{A.1.3-4})$$

式中: σ —— 应力 (N/mm^2);
 ε —— 应变;

T —— 再生混凝土温度 (°C)。

A.1.4 高温后钢管内再生混凝土在单调荷载作用下的受压应力 (σ)-应变 (ε) 关系宜按 A.1.1 节和下列公式确定:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o^{T_{\max}}} \quad (\text{A.1.4-1})$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_o^{T_{\max}}} \quad (\text{A.1.4-2})$$

$$\sigma_o^{T_{\max}} = \frac{\sigma_o}{1 + 6.4[(T_{\max} - 20) \times 10^{-3}]^{3.9}} \quad (\text{A.1.4-3})$$

$$\varepsilon_o^{T_{\max}} = \varepsilon_o \left\{ 1 + 1.5(T_{\max} - 20) \times 10^{-3} + 5[(T_{\max} - 20) \times 10^{-3}]^2 \right\} \quad (\text{A.1.4-4})$$

式中: σ —— 应力 (N/mm²);

ε —— 应变;

$T_{\max}$ —— 再生混凝土经历的历史最高温度 (°C)。

A.1.5 高温下再生混凝土弹性模量折减系数 $\alpha_{E_{c,r}}$ 可按表 A.1.5 取值。

表 A.1.5 高温下再生混凝土弹性模量折减系数

再生混凝土温度/°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800
$\alpha_{E_{c,r}}$	1.00	0.92	0.76	0.59	0.43	0.26	0.14	0.08	0.07

注: 表中 $\alpha_{E_{c,r}} = E_{c,r}^T / E_{c,r}$, $E_{c,r}^T$ 为高温下再生混凝土弹性模量, $E_{c,r}$ 为常温下再生混凝土弹性模量。表内中间值按线性内插法确定。

A.1.6 高温后再生混凝土弹性模量折减系数 $\alpha_{E_{c,r}}^p$ 可按表 A.1.6 取值。

表 A.1.6 高温后再生混凝土弹性模量折减系数

再生混凝土经历的历史最高温度/°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800
$\alpha_{E_{c,r}}^p$	1.00	0.87	0.78	0.59	0.33	0.16	0.08	0.04	0.02

注: 表中 $\alpha_{E_{c,r}}^p = E_{c,r}^p / E_{c,r}$, $E_{c,r}^p$ 为高温后再生混凝土弹性模量, $E_{c,r}$ 为常温下再生混凝土弹性模量。表内中间值按线性内插法确定。

A.1.7 再生混凝土的应变率效应可按下列公式确定:

$$\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{cs}} = \begin{cases} (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{cs})^{0.014} & (\dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1}) \\ 0.012(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{cs})^{1/3} & (\dot{\varepsilon} > 30 \text{ s}^{-1}) \end{cases} \quad (\text{A.1.7-1})$$

$$\frac{\sigma_{td}}{\sigma_{ts}} = \begin{cases} (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{ts})^{0.018} & (\dot{\varepsilon} \leq 10 \text{ s}^{-1}) \\ 0.0062(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{ts})^{1/3} & (\dot{\varepsilon} > 10 \text{ s}^{-1}) \end{cases} \quad (\text{A.1.7-2})$$

式中: σ_{cd} 、 σ_{td} —— 动态压应力与动态拉应力 (N/mm²);

σ_{cs} 、 σ_{ts} —— 静态压应力与静态拉应力 (N/mm²), 静态应力-应变关系曲线可进行实测, 静态受压应力-应变关系曲线可按 A.1.1 条确定;

$\dot{\varepsilon}_{cs}$ 、 $\dot{\varepsilon}_{ts}$ —— 静态受压与受拉参考应变率, $\dot{\varepsilon}_{cs} = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $\dot{\varepsilon}_{ts} = 1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

A.2 钢材

A.2.1 常温下钢管与钢筋在单调荷载作用下的应力 (σ)-应变 (ε) 关系宜按下列公式确定:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_y + 0.01 E_s (\varepsilon - \varepsilon_y) & (\varepsilon > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (\text{A.2.1})$$

式中: E_s —— 钢材的弹性模量 (N/mm^2);

f_y —— 钢材的屈服强度 (N/mm²);

ε_y —— 钢材的屈服应变。

A.2.2 常温下钢管在反复荷载作用下的应力 (σ)-应变 (ε) 关系 (图 A.2.2) 的骨架线和软化段模量宜按下列公式确定:

$$E_{\text{b}} = \begin{cases} \frac{f_{\text{y}} + \sigma_{\text{d}}}{\varepsilon_{\text{y}} + \varepsilon_{\text{d}}} & (1.65\varepsilon_{\text{y}} < \varepsilon_{\text{d}} \leq 6.11\varepsilon_{\text{y}}) \\ 0.1E_{\text{s}} & (\varepsilon_{\text{d}} > 6.11\varepsilon_{\text{y}}) \end{cases} \quad (\text{A.2.2})$$

式中: E_b —— 软化段 de 和相应的反对称段 d'e' 的模量 (N/mm^2);

E_s —— 钢材的弹性模量 (N/mm²);

σ_d —— 软化段起始点 d 的应力 (N/mm^2), d 点位于与 ab 平行的直线上;

ε_d —— 软化段起始点 d 的应变;

ε_y —— 钢材的屈服应变。

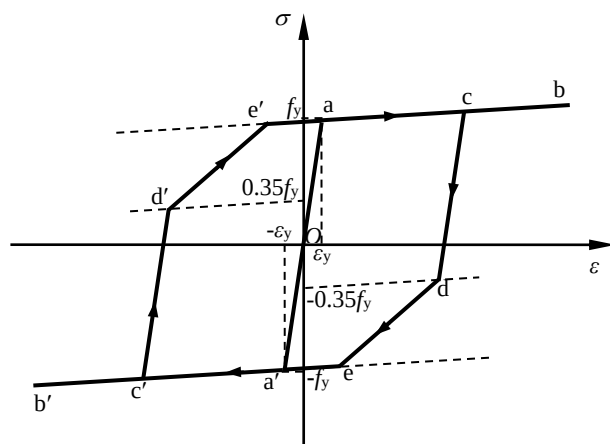


图 A.2.2 常温下钢管在反复荷载作用下的应力-应变关系

A.2.3 常温下钢筋在反复荷载作用下的应力(σ)-应变(ε)关系(图 A.2.3)的骨架线宜按式(A.2.1)确定。

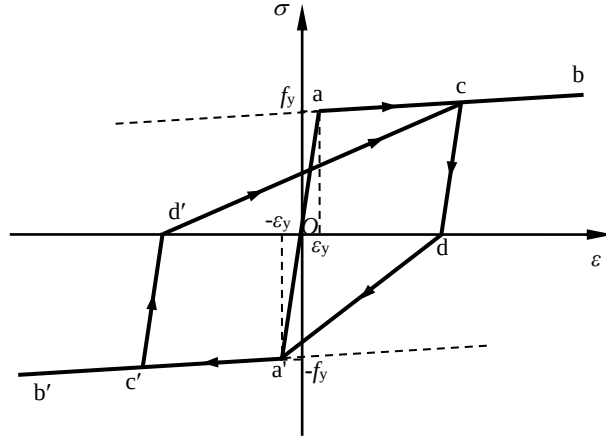


图 A.2.3 常温下钢筋在反复荷载作用下的应力-应变关系

A.2.4 高温下钢管与钢筋在单调荷载作用下的应力 (σ) -应变 (ε) 关系宜按下列公式确定:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ \frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_y + f[T, (\varepsilon - \varepsilon_y + 0.001)] - f(T, 0.001) & (\varepsilon > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (\text{A.2.4-1})$$

$$\varepsilon_y = 4 \times 10^{-6} f_y \quad (\text{A.2.4-2})$$

$$f(T, 0.001) = (345 - 0.276T) \left[1 - e^{(-30+0.03T)\sqrt{0.001}} \right] \quad (\text{A.2.4-3})$$

$$f[T, (\varepsilon - \varepsilon_y + 0.001)] = \left[1 - e^{(-30+0.03T)\sqrt{\varepsilon - \varepsilon_y + 0.001}} \right] (345 - 0.276T) \quad (\text{A.2.4-4})$$

式中: σ —— 应力 (N/mm^2);
 ε —— 应变;
 T —— 钢材的温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 f_y —— 钢材的屈服强度 (N/mm^2)。

A.2.5 高温后钢管与钢筋在单调荷载作用下的应力 (σ) -应变 (ε) 关系宜按下列公式确定:

$$\sigma = \begin{cases} E_{sp}(T_{\max}) \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_{yp}(T_{\max})) \\ f_{yp}(T_{\max}) + E'_{sp}(T_{\max}) [\varepsilon - \varepsilon_{yp}(T_{\max})] & (\varepsilon > \varepsilon_{yp}(T_{\max})) \end{cases} \quad (\text{A.2.5-1})$$

$$f_{yp}(T_{\max}) = \begin{cases} f_y & (T_{\max} \leq 400^{\circ}\text{C}) \\ f_y \left[1 + 2.33 \times 10^{-4} (T_{\max} - 20) - 5.88 \times 10^{-1} (T_{\max} - 20)^2 \right] & (T_{\max} > 400^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (\text{A.2.5-2})$$

$$\varepsilon_{yp}(T_{\max}) = f_{yp}(T_{\max}) / E_{sp}(T_{\max}) \quad (\text{A.2.5-3})$$

$$E_{sp}(T_{\max}) = E_s \quad (\text{A.2.5-4})$$

$$E'_{sp}(T_{\max}) = 0.01 E_{sp}(T_{\max}) \quad (\text{A.2.5-5})$$

式中: σ —— 应力 (N/mm^2);
 ε —— 应变;
 $\varepsilon_{yp}(T_{\max})$ —— 经历历史最高温度 $T_{\max}$ 后钢材的屈服应变;
 f_y —— 钢材的屈服强度 (N/mm^2);

$f_{yp}(T_{\max})$ —— 经历历史最高温度 $T_{\max}$ 后钢材的屈服强度 (N/mm²);
 E_s —— 钢材的弹性模量 (N/mm²);
 $E_{sp}(T_{\max})$ —— 经历历史最高温度 $T_{\max}$ 后钢材的弹性模量 (N/mm²);
 $T_{\max}$ —— 历史最高温度 (°C)。

A.2.6 钢材的弹性模量可不考虑应变率的影响，其塑性阶段应采用如下的动态本构模型进行计算：

$$\sigma_d(\varepsilon_p) = \sigma_s(\varepsilon_p) \cdot \text{DIF}_{\text{avg}}(\dot{\varepsilon}, f)_y \quad (\text{A.2.6-1})$$

$$\text{DIF}_{\text{avg}}(\dot{\varepsilon}, f_y) = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D_{\text{avg}}} \right)^{\frac{1}{p_{\text{avg}}}} \quad (\text{A.2.6-2})$$

$$D_{\text{avg}} = 1000 \left(\frac{f_y}{235} \right)^6 \quad (\text{A.2.6-3})$$

$$p_{\text{avg}} = 3 \left(\frac{f_y}{235} \right)^{0.2} \quad (\text{A.2.6-4})$$

式中：
 $\sigma_d(\varepsilon_p)$ —— 塑性应变为 ε_p 时的动态应力 (N/mm²);
 $\sigma_s(\varepsilon_p)$ —— 塑性应变为 ε_p 时的静态应力 (N/mm²);
 $\dot{\varepsilon}$ —— 应变率 (s⁻¹)。

附录 B 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变计算

B.0.1 钢管内再生混凝土的收缩应变可按下列公式计算：

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t_d}{35 + t_d} (\varepsilon_{sh})_u \gamma_{RAC} \quad (B.0.1-1)$$

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{cp} \gamma_{\lambda} \gamma_{vs} \gamma_s \gamma_{\psi} \gamma_c \gamma_{\alpha} \gamma_u \quad (B.0.1-2)$$

$$\gamma_{RAC} = (1 + 0.44 r_c) e^{0.01 r_c [1 - (90/t_d)^{1.82 - 1.04 r_c}]} \quad (B.0.1-3)$$

$$\gamma_{vs} = 1.2 e^{-0.00472 V/S} \quad (B.0.1-4)$$

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161 s \leq 1 \quad (B.0.1-5)$$

$$\gamma_{\psi} = \begin{cases} 0.30 + 0.014 \psi & (\psi \leq 50) \\ 0.90 + 0.002 \psi & (\psi > 50) \end{cases} \quad (B.0.1-6)$$

$$\gamma_c = 0.75 + 0.00061 c \quad (B.0.1-7)$$

$$\gamma_{\alpha} = 0.95 + 0.008 \alpha_v \quad (B.0.1-8)$$

$$\gamma_u = 0.0002 D' + 0.63 \quad (B.0.1-9)$$

式中： t_d —— 干燥时间(d)；
 $(\varepsilon_{sh})_u$ —— 收缩应变终值($\mu\varepsilon$)；
 γ_{RAC} —— 再生粗骨料取代率修正系数；
 r_c —— 再生粗骨料取代率；
 γ_{cp} —— 初始湿养护收缩修正系数，应按表 B.0.1 确定；
 γ_{λ} —— 环境相对湿度影响修正系数，对于管内再生混凝土取 0.3；
 γ_{vs} —— 构件尺寸影响修正系数，为构件体积与表面积之比(V/S ，单位为 mm)的函数；
 γ_s —— 坍落度影响修正系数；
 s —— 坍落度 (mm)；
 γ_{ψ} —— 细骨料影响修正系数；
 ψ —— 细骨料占骨料总量的百分数；
 γ_c —— 水泥用量影响修正系数；
 c —— 每立方米混凝土中水泥的用量 (kg/m^3)；
 γ_{α} —— 含气量影响修正系数；
 α_v —— 体积含气量的百分数；
 γ_u —— 钢管对再生混凝土收缩的制约影响系数；
 D' —— 对于圆形钢管再生混凝土 $D'=D$ ，对于方形钢管再生混凝土 $D'=B$ (mm)。

表 B.0.1 初始湿养护收缩修正系数 γ_{cp}

湿养护时间(d)	1	3	7	14	28	90
γ_{cp}	1.2	1.1	1.0	0.93	0.86	0.75

B.0.2 在 t_0 时刻施加的荷载持续至 t 时刻所引起的钢管内再生混凝土的徐变应变，可按下列公

式计算:

$$\varepsilon_{\text{cr}}(t, t_0) = \phi(t, t_0) \varepsilon_{\text{initial}}(t_0) \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$\phi(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \right] \phi_{\text{max}}(t_0) \quad (\text{B.0.2-2})$$

$$\phi_{\text{max}}(t_0) = 2.35 K_{\text{RAC}} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \quad (\text{B.0.2-3})$$

$$K_{\text{RAC}} = 3.6548 \left(1 - \frac{D_{\text{RA}}}{D_{\text{NA}}} \right) + 1 \quad (\text{B.0.2-4})$$

$$K_2 = \begin{cases} 1.25 t_0^{-0.118} & (\text{湿养护}) \\ 1.13 t_0^{-0.094} & (\text{蒸汽养护}) \end{cases} \quad (\text{B.0.2-5})$$

$$K_3 = 0.82 + 0.00264s \quad (\text{B.0.2-6})$$

$$K_4 = \frac{2}{3} \left(1 + 1.13 e^{-0.0213V/S} \right) \quad (\text{B.0.2-7})$$

$$K_5 = 0.88 + 0.0024\varphi \quad (\text{B.0.2-8})$$

$$K_6 = 0.46 + 0.09\alpha_v \geq 1 \quad (\text{B.0.2-9})$$

式中: $\varepsilon_{\text{cr}}(t, t_0)$ —— 在 t_0 时刻施加的荷载持续至 t 时刻所引起的再生混凝土徐变应变;

$\phi(t, t_0)$ —— 徐变系数, 为徐变应变与初始应变的比值;

$\varepsilon_{\text{initial}}(t_0)$ —— 初始应变;

$\phi_{\text{max}}(t_0)$ —— 徐变系数终值;

K_{RAC} —— 基于表观密度的再生混凝土徐变系数修正系数;

D_{RA} —— 再生粗骨料的表观密度 (kg/m^3);

D_{NA} —— 天然粗骨料的表观密度 (kg/m^3);

K_1 —— 环境湿度影响修正系数, 对于管内再生混凝土取 0.67;

K_2 —— 加荷龄期修正系数;

K_3 —— 坍落度修正系数;

s —— 坍落度 (mm);

K_4 —— 构件尺寸影响修正系数, 为构件体积与表面积之比(V/S , 单位为 mm) 的函数;

K_5 —— 细骨料影响修正系数;

φ —— 细骨料占骨料总量的百分数;

K_6 —— 混凝土含气量影响修正系数;

α_v —— 体积含气量的百分数。

附录 C 稳定系数 ϕ 值表

C.0.1 圆形钢管再生混凝土构件的稳定系数 ϕ 值可按表 C.0.1 选取。

表 C.0.1 圆形钢管再生混凝土构件的稳定系数 ϕ 值

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q235、 Q235GJ	RC30	0.04	1.000	0.975	0.925	0.876	0.829	0.783	0.739	0.696	0.654	0.614
		0.08	1.000	0.977	0.931	0.887	0.843	0.800	0.758	0.716	0.675	0.635
		0.12	1.000	0.978	0.936	0.894	0.852	0.810	0.769	0.728	0.688	0.647
		0.16	1.000	0.979	0.938	0.898	0.858	0.818	0.778	0.737	0.697	0.657
		0.20	1.000	0.979	0.941	0.902	0.863	0.824	0.784	0.744	0.704	0.664
	RC40	0.04	1.000	0.959	0.902	0.848	0.796	0.747	0.699	0.655	0.613	0.573
		0.08	1.000	0.962	0.909	0.859	0.810	0.763	0.717	0.674	0.632	0.592
		0.12	1.000	0.963	0.913	0.865	0.818	0.772	0.728	0.685	0.644	0.604
		0.16	1.000	0.965	0.916	0.869	0.824	0.779	0.736	0.694	0.653	0.613
		0.20	1.000	0.965	0.919	0.873	0.828	0.785	0.742	0.700	0.659	0.619
	RC50	0.04	1.000	0.948	0.887	0.829	0.774	0.722	0.674	0.628	0.586	0.546
		0.08	1.000	0.951	0.894	0.840	0.787	0.738	0.691	0.646	0.604	0.565
		0.12	1.000	0.953	0.898	0.846	0.795	0.747	0.701	0.657	0.616	0.576
		0.16	1.000	0.954	0.901	0.850	0.801	0.754	0.709	0.665	0.624	0.584
		0.20	1.000	0.955	0.904	0.854	0.806	0.759	0.714	0.671	0.630	0.591
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q235、 Q235GJ	RC30	0.04	0.575	0.516	0.456	0.405	0.362	0.326	0.295	0.268	0.245	0.225
		0.08	0.595	0.534	0.472	0.419	0.375	0.338	0.306	0.278	0.254	0.233
		0.12	0.607	0.545	0.481	0.428	0.383	0.345	0.312	0.283	0.259	0.237
		0.16	0.616	0.553	0.488	0.434	0.388	0.350	0.316	0.288	0.263	0.241
		0.20	0.623	0.560	0.494	0.439	0.393	0.354	0.320	0.291	0.266	0.243
	RC40	0.04	0.536	0.481	0.424	0.377	0.338	0.304	0.275	0.250	0.228	0.209
		0.08	0.554	0.498	0.439	0.391	0.349	0.315	0.285	0.259	0.236	0.217
		0.12	0.566	0.508	0.448	0.399	0.357	0.321	0.290	0.264	0.241	0.221
		0.16	0.574	0.515	0.455	0.404	0.362	0.326	0.295	0.268	0.245	0.224
		0.20	0.580	0.521	0.460	0.409	0.366	0.329	0.298	0.271	0.247	0.227
	RC50	0.04	0.510	0.458	0.404	0.359	0.322	0.289	0.262	0.238	0.217	0.199
		0.08	0.528	0.474	0.418	0.372	0.333	0.300	0.271	0.246	0.225	0.206
		0.12	0.539	0.484	0.427	0.380	0.340	0.306	0.277	0.252	0.230	0.211
		0.16	0.547	0.491	0.433	0.385	0.345	0.310	0.281	0.255	0.233	0.214
		0.20	0.553	0.496	0.438	0.389	0.348	0.314	0.284	0.258	0.236	0.216
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q355、 Q355GJ	RC30	0.04	1.000	0.980	0.938	0.896	0.852	0.806	0.760	0.712	0.664	0.587
		0.08	1.000	0.983	0.948	0.910	0.871	0.828	0.784	0.736	0.687	0.608
		0.12	1.000	0.985	0.954	0.919	0.882	0.841	0.798	0.751	0.701	0.620
		0.16	1.000	0.986	0.958	0.926	0.890	0.851	0.808	0.761	0.711	0.629
		0.20	1.000	0.987	0.961	0.931	0.897	0.858	0.816	0.770	0.719	0.636
	RC40	0.04	1.000	0.964	0.912	0.861	0.811	0.762	0.713	0.665	0.618	0.547
		0.08	1.000	0.968	0.922	0.876	0.829	0.783	0.735	0.688	0.640	0.566
		0.12	1.000	0.970	0.928	0.884	0.840	0.795	0.749	0.701	0.653	0.578
		0.16	1.000	0.972	0.932	0.891	0.848	0.804	0.758	0.711	0.662	0.586
		0.20	1.000	0.973	0.935	0.896	0.854	0.811	0.766	0.719	0.670	0.593
	RC50	0.04	1.000	0.952	0.894	0.839	0.785	0.733	0.683	0.635	0.589	0.521
		0.08	1.000	0.956	0.904	0.853	0.802	0.753	0.704	0.656	0.610	0.539
		0.12	1.000	0.959	0.910	0.861	0.813	0.764	0.717	0.669	0.622	0.550
		0.16	1.000	0.961	0.914	0.867	0.820	0.773	0.726	0.678	0.631	0.558
		0.20	1.000	0.962	0.917	0.872	0.826	0.780	0.733	0.686	0.638	0.564

续表 C.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q355、 Q355GJ	RC30	0.04	0.509	0.445	0.393	0.349	0.313	0.281	0.255	0.231	0.211	0.194
		0.08	0.527	0.461	0.407	0.362	0.324	0.291	0.264	0.240	0.219	0.201
		0.12	0.538	0.470	0.415	0.369	0.330	0.297	0.269	0.244	0.223	0.205
		0.16	0.545	0.477	0.421	0.374	0.335	0.302	0.273	0.248	0.226	0.208
		0.20	0.551	0.483	0.426	0.379	0.339	0.305	0.276	0.251	0.229	0.210
	RC40	0.04	0.474	0.415	0.366	0.325	0.291	0.262	0.237	0.216	0.197	0.180
		0.08	0.491	0.429	0.379	0.337	0.301	0.271	0.245	0.223	0.204	0.187
		0.12	0.501	0.438	0.387	0.344	0.308	0.277	0.250	0.228	0.208	0.191
		0.16	0.508	0.445	0.392	0.349	0.312	0.281	0.254	0.231	0.211	0.193
		0.20	0.514	0.449	0.397	0.353	0.316	0.284	0.257	0.234	0.213	0.196
	RC50	0.04	0.451	0.395	0.349	0.310	0.277	0.250	0.226	0.205	0.187	0.172
		0.08	0.467	0.409	0.361	0.321	0.287	0.258	0.234	0.213	0.194	0.178
		0.12	0.477	0.417	0.368	0.327	0.293	0.264	0.239	0.217	0.198	0.182
		0.16	0.484	0.423	0.374	0.332	0.297	0.268	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.20	0.489	0.428	0.378	0.336	0.301	0.271	0.245	0.223	0.203	0.186
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q390、 Q390GJ	RC30	0.04	1.000	0.981	0.943	0.901	0.858	0.812	0.763	0.712	0.650	0.557
		0.08	1.000	0.985	0.953	0.918	0.878	0.835	0.788	0.737	0.673	0.577
		0.12	1.000	0.987	0.960	0.927	0.891	0.849	0.803	0.752	0.686	0.589
		0.16	1.000	0.989	0.964	0.935	0.900	0.859	0.813	0.762	0.696	0.597
		0.20	1.000	0.990	0.968	0.940	0.907	0.867	0.822	0.771	0.704	0.604
	RC40	0.04	1.000	0.965	0.915	0.865	0.815	0.765	0.714	0.664	0.605	0.519
		0.08	1.000	0.969	0.926	0.881	0.834	0.787	0.738	0.687	0.627	0.537
		0.12	1.000	0.972	0.932	0.890	0.846	0.800	0.751	0.701	0.639	0.548
		0.16	1.000	0.974	0.937	0.897	0.855	0.809	0.761	0.711	0.649	0.556
		0.20	1.000	0.976	0.941	0.903	0.861	0.817	0.769	0.719	0.656	0.562
	RC50	0.04	1.000	0.953	0.896	0.841	0.787	0.734	0.683	0.633	0.576	0.494
		0.08	1.000	0.958	0.907	0.856	0.806	0.755	0.705	0.655	0.597	0.512
		0.12	1.000	0.961	0.913	0.865	0.817	0.768	0.718	0.668	0.609	0.522
		0.16	1.000	0.963	0.918	0.872	0.825	0.777	0.728	0.678	0.618	0.530
		0.20	1.000	0.965	0.922	0.877	0.831	0.784	0.735	0.685	0.625	0.536
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q390、 Q390GJ	RC30	0.04	0.483	0.423	0.373	0.332	0.297	0.267	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.08	0.500	0.437	0.386	0.343	0.307	0.276	0.250	0.227	0.208	0.190
		0.12	0.510	0.446	0.394	0.350	0.313	0.282	0.255	0.232	0.212	0.194
		0.16	0.518	0.453	0.400	0.355	0.318	0.286	0.259	0.235	0.215	0.197
		0.20	0.523	0.458	0.404	0.359	0.321	0.289	0.262	0.238	0.217	0.199
	RC40	0.04	0.450	0.394	0.347	0.309	0.276	0.249	0.225	0.205	0.187	0.171
		0.08	0.466	0.407	0.360	0.320	0.286	0.257	0.233	0.212	0.193	0.177
		0.12	0.475	0.416	0.367	0.326	0.292	0.263	0.238	0.216	0.197	0.181
		0.16	0.482	0.422	0.372	0.331	0.296	0.267	0.241	0.219	0.200	0.184
		0.20	0.487	0.427	0.376	0.335	0.299	0.270	0.244	0.222	0.202	0.186
	RC50	0.04	0.428	0.375	0.331	0.294	0.263	0.237	0.214	0.195	0.178	0.163
		0.08	0.444	0.388	0.343	0.304	0.272	0.245	0.222	0.202	0.184	0.169
		0.12	0.453	0.396	0.350	0.311	0.278	0.250	0.226	0.206	0.188	0.172
		0.16	0.459	0.402	0.355	0.315	0.282	0.254	0.230	0.209	0.191	0.175
		0.20	0.464	0.406	0.359	0.319	0.285	0.257	0.232	0.211	0.193	0.177

续表 C.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q420、 Q420GJ	RC30	0.04	1.000	0.982	0.945	0.904	0.861	0.814	0.763	0.710	0.629	0.539
		0.08	1.000	0.986	0.956	0.922	0.882	0.838	0.789	0.735	0.651	0.558
		0.12	1.000	0.989	0.963	0.932	0.895	0.852	0.804	0.750	0.664	0.569
		0.16	1.000	0.991	0.968	0.939	0.904	0.863	0.815	0.760	0.674	0.578
		0.20	1.000	0.992	0.972	0.945	0.912	0.871	0.823	0.769	0.681	0.584
	RC40	0.04	1.000	0.966	0.917	0.867	0.816	0.765	0.714	0.662	0.586	0.502
		0.08	1.000	0.971	0.928	0.883	0.837	0.788	0.737	0.685	0.606	0.520
		0.12	1.000	0.974	0.935	0.893	0.849	0.802	0.752	0.699	0.619	0.530
		0.16	1.000	0.976	0.940	0.901	0.858	0.812	0.762	0.709	0.628	0.538
		0.20	1.000	0.978	0.944	0.906	0.865	0.819	0.770	0.717	0.635	0.544
	RC50	0.04	1.000	0.953	0.897	0.842	0.787	0.734	0.682	0.630	0.558	0.478
		0.08	1.000	0.958	0.908	0.858	0.807	0.756	0.704	0.652	0.577	0.495
		0.12	1.000	0.962	0.915	0.867	0.819	0.769	0.718	0.666	0.589	0.505
		0.16	1.000	0.964	0.920	0.874	0.827	0.778	0.727	0.675	0.598	0.513
		0.20	1.000	0.966	0.924	0.880	0.834	0.786	0.735	0.683	0.605	0.518
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q420、 Q420GJ	RC30	0.04	0.467	0.409	0.361	0.321	0.287	0.258	0.234	0.213	0.194	0.178
		0.08	0.484	0.423	0.374	0.332	0.297	0.267	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.12	0.494	0.432	0.381	0.339	0.303	0.273	0.247	0.225	0.205	0.188
		0.16	0.501	0.438	0.387	0.344	0.308	0.277	0.251	0.228	0.208	0.191
		0.20	0.506	0.443	0.391	0.348	0.311	0.280	0.253	0.230	0.210	0.193
	RC40	0.04	0.435	0.381	0.336	0.299	0.267	0.241	0.218	0.198	0.181	0.166
		0.08	0.451	0.394	0.348	0.309	0.277	0.249	0.225	0.205	0.187	0.172
		0.12	0.460	0.402	0.355	0.316	0.282	0.254	0.230	0.209	0.191	0.175
		0.16	0.466	0.408	0.360	0.320	0.287	0.258	0.233	0.212	0.194	0.178
		0.20	0.472	0.413	0.364	0.324	0.290	0.261	0.236	0.215	0.196	0.180
	RC50	0.04	0.415	0.363	0.320	0.285	0.255	0.229	0.207	0.189	0.172	0.158
		0.08	0.429	0.376	0.331	0.295	0.264	0.237	0.215	0.195	0.178	0.163
		0.12	0.438	0.383	0.338	0.301	0.269	0.242	0.219	0.199	0.182	0.167
		0.16	0.444	0.389	0.343	0.305	0.273	0.246	0.222	0.202	0.185	0.169
		0.20	0.449	0.393	0.347	0.308	0.276	0.248	0.225	0.204	0.187	0.171
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q460、 Q460GJ	RC30	0.04	1.000	0.983	0.948	0.907	0.863	0.814	0.762	0.704	0.603	0.517
		0.08	1.000	0.988	0.960	0.926	0.886	0.840	0.787	0.729	0.624	0.535
		0.12	1.000	0.990	0.967	0.937	0.899	0.855	0.803	0.744	0.637	0.546
		0.16	1.000	0.992	0.973	0.945	0.909	0.866	0.814	0.755	0.646	0.554
		0.20	1.000	0.994	0.977	0.951	0.917	0.874	0.823	0.763	0.653	0.560
	RC40	0.04	1.000	0.967	0.918	0.868	0.817	0.765	0.711	0.656	0.561	0.481
		0.08	1.000	0.972	0.930	0.886	0.838	0.788	0.735	0.679	0.581	0.498
		0.12	1.000	0.975	0.938	0.896	0.851	0.802	0.750	0.693	0.593	0.509
		0.16	1.000	0.977	0.943	0.904	0.861	0.813	0.760	0.703	0.602	0.516
		0.20	1.000	0.979	0.947	0.910	0.868	0.821	0.768	0.711	0.609	0.522
	RC50	0.04	1.000	0.954	0.898	0.842	0.787	0.732	0.678	0.625	0.535	0.459
		0.08	1.000	0.959	0.910	0.859	0.807	0.755	0.701	0.647	0.554	0.475
		0.12	1.000	0.963	0.917	0.869	0.820	0.768	0.715	0.660	0.565	0.484
		0.16	1.000	0.965	0.922	0.877	0.829	0.778	0.725	0.670	0.573	0.491
		0.20	1.000	0.967	0.926	0.883	0.836	0.786	0.733	0.677	0.580	0.497

续表 C.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q460、 Q460GJ	RC30	0.04	0.448	0.392	0.346	0.308	0.275	0.248	0.224	0.204	0.186	0.171
		0.08	0.464	0.406	0.358	0.318	0.285	0.256	0.232	0.211	0.193	0.177
		0.12	0.473	0.414	0.365	0.325	0.291	0.262	0.237	0.215	0.197	0.180
		0.16	0.480	0.420	0.371	0.330	0.295	0.265	0.240	0.218	0.199	0.183
		0.20	0.486	0.425	0.375	0.333	0.298	0.268	0.243	0.221	0.202	0.185
	RC40	0.04	0.417	0.365	0.322	0.286	0.256	0.231	0.209	0.190	0.173	0.159
		0.08	0.432	0.378	0.334	0.297	0.265	0.239	0.216	0.196	0.179	0.164
		0.12	0.441	0.386	0.340	0.303	0.271	0.244	0.221	0.201	0.183	0.168
		0.16	0.447	0.391	0.345	0.307	0.275	0.247	0.224	0.203	0.186	0.170
		0.20	0.452	0.396	0.349	0.310	0.278	0.250	0.226	0.206	0.188	0.172
	RC50	0.04	0.397	0.348	0.307	0.273	0.244	0.220	0.199	0.181	0.165	0.151
		0.08	0.411	0.360	0.318	0.282	0.253	0.228	0.206	0.187	0.171	0.157
		0.12	0.420	0.367	0.324	0.288	0.258	0.232	0.210	0.191	0.174	0.160
		0.16	0.426	0.373	0.329	0.292	0.262	0.236	0.213	0.194	0.177	0.162
		0.20	0.431	0.377	0.333	0.296	0.265	0.238	0.216	0.196	0.179	0.164
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q500、 Q500GJ	RC30	0.04	1.000	0.984	0.950	0.910	0.865	0.814	0.758	0.685	0.580	0.497
		0.08	0.431	0.377	0.333	0.296	0.265	0.238	0.216	0.196	0.179	0.164
		0.12	1.000	0.989	0.963	0.929	0.888	0.840	0.785	0.709	0.600	0.515
		0.16	0.446	0.390	0.344	0.306	0.274	0.247	0.223	0.203	0.185	0.170
		0.20	1.000	0.992	0.971	0.941	0.903	0.856	0.800	0.724	0.613	0.525
	RC40	0.04	0.455	0.398	0.352	0.313	0.280	0.252	0.228	0.207	0.189	0.173
		0.08	1.000	0.994	0.976	0.949	0.913	0.867	0.812	0.734	0.621	0.533
		0.12	0.462	0.404	0.357	0.317	0.284	0.255	0.231	0.210	0.192	0.176
		0.16	1.000	0.996	0.981	0.956	0.921	0.876	0.821	0.742	0.628	0.539
		0.20	0.467	0.409	0.361	0.321	0.287	0.258	0.234	0.212	0.194	0.178
	RC50	0.04	1.000	0.967	0.919	0.869	0.817	0.763	0.707	0.637	0.539	0.462
		0.08	0.401	0.351	0.310	0.275	0.246	0.222	0.201	0.182	0.166	0.153
		0.12	1.000	0.973	0.932	0.887	0.839	0.787	0.731	0.660	0.558	0.479
		0.16	0.415	0.363	0.320	0.285	0.255	0.229	0.208	0.189	0.172	0.158
		0.20	1.000	0.976	0.940	0.898	0.852	0.801	0.746	0.673	0.570	0.489
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q500、 Q500GJ	RC30	0.04	0.424	0.371	0.327	0.291	0.260	0.234	0.212	0.193	0.176	0.161
		0.08	1.000	0.979	0.945	0.906	0.862	0.812	0.756	0.683	0.578	0.496
		0.12	0.430	0.376	0.332	0.295	0.264	0.238	0.215	0.195	0.178	0.164
		0.16	1.000	0.981	0.950	0.913	0.869	0.820	0.764	0.691	0.585	0.501
		0.20	0.434	0.380	0.336	0.298	0.267	0.240	0.217	0.198	0.180	0.165
	RC40	0.04	1.000	0.951	0.894	0.837	0.780	0.724	0.668	0.602	0.509	0.437
		0.08	0.379	0.331	0.292	0.260	0.233	0.209	0.189	0.172	0.157	0.144
		0.12	1.000	0.957	0.906	0.854	0.801	0.747	0.691	0.623	0.527	0.452
		0.16	0.392	0.343	0.303	0.269	0.241	0.217	0.196	0.178	0.163	0.149
		0.20	1.000	0.961	0.914	0.865	0.814	0.760	0.705	0.636	0.538	0.461
	RC50	0.04	0.400	0.350	0.309	0.275	0.246	0.221	0.200	0.182	0.166	0.152
		0.08	1.000	0.964	0.920	0.873	0.823	0.770	0.715	0.645	0.546	0.468
		0.12	0.406	0.355	0.313	0.279	0.249	0.224	0.203	0.185	0.168	0.154
		0.16	1.000	0.966	0.924	0.879	0.830	0.778	0.723	0.652	0.552	0.473
		0.20	0.410	0.359	0.317	0.282	0.252	0.227	0.205	0.187	0.170	0.156

续表 C.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q550、 Q550GJ	RC30	0.04	1.000	0.985	0.951	0.911	0.864	0.810	0.750	0.653	0.553	0.474
		0.08	0.411	0.359	0.317	0.282	0.252	0.227	0.205	0.187	0.171	0.156
		0.12	1.000	0.990	0.965	0.931	0.888	0.837	0.777	0.676	0.572	0.491
		0.16	0.425	0.372	0.328	0.292	0.261	0.235	0.213	0.193	0.177	0.162
		0.20	1.000	0.993	0.973	0.943	0.903	0.853	0.793	0.690	0.584	0.501
	RC40	0.04	0.434	0.380	0.335	0.298	0.267	0.240	0.217	0.197	0.180	0.165
		0.08	1.000	0.996	0.980	0.952	0.914	0.864	0.804	0.700	0.592	0.508
		0.12	0.440	0.385	0.340	0.302	0.270	0.243	0.220	0.200	0.183	0.168
		0.16	1.000	0.998	0.984	0.959	0.922	0.874	0.813	0.708	0.599	0.514
		0.20	0.445	0.390	0.344	0.306	0.273	0.246	0.223	0.202	0.185	0.169
	RC50	0.04	1.000	0.967	0.919	0.868	0.814	0.758	0.699	0.607	0.514	0.441
		0.08	0.382	0.334	0.295	0.262	0.235	0.211	0.191	0.174	0.159	0.145
		0.12	1.000	0.973	0.933	0.887	0.837	0.782	0.723	0.629	0.532	0.456
		0.16	0.396	0.346	0.305	0.272	0.243	0.219	0.198	0.180	0.164	0.151
		0.20	1.000	0.977	0.941	0.899	0.851	0.797	0.738	0.642	0.543	0.466
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q550、 Q550GJ	RC30	0.04	0.404	0.353	0.312	0.277	0.248	0.223	0.202	0.184	0.168	0.154
		0.08	1.000	0.980	0.947	0.907	0.861	0.808	0.748	0.651	0.551	0.472
		0.12	0.410	0.358	0.316	0.281	0.252	0.226	0.205	0.186	0.170	0.156
		0.16	1.000	0.982	0.952	0.914	0.869	0.816	0.757	0.658	0.557	0.478
		0.20	0.414	0.362	0.320	0.284	0.254	0.229	0.207	0.188	0.172	0.158
	RC40	0.04	1.000	0.951	0.893	0.834	0.776	0.718	0.660	0.574	0.486	0.416
		0.08	0.361	0.316	0.279	0.248	0.222	0.200	0.181	0.164	0.150	0.137
		0.12	1.000	0.957	0.906	0.853	0.798	0.741	0.683	0.594	0.503	0.431
		0.16	0.374	0.327	0.288	0.256	0.229	0.207	0.187	0.170	0.155	0.142
		0.20	1.000	0.961	0.914	0.864	0.811	0.756	0.697	0.606	0.513	0.440
	RC50	0.04	0.381	0.334	0.294	0.262	0.234	0.211	0.191	0.173	0.158	0.145
		0.08	1.000	0.964	0.920	0.872	0.821	0.766	0.707	0.615	0.520	0.446
		0.12	0.387	0.338	0.299	0.265	0.238	0.214	0.193	0.176	0.161	0.147
		0.16	1.000	0.967	0.925	0.879	0.828	0.774	0.715	0.622	0.526	0.451
		0.20	0.391	0.342	0.302	0.268	0.240	0.216	0.196	0.178	0.162	0.149
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q620、 Q620GJ	RC30	0.04	1.000	0.985	0.951	0.909	0.859	0.801	0.735	0.613	0.519	0.445
		0.08	0.385	0.337	0.298	0.265	0.237	0.213	0.193	0.175	0.160	0.147
		0.12	1.000	0.991	0.966	0.931	0.885	0.828	0.761	0.634	0.537	0.460
		0.16	0.399	0.349	0.308	0.274	0.245	0.221	0.200	0.181	0.166	0.152
		0.20	1.000	0.995	0.975	0.944	0.900	0.844	0.776	0.647	0.548	0.470
	RC40	0.04	0.407	0.356	0.314	0.280	0.250	0.225	0.204	0.185	0.169	0.155
		0.08	1.000	0.997	0.982	0.953	0.911	0.856	0.788	0.657	0.556	0.476
		0.12	0.413	0.361	0.319	0.284	0.254	0.228	0.207	0.188	0.172	0.157
		0.16	1.000	0.999	0.987	0.961	0.920	0.865	0.796	0.664	0.562	0.482
		0.20	0.418	0.366	0.323	0.287	0.257	0.231	0.209	0.190	0.173	0.159
	RC50	0.04	1.000	0.967	0.917	0.864	0.807	0.747	0.684	0.570	0.482	0.414
		0.08	0.359	0.314	0.277	0.246	0.220	0.198	0.179	0.163	0.149	0.136
		0.12	1.000	0.973	0.932	0.884	0.831	0.772	0.708	0.590	0.499	0.428
		0.16	0.371	0.325	0.287	0.255	0.228	0.205	0.186	0.169	0.154	0.141
		0.20	1.000	0.977	0.941	0.897	0.846	0.788	0.722	0.602	0.510	0.437

续表 C.0.1

钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q620、 Q620GJ	RC30	0.04	0.379	0.331	0.293	0.260	0.233	0.209	0.189	0.172	0.157	0.144
		0.08	1.000	0.980	0.947	0.906	0.856	0.799	0.733	0.611	0.517	0.443
		0.12	0.384	0.336	0.297	0.264	0.236	0.212	0.192	0.175	0.160	0.146
		0.16	1.000	0.983	0.952	0.913	0.864	0.807	0.741	0.618	0.523	0.448
		0.20	0.389	0.340	0.300	0.267	0.239	0.215	0.194	0.177	0.161	0.148
	RC40	0.04	1.000	0.949	0.889	0.829	0.768	0.707	0.646	0.538	0.456	0.391
		0.08	0.339	0.296	0.261	0.232	0.208	0.187	0.169	0.154	0.141	0.129
		0.12	1.000	0.957	0.904	0.849	0.791	0.731	0.668	0.557	0.472	0.404
		0.16	0.350	0.307	0.271	0.241	0.215	0.194	0.175	0.159	0.146	0.133
		0.20	1.000	0.961	0.913	0.860	0.805	0.745	0.682	0.569	0.481	0.413
	RC50	0.04	0.358	0.313	0.276	0.246	0.220	0.198	0.179	0.163	0.149	0.136
		0.08	1.000	0.964	0.919	0.869	0.815	0.756	0.692	0.577	0.488	0.419
		0.12	0.363	0.318	0.280	0.249	0.223	0.201	0.182	0.165	0.151	0.138
		0.16	1.000	0.967	0.924	0.876	0.822	0.764	0.700	0.583	0.494	0.423
		0.20	0.367	0.321	0.283	0.252	0.225	0.203	0.184	0.167	0.152	0.140
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q690、 Q690GJ	RC30	0.04	1.000	0.985	0.949	0.904	0.850	0.787	0.692	0.577	0.488	0.418
		0.08	0.363	0.317	0.280	0.249	0.223	0.201	0.181	0.165	0.151	0.138
		0.12	1.000	0.991	0.965	0.927	0.877	0.814	0.716	0.597	0.505	0.433
		0.16	0.376	0.329	0.290	0.258	0.231	0.208	0.188	0.171	0.156	0.143
		0.20	1.000	0.995	0.974	0.940	0.892	0.831	0.731	0.609	0.516	0.442
	RC40	0.04	0.383	0.335	0.296	0.263	0.235	0.212	0.192	0.174	0.159	0.146
		0.08	1.000	0.998	0.981	0.950	0.904	0.843	0.741	0.618	0.523	0.448
		0.12	0.389	0.340	0.300	0.267	0.239	0.215	0.194	0.177	0.161	0.148
		0.16	1.000	1.000	0.987	0.958	0.913	0.852	0.750	0.625	0.529	0.454
		0.20	0.393	0.344	0.304	0.270	0.242	0.217	0.197	0.179	0.163	0.150
	RC50	0.04	1.000	0.965	0.913	0.857	0.797	0.733	0.644	0.537	0.454	0.389
		0.08	0.337	0.295	0.261	0.232	0.207	0.187	0.169	0.153	0.140	0.128
		0.12	1.000	0.972	0.929	0.878	0.822	0.759	0.666	0.555	0.470	0.403
		0.16	0.349	0.306	0.270	0.240	0.215	0.193	0.175	0.159	0.145	0.133
		0.20	1.000	0.977	0.938	0.891	0.837	0.774	0.680	0.567	0.480	0.411
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q690、 Q690GJ	RC30	0.04	0.357	0.312	0.275	0.245	0.219	0.197	0.178	0.162	0.148	0.136
		0.08	1.000	0.980	0.945	0.901	0.847	0.785	0.690	0.575	0.487	0.417
		0.12	0.362	0.317	0.279	0.248	0.222	0.200	0.181	0.165	0.150	0.138
		0.16	1.000	0.983	0.950	0.908	0.856	0.793	0.697	0.581	0.492	0.422
		0.20	0.366	0.320	0.282	0.251	0.225	0.202	0.183	0.166	0.152	0.139
	RC40	0.04	1.000	0.947	0.884	0.821	0.757	0.693	0.608	0.507	0.429	0.368
		0.08	0.319	0.279	0.246	0.219	0.196	0.176	0.159	0.145	0.132	0.121
		0.12	1.000	0.955	0.899	0.841	0.780	0.717	0.629	0.524	0.444	0.381
		0.16	0.330	0.289	0.255	0.226	0.203	0.182	0.165	0.150	0.137	0.126
		0.20	1.000	0.959	0.909	0.854	0.795	0.731	0.642	0.535	0.453	0.388
	RC50	0.04	0.337	0.295	0.260	0.231	0.207	0.186	0.168	0.153	0.140	0.128
		0.08	1.000	0.963	0.915	0.863	0.805	0.742	0.651	0.543	0.460	0.394
		0.12	0.342	0.299	0.264	0.234	0.210	0.189	0.171	0.155	0.142	0.130
		0.16	1.000	0.966	0.921	0.870	0.813	0.750	0.659	0.549	0.465	0.398
		0.20	0.345	0.302	0.267	0.237	0.212	0.191	0.173	0.157	0.143	0.131

注：表内中间值按线性内插法确定。

C.0.2 矩形钢管再生混凝土构件的稳定系数 ϕ 值可按表 C.0.2 选取。

表 C.0.2 矩形钢管再生混凝土构件的稳定系数 ϕ 值

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q235、 Q235GJ	RC30	0.04	1.000	0.966	0.918	0.871	0.825	0.780	0.737	0.696	0.655	0.616
		0.08	1.000	0.968	0.924	0.881	0.838	0.797	0.756	0.715	0.676	0.637
		0.12	1.000	0.969	0.928	0.887	0.847	0.806	0.767	0.727	0.688	0.650
		0.16	1.000	0.970	0.931	0.892	0.853	0.814	0.775	0.736	0.697	0.659
		0.20	1.000	0.971	0.933	0.895	0.857	0.819	0.781	0.743	0.704	0.666
	RC40	0.04	1.000	0.951	0.896	0.843	0.793	0.745	0.699	0.656	0.615	0.576
		0.08	1.000	0.954	0.903	0.854	0.806	0.760	0.716	0.674	0.634	0.595
		0.12	1.000	0.955	0.907	0.860	0.814	0.770	0.727	0.685	0.645	0.607
		0.16	1.000	0.956	0.909	0.864	0.820	0.776	0.734	0.693	0.654	0.615
		0.20	1.000	0.957	0.912	0.867	0.824	0.782	0.740	0.700	0.660	0.622
	RC50	0.04	1.000	0.941	0.882	0.826	0.772	0.722	0.674	0.630	0.588	0.550
		0.08	1.000	0.944	0.888	0.835	0.785	0.737	0.691	0.648	0.607	0.568
		0.12	1.000	0.945	0.892	0.841	0.792	0.746	0.701	0.658	0.618	0.579
		0.16	1.000	0.946	0.895	0.846	0.798	0.752	0.708	0.666	0.626	0.587
		0.20	0.999	0.947	0.897	0.849	0.802	0.757	0.714	0.672	0.632	0.593
Q235、 Q235GJ	RC30	0.04	0.579	0.536	0.473	0.421	0.376	0.339	0.306	0.279	0.254	0.233
		0.08	0.599	0.555	0.490	0.435	0.390	0.351	0.317	0.288	0.263	0.241
		0.12	0.611	0.566	0.500	0.444	0.398	0.358	0.324	0.294	0.269	0.246
		0.16	0.620	0.575	0.507	0.451	0.403	0.363	0.328	0.299	0.273	0.250
		0.20	0.627	0.581	0.513	0.456	0.408	0.367	0.332	0.302	0.276	0.253
	RC40	0.04	0.540	0.499	0.441	0.392	0.351	0.316	0.285	0.260	0.237	0.217
		0.08	0.558	0.517	0.456	0.406	0.363	0.327	0.296	0.269	0.245	0.225
		0.12	0.570	0.528	0.466	0.414	0.370	0.333	0.302	0.274	0.250	0.230
		0.16	0.578	0.535	0.472	0.420	0.376	0.338	0.306	0.278	0.254	0.233
		0.20	0.584	0.541	0.478	0.425	0.380	0.342	0.309	0.281	0.257	0.235
	RC50	0.04	0.514	0.476	0.420	0.373	0.334	0.301	0.272	0.247	0.226	0.207
		0.08	0.532	0.492	0.435	0.386	0.346	0.311	0.282	0.256	0.234	0.214
		0.12	0.543	0.503	0.443	0.394	0.353	0.318	0.287	0.261	0.238	0.219
		0.16	0.551	0.510	0.450	0.400	0.358	0.322	0.291	0.265	0.242	0.222
		0.20	0.557	0.516	0.455	0.404	0.362	0.326	0.295	0.268	0.245	0.224
Q355、 Q355GJ	RC30	0.04	1.000	0.972	0.932	0.891	0.848	0.805	0.761	0.715	0.669	0.610
		0.08	1.000	0.976	0.942	0.905	0.867	0.826	0.784	0.739	0.692	0.632
		0.12	1.000	0.978	0.948	0.914	0.878	0.839	0.798	0.753	0.706	0.644
		0.16	1.000	0.980	0.952	0.921	0.886	0.848	0.808	0.763	0.716	0.654
		0.20	1.000	0.982	0.955	0.926	0.893	0.856	0.815	0.772	0.724	0.661
	RC40	0.04	1.000	0.956	0.907	0.858	0.809	0.762	0.715	0.669	0.623	0.568
		0.08	1.000	0.960	0.916	0.872	0.827	0.782	0.736	0.691	0.645	0.588
		0.12	1.000	0.963	0.922	0.880	0.837	0.794	0.749	0.704	0.658	0.600
		0.16	1.000	0.965	0.926	0.886	0.845	0.802	0.759	0.714	0.668	0.609
		0.20	1.000	0.966	0.930	0.891	0.851	0.809	0.766	0.721	0.675	0.616
	RC50	0.04	1.000	0.945	0.889	0.836	0.784	0.734	0.685	0.639	0.594	0.541
		0.08	1.000	0.949	0.899	0.849	0.800	0.753	0.706	0.660	0.615	0.560
		0.12	1.000	0.952	0.904	0.857	0.811	0.764	0.718	0.673	0.627	0.572
		0.16	0.999	0.954	0.908	0.863	0.818	0.772	0.727	0.682	0.636	0.580
		0.20	0.999	0.955	0.912	0.868	0.824	0.779	0.734	0.689	0.643	0.587

续表 C.0.2

钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q355、 Q355GJ	RC30	0.04	0.04	0.529	0.463	0.408	0.363	0.325	0.292	0.265	0.241	0.220
		0.08	0.08	0.547	0.479	0.423	0.376	0.336	0.303	0.274	0.249	0.227
		0.12	0.12	0.559	0.489	0.431	0.384	0.343	0.309	0.279	0.254	0.232
		0.16	0.16	0.567	0.496	0.438	0.389	0.348	0.313	0.284	0.258	0.235
		0.20	0.20	0.573	0.502	0.443	0.393	0.352	0.317	0.287	0.261	0.238
	RC40	0.04	0.04	0.493	0.431	0.380	0.338	0.303	0.272	0.246	0.224	0.205
		0.08	0.08	0.510	0.446	0.394	0.350	0.313	0.282	0.255	0.232	0.212
		0.12	0.12	0.520	0.455	0.402	0.357	0.320	0.288	0.260	0.237	0.216
		0.16	0.16	0.528	0.462	0.408	0.362	0.324	0.292	0.264	0.240	0.219
		0.20	0.20	0.534	0.467	0.412	0.366	0.328	0.295	0.267	0.243	0.222
	RC50	0.04	0.04	0.469	0.411	0.362	0.322	0.288	0.259	0.235	0.213	0.195
		0.08	0.08	0.486	0.425	0.375	0.333	0.298	0.269	0.243	0.221	0.202
		0.12	0.12	0.496	0.434	0.383	0.340	0.304	0.274	0.248	0.225	0.206
		0.16	0.16	0.503	0.440	0.388	0.345	0.309	0.278	0.252	0.229	0.209
		0.20	0.20	0.508	0.445	0.393	0.349	0.312	0.281	0.254	0.231	0.211
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q390、 Q390GJ	RC30	0.04	1.000	0.975	0.937	0.897	0.855	0.811	0.765	0.717	0.666	0.579
		0.08	1.000	0.979	0.948	0.913	0.875	0.834	0.789	0.741	0.690	0.600
		0.12	1.000	0.982	0.954	0.923	0.887	0.848	0.804	0.756	0.704	0.612
		0.16	1.000	0.984	0.959	0.930	0.896	0.858	0.814	0.767	0.714	0.621
		0.20	1.000	0.986	0.963	0.936	0.903	0.865	0.823	0.775	0.722	0.628
	RC40	0.04	1.000	0.958	0.910	0.862	0.814	0.766	0.717	0.669	0.621	0.539
		0.08	1.000	0.963	0.921	0.877	0.833	0.787	0.740	0.692	0.643	0.559
		0.12	1.000	0.966	0.927	0.886	0.844	0.800	0.754	0.706	0.656	0.570
		0.16	1.000	0.968	0.932	0.893	0.852	0.809	0.763	0.715	0.665	0.578
		0.20	1.000	0.970	0.936	0.898	0.859	0.816	0.771	0.723	0.673	0.585
	RC50	0.04	1.000	0.946	0.892	0.838	0.786	0.736	0.686	0.638	0.591	0.514
		0.08	1.000	0.951	0.902	0.853	0.804	0.756	0.708	0.660	0.612	0.532
		0.12	0.999	0.954	0.908	0.862	0.815	0.768	0.721	0.673	0.625	0.543
		0.16	0.999	0.956	0.913	0.869	0.823	0.777	0.730	0.682	0.634	0.551
		0.20	0.998	0.958	0.916	0.874	0.830	0.784	0.738	0.690	0.641	0.557
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q390、 Q390GJ	RC30	0.04	0.502	0.439	0.388	0.345	0.308	0.278	0.251	0.228	0.209	0.191
		0.08	0.520	0.455	0.401	0.357	0.319	0.287	0.260	0.236	0.216	0.198
		0.12	0.530	0.464	0.410	0.364	0.326	0.293	0.265	0.241	0.220	0.202
		0.16	0.538	0.471	0.416	0.369	0.331	0.298	0.269	0.245	0.223	0.205
		0.20	0.544	0.476	0.420	0.374	0.334	0.301	0.272	0.247	0.226	0.207
	RC40	0.04	0.468	0.409	0.361	0.321	0.287	0.259	0.234	0.213	0.194	0.178
		0.08	0.484	0.424	0.374	0.332	0.297	0.268	0.242	0.220	0.201	0.184
		0.12	0.494	0.432	0.382	0.339	0.304	0.273	0.247	0.225	0.205	0.188
		0.16	0.501	0.439	0.387	0.344	0.308	0.277	0.251	0.228	0.208	0.191
		0.20	0.507	0.444	0.391	0.348	0.311	0.280	0.254	0.231	0.210	0.193
	RC50	0.04	0.445	0.390	0.344	0.306	0.274	0.246	0.223	0.203	0.185	0.170
		0.08	0.461	0.404	0.356	0.317	0.283	0.255	0.231	0.210	0.192	0.176
		0.12	0.471	0.412	0.363	0.323	0.289	0.260	0.235	0.214	0.195	0.179
		0.16	0.477	0.418	0.369	0.328	0.293	0.264	0.239	0.217	0.198	0.182
		0.20	0.483	0.422	0.373	0.331	0.297	0.267	0.242	0.220	0.200	0.184

续表 C.0.2

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q420、 Q420GJ	RC30	0.04	1.000	0.976	0.940	0.901	0.859	0.814	0.766	0.716	0.654	0.561
		0.08	1.000	0.981	0.951	0.918	0.880	0.838	0.791	0.741	0.677	0.580
		0.12	1.000	0.984	0.958	0.928	0.892	0.852	0.806	0.755	0.691	0.592
		0.16	1.000	0.986	0.964	0.935	0.902	0.862	0.817	0.766	0.701	0.601
		0.20	1.000	0.988	0.968	0.941	0.909	0.870	0.825	0.775	0.709	0.607
	RC40	0.04	1.000	0.959	0.912	0.864	0.816	0.767	0.717	0.667	0.609	0.522
		0.08	1.000	0.964	0.923	0.880	0.835	0.789	0.741	0.691	0.630	0.541
		0.12	1.000	0.967	0.930	0.890	0.847	0.802	0.755	0.704	0.643	0.552
		0.16	1.000	0.970	0.935	0.897	0.856	0.812	0.765	0.714	0.653	0.560
		0.20	1.000	0.972	0.939	0.903	0.863	0.819	0.773	0.722	0.660	0.566
	RC50	0.04	1.000	0.947	0.893	0.840	0.787	0.736	0.686	0.636	0.580	0.497
		0.08	1.000	0.952	0.904	0.855	0.806	0.757	0.708	0.658	0.601	0.515
		0.12	0.999	0.955	0.910	0.865	0.818	0.770	0.721	0.671	0.613	0.525
		0.16	0.999	0.958	0.915	0.871	0.826	0.779	0.731	0.681	0.622	0.533
		0.20	0.998	0.960	0.919	0.877	0.832	0.786	0.738	0.689	0.629	0.539
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q420、 Q420GJ	RC30	0.04	0.486	0.425	0.375	0.334	0.298	0.269	0.243	0.221	0.202	0.185
		0.08	0.503	0.440	0.388	0.345	0.309	0.278	0.252	0.229	0.209	0.191
		0.12	0.513	0.449	0.396	0.352	0.315	0.284	0.257	0.233	0.213	0.195
		0.16	0.521	0.456	0.402	0.358	0.320	0.288	0.261	0.237	0.216	0.198
		0.20	0.527	0.461	0.407	0.362	0.323	0.291	0.263	0.240	0.219	0.200
	RC40	0.04	0.453	0.396	0.350	0.311	0.278	0.250	0.226	0.206	0.188	0.172
		0.08	0.469	0.410	0.362	0.322	0.288	0.259	0.234	0.213	0.195	0.178
		0.12	0.478	0.418	0.369	0.328	0.294	0.264	0.239	0.217	0.199	0.182
		0.16	0.485	0.424	0.375	0.333	0.298	0.268	0.243	0.221	0.201	0.185
		0.20	0.490	0.429	0.379	0.337	0.301	0.271	0.245	0.223	0.204	0.187
	RC50	0.04	0.431	0.377	0.333	0.296	0.265	0.238	0.216	0.196	0.179	0.164
		0.08	0.446	0.391	0.345	0.306	0.274	0.247	0.223	0.203	0.185	0.170
		0.12	0.455	0.399	0.352	0.313	0.280	0.252	0.228	0.207	0.189	0.173
		0.16	0.462	0.404	0.357	0.317	0.284	0.255	0.231	0.210	0.192	0.176
		0.20	0.467	0.409	0.361	0.321	0.287	0.258	0.234	0.213	0.194	0.178
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q460、 Q460GJ	RC30	0.04	1.000	0.977	0.943	0.904	0.862	0.816	0.766	0.712	0.627	0.538
		0.08	1.000	0.983	0.955	0.922	0.884	0.840	0.791	0.737	0.649	0.557
		0.12	1.000	0.986	0.963	0.933	0.897	0.855	0.807	0.752	0.662	0.568
		0.16	1.000	0.989	0.969	0.941	0.907	0.866	0.818	0.763	0.672	0.576
		0.20	1.000	0.991	0.973	0.948	0.915	0.874	0.827	0.771	0.680	0.583
	RC40	0.04	1.000	0.960	0.914	0.866	0.817	0.767	0.716	0.663	0.584	0.501
		0.08	1.000	0.966	0.926	0.883	0.838	0.790	0.740	0.687	0.605	0.518
		0.12	1.000	0.969	0.933	0.893	0.850	0.804	0.754	0.701	0.617	0.529
		0.16	1.000	0.972	0.939	0.901	0.859	0.814	0.764	0.711	0.626	0.537
		0.20	1.000	0.974	0.943	0.907	0.867	0.822	0.773	0.719	0.633	0.543
	RC50	0.04	1.000	0.947	0.894	0.840	0.788	0.735	0.683	0.632	0.556	0.477
		0.08	1.000	0.953	0.905	0.857	0.808	0.757	0.706	0.654	0.576	0.494
		0.12	0.999	0.957	0.913	0.867	0.820	0.771	0.720	0.668	0.588	0.504
		0.16	0.999	0.959	0.918	0.874	0.828	0.780	0.730	0.677	0.596	0.511
		0.20	0.998	0.962	0.922	0.880	0.835	0.788	0.738	0.685	0.603	0.517

续表 C.0.2

钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q460、 Q460GJ	RC30	0.04	0.466	0.408	0.360	0.320	0.286	0.258	0.233	0.212	0.194	0.177
		0.08	0.482	0.422	0.373	0.331	0.296	0.267	0.241	0.219	0.200	0.184
		0.12	0.492	0.431	0.380	0.338	0.302	0.272	0.246	0.224	0.204	0.187
		0.16	0.499	0.437	0.386	0.343	0.307	0.276	0.250	0.227	0.207	0.190
		0.20	0.505	0.442	0.390	0.347	0.310	0.279	0.253	0.230	0.210	0.192
	RC40	0.04	0.434	0.380	0.335	0.298	0.267	0.240	0.217	0.197	0.180	0.165
		0.08	0.449	0.393	0.347	0.309	0.276	0.248	0.225	0.204	0.187	0.171
		0.12	0.459	0.401	0.354	0.315	0.282	0.254	0.229	0.209	0.190	0.175
		0.16	0.465	0.407	0.359	0.319	0.286	0.257	0.233	0.212	0.193	0.177
		0.20	0.470	0.412	0.363	0.323	0.289	0.260	0.235	0.214	0.195	0.179
	RC50	0.04	0.413	0.362	0.319	0.284	0.254	0.229	0.207	0.188	0.172	0.157
		0.08	0.428	0.375	0.331	0.294	0.263	0.237	0.214	0.195	0.178	0.163
		0.12	0.437	0.382	0.337	0.300	0.268	0.242	0.219	0.199	0.181	0.166
		0.16	0.443	0.388	0.342	0.304	0.272	0.245	0.222	0.202	0.184	0.169
		0.20	0.448	0.392	0.346	0.308	0.275	0.248	0.224	0.204	0.186	0.171
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q500、 Q500GJ	RC30	0.04	1.000	0.979	0.946	0.908	0.865	0.817	0.764	0.707	0.603	0.517
		0.08	0.448	0.392	0.346	0.308	0.275	0.248	0.224	0.204	0.186	0.171
		0.12	1.000	0.985	0.959	0.927	0.888	0.842	0.790	0.732	0.625	0.535
		0.16	0.464	0.406	0.358	0.319	0.285	0.257	0.232	0.211	0.193	0.177
		0.20	1.000	0.988	0.967	0.938	0.902	0.857	0.806	0.747	0.637	0.546
	RC40	0.04	0.474	0.415	0.366	0.325	0.291	0.262	0.237	0.215	0.197	0.180
		0.08	1.000	0.991	0.973	0.947	0.912	0.869	0.817	0.757	0.647	0.554
		0.12	0.481	0.421	0.371	0.330	0.295	0.266	0.240	0.219	0.200	0.183
		0.16	1.000	0.994	0.978	0.953	0.920	0.877	0.826	0.766	0.654	0.561
		0.20	0.486	0.425	0.375	0.334	0.299	0.269	0.243	0.221	0.202	0.185
	RC50	0.04	1.000	0.961	0.915	0.867	0.817	0.766	0.713	0.657	0.561	0.481
		0.08	0.417	0.365	0.322	0.286	0.256	0.231	0.209	0.190	0.173	0.159
		0.12	1.000	0.967	0.928	0.885	0.839	0.790	0.737	0.681	0.581	0.498
		0.16	0.432	0.378	0.333	0.296	0.265	0.239	0.216	0.196	0.179	0.164
		0.20	1.000	0.971	0.935	0.896	0.852	0.804	0.751	0.695	0.593	0.508
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q500、 Q500GJ	RC30	0.04	0.441	0.386	0.340	0.303	0.271	0.244	0.220	0.200	0.183	0.168
		0.08	1.000	0.974	0.941	0.904	0.861	0.814	0.762	0.705	0.602	0.516
		0.12	0.447	0.391	0.345	0.307	0.275	0.247	0.224	0.203	0.186	0.170
		0.16	1.000	0.976	0.946	0.910	0.869	0.822	0.770	0.712	0.608	0.522
		0.20	0.452	0.396	0.349	0.310	0.278	0.250	0.226	0.206	0.188	0.172
	RC40	0.04	1.000	0.945	0.890	0.836	0.782	0.728	0.674	0.621	0.530	0.454
		0.08	0.394	0.345	0.304	0.270	0.242	0.218	0.197	0.179	0.164	0.150
		0.12	0.999	0.951	0.903	0.853	0.802	0.750	0.697	0.643	0.549	0.470
		0.16	0.408	0.357	0.315	0.280	0.250	0.225	0.204	0.185	0.169	0.155
		0.20	0.998	0.955	0.910	0.863	0.815	0.764	0.711	0.656	0.560	0.480
	RC50	0.04	0.416	0.364	0.321	0.286	0.256	0.230	0.208	0.189	0.173	0.158
		0.08	0.998	0.958	0.916	0.871	0.823	0.773	0.721	0.665	0.568	0.487
		0.12	0.422	0.369	0.326	0.290	0.259	0.233	0.211	0.192	0.175	0.161
		0.16	0.998	0.961	0.920	0.877	0.831	0.781	0.728	0.673	0.574	0.492
		0.20	0.427	0.374	0.330	0.293	0.262	0.236	0.214	0.194	0.177	0.163

续表 C.0.2

钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q550、 Q550GJ	RC30	0.04	1.000	0.980	0.948	0.909	0.865	0.814	0.758	0.680	0.575	0.493
		0.08	0.428	0.374	0.330	0.294	0.263	0.236	0.214	0.194	0.178	0.163
		0.12	1.000	0.986	0.962	0.929	0.889	0.841	0.784	0.704	0.596	0.511
		0.16	0.443	0.387	0.342	0.304	0.272	0.245	0.221	0.201	0.184	0.169
		0.20	1.000	0.991	0.971	0.942	0.903	0.856	0.800	0.718	0.608	0.521
	RC40	0.04	0.452	0.395	0.349	0.310	0.277	0.250	0.226	0.205	0.188	0.172
		0.08	1.000	0.994	0.977	0.950	0.914	0.868	0.812	0.728	0.617	0.529
		0.12	0.458	0.401	0.354	0.315	0.281	0.253	0.229	0.208	0.190	0.174
		0.16	1.000	0.996	0.982	0.957	0.922	0.877	0.821	0.737	0.623	0.535
		0.20	0.463	0.405	0.358	0.318	0.285	0.256	0.232	0.211	0.192	0.176
	RC50	0.04	1.000	0.961	0.915	0.867	0.816	0.762	0.706	0.632	0.535	0.459
		0.08	0.398	0.348	0.307	0.273	0.244	0.220	0.199	0.181	0.165	0.151
		0.12	1.000	0.968	0.929	0.886	0.838	0.787	0.731	0.655	0.554	0.475
		0.16	0.412	0.360	0.318	0.283	0.253	0.228	0.206	0.187	0.171	0.157
		0.20	1.000	0.972	0.937	0.897	0.852	0.801	0.745	0.668	0.565	0.485
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q550、 Q550GJ	RC30	0.04	0.420	0.368	0.325	0.288	0.258	0.232	0.210	0.191	0.175	0.160
		0.08	1.000	0.975	0.944	0.906	0.862	0.812	0.756	0.678	0.574	0.492
		0.12	0.426	0.373	0.329	0.293	0.262	0.236	0.213	0.194	0.177	0.162
		0.16	1.000	0.978	0.948	0.912	0.870	0.820	0.764	0.685	0.580	0.497
		0.20	0.431	0.377	0.333	0.296	0.265	0.238	0.216	0.196	0.179	0.164
	RC40	0.04	1.000	0.945	0.890	0.834	0.779	0.723	0.667	0.597	0.505	0.433
		0.08	0.376	0.329	0.290	0.258	0.231	0.208	0.188	0.171	0.156	0.143
		0.12	0.999	0.952	0.903	0.852	0.800	0.746	0.690	0.618	0.523	0.449
		0.16	0.389	0.340	0.300	0.267	0.239	0.215	0.195	0.177	0.161	0.148
		0.20	0.998	0.956	0.911	0.863	0.813	0.760	0.704	0.631	0.534	0.458
	RC50	0.04	0.397	0.347	0.306	0.272	0.244	0.219	0.199	0.180	0.165	0.151
		0.08	0.998	0.959	0.917	0.871	0.822	0.770	0.714	0.640	0.542	0.464
		0.12	0.403	0.352	0.311	0.276	0.247	0.223	0.201	0.183	0.167	0.153
		0.16	0.998	0.962	0.922	0.878	0.830	0.778	0.722	0.647	0.548	0.470
		0.20	0.407	0.356	0.314	0.279	0.250	0.225	0.204	0.185	0.169	0.155
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q620、 Q620GJ	RC30	0.04	1.000	0.981	0.948	0.909	0.861	0.807	0.745	0.638	0.540	0.463
		0.08	0.401	0.351	0.310	0.276	0.247	0.222	0.201	0.183	0.167	0.153
		0.12	1.000	0.988	0.964	0.930	0.887	0.834	0.771	0.661	0.559	0.479
		0.16	0.415	0.364	0.321	0.285	0.255	0.230	0.208	0.189	0.173	0.158
		0.20	1.000	0.992	0.973	0.943	0.902	0.850	0.787	0.674	0.571	0.489
	RC40	0.04	0.424	0.371	0.327	0.291	0.260	0.234	0.212	0.193	0.176	0.161
		0.08	1.000	0.996	0.980	0.953	0.913	0.862	0.799	0.684	0.579	0.496
		0.12	0.430	0.376	0.332	0.295	0.264	0.238	0.215	0.196	0.179	0.164
		0.16	1.000	0.999	0.986	0.960	0.922	0.871	0.807	0.692	0.585	0.502
		0.20	0.435	0.381	0.336	0.299	0.267	0.241	0.218	0.198	0.181	0.166
	RC50	0.04	1.000	0.961	0.914	0.864	0.810	0.754	0.693	0.594	0.502	0.431
		0.08	0.373	0.327	0.288	0.256	0.229	0.206	0.187	0.170	0.155	0.142
		0.12	1.000	0.968	0.929	0.884	0.834	0.779	0.718	0.615	0.520	0.446
		0.16	0.387	0.338	0.299	0.265	0.237	0.214	0.193	0.176	0.161	0.147
		0.20	1.000	0.973	0.938	0.896	0.848	0.794	0.732	0.627	0.531	0.455

续表 C.0.2

钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q620、 Q620GJ	RC30	0.04	0.394	0.345	0.305	0.271	0.242	0.218	0.197	0.179	0.164	0.150
		0.08	1.000	0.976	0.945	0.905	0.859	0.805	0.743	0.636	0.538	0.462
		0.12	0.400	0.350	0.309	0.275	0.246	0.221	0.200	0.182	0.166	0.152
		0.16	1.000	0.979	0.950	0.912	0.867	0.813	0.751	0.643	0.545	0.467
		0.20	0.405	0.354	0.313	0.278	0.249	0.224	0.202	0.184	0.168	0.154
	RC40	0.04	1.000	0.944	0.887	0.830	0.772	0.714	0.655	0.561	0.474	0.407
		0.08	0.353	0.309	0.272	0.242	0.217	0.195	0.176	0.160	0.146	0.134
		0.12	0.999	0.951	0.901	0.849	0.794	0.737	0.678	0.580	0.491	0.421
		0.16	0.365	0.319	0.282	0.251	0.224	0.202	0.183	0.166	0.152	0.139
		0.20	0.998	0.956	0.910	0.861	0.808	0.752	0.692	0.592	0.501	0.430
	RC50	0.04	0.372	0.326	0.288	0.256	0.229	0.206	0.186	0.169	0.155	0.142
		0.08	0.998	0.959	0.916	0.869	0.818	0.762	0.702	0.601	0.508	0.436
		0.12	0.378	0.331	0.292	0.259	0.232	0.209	0.189	0.172	0.157	0.144
		0.16	0.998	0.962	0.921	0.876	0.825	0.770	0.710	0.607	0.514	0.441
		0.20	0.382	0.334	0.295	0.262	0.235	0.211	0.191	0.174	0.159	0.145
钢材	混凝土	α_s	λ									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q690、 Q690GJ	RC30	0.04	1.000	0.981	0.947	0.905	0.854	0.795	0.721	0.601	0.509	0.436
		0.08	0.378	0.331	0.292	0.259	0.232	0.209	0.189	0.172	0.157	0.144
		0.12	1.000	0.988	0.963	0.927	0.880	0.823	0.746	0.622	0.527	0.451
		0.16	0.391	0.342	0.302	0.269	0.240	0.216	0.196	0.178	0.163	0.149
		0.20	1.000	0.993	0.973	0.941	0.896	0.839	0.761	0.635	0.537	0.461
	RC40	0.04	0.399	0.349	0.308	0.274	0.245	0.221	0.200	0.182	0.166	0.152
		0.08	1.000	0.997	0.981	0.951	0.908	0.851	0.773	0.644	0.545	0.467
		0.12	0.405	0.355	0.313	0.278	0.249	0.224	0.203	0.184	0.168	0.154
		0.16	1.000	1.000	0.986	0.959	0.917	0.860	0.781	0.651	0.551	0.473
		0.20	0.410	0.358	0.316	0.281	0.252	0.226	0.205	0.186	0.170	0.156
	RC50	0.04	1.000	0.960	0.911	0.858	0.802	0.742	0.671	0.559	0.473	0.406
		0.08	0.352	0.308	0.272	0.241	0.216	0.194	0.176	0.160	0.146	0.134
		0.12	1.000	0.967	0.927	0.880	0.826	0.767	0.694	0.579	0.490	0.420
		0.16	0.364	0.319	0.281	0.250	0.224	0.201	0.182	0.166	0.151	0.139
		0.20	1.000	0.972	0.936	0.892	0.841	0.782	0.708	0.591	0.500	0.429
钢材	混凝土	α_s	λ									
			110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Q690、 Q690GJ	RC30	0.04	0.371	0.325	0.287	0.255	0.228	0.205	0.186	0.169	0.154	0.141
		0.08	1.000	0.976	0.943	0.902	0.852	0.793	0.719	0.599	0.507	0.435
		0.12	0.377	0.330	0.291	0.259	0.232	0.208	0.189	0.171	0.157	0.143
		0.16	1.000	0.979	0.949	0.909	0.860	0.802	0.727	0.606	0.513	0.440
		0.20	0.381	0.334	0.294	0.262	0.234	0.211	0.191	0.173	0.158	0.145
	RC40	0.04	1.000	0.942	0.883	0.823	0.763	0.701	0.633	0.528	0.447	0.383
		0.08	0.332	0.291	0.256	0.228	0.204	0.184	0.166	0.151	0.138	0.126
		0.12	0.998	0.949	0.898	0.843	0.786	0.725	0.656	0.546	0.463	0.397
		0.16	0.344	0.301	0.265	0.236	0.211	0.190	0.172	0.156	0.143	0.131
		0.20	0.998	0.954	0.907	0.855	0.800	0.740	0.669	0.558	0.472	0.405
	RC50	0.04	0.351	0.307	0.271	0.241	0.215	0.194	0.175	0.160	0.146	0.134
		0.08	0.998	0.958	0.914	0.864	0.810	0.750	0.679	0.566	0.479	0.411
		0.12	0.356	0.311	0.275	0.244	0.219	0.197	0.178	0.162	0.148	0.135
		0.16	0.997	0.961	0.919	0.871	0.818	0.758	0.686	0.572	0.484	0.415
		0.20	0.360	0.315	0.278	0.247	0.221	0.199	0.180	0.164	0.149	0.137

注：表内中间值按线性内插法确定。

本规程用词说明

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

引用标准名录

- 1 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 2 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 3 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 4 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 5 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 6 《人民防空地下室设计规范》 GB 50038
- 7 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 8 《混凝土质量控制标准》 GB 50164
- 9 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 10 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 11 《建筑工程施工质量验收统一标准》 GB 50300
- 12 《钢管混凝土工程施工质量验收规范》 GB 50628
- 13 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 14 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 15 《钢结构工程施工规范》 GB 50755
- 16 《钢-混凝土组合结构施工规范》 GB 50901
- 17 《抗爆间室结构设计规范》 GB 50907
- 18 《钢管混凝土结构技术规范》 GB 50936
- 19 《建筑钢结构防火技术规范》 GB 51249
- 20 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
- 21 《混凝土外加剂》 GB 8076
- 22 《钢结构防火涂料》 GB 14907
- 23 《工业建筑防腐蚀设计标准》 GB/T 50046
- 24 《混凝土结构耐久性设计标准》 GB/T 50476
- 25 《矿物掺合料应用技术规范》 GB/T 51003
- 26 《钢管混凝土混合结构技术标准》 GB/T 51446
- 27 《碳素结构钢》 GB/T 700
- 28 《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》 GB/T 985.1
- 29 《埋弧焊的推荐坡口》 GB/T 985.2
- 30 《钢结构用高强度大六角头螺栓》 GB/T 1228
- 31 《钢结构用高强度大六角螺母》 GB/T 1229

- 32 《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230
- 33 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231
- 34 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 35 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596
- 36 《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1
- 37 《紧固件公差 螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3103.1
- 38 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632
- 39 《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117
- 40 《热强钢焊条》GB/T 5118
- 41 《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 5293
- 42 《厚度方向性能钢板》GB/T 5313
- 43 《六角头螺栓C级》GB/T 5780
- 44 《六角头螺栓》GB/T 5782
- 45 《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》GB/T 8110
- 46 《结构用无缝钢管》GB/T 8162
- 47 《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》GB/T 8923.1
- 48 《建筑构件耐火试验方法 第1部分：通用要求》GB/T 9978.1
- 49 《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》GB/T 10045
- 50 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 51 《埋弧焊用热强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 12470
- 52 《熔化焊用钢丝》GB/T 14957
- 53 《热强钢药芯焊丝》GB/T 17493
- 54 《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046
- 55 《建筑结构用钢板》GB/T 19879
- 56 《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177
- 57 《砂浆和混凝土中用硅灰》GB/T 27690
- 58 《石灰石粉混凝土》GB/T 30190
- 59 《组合结构设计规范》JGJ 138
- 60 《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3
- 61 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52
- 62 《混凝土用水标准》JGJ 63

- 63 《高层民用建筑钢结构技术规程》 JGJ 99
- 64 《建筑工程冬期施工规程》 JGJ/T 104
- 65 《建筑结构用冷弯矩形钢管》 JG/T178
- 66 《再生骨料应用技术规程》 JGJ/T 240
- 67 《石灰石粉在混凝土中应用技术规程》 JGJ/T 318
- 68 《再生混凝土结构技术标准》 JGJ/T 443
- 69 《高强钢结构设计标准》 JGJ/T 483
- 70 《公路桥梁抗撞设计规范》 JTG/T 3360-02
- 71 《钢结构防火涂料应用技术规范》 T/CECS 24
- 72 《矩形钢管构件自锁式单向高强螺栓连接设计标准》 T/CECS 605

中国工程建设标准化协会标准

钢管再生混凝土结构技术规程

T/CECS XXX-201X

条 文 说 明

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	2
3 基本规定	5
3.1 一般规定.....	5
3.2 作用和作用组合.....	5
3.3 构造规定.....	6
4 材 料	7
4.1 钢材.....	7
4.2 再生混凝土.....	7
4.3 连接材料.....	9
5 结构分析	11
5.1 一般规定.....	11
5.2 计算指标.....	12
5.3 分析方法.....	13
6 构件承载力计算	15
6.1 一般规定.....	15
6.2 轴心受力构件承载力计算.....	15
6.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算.....	17
6.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算.....	20
6.5 局部受压构件承载力计算.....	22
7 构造设计	24
8 节点设计	27
8.1 一般规定.....	27
8.2 梁柱节点.....	27
8.3 桁式混合结构节点.....	36
8.4 柱脚节点.....	36
9 防护设计	38
9.1 一般规定.....	38
9.2 防腐设计.....	38
9.3 防火设计.....	39
9.4 防撞击设计.....	40
9.5 抗爆设计.....	43
10 施工、验收、维护和拆除	44
10.1 一般规定.....	44
10.2 制作与安装.....	44
10.3 钢管内再生混凝土施工.....	45
10.4 检测与验收.....	46
10.5 维护和拆除.....	47
附录 A 钢管再生混凝土结构的材料本构模型	49
附录 B 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变计算	55

附录 C 稳定系数 φ 值表.....	57
本规程用词说明	69
引用标准名录	70
条文说明	73
1 总 则	76
3 基本规定	77
3.1 一般规定.....	77
3.2 作用和作用组合.....	77
3.3 构造规定.....	77
4 材 料	79
4.1 钢材.....	79
4.2 再生混凝土.....	79
5 结构分析	82
5.1 一般规定.....	82
5.2 计算指标.....	82
6 构件承载力计算	84
6.1 一般规定.....	84
6.2 轴心受力构件承载力计算.....	85
6.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算.....	85
6.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算.....	86
6.5 局部受压构件承载力计算.....	87
7 构造设计	88
8 节点和连接设计	89
8.1 一般规定.....	89
8.2 梁柱节点.....	89
8.3 桁式混合结构节点.....	90
8.4 柱脚节点.....	90
9 防护设计	92
9.1 一般规定.....	92
9.2 防腐设计.....	93
9.3 防火设计.....	93
9.4 防撞击设计.....	94
9.5 抗爆设计.....	94
10 施工、验收、维护和拆除	96
10.1 一般规定.....	96
10.2 制作与安装.....	96
10.3 钢管内再生混凝土施工.....	96
10.4 检测与验收.....	97
附录 A 钢管再生混凝土结构的材料本构模型	98
附录 B 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变计算	101

1 总 则

1.0.2 本规程针对钢管再生混凝土结构和构件的适用范围、设计方法、构造措施作出规定，本规程适用于房屋建筑、铁路、公路、电力、港口等工程中钢管再生混凝土结构的设计、施工、验收、维护和拆除。如无特殊说明，本规程所述钢管再生混凝土构件或结构采用的再生混凝土均为再生粗骨料混凝土。

1.0.3 特殊环境下（如高温辐射、氯离子腐蚀等）的钢管再生混凝土结构设计与施工，执行专门规范的有关规定。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.6 在进行更多的专门研究之前,钢管再生混凝土结构在房屋建筑工程中的变形和裂缝宽度应满足现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446、《钢结构设计标准》GB 50017、《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 中同类型结构的有关规定;在铁路工程中应满足国家现行标准《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 和《铁路桥涵设计规范》TB 10002 的有关规定;在公路工程中应满足现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 和《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01 的有关规定;在电力工程中应满足现行行业标准《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 的有关规定。

3.1.7 钢管再生混凝土结构设计需计入施工全过程对其在使用阶段承载能力的影响,相应提出如钢管初应力限值、钢管内混凝土脱空容限等关键技术要求,以达到设计目标。

3.2 作用和作用组合

3.2.1 根据工程类别,钢管再生混凝土结构荷载标准值确定应符合国家现行标准《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《铁路工程结构可靠性设计统一标准》GB 50216、《铁路桥涵设计规范》TB 10002、《公路工程结构可靠性设计统一标准》JTG 2120、《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 和《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 等的有关规定。特殊工程项目使用本规程时,荷载应符合相关国家标准的规定或按工程实际情况确定。

荷载组合的分项系数、组合值系数应按国家现行标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068、《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《机械工业厂房结构设计规范》GB 50906、《铁路桥涵设计规范》TB 10002、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 和《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 等的有关规定执行。目前尚缺少铁路桥梁中荷载组合的分项系数、组合值系数的选取方法以及强制性条文,《铁路桥涵设计规范(极限状态法)》Q/CR 9300 对铁路桥梁工程的荷载分布做了一系列调研,给出了荷载组合的分项系数、组合值系数的建议值。进行铁路桥梁工程设计时,可参考该规范或单独进行荷载分布调研,从而确定荷载组合的分项系数和组合值系数。

3.3 构造规定

3.3.1 最小管径和最小壁厚的规定是为了保证混凝土浇灌质量和钢管焊接质量而确定的。研究表明,钢管再生混凝土管壁的稳定性,由于存在内填混凝土而有所提高,钢管的外直径或最大外边长与壁厚之比不应大于无混凝土时相应限值的 1.5 倍。对于桁式混合结构,缀材采用的钢管不灌混凝土。为保证大尺寸钢管再生混凝土中钢管和混凝土的共同工作,可根据工程需求,在钢管内壁设置加劲肋等必要构造措施。

3.3.2 本条规定了钢管再生混凝土构件截面含钢率的适用范围。在实际工程中,圆形与矩形钢管普通混凝土构件的截面含钢率基本处于 0.04~0.20 与 0.05~0.20 范围内。在该范围内,钢管混凝土构件表现出良好的承载能力和经济性。考虑到钢管再生混凝土构件的力学性能与钢管普通混凝土构件相近,造价也接近,据此给出了截面含钢率的合理取值范围。

当截面含钢率较低时,钢管对管内再生混凝土的约束作用较小。同时,现有研究中含钢率较低的试验数据十分有限。为稳妥推动钢管再生混凝土结构的工程应用,在低含钢率构件承载力计算时可偏于安全地不计入约束作用的有利影响。

3.3.3 为了保证矩形钢管和核心混凝土之间有效的共同工作，根据目前有关研究成果的适用范围，提出此条件。当在钢管束混凝土结构中采用再生混凝土时，钢管束再生混凝土结构的设计尚应满足现行协会标准《钢管混凝土束结构技术标准》T/CECS 546 的相关规定。

3.3.4 “约束效应系数”是描述工程常用参数范围内钢管及管内混凝土之间相互作用的重要参数。在工程常用参数范围内，约束效应系数 ξ_r 对钢管再生混凝土性能的影响主要表现在： ξ_r 值越大，在受力过程中，钢管可对管内再生混凝土提供足够的约束作用，钢管再生混凝土强度和延性的增加相对较大；反之，随着 ξ_r 值的减小，钢管对管内再生混凝土的约束作用将随之减小，钢管再生混凝土的强度和延性的提高就越少，也就是说，在一定参数范围内， ξ_r 的大小可以很直观地反映出钢管和再生混凝土之间组合作用的强弱。据此，给出了约束效应系数的合理取值范围。

4 材 料

4.1 钢材

4.1.1 钢管再生混凝土构件主要用作各类结构柱，结合结构柱要求和现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定提出了对钢材的要求。钢管材料应根据结构的重要性、荷载特征、应力状态、钢材厚度、连接方式、工作条件等因素，合理选取牌号和等级。因钢管由冷弯卷制而成，所以要求冷弯 180° 合格的保证。现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 中，采用了 Q355 钢材代替原 Q345 钢材，采用 Q355 钢材时，可暂按 Q345 钢材进行设计。钢管再生混凝土结构也可采用不锈钢，应符合现行协会标准《不锈钢管混凝土结构技术规程》T/CECS 952 的有关规定。当采用其他牌号的钢材时，尚应符合国家现行有关标准的规定。

4.1.2 钢管再生混凝土结构钢材抗震性能要求可参照国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《高强钢管混凝土结构技术规程》T/CECS 987 的有关规定。

4.1.4 为防止层状撕裂，焊接承重结构可采用 Z 向钢，Z 向钢的材质应符合现行国家标准《厚度方向性能钢板》GB/T 5313 的有关规定。

4.2 再生混凝土

4.2.2 由于钢管本身是封闭的，混凝土中多余的水分不能排出，因而混凝土的水灰比不宜过大。采用流动性混凝土还是塑性混凝土主要取决于采用的浇灌工艺。良好的混凝土密实度是保证钢管和核心混凝土共同工作的重要前提。高强混凝土、自密实混凝土是已应用比较成熟但尚处在发展阶段的新材料。研究结果已表明，在钢管再生混凝土中采用自密实混凝土时，只要按有关规定严格控制质量，钢管自密实混凝土能够满足对钢管再生混凝土的设计要求。

4.2.7 本条规定将再生混凝土强度等级的确定方法与现行国家标准中普通混凝土强度等级的确定方法相统一。本规程适用的再生混凝土强度等级划分为：RC30、RC35、RC40、RC45 和 RC50。立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作并养护的边长为 150mm 的立方体试体，在 28d 龄期或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值。本条同时规定了再生混凝土的水胶比限值，进行再生混凝土配合比计算时应以饱和面干骨料为基准，如需以自然含水状态骨料为基准进行计算时则应进行相应的修正。

试验表明，再生混凝土类型对构件力学性能的影响主要取决于普通混凝土、一次再生混凝土和多次再生混凝土的抗压强度和弹性模量。整体而言，采用多次再生混凝土的钢管再生混凝土构件力学性能与采用一次再生混凝土的钢管再生混凝土构件力学性能接近。

4.2.8 对于目前建筑工程中常用的钢材，采用 RC30 以上强度等级的再生混凝土比较合理。在常用截面含钢率情况下，Q235 和 Q235GJ 钢配 RC30 级再生混凝土；Q355 和 Q355GJ 钢配 RC30~RC50 级再生混凝土；Q390~Q690 和 Q390GJ~Q690 GJ 钢配 RC50 级再生混凝土，且约束效应系数不宜大于 4，也不宜小于 0.6。

对钢管再生混凝土的理论分析和试验研究的结果都表明，由于钢管对核心混凝土的约束作用，使混凝土材料本身力学性质得到改善，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；在这种情况下，不仅钢管和混凝土材料本身的性质对钢管再生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”，也将对钢管再生混凝土构件力学性能起着非常重要的影响。研究结果表明，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，则构件的延性越好，反之则越差。当钢管再生混凝土用作地震区的结构柱时，为了保证钢管再生混凝土构件具有良好的延性，提出

此限值。

4.2.9 试验表明，I类再生粗骨料与天然粗骨料的各项性能指标基本相同，本条规定了仅掺用I类再生粗骨料的再生混凝土强度可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定取值，构件受力和变形计算中再生混凝土强度不折减。I类再生粗骨料再生混凝土的强度等级可参考同强度等级的普通混凝土，如 RC30 再生混凝土强度可参考 C30 普通混凝土，RC40 再生混凝土强度可参考 C40 普通混凝土，RC50 再生混凝土强度可参考 C50 普通混凝土。再生粗骨料分类可根据国家现行标准《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177 和《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240 确定。

4.2.10 研究表明，钢管再生混凝土结构的力学性能和普通钢管混凝土基本一致。本条规定了掺用II类、III类再生粗骨料的再生混凝土，轴心抗压强度标准值、轴心抗拉强度标准值、轴心抗压强度设计值、轴心抗拉强度设计值、轴心抗压疲劳强度设计值、轴心抗拉疲劳强度设计值的确定方法，即可采用按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 取值乘以再生混凝土强度折减系数 α_o 的方法。试验表明，不同再生粗骨料取代率和不同受力条件下，再生混凝土构件的承载力与相同强度等级的普通混凝土构件承载力相当或略低，影响的关键因素是再生粗骨料取代率和不同受力条件。

考虑这些因素，规定再生混凝土构件承载力计算时，可按不同再生粗骨料取代率和不同受力条件对再生混凝土强度设计值乘以折减系数的方法，再生混凝土构件承载能力极限状态计算时，只需先将再生混凝土强度的标准值和设计值按规定乘以折减系数 α_o ，之后可直接用普通混凝土构件承载力计算方法与公式进行计算，简化了再生混凝土结构构件的计算与设计，便于设计应用。

4.2.11 本条规定了再生混凝土弹性模量的确定方法。再生混凝土的受压和受拉弹性模量 E_{cr} 宜通过试验确定；当缺乏试验资料时，按式（1）计算再生混凝土弹性模量，结果见表 3.2.11。式（1）对再生混凝土弹性模量规定的依据是国内外具有代表性的 310 余组再生混凝土试验数据的统计回归分析及编制组的试验研究结果。值得注意的是，对于采用 II 类和 III 类再生粗骨料配制的再生混凝土，理论上由于 III 类再生粗骨料性能更差，采用 III 类再生粗骨料配制的再生混凝土的弹性模量应小于采用 II 类再生粗骨料配制的再生混凝土。但由于再生混凝土的弹性模量本身具有较大的离散性，现有试验的统计结果中，未发现采用 II 类和 III 类再生粗骨料配置的再生混凝土的弹性模量存在明显差异，见图 1。因此表 3.2.11 规定采用 II 类和 III 类再生粗骨料配制的再生混凝土弹性模量取值相同。

$$E_{cr} = \begin{cases} (1 - 0.11r_c)E_c & \text{I类骨料} \\ (0.11r_c^2 - 0.33r_c + 1)E_c & \text{II~III类骨料} \end{cases} \quad (1)$$

式中： r_c —— 再生粗骨料取代率；

E_c —— 28d 普通混凝土弹性模量的数值宜通过试验确定，当缺乏试验资料时可采用《混凝土结构设计规范》GB 50010 中表 4.1.5 的取值（N/mm²）。

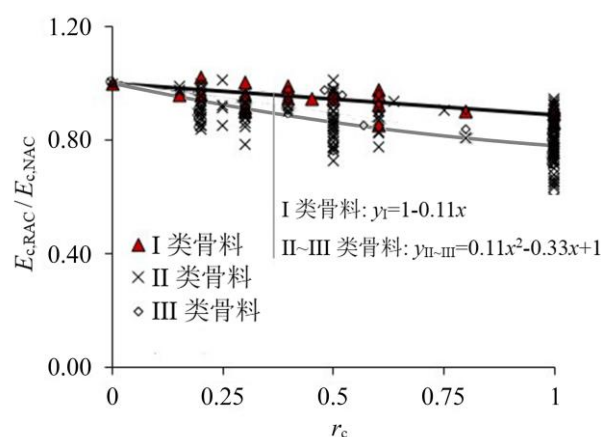


图1 再生粗骨料取代率对混凝土弹性模量的影响

4.2.12 本条规定了再生混凝土的剪变模量 $G_{c,r}$ 可按相应弹性模量值的 40% 采用, 再生混凝土泊松比 $\nu_{c,r}$ 可按 0.2 采用。试验表明, 再生混凝土的剪变模量和弹性模量的量值关系与普通混凝土接近, 泊松比也接近。

4.2.13 本条规定了再生混凝土的热膨胀系数、比热容和热传导系数宜通过试验确定。哈尔滨工业大学开展了掺用 II 类再生硅质粗骨料的混凝土在 20-800°C 范围内的热工参数试验, 提供了不同取代率的再生混凝土热膨胀率与导热系数的建议计算公式(参见文献 Hui Zhao, Faqi Liu, Hua Yang. Thermal Properties of Coarse RCA Concrete at Elevated Temperatures. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 180-189)。研究表明, 取代率对再生混凝土热膨胀率和导热系数有一定影响, 应予以考虑。

4.2.14 哈尔滨工业大学对再生混凝土的相关试验结果表明, 取代率对高温下和高温后再生混凝土的轴心抗压强度、弹性模量、峰值应变等指标的损伤程度影响不大。因此, 可在再生混凝土常温力学性能指标的基础上, 乘以考虑温度对各指标影响的折减系数。鉴于再生混凝土材料的离散性较大, 对于需要精细化分析的设计工况, 宜进行专门试验测定其相关高温力学性能。

5 结构分析

5.1 一般规定

5.1.1 钢管再生混凝土组合结构构件基本性能试验研究表明,钢管再生混凝土组合结构构件相比于钢筋混凝土结构构件具有承载力大、延性性能好、刚度大的特点。目前,国内高层建筑中大量采用组合结构构件,尤其是由钢管(型钢)混凝土柱和钢梁形成的外框架(外筒)与钢筋混凝土核心筒组成的框架-核心筒、筒中筒结构体系,更显示了钢管再生混凝土固有的优良结构特性,提高了结构抗震性能,增加了使用面积,满足了工程的需要。

5.1.2 国内外历次大地震震害表明,平面不规则、质量与刚度偏心和抗扭刚度太弱的结构,在地震中遭受到严重的破坏。因此,钢管再生混凝土结构平面应力求简单、规则,避免刚度、质量和承载力分布不均匀,结构不规则性判别可参照国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的有关规定,当出现不规则时,应采取相应加强措施或进行专项论证。

5.1.4 钢管再生混凝土与钢管普通混凝土相近,具有受压承载力高、延性好、抗震性能优越的特点。但考虑到钢管再生混凝土应用还处于起步阶段,工程应用不多,特别是在超高层和高烈度区,为稳妥推动钢管再生混凝土结构的工程应用,本规程对钢管再生混凝土结构采取相对更严格的最大适用高度限值。本条规定参考了现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 的有关规定,对于钢管再生混凝土结构,当抗震设防烈度不超过 8 度(0.2g)时,相比同类型钢管混凝土结构,按提高一个抗震设防等级确定结构最大适用高度;当抗震设防烈度为超过 8 度(0.3g)或 9 度时,则综合考虑了结构类型、设防烈度等因素,在同类型钢管混凝土结构的基础上,适当降低了最大适用高度限值。

5.1.5 本条参考了现行行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138 的相关条文。在进行钢管再生混凝土柱轴压比的计算时,分母采用了钢管再生混凝土柱构件实际的极限承载力,更符合构件实际的工作情况,也便于工程设计使用。

5.2 计算指标

5.2.1 本条参考现行国家标准《钢管混凝土混合结构设计标准》GB/T 51446,采用 $f_{sc,r}$ 为设计钢管再生混凝土构件的强度指标,并对轴心受压构件的强度进行了可靠性分析。在收集和整理了大量试件的试验结果,按不同钢号、混凝土强度等级、截面含钢率和荷载比的情况进行分析和计算以后表明,采用本规定的设计方法所确定的钢管再生混凝土基本构件的抗力满足现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 中规定对延性破坏构件的可靠性要求。对于房屋建筑、公路桥涵及港口工程结构,分别按照现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068、《公路工程结构可靠度设计统一标准》GB/T 50283 和《港口工程结构可靠性设计统一标准》GB 50158 中规定的目标可靠指标,给出了结构安全等级为二级时的钢管再生混凝土轴心抗压强度分项系数。对于铁路桥涵结构,按照国家现行标准《铁路工程结构可靠性设计统一标准》GB50216 和《铁路桥涵设计规范(极限状态法)》Q/CR9300 进行可靠度计算,同时考虑到铁路行业中容许应力的取值方法,建议其抗压强度分项系数取值为 1.45。

钢管再生混凝土构件处于温度变化的环境中时,构件组合强度将受温度变化的影响。当温度升高时,钢材和混凝土的强度和弹性模量都随温度的升高而下降,通过试验和分析可得到强度的下降率。本规程条文中并未列入考虑环境温度影响的计算,遇此情况,应以 +20℃ 为基准,通过实验和分析确定轴心抗压强度设计指标的下降率。

5.2.2、5.2.3 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。

5.2.4 采用数值分析方法可以计算获得钢管再生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（ γ ）间的关系曲线，此为钢管再生混凝土的组合应力-应变关系。基于理论分析和试验研究，可确定出钢管再生混凝土组合受剪强度标准值 $f_{sv,r}$ 的计算公式为式（5.2.4）。

5.2.5 本条参考了现行行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138 的相关条文。

5.2.7 对于有些高层及超高层建筑，需要预测竖向承重构件的长期压缩变形以便加以控制，避免不同承重构件间的累积竖向变形差异在水平构件中引起过大的附加内力，或对玻璃幕墙、管道等非结构构件造成影响。由于核心混凝土处于密闭环境，自生收缩对钢管再生混凝土构件长期性能影响较小，在 5% 以内。在计算钢管再生混凝土柱长期变形时，可以忽略收缩的影响。当需要精确的计算结果时，建议采用精确计算方法（如逐步积分法），基于本规程附录 B 提供的收缩、徐变模型，计算钢管再生混凝土柱中再生混凝土的长期变形。钢管再生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。

6 构件承载力计算

6.1 一般规定

6.1.1 本节规定的钢管再生混凝土构件的设计和计算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。对钢管再生混凝土的抗震验算可参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 对钢结构的有关规定进行。

6.1.2 根据已有的工程经验，钢管再生混凝土构件的容许长细比按现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 对钢管混凝土结构构件的有关规定确定是可行的。

6.1.3 在验算施工阶段空钢管结构时，不考虑地震组合。根据施工阶段的荷载计算空钢管柱的应力，这种初始应力对钢管再生混凝土柱的最终强度承载力影响不大。但由于初应力的存在使组合性能的弹塑性阶段提前了，改变了弹塑性阶段的组合切线模量，从而影响了构件的稳定承载力。根据几十个构件的试验结果分析和大量的理论计算，为了保证结构的安全可靠，应控制截面的平均初始应力不应超过空钢管结构临界应力值的 35%。若超过限值，则需要考虑钢管初应力对钢管构件正常使用阶段承载力的影响，对钢管再生混凝土柱的轴心受压稳定承载力 N_u 乘以钢管初应力影响系数 k_p ，钢管初应力影响系数可按式 (2) 计算：

$$k_p = 1 - f(\lambda) f\left(\frac{e}{r}\right) \beta_0 \quad (2)$$

$$\beta_0 = \frac{\sigma_0}{\varphi_s f} \quad (3)$$

1) 对于圆形钢管再生混凝土：

$$f(\lambda) = \begin{cases} 0.17\lambda_0 - 0.02 & (\lambda_0 \leq 1) \\ -0.13\lambda_0^2 + 0.35\lambda_0 - 0.07 & (\lambda_0 > 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$f\left(\frac{e}{r}\right) = \begin{cases} 0.75\left(\frac{e}{r}\right)^2 - 0.05\left(\frac{e}{r}\right) + 0.9 & \left(\frac{e}{r} \leq 0.4\right) \\ -0.15\left(\frac{e}{r}\right) + 1.06 & \left(\frac{e}{r} > 0.4\right) \end{cases} \quad (5)$$

2) 对于矩形钢管再生混凝土：

$$f(\lambda) = \begin{cases} 0.14\lambda_0 + 0.02 & (\lambda_0 \leq 1) \\ -0.15\lambda_0^2 + 0.42\lambda_0 - 0.11 & (\lambda_0 > 1) \end{cases} \quad (6)$$

$$f\left(\frac{e}{r}\right) = \begin{cases} 1.35\left(\frac{e}{r}\right)^2 - 0.04\left(\frac{e}{r}\right) + 0.8 & \left(\frac{e}{r} \leq 0.4\right) \\ -0.2\left(\frac{e}{r}\right) + 1.08 & \left(\frac{e}{r} > 0.4\right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_0 = \lambda/80 \quad (8)$$

式中： f —— 钢管钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

φ_s —— 空钢管的稳定系数，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 取值；

β_0 —— 钢管初应力系数；

λ —— 钢管再生混凝土柱长细比；

- e/r —— 钢管再生混凝土柱荷载偏心率；
- $f(\lambda)$ —— 考虑构件长细比 λ 影响的函数，按式（4）和（6）计算；
- $f(e/r)$ —— 考虑构件荷载偏心率 e/r 影响的函数，按式（5）和（7）计算。

6.2 轴心受力构件承载力计算

6.2.1 本条对轴心受压构件的计算作出了规定。

1 不计入长期荷载的影响时

考虑初始弯曲 $L_0/1000$ ，按偏心受压构件的方法计算钢管再生混凝土构件轴心受压时的临界应力 $\bar{\sigma}_{cr}$ ，与大量试验结果吻合良好。由此得到了稳定系数 $\varphi = \bar{\sigma}_{cr} / f_{scy}$ 。经回归分析， φ 值可按式（6.2.1-4）计算。

2 计入长期荷载的影响时

在长期荷载作用下，由于管内混凝土发生徐变和收缩变形，产生应力重分布现象，导致钢材和管中混凝土应力改变，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。在工程常用参数范围内，根据分析结果提出长期荷载作用影响系数 k_{cr} 。计算永久荷载引起的轴心压力占全部荷载所引起的轴心压力的比重时，全部荷载按标准值取值。

公式中各参数适用范围为：钢材 Q235~Q690 或 Q235GJ~Q690GJ、再生混凝土 RC30~RC50、长细比 10~150、荷载偏心率 0~1、约束效应系数 0.6~4.0（对于圆形钢管再生混凝土）或 1.0~4.0（对于矩形钢管再生混凝土）、截面含钢率 0.04~0.20（对于圆形钢管再生混凝土）或 0.05~0.20（对于矩形钢管再生混凝土），矩形钢管截面高宽比 1~2。

6.2.2 再生混凝土轴心受拉时，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。计算时以钢管再生混凝土轴心受拉时荷载-变形关系曲线上对应钢管达到屈服强度时的点为受拉极限状态。通过简化提出计算公式（6.2.2-2）。

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

6.2.4、6.2.5 钢管再生混凝土桁式混合结构轴心受压结构保证单肢稳定的规定及假想剪力的计算参考了现行《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

6.3 受弯、压弯和拉弯构件承载力计算

6.3.1、6.3.2 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。

6.3.3~6.3.5 通过数值计算分析，计算得到了轴力（ N ）、弯矩（ M ）共同作用下的 $\frac{N}{N_0} - \frac{M}{M_u}$ 相关

曲面。在 $\frac{N}{N_0} - \frac{M}{M_u}$ 的相关关系中有平衡点，位于 $\frac{N}{f_{scy,r} A_{sc}} = 2\varphi^3 \eta_0$ 处，可得到压弯荷载共同作用下

承载力的验算公式。当 $\lambda=0$ 时， $\varphi=1$ ，且不计及附加挠度影响系数，对于圆形钢管再生混凝土为

$\frac{1}{1-0.4\frac{N}{N_E}}$ ，对于矩形钢管再生混凝土为 $\frac{1}{1-0.25\frac{N}{N_E}}$ ，则可得到强度验算公式。式（6.3.3-7）给出了

约束效应系数大于 0.4 的情况。对于约束小于 0.4 的情况，可按式（9）计算：

$$\eta_o = \begin{cases} 0.5 - 0.2445\xi_r & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 0.5 - 0.3175\xi_r & (\text{矩形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (9)$$

由于矩形钢管再生混凝土压弯构件在两个主轴方向的长细比不一定相同，因此有必要进行弯矩作用平面外的稳定计算。目前弯矩作用平面外失稳尚缺乏试验资料，有待今后在这方面做工作。

6.3.6 对于矩形钢管再生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。

6.3.7 相关公式考虑了截面塑性发展，当不考虑塑性发展时，结果可直接用于钢管再生混凝土桁式混合结构。

6.4 受剪、受扭和压扭构件承载力计算

6.4.1~6.4.5 采用有限元法建立了钢管再生混凝土构件在压、弯、扭、剪及其复合受力状态下力学性能的分析模型。对受剪、纯扭、压扭、压弯扭和压弯剪构件的荷载-变形关系曲线进行了全过程分析，研究了各阶段钢管和核心混凝土截面的应力状态及其相互作用，探讨了不同加载路径情况对钢管再生混凝土构件力学特性的影响规律。研究表明，加载路径对钢管再生混凝土构件承载力极限状态影响不大。

最终在参数分析结果的基础上，综合各参数的影响规律，在钢材Q235~Q690或Q235GJ~Q690GJ、再生混凝土RC30~RC50的参数范围内，推导了钢管再生混凝土构件在不同受力状态下的承载力实用计算方法，其中圆形钢管再生混凝土截面含钢率适用范围为0.04~0.2，矩形钢管再生混凝土截面含钢率适用范围为0.05~0.2。

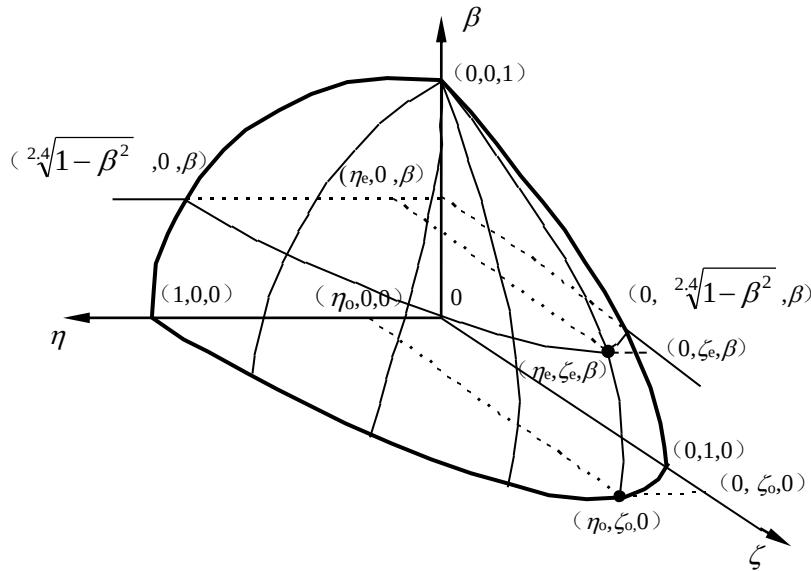


图2 压弯扭构件 $\frac{N}{N_0}(\eta) - \frac{M}{M_u}(\zeta) - \frac{T}{T_u}(\beta)$ 关系示意图

以钢管再生混凝土压弯扭构件为例，在极限状态下典型的 $\frac{N}{N_0}(\eta) - \frac{M}{M_u}(\zeta) - \frac{T}{T_u}(\beta)$ 相关关系

如图 2 所示，图中还给出了一些特征点的坐标值。

6.5 局部受压构件承载力计算

6.5.1~6.5.4 应考虑局部压力对钢管再生混凝土结构承载力的影响，根据参数分析的结果，综合各参数的影响规律，在约束效应系数 0.3~5、钢材 Q235~Q420 或 Q235GJ~Q420GJ、局压面积比 1~16、再生混凝土 RC30~RC50 的参数范围内，推导带端板钢管再生混凝土局压承载力折减系数 K_{LC} 的计算公式，其中圆形钢管再生混凝土截面含钢率适用范围为 0.06~0.20，矩形钢管再生混凝土截面含钢率适用范围为 0.10~0.20。本公式适用于：①轴心受力钢管再生混凝土构件；②带端板钢管再生混凝土柱的局部受压。

7 构造设计

7.0.1 假设腹杆倾角为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，按桁式混合结构抗弯刚度折减值得出斜腹杆钢管再生混凝土桁式混合结构的换算长细比，因此实际结构的腹杆角度亦应限定在此范围内。平腹杆钢管再生混凝土桁式混合结构的构造规定是为保证腹杆有一定的线刚度，不致使结构的抗弯刚度过低，因此在换算长细比的推导过程中，作了条文中规定的限制。

7.0.2 本条参照了现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

7.0.3 焊接对钢管混凝土结构轴心受压构件工作性能影响的试验结果表明（参见钟善桐著《钢管混凝土结构》，哈尔滨：黑龙江科学技术出版社，1994），后施焊会造成核心混凝土强度指标下降，但对构件承载力的降低不超过 2.5%；由焊接造成柱挠曲产生的偏心很小，可忽略挠曲产生的偏心对偏心承载力的影响。在设计荷载下施焊，柱刚度变化也很小，对结构的工作性能无明显影响。但应注意不宜在同一构件上多点同时施焊，且焊接电流不宜过大。

7.0.4 当在管壁上支承重量较大的支、吊架时，采用加强环是为了有效地把荷载均匀地传给柱身。

7.0.5 在实际工程中，混凝土剪力墙与钢管再生混凝土框架的连接构造应保证共同受力，注意连接的可靠性，可采取图 3 所示的连接方式，并应符合下列要求：

1) 混凝土剪力墙的水平分布钢筋可采用焊接的形式与钢管再生混凝土柱和钢梁上的连接钢板进行连接。

2) 与钢筋连接用的连接钢板强度、连接钢板与钢管柱和钢梁连接强度、连接钢板与连接钢筋焊缝强度均不应小于对应连接钢筋的强度。

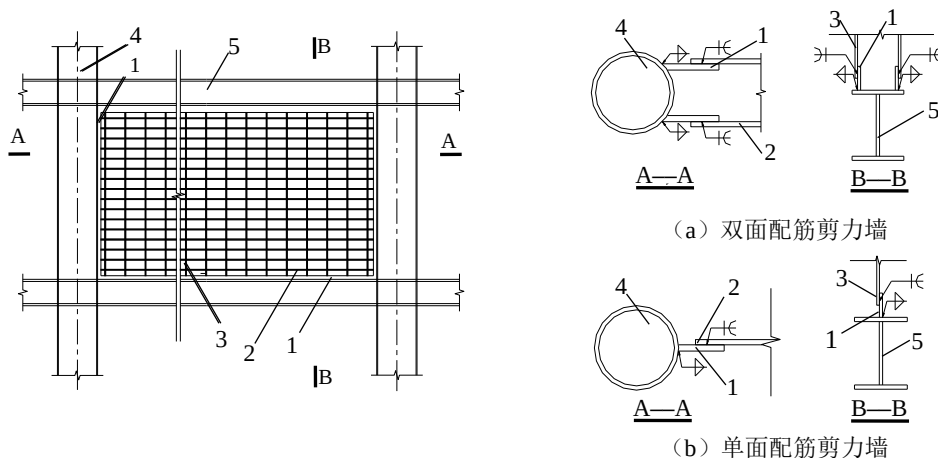


图 3 钢筋混凝土剪力墙和钢管再生混凝土边框柱连接构造

1—连接钢板；2—墙体水平分布钢筋；3—墙体竖向分布钢筋；
4—钢管再生混凝土柱；5—钢梁

7.0.6 本条参照了现行国家标准《钢管混凝土结构技术规范》GB 50936 和《钢结构设计标准》GB 50017 的相应规定，空钢管宽厚比的限值为 $B/t \leq 40\sqrt{235/f_y}$ ，钢管再生混凝土结构钢管的宽厚比限值为 $B/t \leq 60\sqrt{235/f_y}$ 。当钢管再生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钢管再生混凝土结构，可通过设置纵向加劲肋使子板件和加劲肋满足式 (7.0.6-1) 和 (7.0.6-2)，从而加强整体稳定性。

7.0.7 当采用钢管再生混凝土斜柱时，斜柱与直柱的对接部位在外荷载作用下易被撕裂，产生局部破坏而降低结构的整体受力性能，可在对接部位设置内隔板来提高整体性能。

8 节点和连接设计

8.1 一般规定

8.1.1 本条指明了在钢管再生混凝土结构中的节点和连接构造的基本要求。

8.1.2 本条参考了现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 的有关规定。

8.1.3 对搜集和整理的172个圆形钢管混凝土、35个方形钢管混凝土界面的粘结强度进行的统计分析（参数范围： $f_{cu}=(20\sim60)$ N/mm²， $D(B)\leq 600$ mm， $D/t(B/t)\leq 60$ ），结果表明再生粗骨料取代率对界面强度无明显影响，钢管再生混凝土与普通钢管混凝土的界面粘结机理类似，可对二者界面的粘结强度的计算方法进行统一。钢管及其核心再生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，粘结强度可表示为二者倒数的乘积 t/D^2 (t/B^2)的函数。式（10）分别给出圆形和方钢管再生混凝土构件界面粘结强度计算公式。

$$f_b = \begin{cases} 0.071 + 4900 \frac{t}{D^2} & (\text{圆形钢管再生混凝土}) \\ 0.043 + 1100 \frac{t}{B^2} & (\text{方形钢管再生混凝土}) \end{cases} \quad (10)$$

根据对试验结果的分析，建议了粘结强度的下限值，即对于圆钢再生管混凝土， $f_b=0.225$ N/mm²；对于方钢管再生混凝土， $f_b=0.150$ N/mm²。对于矩形钢管再生混凝土，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》，可认为矩形钢管再生混凝土界面粘结强度的下限值与方钢管再生混凝土保持一致。因此，本规程确定在设计时，对于圆形钢管再生混凝土， $f_b=0.225$ N/mm²；对于矩形钢管再生混凝土， $f_b=0.150$ N/mm²。

8.2 梁柱节点

8.2.1 根据试验研究成果和工程实践的经验，梁柱刚性节点采用加强环形式安全可靠，便于混凝土浇灌施工。实践证明，加强环能和管柱共同工作，能可靠地将梁的内力传给柱肢。此外，由于加强环的存在，管壁受力均匀，防止了局部应力集中，改善了节点受力性能，同时也增强了节点和构件在水平方向的刚性。通常，当钢管直径大于 800mm 时，也可采用内加强环节点形式。

1 横梁为工字形焊接钢梁时，梁端上下翼缘板在接近管柱时逐渐加宽，再与管柱连接处将柱围住，形成加强环。梁端的弯矩和轴力由上下加强环承担，剪力靠腹板通过焊缝传给柱肢。为便于现场装配连接，将梁端连同加强环与管柱段一起加工焊好，形成小段钢梁。现场施工时，二者只要做等强焊接即可。为便于施工，腹板可采用高强螺栓连接，按梁的剪力计算；

2 横梁为钢筋混凝土梁时，对于本规定推荐的节点形式，经节点模型试验及工程实践证明，受力明确，可保证刚接而且便于施工。承重销节点的试验结果表明，承重销的破坏荷载为设计荷载的 2.2 倍~2.5 倍，节点为弯曲破坏，受力安全可靠。但当钢管的管径较小时不宜采用此节点，因为承重销腹板在管内的焊接比较困难；

3 桁式混合结构节点，应采取措施保证节点的刚度和几何不变性。

本规程只推荐了目前常用的一些节点形式，对其他形式只要有可靠的依据和使用经验也可采用。

8.2.2 采用圆形钢管再生混凝土柱与钢梁单边高强螺栓连接节点时，柱壁和端板均为弧形，计算柱壁和端板屈服承载力时，相应的螺栓孔间距、端板宽度和柱壁宽度等计算参数应取为延圆弧面的弧长，相当于将圆弧形柱壁和端板展开为平面进行计算。

8.2.4 本条规定参照了已有工程设计经验。

8.2.6 当集中力作用在二肢结构柱的两弦杆之间时,可采用穿过也可不穿过钢管的肩梁,将力传给柱肢。柱顶构造由加强环、肩梁和加劲肋组成刚性节点。这种节点根据试验结果以及荆门电厂 670 t/h 炉架的实际工程经验(肩梁不穿过钢管),证明节点能保证钢管和混凝土共同工作。由柱顶承受集中荷载的柱,为保证钢管和管中混凝土共同受力,应加厚柱顶板、增设肩梁和加劲肋以保证柱头刚度。

8.2.6 刚性节点加强环板的类型可分为 6 种型式,Ⅰ、Ⅱ和Ⅴ型具有外形简单,便于制作的优点;Ⅲ、Ⅳ和Ⅵ型外形曲线光滑,受力好,这 6 种形式都是工程中常用的形式,因而也作为本规程的推荐形式。

环板的承载力受最大应力断面控制,但是不同型式环板,控制断面位置不同。试验表明,对Ⅰ、Ⅱ型环板,不论是单向还是双向受拉,最大应力点均出现在角隅的外边缘处;对Ⅲ、Ⅳ型环板,当单向受拉时,最大应力是与力呈 30° 角环板外缘的环向应力;当双向受拉时,由于应力的叠加,在与力方向呈 45° 断面最小处的外缘环向拉应力最大,首先屈服。

根据以上分析研究,对日本设计指南《钢管混凝土结构的设计和建造指针》AIJ(1997)有关公式进行补充并变换后提出了以控制断面宽度 b 来满足环板设计承载力要求的公式(8.2.6-4)和(8.2.6-8)。对Ⅲ、Ⅳ型环板的计算公式(8.2.6-8)中引入了双向拉力比值 β_0 ,经与试验结果和国内已有计算公式相比,本规定公式用于设计是可行且偏于安全的。

8.2.8 节点设计是钢管再生混凝土框架结构抗震设计的关键。在满足计算和构造要求时,钢管再生混凝土框架节点在低周往复荷载作用下的滞回特性、延性系数和强度储备均远高于相应的钢筋混凝土框架节点,其节点核心区不会发生破坏且梁端塑性铰位置易于控制。因此,采用钢管再生混凝土柱和钢梁或钢筋混凝土梁加强节点组成的框架,更便于实现“强柱弱梁,节点更强”的抗震设计要求。试验研究表明,对混凝土梁节点,在保证梁内主筋与环板可靠焊接锚固的前提下,梁端配筋设计满足《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求,也可达到“强剪弱弯”的目的,表现出良好的抗震能力。Ⅲ、Ⅳ型加强环板外形曲线光滑,无明显应力集中点,因而更适于承受往复荷载作用。此外,重视节点环板的加工和焊接质量,也是减少残余应力和缺陷的影响,避免应力集中所必需的。

8.3 桁式混合结构节点

8.3.1 本条参考了现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 的有关规定。

8.3.2 本条参考了现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定。

8.4 柱脚节点

8.4.1 钢管再生混凝土柱与基础的连接,宜采用插入式、埋入式、外包式和外露式柱脚(图 4~图 7)。外包式柱脚和埋入式柱脚具有刚度大、抗灾性能好的特点,宜作为钢管再生混凝土柱的优选柱脚形式。外露式柱脚的刚度和抗震性能较差,不宜用于钢管再生混凝土柱脚形式,但在满足计算要求的情况下也可使用。

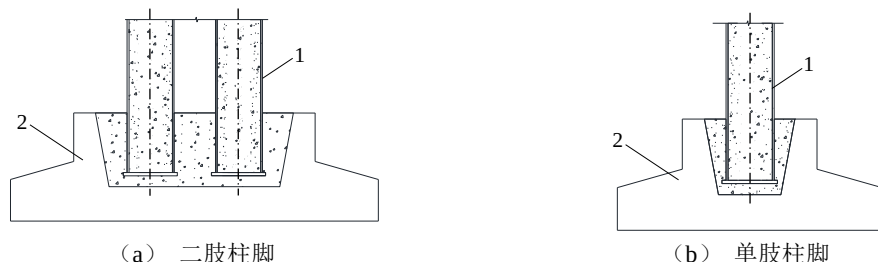


图4 插入式柱脚

1—钢管再生混凝土柱； 2—基础

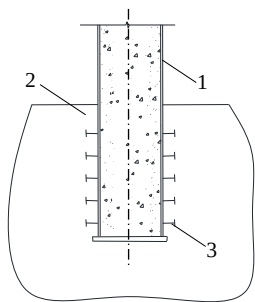


图5 埋入式柱脚

1—钢管再生混凝土柱；
2—基础； 3—栓钉

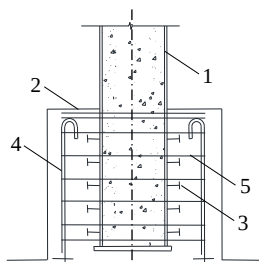


图6 外包式柱脚

1—钢管再生混凝土柱；
2—基础； 3—栓钉；
4—主筋； 5—箍筋

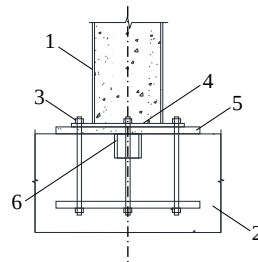


图7 外露式柱脚

1—钢管再生混凝土柱；
2—基础； 3—锚栓； 4—底板；
5—无收缩砂浆； 6—抗剪键

8.4.3 外包式钢管再生混凝土柱脚可能有三种压弯破坏形态(图8),包括:底板底截面压弯破坏,底板顶截面压弯破坏和柱截面压弯破坏,由此确定了外包式柱脚极限受弯承载力计算时的三个控制截面。

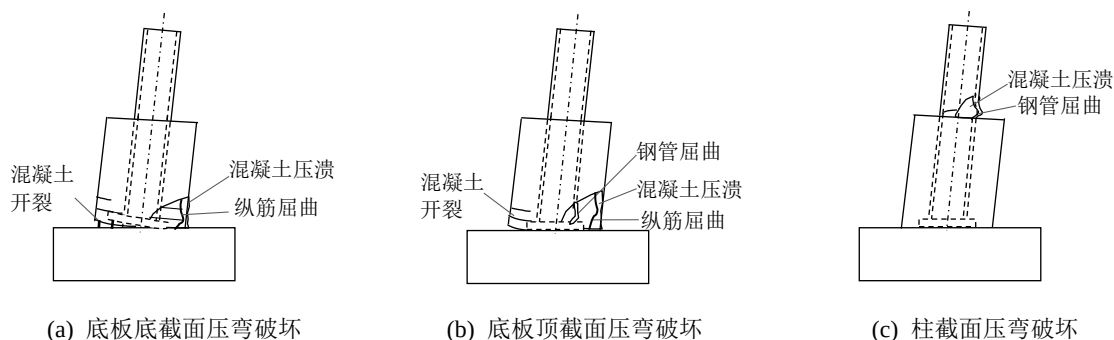


图8 外包式钢管再生混凝土柱脚受弯破坏形态

8.4.5 外包混凝土的厚度和高度影响外包混凝土部分和钢管再生混凝土柱的共同工作性能,由此对外包厚度和高度做出规定。相比于普通钢管混凝土结构,钢管再生混凝土结构由于再生混凝土的弹性模量较低,其抗弯刚度也因此较低,从而二阶效应更加明显。外包式钢管再生混凝土柱脚易发生柱截面的压弯破坏,应保证足够的外包混凝土高度,确保外包混凝土部分和钢管再生混凝土柱的共同工作性能。

8.4.6 外包混凝土顶部应设置加密箍筋可有效避免出现外包混凝土顶部的冲切破坏。由于地震的多维性,外包混凝土底部的混凝土损伤情况严重,应设置箍筋加密区以保证外包式柱脚的抗震性能。

8.4.7 外包式柱脚的底板锚栓连接部分承担外包式柱脚上的部分弯矩荷载,应配置锚栓。底板对外包钢筋混凝土部分的受弯承载力有削弱,在满足锚栓锚固的要求下,外包式柱脚应尽可能减小底板外伸宽度。当外包式柱脚上部轴力不足时,其侧向抗剪可能不足,应在底板底部设置抗剪件。

8.4.8 在钢管外设置抗剪连接件可改善外包钢筋混凝土部分和钢管再生混凝土柱的共同工作性能,进而提高外包式柱脚的耗能能力和延性。应按照《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 和《钢结构设计标准》GB 50017 的规定设置栓钉,或者按照《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 的规定设置锚固环板和加劲肋。

9 防护设计

9.1 一般规定

9.1.1 加速腐蚀的不良设计是指容易导致水积聚，或者不能使水正常干燥的凹槽、死角、焊缝缝隙等。

9.1.3 现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 中对于耐火极限的定义为：在标准耐火试验条件下，建筑构件、配件或结构从受到火的作用时起，至失去承载能力、完整性或隔热性时止所用时间。这里的“标准耐火试验条件”所用的火灾温度-时间曲线为标准火灾升温曲线。

现行国家标准《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249 给出了普通钢管混凝土防火保护设计。钢管再生混凝土柱的耐火性能和普通钢管混凝土柱接近，对比分析结果表明，可采用普通钢管混凝土柱的方法进行钢管再生混凝土柱耐火极限的设计。在确定钢管再生混凝土的荷载比时，应按照本规程第 4 章的条文计算。遭受火灾后的钢管再生混凝土柱可根据火灾后评估结果，采用外包混凝土、钢管或 FRP 布等措施进行修复加固。钢管再生混凝土柱火灾后修复加固的典型构造措施如图 8 所示。

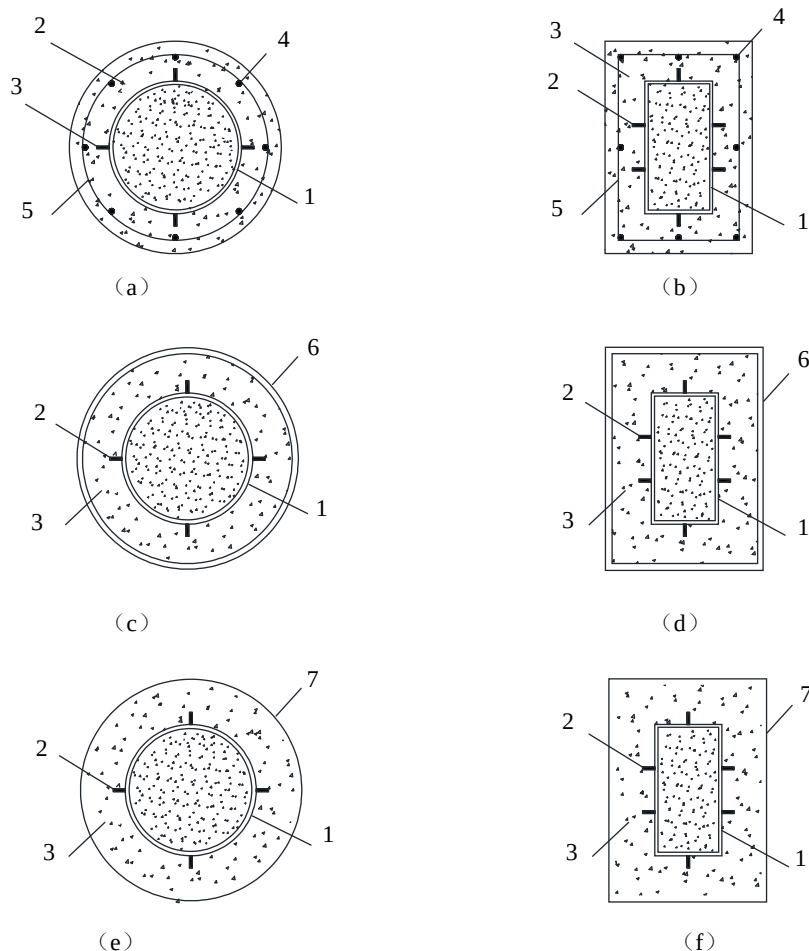


图 8 典型的火灾后修复加固措施

1—原钢管再生混凝土柱；2—栓钉或竖板；3—新混凝土；
4—纵筋；5—螺旋箍筋；6—钢管；7—FRP 布

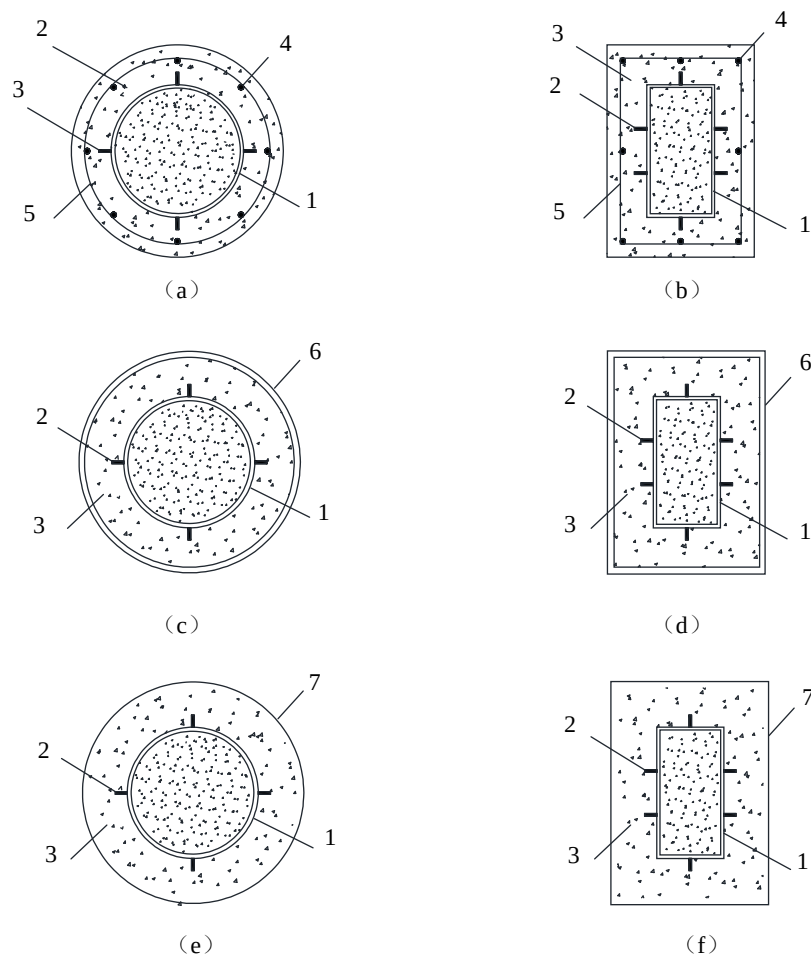


图 8 典型的火灾后修复加固措施

1—原钢管再生混凝土柱；2—栓钉或竖板；3—新混凝土；
4—纵筋；5—螺旋箍筋；6—钢管；7—FRP 布

9.2 防腐设计

9.2.1、9.2.2 本条文适用于钢管再生混凝土遭受均匀腐蚀或近似均匀腐蚀的工况，即钢管腐蚀表面无明显的局部坑蚀。钢管再生混凝土结构应参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 进行相应防腐设计。但工程实际中的钢管再生混凝土结构，往往由于环境、人为等因素影响，构件钢管仍可能发生腐蚀。基于此，本条给出了腐蚀后构件承载力的计算方法，为腐蚀后构件的评估提供依据。

9.3 防火设计

9.3.1 火灾下钢管再生混凝土构件的荷载比 R 表征受火过程中作用在结构上的轴心受压荷载水平。已有研究表明，荷载比是影响钢管再生混凝土构件耐火极限的重要参数。

9.3.2 当温度超过 100°C 时，核心混凝土中的水分会发生蒸发，从而导致钢管内压力显著增加，增加的压力可能造成钢管爆裂等安全隐患，因此，为保证火灾发生时核心混凝土中水蒸气的排放，应在钢管上设置排气孔。对于较长杆件，为保证充分排气，当杆件长度超过 4m 时，应在构件长度方向增设排气孔。

当采用钢管再生混凝土柱-钢梁外加强环板连接节点时，为保证梁柱连接的火灾中的安全性，

节点区外加强环板和钢管的防火保护层厚度应取与钢管相连的钢梁和钢管再生混凝土防火保护层厚度的较大值。

9.4 防撞击设计

9.4.1 本条规定了钢管再生混凝土结构抗撞击设计的设计原则。在结构分析和构件设计中是否需要考虑撞击作用，应根据结构的安全等级、结构类型、复杂程度等因素，由设计人员根据经验决定。撞击荷载的计算应根据撞击物的质量、速度、撞击时间和作用点确定，应根据工程类型，参考国家现行有关标准确定。

9.4.2 对于安全等级为一级的结构，宜在考虑材料应变率效应的基础上，进行精细化的动力有限元分析与设计。再生混凝土应变率效应模型可采用国际结构混凝土联合会 FIB Model Code 2010 提出的公式，即式 A.1.7-1 与 A.1.7-2。该模型适用混凝土强度范围为 C15~C140、混凝土受压应力-应变关系应变率效应公式适用应变率范围为 $30 \times 10^{-6} \sim 300 \text{s}^{-1}$ ，受拉应力-应变关系应变率效应公式适用应变率范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 300 \text{s}^{-1}$ 。钢材的应变率效应随着屈服强度的增大呈现明显的下降趋势。哈尔滨工业大学杨华等基于 453 个试验数据建立的建筑结构钢连续性动态本构模型（公式 A.2.6-1），能较为准确地预测普通强度与高强度建筑结构钢在较大应变率区间的动态响应。适用范围为：钢材的屈服强度 235~960MPa、应变率 $0.00025 \sim 5000 \text{s}^{-1}$ 。

9.4.3 式（9.4.3-1）中计算得到的为圆形钢管再生混凝土在遭受具有一定质量和速度的刚体撞击时的动力极限弯矩。对于工程中可产生较大塑性变形的可变形体，如汽车等，撞击圆形钢管再生混凝土的工况，可参考进行计算。公式中各参数适用范围为：钢材 Q235~Q690 或 Q235GJ~Q690GJ、再生混凝土 RC30~RC50、再生粗骨料取代率 0~100%、截面含钢率 0.05~0.20、截面直径 200~600mm、撞击物质量 500~3000kg、撞击物速度 0~28m/s。

9.4.4 本条规定了简支条件下的圆形钢管再生混凝土构件中部遭受刚性撞击物侧向撞击时的动态稳定性要求与判别方法，公式中各参数适用范围为：钢材 Q235~Q690 或 Q235GJ~Q690GJ、再生混凝土 RC30~RC50、再生粗骨料取代率 0~100%、截面含钢率 0.05~0.20，截面直径 200mm~600mm，撞击物质量 500kg~3000kg，撞击物速度 0m/s~28m/s。对于两端固支和一端固支一端简支的边界条件、其他撞击作用位置、柔性撞击等工况也可偏于安全地根据本条规定进行计算。

9.4.5、9.4.6 分别规定了钢管再生混凝土构件中部遭受刚性撞击物侧向撞击时的撞击变形要求与计算方法和撞击作用发生后轴向承载力剩余率的要求与计算方法，公式中各参数适用范围为：钢材 Q235~Q690 或 Q235GJ~Q690GJ、再生混凝土 RC30~RC50、再生粗骨料取代率 0~100%、截面含钢率 0.05~0.20，截面直径 200mm~600mm，撞击物质量 500kg~3000kg，撞击物速度 0m/s~28m/s。对于两端固支和一端固支一端简支的边界条件、其他撞击作用位置、柔性撞击等工况也可偏于安全地根据本条规定进行计算。其中，构件在撞击作用发生时的最大变形允许值 $[u_m]$ 及撞击作用发生后的轴向承载力剩余率允许值 $[R_r]$ 由工程设计人员依据结构安全等级及设计经验确定。根据 1000 个随机模型的计算结果显示，构件中部最大受撞变形为构件长度的 1.7%时，即柱端转角约为 2° ，构件的轴向承载力剩余率约为 80%；构件中部最大受撞变形为构件长度的 3.5%时，即柱端转角约为 4° ，构件的轴向承载力剩余率约为 63%，可供相关设计参考。

9.4.7 本条公式中各参数适用范围为：钢材 Q235~Q690 或 Q235GJ~Q690GJ、再生混凝土 RC30~RC50、再生粗骨料取代率 0~100%、截面含钢率 0.05~0.20，截面直径 200mm~600mm、腹弦杆管径比 0.3~0.7，撞击物质量 500kg~3000kg，撞击物速度 0m/s~28m/s。

9.5 抗爆设计

9.5.1 现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 中对目前工程中较为常用且有一定研究和

应用经验的炸药爆炸和燃气爆炸荷载给出了规定。对于规定之外的爆炸荷载取值，宜根据结构的重要性和所处的环境（指社会环境和周边交通环境），减轻爆炸荷载的措施（指防爆墙、防撞墩）以及业主需求共同确定。

9.5.2 等效静载法、等效单自由度模型、超压-冲量图法和有限元分析法等方法是进行结构抗爆分析常用的方法，但具有其适用条件。等效静载法前提是等效静力荷载作用下的内力与动荷载作用下相应内力最大值相等，可将动荷载视为考虑动力系数后的等效静荷载，一般适用于构件。等效单自由度模型将结构构件等效为单自由度体系，运用结构动力学中对单自由度集中质量体系的分析结果，可获得相应的动力系数。等效单自由度模型具有概念清晰、简单实用等特点，因而作为简化分析方法被广泛应用于各种结构构件的抗爆分析和设计规范；但仍有其局限性：不能考虑结构构件的剪切破坏，以及结构有明显的局部变形（如近爆或接触爆炸）的情况；不能考虑结构构件高阶响应的影响；另外，在复杂结构的分析方面，等效单自由度模型的应用也有较大的局限性。

超压-冲量图法给出了构件在超压-冲量下的破坏等级曲线，不仅能够反映峰值超压的破坏效应，还考虑了超压产生的累积冲量的影响。超压-冲量图法中破坏等级曲线可以通过理论解析推导、试验和数值模拟方法得到。

结构抗爆有限元方法的基本原理是以连续介质力学守恒方程和固体材料本构方程为基础，将描述结构在爆炸冲击作用下的动力学方程离散化，根据协调方程、边界条件和初始条件等，借助编制的计算程序进行计算求解。相比前面的方法，有限元分析法具有如下优点：如可以综合考虑材料在爆炸冲击波荷载作用下的复杂本构关系、结构构件的复杂边界条件、爆炸冲击波的传播及其与结构相互作用的复杂过程；可以得到试验中难以精确观测的应力、变形和破坏过程等的详细信息；可以对构件的局部损伤和结构的整体响应特征和破坏模式进行精确分析等。然而，该方法也存在如下问题：计算结果常受到材料动态本构模型和损伤失效准则等参数定义的影响，难以判断分析结果的准确性和可靠性；涉及几何非线性、材料非线性和接触非线性等问题，计算难于收敛且计算耗时长；建模过程通常比较复杂且工作量大，对分析者在结构动力学、爆炸动力学和有限元方法等方面的理论知识要求较高，工程实用性较差。另外，有限元分析法还需要基于试验研究的模型验证以及网格收敛性分析。。

9.5.3 近场爆炸、接触爆炸条件下，结构构件一般会出现比较明显的局部损失或破坏，简化理论方法，如等效静载法和等效单自由度模型已不适用，需要根据试验或有限元分析确定爆炸荷载作用下钢管再生混凝土结构的动态响应和破坏模态等。

9.5.4 现行国家标准《人民防空地下室设计规范》GB 50038 和《抗爆间室结构设计规范》GB 50907 中给出了钢筋、混凝土和砌体的动荷载作用下材料强度综合调整系数。对于其他结构材料，宜采用材料的静、动态力学性能试验研究及应变率范围确定。

9.5.5 钢管再生混凝土结构的构造措施结合结构的设计需求，宜与抗震、抗火、防撞等设计的构造一体化考虑；如有其他构造措施，应采用试验研究或数值模拟对其进行研究或验证。

10 施工、验收、维护和拆除

10.1 一般规定

10.1.1~10.1.5 本节给出了钢管再生混凝土结构施工、验收、维护和拆除的一般规定。根据工程类别，钢管再生混凝土结构还需符合国家现行有关标准的规定。

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。

10.2 制作与安装

10.2.1 钢管再生混凝土构件常用作各种柱构件，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。

10.2.7 为了保证防火涂料与结构具有可靠粘结，钢管再生混凝土柱防火涂料涂装前应对钢管表面进行除锈及防锈处理。

10.2.11 钢管构件在吊装时，如吊装荷载作用下的变形过大，应采取临时加固措施。

10.2.12 吊装钢管构件时将构件管口包封可防止异物落入管内。

10.3 钢管内再生混凝土施工

10.3.3 泵送顶升法、人工浇捣法、埋管输入法和高位抛落法等混凝土浇筑方法是目前国内钢管再生混凝土工程施工中较为成熟的方法。具体工艺如下：

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

2 人工浇捣法：混凝土自钢管上口逐段灌入，并用振捣器逐段振捣密实；

3 埋管输入法：通过导管将混凝土输送入钢管，并保证在施工过程中导管端部埋入混凝土一定深度，边提管边完成混凝土浇筑。依靠混凝土自重进行不间断填充，使混凝土密实；

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

其中泵送顶升法的质量最易控制。随着施工技术的发展，在工程实践中矩形钢管再生混凝土施工的工艺将会有所不同，但无论采用哪种工艺，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钢管再生混凝土构件作为质量检测的参照试件。

10.3.5 当钢管再生混凝土结构需设置施工缝时，封闭管口可防止水、油和异物等落入钢管内。对接焊口的钢管应高出混凝土浇筑施工缝面，以防止钢管焊接时产生的高温影响混凝土质量。

10.3.6 采用高位抛落法浇筑再生混凝土前浇灌一层砂浆，可防止自由下落的混凝土产生骨料弹跳现象。

10.4 检测与验收

10.4.3 钢管再生混凝土结构中钢管混凝土部分的管内混凝土浇筑质量，可采用敲击钢管的方式检查混凝土密实度，重要构件或部位宜采用超声波或冲击回波进行检测。

附录 A 钢管再生混凝土结构的材料本构模型

A.1 再生混凝土

A.1.1 再生混凝土本构模型中屈服面方程宜按下列公式确定：

$$F = \frac{1}{1-\alpha} \left[\sqrt{3J_2} + \alpha I_1 + \beta(\sigma_{\max}) - \gamma(-\sigma_{\max}) \right] - \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{\text{pl}}) \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} - 1}{\frac{2\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} - 1} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}(1-\alpha) - (1+\alpha) \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c - 1} \quad (14)$$

式中：
 σ_{b0} —— 双向受压状态下的峰值应力 (N/mm²)；
 σ_{c0} —— 单轴受压状态下的峰值应力 (N/mm²)；
 $\sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{\text{pl}})$ —— 再生混凝土有效粘聚应力 (N/mm²)；
 K_c —— 拉、压子午线上第二应力不变量的比值，对于再生混凝土近似为一常数，其值为 2/3。

A.1.2 对于反复荷载作用的工况，可引入损伤指标对再生混凝土弹性刚度矩阵加以折减，来反映再生混凝土在拉、压时受损引起的弹性刚度退化。损伤指标从 0（无损伤）变化到 1（完全损伤）。 $(1-d)$ 表示有效承载面积（总面积减去损伤面积）与总面积之比。在无损伤的情况下， $d=0$ ，有效应力 $\bar{\sigma}$ 相当于柯西应力，此时再生混凝土的骨架曲线如 A.1.1 条所述；当损伤出现后，仅由未损伤面积承担外荷载。在反复荷载作用下，再生混凝土截面在受拉开裂后重新受压时，开裂面会产生骨料咬合的裂面效应，使开裂面在完全闭合之前就能传递相当部分的压应力。受拉、受压刚度恢复系数 d_t 和 d_c 分别控制裂缝闭合前后的行为，二者可以在 0 到 1 之间变化。当 $\omega_t = 0$ 时，认为受压再生混凝土卸载并再次受拉时，受拉刚度和受压卸载刚度的比值为 $(1-d_t)$ ；当 $\omega_t = 1$ 时，认为开裂后的再生混凝土再次受压时，受压刚度完全恢复。

反复荷载作用下的再生混凝土加、卸载准则宜采用“焦点法”模型，即当卸载再反向加载时，其卸载、再加载路径近似的指向空间的某一“焦点”。如图 9 所示，再生混凝土由受压卸载，再反向加载时，其所有加、卸载路径近似指向空间 $R((n_c\sigma_{c0})/E_{c,r}, n_c\sigma_{c0})$ ，其中， n_c 为再生混凝土受压损伤指标系数； σ_{c0} 为再生混凝土峰值压应力， $E_{c,r}$ 为再生混凝土初始弹性模量。再生混凝土由受拉卸载，再反向加载时，当再生混凝土应变 (ε_t) 大于峰值拉应力对应的应变 (ε_{t0}) 时，按照初始弹性刚度卸载和再加载；当 ε_t 小于 ε_{t0} 时，加、卸载路径近似指向空间 $Z((n_t\sigma_{t0})/E_{c,r}, n_t\sigma_{t0})$ ，其中， n_t 为再生混凝土受拉损伤指标系数； σ_{t0} 为再生混凝土峰值拉应力。

根据以上加、卸载准则，则单轴受力情况下再生混凝土受压、受拉损伤指标可按下列公式计算：

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c + n_c \sigma_{c0}}{E_{c,r} (n_c \sigma_{c0} / E_{c,r} + \varepsilon_c)} \geq 0 \quad (15)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t + n_t \sigma_{t0}}{E_{c,r} (n_t \sigma_{t0} / E_{c,r} + \varepsilon_t)} \geq 0 \quad (16)$$

式中： d_c —— 再生混凝土受压损伤指标；
 d_t —— 再生混凝土受拉损伤指标；
 σ_c —— 再生混凝土受压应力 (N/mm²)；
 σ_t —— 再生混凝土受拉应力 (N/mm²)；
 σ_{c0} —— 再生混凝土峰值压应力 (N/mm²)；
 σ_{t0} —— 再生混凝土峰值拉应力 (N/mm²)；
 ε_c —— 再生混凝土受压应变；
 ε_t —— 再生混凝土受拉应变；
 ε_{c0} —— 再生混凝土峰值压应力对应的应变；
 ε_{t0} —— 再生混凝土峰值拉应力对应的应变；
 n_c —— 再生混凝土受压损伤指标系数，对于钢管内再生混凝土， $n_c=2$ ；
 n_t —— 再生混凝土受拉损伤指标系数，对于钢管内再生混凝土， $n_t=1$ 。

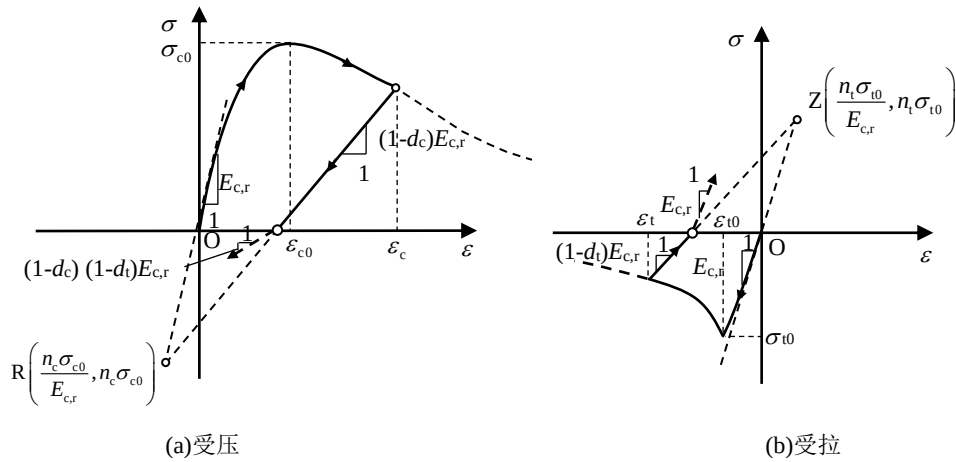


图9 混凝土加、卸载刚度退化

A.1.6 表 A.1.6 中高温后再生混凝土弹性模量折减系数 ($\alpha_{E_c}^p$) 按下式计算：

$$\alpha_{E_c}^p = E_c^{T,p} / E_c = \begin{cases} -0.00165T_c + 1.033 & (20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 125^\circ\text{C}) \\ \frac{1}{1.2 + 18(0.0015T_c)^{4.5}} & (125^\circ\text{C} < T_c \leq 800^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (17)$$

式中： T —— 再生混凝土经历的历史最高温度 (°C)；
 $E_c^{T,p}$ —— 高温后再生混凝土弹性模量 (N/mm²)；
 E_c —— 常温下再生混凝土弹性模量 (N/mm²)。

A.2 钢材

A.2.3 参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010，当钢筋在进入强化段 ab 前卸载，

则不需考虑包辛格效应，按弹性模量 E_s 加、卸载；当钢筋在进入强化段 ab 后卸载，则需考虑包辛格效应，按弹性模量 E_s 卸载至应力为零点，再加载过程沿直线指向该方向初始屈服点（ da' 段）或历史最大应变点（ $d'c$ 段），之后继续沿骨架线加载。

A.2.5 高温后钢材的力学性能与钢材种类、高温持续时间、冷却方式等因素有关。一般认为：高温状态下，钢材内部金相结构发生变化，强度和弹性模量随着温度的升高而不断降低，经过高温冷却后，其强度有较大幅度的恢复。对于高温后钢管混凝土构件的力学性能研究表明，自然冷却钢管钢材的应力-应变关系采用双折线模型与实测结果较为吻合。

附录 B 钢管内再生混凝土收缩应变和徐变应变计算

B.0.1 再生粗骨料表面往往附着有陈旧水泥砂浆，因此相对于普通混凝土，再生混凝土实际的砂浆质量百分比偏高而天然骨料质量百分比偏低，进而使其收缩应变高于相应的普通混凝土。因此，在现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 中钢管内普通混凝土收缩应变计算公式的基础上，考虑再生混凝土收缩应变修正系数，对钢管再生混凝土中核心再生混凝土的收缩应变进行计算。根据对现有实测结果的分析，建议公式（B.0.1-1）的适用范围是 $100\text{mm} < D < 1200\text{mm}$ ，再生粗骨料取代率 0~100%。

B.0.2 再生混凝土的徐变变形通常大于相同条件下的普通混凝土，因此采用基于骨料表观密度的修正系数 K_{RAC} 对 ACI 209.2R-08 中基于徐变系数的模型进行修正。计算管内再生混凝土的徐变系数时可取相对湿度为 90%。