

DB21

辽宁省地方标准

DB21/XXXXX-2023
XXXXXX-2023

碳纤维增强聚合物-钢管混凝土 结构技术规程

Technical Specification for Concrete Filled
CFRP-Steel Tubular Structures

(征求意见稿)

2023-XX-XX 发布

2023-XX-XX 实施

辽宁省住房和城乡建设厅
辽宁省市场监督管理局

联合发布

辽宁省地方标准

碳纤维增强聚合物-钢管混凝土 结构技术规程

Technical Specification for Concrete Filled CFRP-Steel Tubular Structures

DB21/XXXXX-2023

XXXXXX-2023

主编单位：辽宁科技大学
中国建筑东北设计研究院有限公司

批准部门：辽宁省住房和城乡建设厅
辽宁省市场监督管理局

施行日期：2023年XX月XX日

2023 沈阳

前 言

根据辽宁省市场监督管理局辽市监发[2022]20号文件《辽宁省市场监督管理局关于印发2022年辽宁省地方标准立项计划的通知》和辽宁省住房和城乡建设厅辽住建科[2022]11号文件《关于印发〈2022年度辽宁省工程建设地方标准制修订计划〉通知》的要求，在借鉴国内外先进标准的基础上，结合本地区CFRP-钢管混凝土结构的实际，由辽宁科技大学和中国建筑东北设计研究院有限公司等单位负责编制本规程。

CFRP-钢管混凝土结构是在钢管混凝土结构和FRP管混凝土结构的基础上演变和发展起来的，属于钢、混凝土和CFRP组合结构形式之一。由于CFRP-钢管混凝土可以充分利用钢、混凝土和CFRP三种材料在受力过程中的相互作用，因此能够很好地发挥各自的特性和潜力，使材料得到更为充分和合理的利用，可以取得很好的建筑效果。另一方面，采用CFRP加固更新既有老旧钢管混凝土结构是一个不错的选择。为了对其设计施工等技术要求做出配套的规定以促进其进一步发展，本规程在总结国内外设计、施工、管理经验和科研成果的基础上，对CFRP-钢管混凝土结构的基本设计要求、材料、构件承载力计算、节点和施工与验收等做出了规定。本规程为首次发布。

本规程由辽宁科技大学（辽宁省鞍山市立山区千山中

路189号，邮编114051)负责解释。

主编单位：辽宁科技大学

中国建筑东北设计研究院有限公司

参编单位：辽宁中测建筑科技有限公司

辽宁省交通高等专科学校

东北大学

西南石油大学

中国三冶集团有限公司

辽宁省市政工程设计研究院有限责任公司

参编人员：王庆利 陈 勇 于彦凯 田 帅 冯 颖

宁迎福 刘一民 刘鹏飞 张艺竞 张红涛

张铁志 张慧莹 陈 猛 赵 彤 赵 杰

秦海宇 郭益寰 顾 威 高 松 高 健

高华国 高行程 高国瑞 彭 宽 董志峰

审 查 人：

目 次

1 总 则.....	1
2 术语和符号.....	3
2.1 术 语.....	3
2.2 符 号.....	4
3 基本规定.....	9
4 材料与设计指标.....	10
5 构件的承载力计算.....	14
5.1 一般规定.....	14
5.2 轴压短柱的承载力计算.....	14
5.3 轴压长柱的稳定承载力计算.....	14
5.4 受弯构件的承载力计算.....	15
5.5 压-弯构件的承载力计算.....	16
5.6 压-弯滞回构件的恢复力模型.....	17
6 节点和连接.....	31
7 施工与验收.....	31
7.1 一般规定.....	31
7.2 钢构件的制作与施工.....	31
7.3 混凝土施工.....	33
7.4 冬期混凝土施工.....	34
7.5 碳纤维织物粘贴施工.....	36
7.6 验 收.....	37
1 总 则.....	39
2 术语和符号.....	40

3 基本规定.....	41
4 材料与设计指标.....	42
5 构件的承载力计算.....	45
5.1 一般规定.....	45
5.2 轴压短柱的承载力计算.....	45
5.3 轴压长柱的承载力计算.....	46
5.4 受弯构件的承载力计算.....	47
5.5 压-弯构件的承载力计算.....	47
5.6 压-弯滞回构件的恢复力模型.....	48
6 节点和连接.....	50
7 施工与验收.....	57
7.1 一般规定.....	57
7.2 钢构件的制作与施工.....	58
7.3 混凝土施工.....	58
7.4 冬期混凝土施工.....	58
7.5 碳纤维织物粘贴施工.....	59
7.6 验收.....	60

1 总 则

1.0.1 为满足建筑工程的需要，使 CFRP-钢管混凝土结构的设计、施工和验收做到技术先进、安全适用、经济合理以及确保质量，特制定本规程。

1.0.2 本规程限用于圆形和方形截面 CFRP-钢复合管内浇筑素混凝土的 CFRP-钢管混凝土结构，以及用 CFRP 修复/加固受损或既有钢管混凝土而形成的结构。

1.0.3 本规程适用于本省工业与民用建筑及构筑物的 CFRP-钢管混凝土结构的设计、施工和验收。

1.0.4 本规程根据现行国家标准 A 《工程结构通用规范》GB55001-2021 规定的原则制定。

1.0.5 本规程使用的符号、计量单位和基本术语按现行国家标准《工程结构设计通用符号标准》GBT50132-2014 和《工程结构设计基本术语标准》GBT50083-2014 的规定采用。

1.0.6 除了本规程外，CFRP-钢管混凝土的结构设计尚应遵守现行国家标准《结构加固修复用碳纤维片材》JGT167-2016、《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》CECS146-2003、《既有建筑鉴定与加固通用规范》GB55021-2021、《合金结构钢》GB/T3077-2015、《碳素结构钢》GB700-2006、《建筑结构荷载规范》GB50009-2012、《钢结构设计标准》GB50017-2017、《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 (2015 版)、《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 (2016 版)、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99-2015 以及《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2010 的有关规定。

1.0.7 CFRP-钢管混凝土施工质量应符合现行国家标准《钢管混凝土工程施工质量验收规范》GB50628-2010、《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205-2020、《混凝土结构工程施工质量验收规范》

GB50204-2015、《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB50550-2010 及有关标准的要求。有关钢结构部分的设计尚应注明所要求的焊缝质量等级及对钢材所要求的机械性能和化学成分的附加保证项目。混凝土强度的检验评定应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T50107-2010 的要求。

1.0.8 特殊环境下的 CFRP-钢管混凝土结构设计与施工，尚应符合专门规范的有关规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 CFRP-钢管混凝土 concrete-filled CFRP-steel tube

在 CFRP-钢复合管内浇筑混凝土而形成的构件，也指用 CFRP 修复/加固受损或既有钢管混凝土而形成的构件。

2.1.2 CFRP-钢管混凝土结构 concrete-filled CFRP-steel tubular structures

以 CFRP-钢管混凝土为主要受力构件的结构。

2.1.3 组合轴压强度 composite compressive strength

CFRP-钢管混凝土组合截面所能承受的最大名义压应力。

2.1.4 组合轴压弹性模量 composite compressive modulus of elasticity

CFRP-钢管混凝土组合截面在单向受压，且其纵向名义应力与应变近似呈线性关系时，截面上名义正应力与对应的正应变的比值。

2.1.5 组合弹性抗弯刚度 composite bending stiffness of elasticity

CFRP-钢管混凝土构件的曲率与截面弯矩近似呈线性关系时，截面弯矩与曲率的比值。

2.1.6 钢管约束系数 confinement factor of steel tube

反映 CFRP-钢管混凝土中钢管对混凝土的约束作用，用 ξ_s 表示， $\xi_s = A_s f_y / (A_c f_{ck})$ 。

2.1.7 横向 CFRP 约束系数 confinement factor of transverse CFRP

反映 CFRP-钢管混凝土中横向 CFRP 为钢管混凝土提供的横向约束作用，用 ξ_{cf} 表示， $\xi_{cf} = A_{cf} f_{ctv} / (A_c f_{ck})$ 。

2.1.8 纵向 CFRP 增强系数 strengthening factor of longitudinal CFRP

反映 CFRP-钢管混凝土中纵向 CFRP 为钢管混凝土提供的纵向增强系数，用 η 表示， $\eta=A_{cf}f_{cf}/(A_s f_y)$ 。

2.1.9 总约束系数 global confinement factor

反映 CFRP-钢管混凝土中横向 CFRP 和钢管对混凝土的总约束作用，用 ξ 表示， $\xi=\xi_s+\xi_{cf}$ 。

2.1.10 约束系数比 confinement factor ratio

反映 CFRP-钢管混凝土中横向 CFRP 与钢管的匹配关系，用 ξ' 表示， $\xi'=\xi_{cf}/\xi_s$ 。

2.1.11 加强环板 stiffener ring plate

为构造 CFRP-钢管混凝土刚性节点而设置的环向节点板。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应（设计值）

- M — 弯矩；
- N — 轴压力；
- V — 对应于 M_c 柱轴线处梁端剪力。

2.2.2 计算指标

- E_c — 混凝土的弹性模量；
- E_{cf} — 碳纤维布的弹性模量；
- E_{cfsc} — CFRP-钢管混凝土的组合轴压弹性模量；
- $E_{cfsc}A_{cfsc}$ — CFRP-钢管混凝土轴压短柱的纵向刚度；
- E_s — 钢材的弹性模量；
- f_c — 混凝土的抗压强度设计值；
- f_{cfscy} — CFRP-钢管混凝土的轴压强度；
- f_{ck} — 混凝土的轴心抗压强度标准值；
- f_{cu} — 混凝土立方体抗压强度；
- f_{cfscp} — CFRP-钢管混凝土的轴压短柱的名义比例极

	—	限；
f_t	—	混凝土的抗拉强度设计值；
f_{tk}	—	混凝土的轴心抗拉强度标准值；
f_u	—	钢材的抗拉强度；
f_y	—	钢材的屈服强度；
f'_c	—	混凝土圆柱体抗压强度；
f'_{cf}	—	碳纤维布的抗拉强度；
G_f	—	混凝土的断裂能；
K_a	—	CFRP-钢管混凝土恢复力模型的弹性阶段的刚度；
K_T	—	CFRP-钢管混凝土恢复力模型的第三阶段的刚度；
M_0	—	只有横向 CFRP 的 CFRP-钢管混凝土的抗弯承载力；
M_{bc}	—	CFRP-钢管混凝土压-弯构件的抗弯承载力；
M_c	—	柱中心线处的梁支座弯矩设计值；
M_u	—	CFRP-钢管混凝土的抗弯承载力(兼有横、纵 CFRP)；
M_y	—	CFRP-钢管混凝土在侧向滞回力作用下的抗弯承载力；
N_b	—	梁轴向力对一个环板产生的拉力；
N_{bc}	—	CFRP-钢管混凝土压-弯构件的抗压承载力；
N_E	—	欧拉临界力；
N_u	—	CFRP-钢管混凝土的轴压承载力；
$N_{u, cr}$	—	CFRP-钢管混凝土的稳定承载力；
N_y	—	y 方向与 $N_{x, max}$ 同时作用的拉力；

P_y	—	压-弯滞回性能试件骨架曲线峰值荷载；
V_{\max}	—	梁端腹板承受的最大剪力；
ν_c	—	混凝土的泊松比；
ν_s	—	钢材的泊松比；
w_{cf}	—	碳纤维布的单位面积重量；
W_{cfscm}	—	CFRP-钢管混凝土的抗弯模量；
ε_0	—	混凝土的极限压应变；
ε_{cfscp}	—	对应于 f_{cfscp} 的应变；
ε_{cft}	—	横向 CFRP 的应变；
ε_{cl}	—	混凝土的纵向应变；
ε_u	—	圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱在荷载达到 N_{\max} 时对应的纵向应变、方 CFRP-钢管混凝土在横向 CFRP 断裂时对应的纵向应变。
λ	—	长细比；
λ_0	—	CFRP-钢管混凝土弹塑性失稳的界限长细比；
λ_p	—	CFRP-钢管混凝土弹性失稳的界限长细比；
σ_0	—	混凝土的极限压应力；
σ_{cft}	—	横向 CFRP 的应力；
σ_{cl}	—	混凝土的纵向应力；
σ_{t0}	—	混凝土的极限拉应力。

2.2.3 几何参数

A_c	—	混凝土的横截面积；
A_{cfsc}	—	CFRP-钢管混凝土的横截面积；
A_{cft}	—	横向 CFRP 的横截面积
A_s	—	钢管的横截面积；
A_{sc}	—	钢管混凝土的横截面积；

B	—	构件的外边长，以 mm 计；
b_e	—	柱肢管壁参加加强环工作的有效宽度；
b_j	—	角焊缝包入的宽度；
B_s	—	方钢管的外边长，以 mm 计；
D	—	构件的外径，以 mm 计；
D_s	—	圆钢管的外径，以 mm 计；
h	—	梁端截面高度；
h_j	—	腹板高度；
I_c	—	混凝土截面惯性矩；
I_{cfl}	—	纵向 CFRP 的截面惯性距；
I_s	—	钢管截面惯性矩；
L	—	试件的计算长度；
r	—	承载力的提高率、方钢管的内倒角半径；
r_c	—	混凝土的半径；
t	—	柱肢管壁厚度；
t_{cf}	—	单层碳纤维布的厚度；
t_s	—	钢管的壁厚；
t_w	—	腹板厚度。

2.2.4 计算系数及其它

e	—	偏心率；
n	—	轴压比；
α	—	含钢率， $\alpha=A_s/A_c$ ；拉力 N 作用方向与计算截面的夹角；
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， $\beta=0$ ；
Δ_p	—	骨架曲线峰值荷载对应的位移；

φ	—	CFRP-钢管混凝土的稳定系数、轴压比影响系数；
η	—	纵向 CFRP 增强系数；
γ	—	CFRP-钢管混凝土抗弯承载力计算系数(仅有横向 CFRP)；
γ_m	—	CFRP-钢管混凝土抗弯承载力计算系数(兼有横、纵 CFRP)；
λ_0	—	CFRP-钢管混凝土弹塑性失稳的界限长细比；
λ_p	—	CFRP-钢管混凝土弹性失稳的界限长细比；
ξ	—	总约束系数；
ξ_{cf}	—	横向 CFRP 约束系数；
ξ_s	—	钢管约束系数；
ξ'	—	约束系数比， $=\xi_{cf}/\xi_s$ ；
ξ_0	—	截面的约束效应系数设计值。

3 基本规定

3.0.1 CFRP-钢管混凝土结构设计必须贯彻执行国家技术经济政策，充分考虑工程情况、材料供应、构件运输、安装和施工的具体条件，合理选用结构方案，做到安全、经济和适用。

3.0.2 方 CFRP-钢管混凝土柱边长尺寸不宜小于 150mm，钢管壁厚不应小于 3mm。圆 CFRP-钢管混凝土柱截面直径不宜小于 180mm，壁厚不应小于 3mm。钢管的外直径或最大外边长与壁厚之比不得大于无混凝土时由现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 钢管局部稳定控制的相应限值的 1.5 倍。

3.0.3 CFRP-钢管混凝土宜用作轴心受压或小偏心受压的构件。

3.0.4 结构构件应根据承载能力极限状态和正常使用极限状态的要求进行下列计算和验算：

1 承载力及稳定

所有结构构件均应进行承载力计算，必要时尚应进行结构的抗倾覆和抗滑移验算。

2 变形

对使用上需控制变形的结构构件，应进行变形验算。

3.0.5 CFRP-钢管混凝土构件应按制作、运输及安装的荷载设计值进行施工阶段的验算，其自身吊装的验算，应将构件自重乘以动力系数 1.5。

3.0.6 当 CFRP-钢管混凝土用作地震区的多层、高层（结构体系中含框架的）和超高层框架结构柱时，对于 CFRP-圆钢管混凝土，构件截面的约束效应系数设计值 ξ_0 不应小于 0.6，对于 CFRP-方钢管混凝土， ξ_0 不应小于 1，其中 $\xi_0 = A_s f / (A_c f_c) + A_{cfr} f_{fr} / (A_c f_c)$ ，其中 A_s 为钢管的截面面积， f 为钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值， A_c 为钢管内混凝土的截面面积， f_c 为混凝土的轴心抗压强度设计值。

4 材料与设计指标

4.0.1 钢管用钢材宜采用 Q235、Q345、Q390、Q420、Q460 和 Q345GJ 钢，其性能与质量要求应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定和要求。当采用其它品种的钢材时，尚应符合相应有关标准的规定和要求。用于加工钢管的钢板板材尚应具有冷弯试验的合格保证。

4.0.2 钢管宜采用直缝焊接管。焊缝应采用对接焊缝并符合二级质量检验标准。

4.0.3 宜采用高强高性能混凝土，水灰比不宜大于 0.40。

4.0.4 混凝土的强度等级不宜低于 C30 级，可参照下列材料强度指标进行组合：Q235 钢配 C30 或 C40 级混凝土；Q345 钢配 C40、C50 或 C60 级混凝土；Q390、Q420 和 Q460 钢配 C50、C60 级或 C60 以上强度等级的混凝土。混凝土的强度按表 4.0.4-1 确定（表内中间值可用插值法求得），其中 f_{ck} 为混凝土的轴心抗压强度标准值， f_{tk} 为混凝土的轴心抗拉强度标准值， f_c 为混凝土的轴心抗压强度设计值， f_t 为混凝土的轴心抗拉强度设计值。

表 4.0.4-1 混凝土强度（MPa）

混凝土强度等级	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C95	C100
f_{ck}	20.1	26.8	32.4	38.5	44.5	50.2	55.9	58.7	61.5
f_{tk}	2.01	2.39	2.64	2.85	2.99	3.11	3.21	3.25	3.29
f_c	14.3	19.1	23.1	27.5	31.8	35.9	39.9	41.9	43.9
f_t	1.43	1.71	1.89	2.04	2.14	2.22	2.29	2.32	2.35

4.0.5 采用单项碳纤维布，其安全性及适配性检验指标应符合表 4.0.5-1 的规定。碳纤维布的抗拉强度、受拉弹性模量和伸长率，应采用《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》GB/T3366 进行测定；碳纤维织物单位面积质量，应采用《增强制品试验方法第 3 部分：单位面积质量的测定》GB/T9914.3 进行测定。禁止使用来源不明的

碳纤维布，以及未做适配性检验的胶粘剂。

表 4.0.5-1 碳纤维复合材安全性能指标

检验项目		合格指标		
		单向织物（布）		
		高强 I 级	高强 II 级	高强 III 级
抗拉强度 (MPa)	标准值	≥3400	≥3000	—
	平均值	—	—	≥3000
受拉弹性模量 (MPa)		≥2.3×10 ⁵	≥2.0×10 ⁵	≥2.0×10 ⁵
伸缩率 (%)		≥1.6	≥1.5	≥1.3
弯曲强度 (MPa)		≥700	≥600	≥500
层间剪切强度 (MPa)		≥45	≥35	≥30
纤维复合材与基材 正拉粘结强度 (MPa)		对混凝土和砌体材料：≥2.5，且为基材内聚破坏； 对钢基材：≥3.5，且不得为粘附破坏		
单位面积 质量 (g/m ²)	人工粘贴	≤300		
	真空灌注	≤450		

4.0.6 胶粘剂采用改性环氧树脂胶，其安全性检验指标必须符合表 4.0.6-1 的规定。

表 4.0.6-1 碳纤维复合材的结构胶粘结能力指标

检验项目	检验条件	检验合格指标			
		I类胶		II类胶	III类胶
		A 级	B 级		

钢对钢拉伸 抗拉强度 (MPa)	标准值	试件粘合后养护 7d, 到期立即在: (23±2)℃, (50 ±5) %RH 条件下 测试	≥17	≥14	≥17	
	平均值	(95±2)℃; 10min	—	—	≥15	—
		(125±3)℃; 10min	—	—	—	≥12
		(-45±2)℃; 30min	≥19	≥16	≥19	
钢对钢对接接头 抗拉强度 (MPa)	试件粘合后养护 7d, 到期立即在: (23±2)℃, (50 ±5) %RH 条件下 测试	≥45	≥40	≥45	≥38	
钢对钢 T 冲击 剥离长度 (mm)		≤10	≤20	≤6		
钢对钢不均匀 扯离强度 (kN/m)		≥30	≥25	≥35		
热变形温度 (℃)	使用 0.45MPa 的弯 曲应力进行测试	≥65		≥100	≥130	

4.0.7 CFRP-钢管混凝土组合轴压强度 f_{cfscy} 应按下式计算:

1 圆构件

$$f_{cfscy} = [1.14 + 1.02(\zeta_s + 3\zeta_{cf})]f_{ck} \quad (4.0.7-1)$$

式中: ζ_s — 钢管约束系数;
 ζ_{cf} — 横向 CFRP 约束系数;
 f_{ck} — 混凝土的轴心抗压强度标准值。

2 方构件

$$f_{cfscy} = (1.18 + 0.85\xi)f_{ck} \quad (4.0.7-2)$$

式中: ξ — 约束效应系数设计值。

4.0.8 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的纵向刚度:

$$EA = E_{cfsc}A_{cfsc} \quad (4.0.8)$$

式中: E_{cfsc} — CFRP-钢管混凝土组合轴压弹性模量;
 A_{cfsc} — CFRP-钢管混凝土的横截面积。

4.0.9 CFRP-钢管混凝土组合弹性抗弯刚度应按下式计算:

$$K_e = E_s I_s + 0.6 E_c I_c + E_{cf} I_{cf} \quad (\text{圆构件}) \quad (4.0.9-1)$$

$$K_e = E_s I_s + 0.2 E_c I_c + 5 E_{cf} I_{cf} \quad (\text{方构件}) \quad (4.0.9-2)$$

式中： E_s — 钢材的弹性模量，按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定确定；

E_c — 混凝土的弹性模量；

I_s — 钢管的截面惯性距；

I_c — 混凝土的截面惯性矩；

I_{cf} — 纵向 CFRP 的截面惯性距。

表 4.0.9-1 混凝土弹性模量 (GPa)

混凝土 强度等级	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C95	C100
E_c	30.0	32.5	34.5	36.0	37.0	38.0	39.0	39.5	40.0

5 构件的承载力计算

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于轴压、受弯、稳定和压-弯的静力荷载，以及压-弯滞回作用下的 CFRP-钢管混凝土构件的设计和计算。

5.2 轴压短柱的承载力计算

5.2.1 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的承载力应按下式验算

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

$$N_u = A_{cfsc} f_{cfscy} \quad (5.2.1-2)$$

式中： N — 轴压力；
 A_{cfsc} — CFRP-钢管混凝土的横截面积；
 f_{cfscy} — CFRP-钢管混凝土的轴压强度；
 N_u — CFRP-钢管混凝土的轴压承载力。

1 圆构件：

$$f_{cfscy} = [1.14 + 1.02(\zeta_s + 3\zeta_{cf})] f_{ck} \quad (5.2.1-3)$$

式中： ζ_s — 钢管约束系数；
 ζ_{cf} — 横向 CFRP 约束系数；
 f_{ck} — 混凝土的轴心抗压强度标准值。

2 方构件

$$f_{cfscy} = (1.18 + 0.85\xi) f_{ck} \quad (5.2.1-4)$$

式中： ξ — 总约束系数。

5.3 轴压长柱的稳定承载力计算

5.3.1 CFRP-钢管混凝土轴压长柱构件的稳定承载力应满足下列要求：

$$N \leq N_{u,cr} \quad (5.3.1-1)$$

$$N_{u,cr} = \varphi N_u \quad (5.3.1-2)$$

式中： $N_{u,cr}$ — CFRP-钢管混凝土的稳定承载力；
 φ — CFRP-钢管混凝土的稳定系数。

φ 值可按式计算:

$$\varphi = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_0) \\ a\lambda^2 + b\lambda + c & (\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p) \\ d/(\lambda + 35)^2 & (\lambda > \lambda_p) \end{cases} \quad (5.3.1-3)$$

λ 为构件的长细比:

$$\lambda = 4L/D \quad (\text{圆构件}) \quad (5.3.1-4a)$$

$$\lambda = 2\sqrt{3} L/B \quad (\text{方构件}) \quad (5.3.1-4b)$$

式中: L — 构件的计算长度;
 D — 构件的外直径;
 B — 构件的外边长。

a , b , c 和 d 均为系数:

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

$$b = e - 2a\lambda_p$$

$$c = 1 - a\lambda_0^2 - b\lambda_0$$

$$e = -d/(\lambda_p + 35)^3$$

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

$$d = \left[13500 + 4810 \ln \left(\frac{235}{f_y} \right) \right] \left(\frac{25}{f_{ck} + 5} \right)^{0.3} \left(\frac{\alpha_s}{0.1} \right)^{0.05} \quad (\text{方构件})$$

λ_p 和 λ_0 分别为构件弹性失稳和弹塑性失稳的界限长细比:

$$\lambda_p = 1743/\sqrt{f_y}; \quad \lambda_0 = \pi[(420\xi + 550)/f_{cfscy}]^{0.5} \quad (\text{圆构件})$$

$$\lambda_p = 1811/\sqrt{f_y}; \quad \lambda_0 = \pi[(220\xi + 450)/f_{cfscy}]^{0.5} \quad (\text{方构件})$$

5.4 受弯构件的承载力计算

5.4.1 当 CFRP-钢管混凝土构件仅有横向 CFRP 时, 其受弯承载力

应满足下列要求:

$$M \leq M_0 \quad (5.4.1-1)$$

$$M_0 = \gamma W_{cfscm} f_{cfscy} \quad (5.4.1-2)$$

- 式中: M — 所计算构件段范围内的最大弯矩设计值;
 M_0 — 构件的抗弯承载力(仅有横向 CFRP);
 γ — 构件截面抗弯承载力计算系数(仅有横向 CFRP), 对圆 CFRP-钢管混凝土取 $0.93+0.532\ln(\xi+0.306)$; 对方 CFRP-钢管混凝土取 $1.05+0.524\ln(\xi+0.32)$;
 W_{cfscm} — CFRP-钢管混凝土的抗弯模量, 对圆 CFRP-钢管混凝土取 $\pi D^3/32$; 对方 CFRP-钢管混凝土取 $B^3/6$ 。

5.4.2 当 CFRP-钢管混凝土构件兼有横、纵向 CFRP 时, 其受弯承载力应满足下列要求:

$$M \leq M_u \quad (5.4.2-1)$$

$$M_u = \gamma_m W_{cfscmj} f_{cfscy} \quad (5.4.2-2)$$

- 式中: M_u — 构件的抗弯承载力(兼有横、纵 CFRP);
 γ_m — 构件截面抗弯承载力计算系数(兼有横、纵 CFRP), 对圆 CFRP-钢管混凝土取 $\gamma+(0.3+0.2\xi)\eta$; 对方 CFRP-钢管混凝土取 $\gamma+(0.1+0.2\xi)\eta$ 。

5.5 压-弯构件的承载力计算

5.5.1 CFRP-钢管混凝土压-弯构件的承载力应按下式计算:

1 强度承载力

$$N_{bc}/N_u + aM_{bc}/M_u = 1 \quad (N/N_u \geq 2\eta_0) \quad (5.5.1-1)$$

$$-b(N_{bc}/N_u)^2 - cN_{bc}/N_u + M_{bc}/M_u = 1 \quad (N/N_u < 2\eta_0) \quad (5.5.1-2)$$

$$a = 1 - 2\eta_0$$

$$b=(1-\zeta_0)/\eta_0^2$$

$$c=2(\zeta_0-1)/\eta_0$$

$$\zeta_0=0.18\xi^{-1.15}+1; \quad \eta_0 = \begin{cases} 0.5-0.245\xi & (\xi \leq 0.4) \\ 0.1+0.14\xi^{-0.84} & (\xi > 0.4) \end{cases} \quad (\text{圆构件})$$

$$\zeta_0=0.14\xi^{-1.3}+1; \quad \eta_0 = \begin{cases} 0.5-0.318\xi & (\xi \leq 0.4) \\ 0.1+0.13\xi^{-0.81} & (\xi > 0.4) \end{cases} \quad (\text{方构件})$$

式中: M_{bc} — CFRP-钢管混凝土压-弯构件的抗弯承载力
 N_{bc} — CFRP-钢管混凝土压-弯构件的抗压承载力

2 稳定承载力

$$\begin{cases} \frac{1}{\varphi} \frac{N_{bc}}{N_u} + \frac{a}{d} \frac{M_{bc}}{M_u} = 1 & (N_{bc}/N_u \geq 2\varphi^3\eta_0) \\ -b \left(\frac{N_{bc}}{N_u} \right)^2 - c \frac{N_{bc}}{N_u} + \frac{1}{d} \frac{M_{bc}}{M_u} = 1 & (N_{bc}/N_u < 2\varphi^3\eta_0) \end{cases} \quad (5.5.1-3)$$

$$a=1-2\varphi^2\eta_0$$

$$b=(1-\zeta_0)/(\varphi^3\eta_0^2)$$

$$c=2(\zeta_0-1)/\eta_0$$

$$d=1-0.4N/N_E \quad (\text{圆构件})$$

$$d=1-0.25N/N_E \quad (\text{方构件})$$

式中: N_E — 欧拉临界力, $N_E=\pi^2 E_{\text{cfsc}} A_{\text{cfsc}}/\lambda^2$ 。

5.6 压-弯滞回构件的恢复力模型

5.6.1 CFRP-钢管混凝土采用图 5.6.1 所示的恢复力模型。其侧向荷载取骨架曲线峰值荷载 P_y 的 0.6 倍, OA 段的刚度为 K_a ; B 点为骨架线峰值点, 其侧向荷载为 P_y , 对应的位移为 Δ_p ; 此后, 沿 BC 段加载, 其刚度为 K_T 。

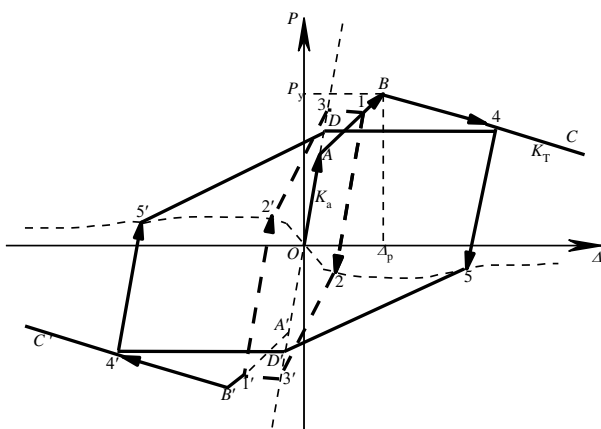


图 5.6.1 CFRP-钢管混凝土的压-弯恢复力模型

5.6.2 CFRP-钢管混凝土压-弯构件弹性阶段的刚度 K_a 按下式计算:

$$K_a = 3K_e / L_1^3 \quad (5.6.2-1)$$

$$K_e = E_s I_s + 0.6 E_c I_c + E_{cf} I_{cf} \quad (\text{圆构件})$$

$$K_e = E_s I_s + 0.2 E_c I_c + 5 E_{cf} I_{cf} \quad (\text{方构件})$$

$$L_1 = L/2$$

式中：
 I_s — 钢管的截面惯性距；
 I_c — 混凝土的截面惯性距；
 I_{cf} — 纵向 CFRP 的截面惯性距。

5.6.3 CFRP-钢管混凝土压-弯构件在侧向滞回力作用下的骨架曲线峰值荷载对应的位移 Δ_p 按下式计算:

1 圆构件:

$$\Delta_p = \frac{6.74 \left[(\ln r)^2 - 1.08 \ln r + 3.33 \right] (0.8 - n \xi_{cf}) (0.8 - 0.7 n \eta) f_1(n) \frac{P_y}{K_a}}{8.7 - s} \quad (5.6.3-1)$$

$$f_1(n) = \begin{cases} 1.336n^2 - 0.044n + 0.804 & (0 \leq n \leq 0.5) \\ 1.126 - 0.02n & (0.5 < n < 1) \end{cases}$$

$$r = \lambda/40$$

$$s=f_y/345$$

式中： r — 承载力的提高率；
 n — 轴压比；
 λ — 长细比。

2 方构件：

$$\Delta_p=f_1(\xi_{cf}, \eta, n)(1.7+n+0.5\xi)P_y/K_a \quad (5.6.3-2)$$

$$f_1(\xi_{cf}, \eta, n)=(1-0.1\xi_{cf})(0.85-0.08\eta)(0.703-0.4n)$$

5.6.4 CFRP-钢管混凝土压-弯构件在侧向滞回力作用下的骨架曲线峰值荷载 P_y 按下式计算：

1 圆构件：

$$P_y = \begin{cases} 1.05af_1(\xi_{cf}, \eta, n)M_y/L_1 & (1 < \xi \leq 4) \\ (0.2\xi + 0.85)af_1(\xi_{cf}, \eta, n)M_y/L_1 & (0.2 \leq \xi \leq 1) \end{cases} \quad (5.6.4-1)$$

$$a = \begin{cases} 0.96 - 0.002\xi & (0 \leq n \leq 0.3) \\ (1.4 - 0.34\xi)n + 0.1\xi + 0.54 & (0.3 < n < 1) \end{cases}$$

$$f_1(\xi_{cf}, \eta, n) = \begin{cases} 1.4 - 5.7(0.35 - 20\xi_{cf}n)(n - 0.3) + 0.1(1 + \eta)^{2+n} & (\xi_{cf} \leq 0.1) \\ 1.34 - 2.37(1 - 3\xi_{cf})(n - 0.35) - 0.01\eta^{1+n} & (\xi_{cf} > 0.1) \end{cases}$$

2 方构件：

$$P_y = \begin{cases} (2.5n^2 - 0.75n + 1)f_2(\xi_{cf}, \eta, n)M_y/L_1 & (0 \leq n \leq 0.4) \\ (0.63n + 0.848)f_2(\xi_{cf}, \eta, n)M_y/L_1 & (0.4 < n < 1) \end{cases} \quad (5.6.4-2)$$

5.6.5 CFRP-钢管混凝土压-弯构件在侧向滞回力作用下的抗弯承载力 M_y 按下式计算：

1 圆构件：

$$M_y = \frac{A_1c + B_1}{(A_1 + B_1)(pn + q)} f_2(\xi_{cf}, \eta, n)M_{bc} \quad (5.6.5-1)$$

$$f_2(\xi_{cf}, \eta, n) = 1 - 1.5\xi_{cf}n - 0.1\eta^{0.1(1+n)}$$

$$A_1 = \begin{cases} -0.137 & (b \leq 1) \\ 0.118b - 0.255 & (b > 1) \end{cases}$$

$$B_1 = \begin{cases} -0.468b^2 + 0.8b + 0.874 & (b \leq 1) \\ 1.306 - 0.1b & (b > 1) \end{cases}$$

$$p = \begin{cases} 0.566 - 0.789b & (b \leq 1) \\ -0.11b - 0.113 & (b > 1) \end{cases}$$

$$q = \begin{cases} 1.195 - 0.34b & (b \leq 1) \\ 1.025 & (b > 1) \end{cases}$$

$$b = \alpha/0.1$$

式中： M_y — CFRP-钢管混凝土在侧向滞回力作用下的抗弯承载力；
 α — 含钢率， $\alpha = A_s/A_c$ 。

2 方构件：

$$M_y = f_3(\xi_{cf}, \eta, n) M_{bc} \quad (5.6.5-2)$$

$$f_3(\xi_{cf}, \eta, n) = (0.8 - 0.15\eta)(1 - 0.2\xi_{cf})(1.1 + 0.1n)$$

5.6.6 CFRP-钢管混凝土压-弯构件恢复力模型的第三阶段的刚度 K_T
按下列式计算：

1 圆构件：

$$K_T = [0.03f_2(n)f(r, \alpha)K_a]/(c^2 - 3.39c + 5.41) \quad (5.6.6-1)$$

$$f_2(n) = \begin{cases} 3.043n - 0.21 & (0 \leq n \leq 0.7) \\ 0.5n + 1.57 & (0.7 < n < 1) \end{cases}$$

$$f(r, \alpha) = \begin{cases} [8\alpha(1 + 5\xi_{cf})(1 + \eta) - 8.6]r + 6\alpha + 0.9 & (r \leq 1) \\ [15\alpha(1 - 0.02\xi_{cf})(1 - 2\eta) - 13.8]r + 6.1 - \alpha & (r > 1) \end{cases}$$

2 方构件：

$$K_T = [-9.83(0.035 + 1.5n)^{1.2}\lambda^{0.75}f_yK_a(1 - 0.65\eta)]/(E_s\xi) \quad (5.6.6-2)$$

$$f_3(\xi_{cf}, \eta, n) = (0.8 - 0.15\eta)(1 - 0.2\xi_{cf})(1.1 + 0.1n)$$

6 节点和连接

6.0.1 CFRP-钢管混凝土结构节点和连接的设计，应满足强度、刚度、稳定性和抗震的要求，保证力的传递，使 CFRP、钢管和管中混凝土能共同工作，便于制作、安装和管中混凝土的浇灌施工。

6.0.2 等直径钢管对接时宜采用螺纹连接的形式以避免钢管焊接时对 CFRP 产生的影响。同时为解决螺纹卡死后出现梁端无法对正的问题，本规程提出内衬管与外套管两种钢梁节点(6.0.3-2)和(6.0.3-3)。

6.0.3 框架结构的梁柱刚性节点，宜采用加强环节点形式。

1 当横梁为双轴对称工字形钢梁时，节点构造见图 6.0.3-1~6.0.3-5。节点计算可按国家标准《钢结构设计标准》GB50017-2017 进行。

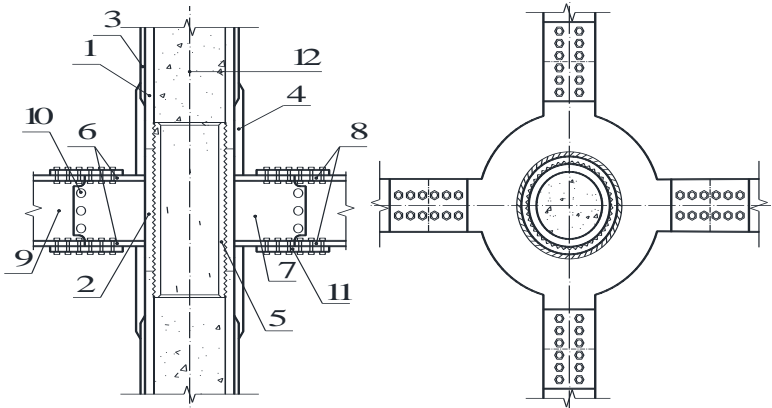


图 6.0.3-1 内衬筒外环板钢梁节点

- 1—节点间钢管 2—节点区钢管 3—碳纤维织物 4—人工补贴碳纤维织
5—内衬筒 6—钢环板 7—加强环腹板 8—钢梁翼缘 9—钢梁腹板
10—高强螺栓 11—盖板 12—混凝土

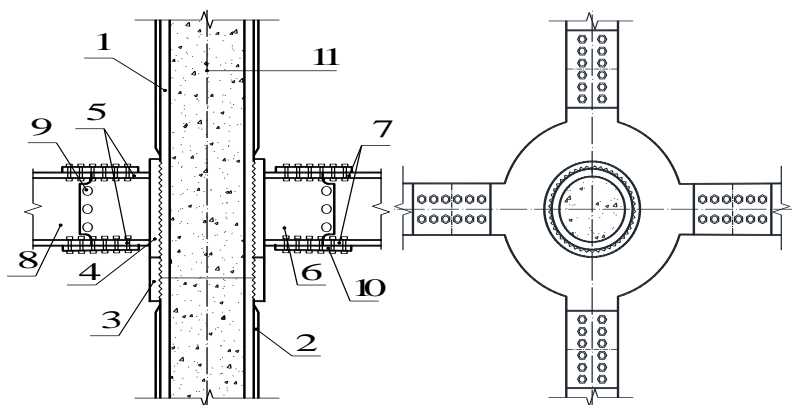


图 6.0.3-2 外套管外环板钢梁节点

- 1—钢管 2—碳纤维织物 3—外套管一 4—外套管二
 5—钢环板 6—加强环腹板 7—钢梁翼缘 8—钢梁腹板
 9—高强螺栓 10—盖板 11—混凝土

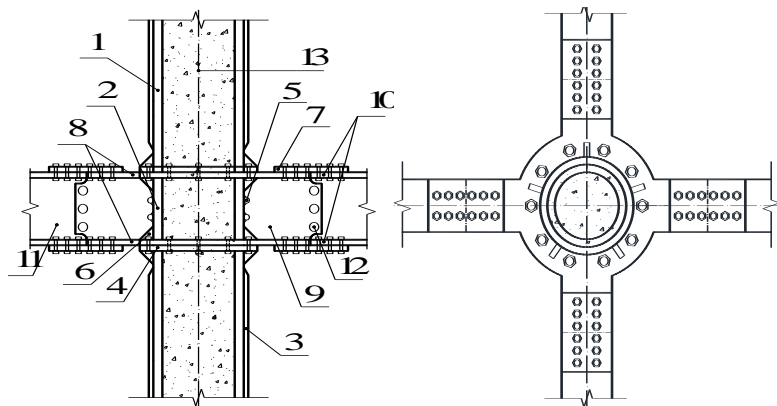


图 6.0.3-3 法兰连接钢梁节点

- 1—节点间钢管 2—节点区钢管 3—碳纤维织物 4—法兰盘
 5—钢箍 6—加劲肋 7—盖板 8—钢环板 9—加强环腹板 10—钢梁翼缘
 11—钢梁腹板 12—高强螺栓 13—混凝土

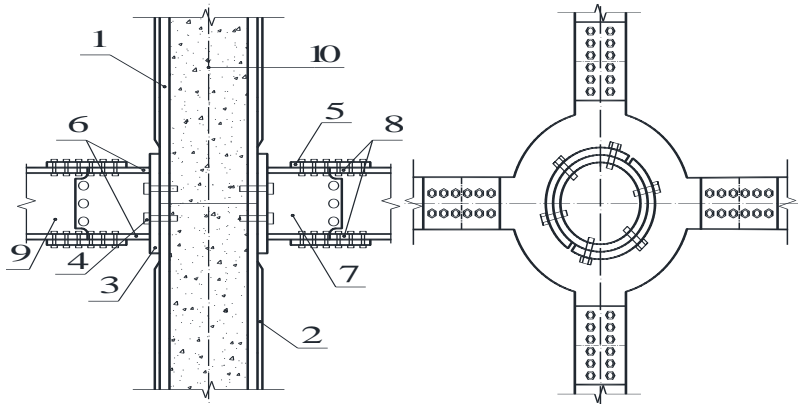


图 6.0.3-4 螺栓盖板连接钢梁节点

- 1—钢管 2—碳纤维织物 3—螺栓盖板 4—高强螺栓 5—盖板
6—钢环板 7—加强环腹板 8—钢梁翼缘 9—钢梁腹板 10—混凝土

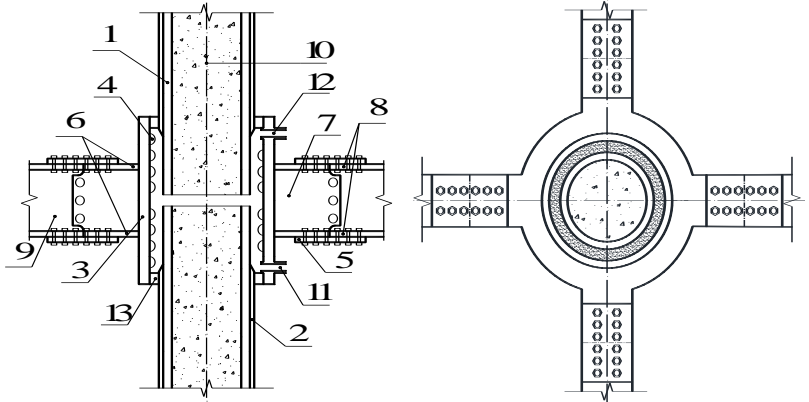


图 6.0.3-5 灌浆套筒连接钢梁节点

- 1—钢管 2—碳纤维织物 3—钢套筒 4—抗剪键 5—盖板
6—钢环板 7—加强环腹板 8—钢梁翼缘 9—钢梁腹板 10—混凝土
11—进浆孔 12—排浆孔 13—封浆橡胶环

2 当横梁为现浇钢筋混凝土梁时，节点构造见图 6.0.3-6~6.0.3-10。抗剪环应能较为均匀分散传递剪力，钢筋混凝土

土环梁应能传递弯矩。

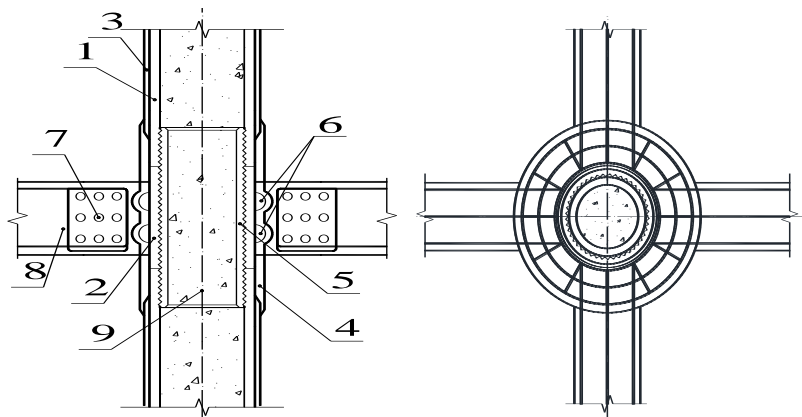


图 6.0.3-6 内衬筒钢筋混凝土梁节点

1—节点间钢管 2—节点区钢管 3—碳纤维织物 4—人工补贴碳纤维织物
5—内衬筒 6—抗剪环 7—钢筋混凝土环梁 8—钢筋混凝土梁 9—混凝土

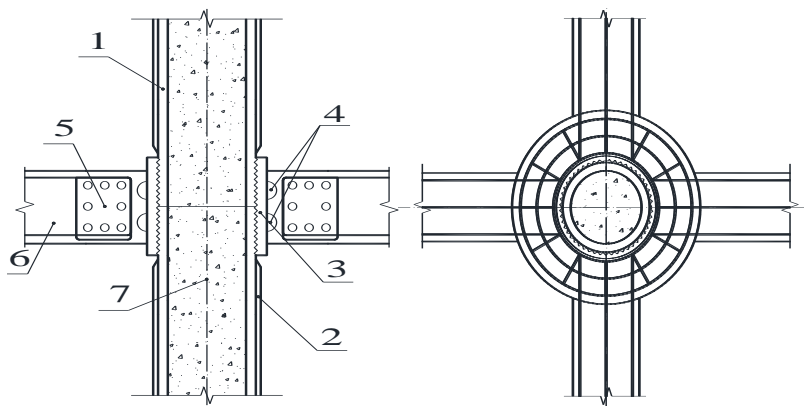


图 6.0.3-7 外套管钢筋混凝土梁节点

1—钢管 2—碳纤维织物 3—外套管 4—抗剪环
5—钢筋混凝土环梁 6—钢筋混凝土梁 7—混凝土

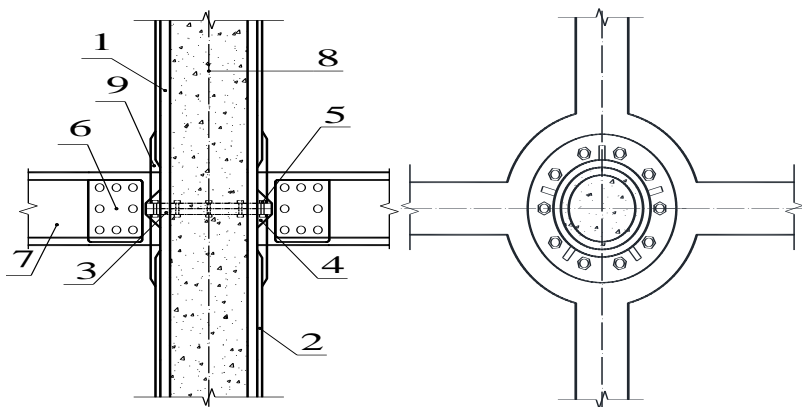


图 6.0.3-8 法兰连接钢筋混凝土梁节点

1—钢管 2—碳纤维织物 3—法兰盘 4—加劲肋 5—高强螺栓
6—钢筋混凝土环梁 7—钢筋混凝土梁 8—混凝土 9—人工补贴碳纤维织物

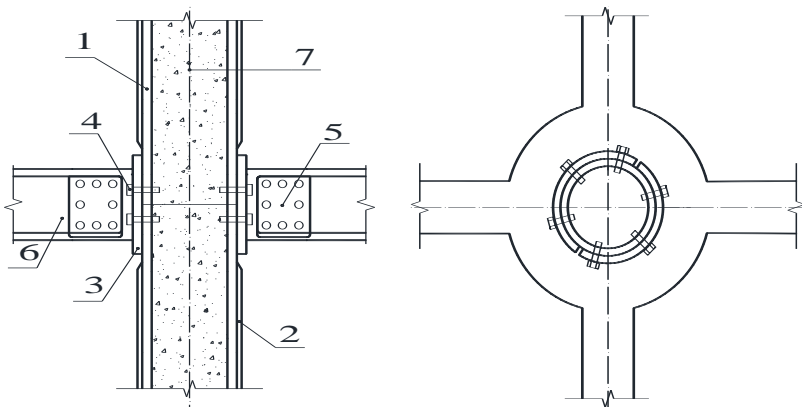


图 6.0.3-9 螺栓盖板连接钢筋混凝土梁节点

1—钢管 2—碳纤维织物 3—螺栓盖板 4—高强螺栓
5—钢筋混凝土环梁 6—钢筋混凝土梁 7—混凝土

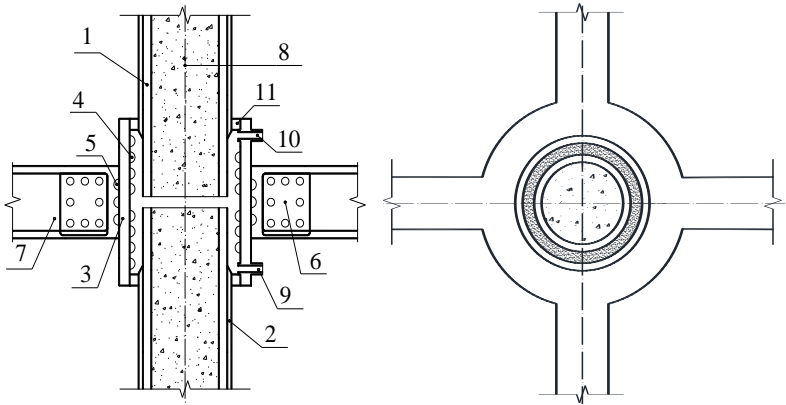
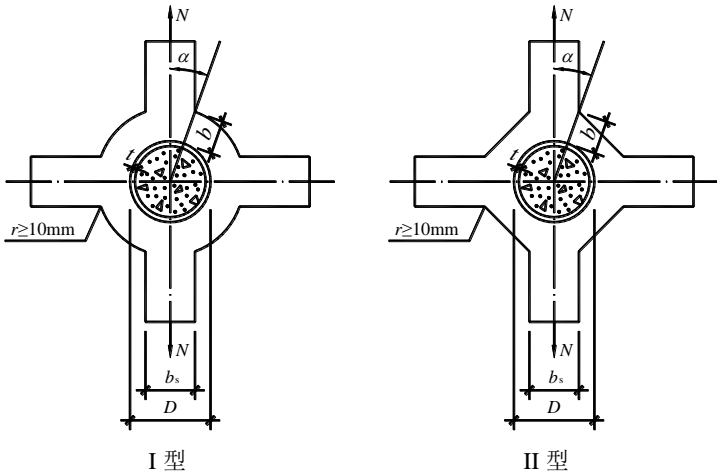


图 6.0.3-10 灌浆套筒连接钢筋混凝土梁节点

- 1—钢管 2—碳纤维织物 3—灌浆套筒 4—抗剪键
 5—抗剪环 6—钢筋混凝土环梁 7—钢筋混凝土梁 8—混凝土
 9—灌浆孔 10—排浆孔 11—封浆橡胶环

6.0.4 CFRP-圆钢管混凝土结构刚性节点加强环板的平面类型一般有四种，见图 6.0.4-1。



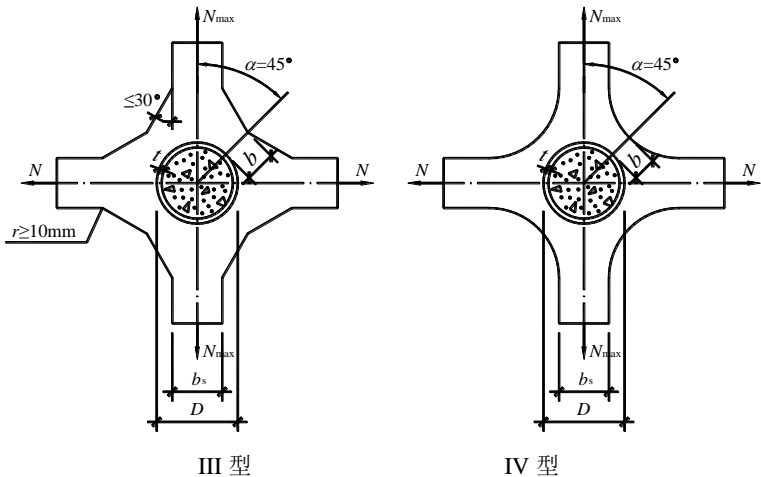


图 6.0.4-1 圆 CFRP-钢管混凝土加强环板的类型

加强环板在梁方向受拉力 N 作用时, N 按下式计算:

$$N = M/h + N_b \quad (6.0.4-1)$$

$$M = M_c - VD/3, \text{ 且 } M \geq 0.7M_c \quad (6.0.4-2)$$

式中: M — 梁端弯矩设计值;
 N_b — 梁轴向力对一个环板产生的拉力;
 h — 梁端截面高度;
 M_c — 柱中心线处的梁支座弯矩设计值;
 V — 对应于 M_c 柱轴线处梁端剪力;
 D — 圆钢管直径或方形钢管垂直于弯曲轴的边长。

1 加强环板宽度 b_s 和厚度 t_1 的计算

- 1) 连接钢梁的环板宽度 b_s 宜与梁翼缘等宽。
- 2) 连接钢梁的环板厚度 t_1 , 按梁翼缘板的轴心拉力确定。

2 加强环板控制截面宽度 b 计算

- 1) I 型和 II 型加强环板, 按下式计算:

$$b \geq F_1(\alpha) \frac{N}{t_1 f_1} - F_2(\alpha) b_e \frac{t f}{t_1 f_1} \quad (6.0.4-3)$$

$$F_1(\alpha) = \frac{0.93}{\sqrt{2 \sin^2 \alpha + 1}} \quad (6.0.4-4)$$

$$F_2(\alpha) = \frac{1.74 \sin \alpha}{\sqrt{2 \sin^2 \alpha + 1}} \quad (6.0.4-5)$$

$$b_e = \left(0.63 + 0.88 \frac{b_s}{d} \right) \sqrt{d t} + t_1 \quad (6.0.4-6)$$

- 式中：
 α — 拉力 N 作用方向与计算截面的夹角；
 b_e — 柱肢管壁参加加强环工作的有效宽度（见图 6.0.4-2）；
 t — 柱肢管壁厚度。

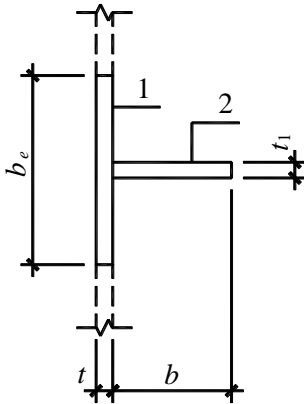


图 6.0.4-2 圆柱肢管壁的有效宽度

1—管壁 2—加强环板

2) III型和IV型加强环板，按下式计算：

$$b \geq (1.44 + \beta) \frac{0.392 N_{x, \max}}{t_1 f_1} - 0.864 b_e \frac{t f}{t_1 f_1} \quad (6.0.4-7)$$

$$\beta = N_y / N_{x,\max} \leq 1 \quad (6.0.4-8)$$

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_y — y 方向与 $N_{x,\max}$ 同时作用的拉力。

3 加强环板的构造要求如下：

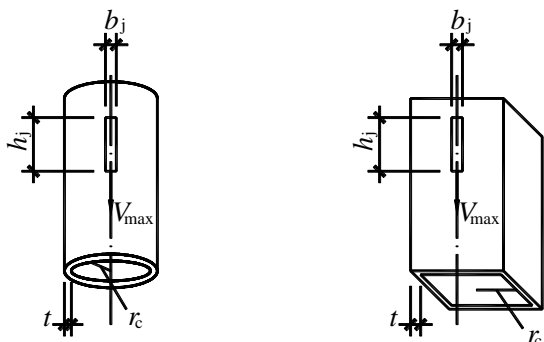
- 1) $0.25 \leq b_s / D \leq 0.75$ ；
- 2) CFRP-圆钢管混凝土： $0.1 \leq b / D \leq 0.35$ ， $b / t_1 \leq 10$ 。

6.0.5 梁柱节点的钢梁腹板的管壁剪应力（见图 6.0.5-1）应按下式进行验算。

$$\tau = 0.6 \frac{V_{\max}}{h_j t} \lg(2r_c / b_j) \leq f_v \quad (6.0.5-1)$$

$$b_j = t_w + 2h_f \quad (6.0.5-2)$$

式中： V_{\max} — 梁端腹板承受的最大剪力；
 h_j — 腹板高度；
 r_c — 混凝土半径，对于圆 CFRP-钢管混凝土， $r_c = D/2 - t$ ；对于方 CFRP-钢管混凝土， $r_c = B/2 - t$ ；
 b_j — 角焊缝包入的宽度；
 t_w — 腹板厚度。



(a) 圆 CFRP-钢管混凝土

(b) 方 CFRP-钢管混凝土

图 6.0.5-1 管壁应力计算简图

6.0.6 位于地震区的框架节点设计，应符合下列要求：

- 1 采用 III~IV 型钢梁加强环节点或带内隔板节点。
- 2 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 50011-2010 和《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010 的有关要求。
- 3 加强环板的抗震验算可参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 对钢结构的有关规定进行。
- 4 节点应符合下列规定：加强环板的加工应保证外形曲线光滑，无裂纹、刻痕。

7 施工与验收

7.1 一般规定

7.1.1 CFRP-钢管混凝土结构的制作与施工除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

7.1.2 钢管结构制作和安装的施工单位应具有相应的资质，施工单位应根据批准的施工图设计文件编制施工详图。当需要修改时，应按有关规定办理设计变更手续。

7.1.3 钢管结构在制作前，应根据施工图设计文件和施工详图的要求编制制作工艺。制作工艺至少应包括：制作所依据的标准，施工操作要点，成品质量保证措施等。

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

7.1.5 对于现浇 CFRP-钢管混凝土结构，钢管管内混凝土浇灌应在钢构件安装并经有关单位验收合格后进行。

7.1.6 钢管结构的冬期施工应符合现行《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T 104 中对钢结构工程的规定。

7.1.7 粘贴纤维材料的施工环境，应符合下列要求：

1 施工环境温度应符合结构胶粘剂产品使用说明书的规定。若未作规定，应按不低于 15℃ 进行控制。

2 作业场地应无粉尘，且不受日晒、雨淋和化学介质污染。

7.1.8 防护面层的构造和施工应符合设计规定。对各种不同面层的施工过程控制和施工质量验收，应符合国家现行有关标准的规定。

7.2 钢构件的制作与施工

7.2.1 钢管构件应根据施工详图进行放样。放样与号料应预留焊接收缩量和切割、端铣等加工余量。对于高层框架柱尚应预留弹性压缩量，弹性压缩量可由制作单位通过计算并据已有工程经验确定。

7.2.2 直缝焊接圆管和采用板材焊接的方形钢管，其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、手工电弧焊及气体保护焊焊缝坡口的基本形式和尺寸》GB/T 985 和《埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸》GB/T 986 的规定。

7.2.3 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。

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

7.2.5 钢管构件的焊接（包括施工现场焊接）应严格按照所编工艺文件规定的焊接方法、工艺参数、施焊顺序进行，并应符合设计文件和现行国家行业标准《钢结构焊接规范》GB 50661 规定。

7.2.6 钢管构件的除锈和涂装应在制作检验合格后进行。构件表面的除锈方法和除锈等级应符合设计规定，其质量要求应符合现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB 8923 的规定。

7.2.7 钢管构件制作完成后，应按照施工图和现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的规定进行验收。

7.2.8 钢管构件制作完毕后应仔细清除钢管内的杂物，钢管内表面必须保持干净，不得有油渍等污物，应采取适当措施保持管内清洁。

7.2.9 制作完毕后的钢管构件，应采取适当保护措施，防止钢管内表面严重锈蚀。

7.2.10 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本身的承载力和稳定性经验算后确定。必要时，应采取临时加固措施。

7.2.11 吊装钢管构件时，应将其管口包封，防止异物落入管内。当

采用预制 CFRP-钢管混凝土构件时，应待管内混凝土强度达到设计值的 50% 以后，方可进行吊装。

7.2.12 钢管构件吊装就位后，应立即进行校正，采取可靠固定措施以保证构件的稳定性。

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

7.2.14 钢管构件的吊装质量应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的规定。

7.3 混凝土施工

7.3.1 钢管内混凝土的浇注方式宜采用泵送顶升浇灌法，也可采用高位抛落免振捣法或手工逐段浇捣法，钢管底部应留清扫口。

7.3.2 泵送顶升浇灌法：在钢管柱适当的位置安装一个带有防回流装置的进料支管，直接与泵车的输送管相连，将混凝土连续不断地自下而上灌入钢管，无需振捣。钢管的尺寸宜大于或等于进料支管的 2 倍。对泵送顶升浇灌的柱下部入口处的管壁应进行强度验算。泵送混凝土前应用清水冲洗钢管内壁。

7.3.3 高位抛落免振捣法：利用混凝土下落时产生的动能达到振实混凝土的目的，适用于管截面最小边长或管径大于 350mm，高度不小于 4m 的情况。对于抛落高度低于 4m 的区段，应用内部振捣器振实，一次抛落的混凝土量宜在 0.7m³ 左右，用料斗装填，料斗的下口尺寸应比钢管截面最小边长或管径小 100mm~200mm，以便于管内空气的排出，应保证混凝土无泌水和离析现象。

7.3.4 手工逐段浇捣法：混凝土自钢管上口灌入，用振捣器捣实，管截面最小边长或管径大于 350mm 时，采用内部振捣器进行振捣，每次振捣时间不少于 30 秒，一次浇灌高度不宜大于 1.5m。当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灌进展加以调整。手工

逐段浇捣法一次浇灌的高度不应大于振捣器的有效工作范围和2m~3m柱长。

7.3.5 混凝土的配合比，除应满足强度指标外，尚应注意混凝土坍落度的选择。混凝土配合比应根据混凝土设计等级计算，并通过试验后确定。对于泵送顶升浇灌法，混凝土的配合比尚应满足可泵性要求。

7.3.6 钢管内混凝土浇灌工作，宜连续进行，若间歇时，时间不应超过混凝土的终凝时间，需留施工缝时，应将管口封闭，防止水、油和异物等落入。

7.3.7 每次浇灌混凝土前（包括施工缝），应先浇灌一层厚度为100mm~200mm的不含粗骨料的混凝土，以免自由下落的混凝土骨料产生弹跳现象。

7.3.8 当混凝土浇灌到钢管顶端时，可以使混凝土稍微溢出后再将留有排气孔的层间横隔板或封顶板紧压在管端，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，也可将混凝土浇灌到稍低于管口的位置，待混凝土强度达到设计值的50%后再用相同不含粗骨料的混凝土添至管口，并按上述方法将横隔板或封顶板一次封焊到位。

7.3.9 CFRP-钢管混凝土结构内部混凝土浇灌质量在施工阶段一般可采用敲击钢管的方法来检查其密实度，终凝后对于重要构件或部位应采用超声波进行检测。混凝土不密实的部位，应采用局部钻孔压浆法进行补强，并将钻孔补焊封固。

7.4 冬期混凝土施工

7.4.1 本规程冬期施工期限划分原则是：当室外日平均气温连续5d稳定低于5℃或最低气温连续5d稳定在-3℃以下时，即进入冬期施工。冬期施工期限以外，当气温突然下降时，也应按本节规定执行。

7.4.2 冬期施工时，必须编制专项施工组织设计和技术措施，以保

证浇筑的混凝土满足设计要求。

7.4.3 冬期浇筑的混凝土，其受冻临界强度应符合下列规定：普通混凝土采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥配制时，应为设计的混凝土强度标准值的 30%；采用矿渣硅酸盐水泥配制的混凝土，应为设计的混凝土强度标准值的 40%。如施工需要提高混凝土强度等级时，应按提高后的强度等级确定。

7.4.4 原材料的储存、加热、输送和混凝土的拌和、运输，均应根据气候条件通过热工计算，选择适宜的保温措施。

7.4.5 合理选用各种外加剂，宜使用无氯盐防冻剂。在掺用含有钾、钠离子的防冻剂混凝土中，不得采用活性骨料或在骨料中混有这类物质的材料。

7.4.6 在原混凝土上浇筑混凝土前，应检测原混凝土表面温度，如为负温，应加热成正温，加热深度不小于 100mm。

7.4.7 当室外气温低于 5℃、高于-10℃时，浇筑混凝土前应加热钢管并包裹覆盖；当室外气温低于-10℃时，钢管外应包裹电热毯保温。在养护过程中根据混凝土温度变化可继续送电。尽量争取在白天施工，利用较高的气温以保证混凝土施工的质量。

7.4.8 在施工过程中，应控制并及时调节混凝土的机口温度，使入管混凝土的温度高于 15℃。控制方法以调节拌和水温为宜。提高混凝土拌和物温度的方法：首先应考虑加热拌和用水；当加热拌和用水尚不能满足浇筑温度要求时，应加热骨料。水泥不得加热。拌和用水加热超过 60℃时，应改变拌和加料顺序，将骨料与水先拌和，然后加入水泥，以免水泥假凝。骨料不需加热时，应注意不要结冰，也不得混入冰、雪。

7.4.9 混凝土浇筑完毕后，外露表面及新老混凝土接合处和边角处应做好保温。混凝土在加热养护过程中，其表面不应出现干燥脱水。

7.4.10 冬期施工期间，施工单位应根据需要进行适当的温度观测，

应与气象部门保持密切联系，随时掌握天气预报和寒潮、大风警报，以便及时采取防寒措施。

7.5 碳纤维织物粘贴施工

7.5.1 浸渍、粘结专用的结构胶粘剂，其配制和使用应按产品使用说明书的规定进行；拌合应采用低速搅拌机充分搅拌；拌好的胶液色泽应均匀、无气泡；胶液注入盛胶容器后，应采取措施防止水、油、灰尘等杂质混入。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，并对照产品使用说明书检查配制记录、测定初黏度记录及施工记录。

7.5.2 碳纤维织物应按下列步骤和要求粘贴：

1 按设计尺寸裁剪碳纤维织物，且严禁折叠；若碳纤维织物原件已有折痕，应裁去有折痕一段织物；

2 将配制好的浸渍、粘结专用的结构胶粘剂均匀涂抹于粘贴部位的混凝土表面；

3 将裁剪好的纤维织物按照防线位置敷在涂好结构胶粘剂的混凝土表面。织物应充分展平，不得有褶皱；

4 沿纤维方向应使用特制滚筒在已贴好纤维的面上多次滚压，使胶液充分浸渍碳纤维织物，并使织物的铺层均匀压实，无气泡发生；

5 多层粘贴碳纤维织物时，应在碳纤维织物表面所浸渍的胶液达到指干状态时立即粘贴下一层。若延误时间超过 1h，则应等待 12h 后，方可重复上述步骤继续进行粘贴，但粘贴前应重新将织物粘合面上的灰尘擦拭干净；

6 最后一层碳纤维织物粘贴完毕，尚应在其表面均匀涂刷一道浸渍、粘结专用的结构胶。

检查数量：全数检查。

检验方法：由监理人员负责检查，并签字确认无误。

7.5.3 碳纤维织物可采用特制剪刀剪断或用优质美工刀切割成所需尺寸。织物裁剪的宽度不宜小于 100mm。

7.5.4 碳纤维复合材胶粘完毕后应静置固化，并按胶粘剂产品说明书规定的固化环境温度和固化时间进行养护。当达到 7d 时，应先采用 D 型邵氏硬度计检测胶层硬度，据以判断其固化质量，并以邵氏硬度 $HD \geq 70$ 为合格，然后进行施工质量检验、验收。若邵氏硬度 $HD < 70$ ，应揭去重贴，并改用固化性能良好的结构胶粘剂。

检查数量：全数检查。

检验方法：用 D 型邵氏硬度计检测硬度。

7.6 验收

7.6.1 CFRP-钢管混凝土结构工程的质量验收应按现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 中的有关规定执行。

7.6.2 CFRP-钢管混凝土子分部工程验收资料：

- 1 设计变更文件及原材料代用证件；
- 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 其它文件和记录。

7.6.3 CFRP-钢管混凝土碳纤维织物验收

碳纤维织物与钢管之间的粘结质量可用锤击法或其他有效探测法进行检查。根据检查结果确认的总有效粘结面积不应小于总结面积的 95%。

探测时，应将粘贴的碳纤维织物分区，逐区测定空鼓面积（即无效粘结面积）；若单个空鼓面积不大于 10000mm^2 ，允许采用注射法充胶修复；若单个空鼓面积大于或等于 10000mm^2 ，应割除修补，重新粘贴等量纤维复合材。粘贴时，其受力方向（顺纹方向）每端的搭接长度不应小于 200mm；若粘贴层数超过 3 层，该搭接长度不应小于 300mm；对非受力方向（横纹方向）每边的搭接长度可取为 100mm。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查检验

1 总 则

1.0.1 本条文说明了编制本规程的目的。

1.0.2 CFRP-钢管混凝土构件由于截面形式的不同，其力学性能和设计方法也不同。本条限定了本规程中 CFRP-钢管混凝土构件的截面形状及结构形式。

1.0.3 本条文给出了本规程的适用范围。

1.0.4 本条文规定了本规程的设计原则。

1.0.5 本条文给出了本规程中符号、计量单位和技术术语的规定依据。

1.0.6 CFRP-钢管混凝土结构作为一种组合结构形式，其设计除满足本规程外，尚应依据其他相应国家或行业标准等进行。

1.0.7 CFRP-钢管混凝土结构作为一种组合结构形式，其施工除满足本规程外，尚应依据其他相应国家或行业标准等进行。

1.0.8 在特殊环境下的钢管混凝土结构应进行专门研究。本规程中的 CFRP-钢管混凝土仅适用于一般使用环境中的建筑工程。另外，对于有特殊要求的结构，也应进行专门研究，且应符合现行有关国家标准的要求。

2 术语和符号

(本章无条文说明)

3 基本规定

3.0.1 本条给出 CFRP-钢管混凝土结构设计的总体规定。

3.0.2 最小管径和最小壁厚的规定是为了保证混凝土浇灌质量、钢管焊接质量以及构件受力性能而确定的。

研究表明，由于内填混凝土的存在，CFRP-钢管混凝土钢管管壁的稳定性的有所提高，钢管的外直径或最大外边长与壁厚之比不得大于无混凝土时相应限值的 1.5 倍。

3.0.3 本条指出 CFRP-钢管混凝土结构的一般应用范围。

3.0.4 CFRP-钢管混凝土柱的延性和耗能性能比钢筋混凝土柱更好，在没有进行更多的专门研究之前，其抗震和抗风计算参数暂按钢筋混凝土取值应该是偏于安全的。

3.0.6 对 CFRP-钢管混凝土的理论分析和实验研究的结果都表明，由于钢管对其核心混凝土的约束作用，混凝土本身性质得到改善，即强度得以提高，塑性和韧性大为改善。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 CFRP-钢管混凝土性能的影响很大，而且二者几何特性和物理特性参数如何“匹配”，也将对 CFRP-钢管混凝土构件力学性能起着非常重要的影响。研究表明，可以以约束效应系数作为衡量这种相互作用的基本参数。约束效应系数越大，则构件的延性越好，反之则越差。

当 CFRP-钢管混凝土用作地震区的结构柱时，为了 CFRP-保证钢管混凝土构件具有良好的延性，提出此限值。

4 材料与设计指标

4.0.1 CFRP-钢管混凝土构件主要用作各种柱子，结合柱子要求和现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定提出了对钢材的要求。因钢管多数由冷弯卷制而成，所以要求冷弯 180°的保证。

4.0.2 圆 CFRP-钢管混凝土结构常用直缝焊接管。无缝钢管价格高且壁过厚，因而不宜采用。也可采用钢板卷制成的直缝焊接钢管，应采用对接坡口焊缝，不允许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。

4.0.3 由于钢管本身是封闭的，多余水分不能排出，因而水灰比不宜过大。采用流动性混凝土或塑性混凝土主要决定于采用的浇灌工艺。

良好的混凝土密实度是保证钢管和核心混凝土之间共同工作的重要前提。高强混凝土、自密实高性能混凝土是已比较成熟应用但尚处在发展阶段的新技术。研究表明，在钢管混凝土中采用自密实高性能混凝土时，只要按有关规定严格控制其质量，钢管自密实混凝土能够满足对钢管混凝土的设计要求。

4.0.4 对于目前建筑工程中常用的钢材，采用 C30 以上强度等级的混凝土比较合理。在常用含钢率情况下，Q235 钢和 Q345 钢宜配 C30~C50 级或 C60 级混凝土，Q390 钢和 Q420 钢宜配 C60 级及以上强度等级的混凝土，且约束效应系数不宜大于 4，也不宜小于 0.6。

C80 及以下等级混凝土的强度按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定确定，C80 以上等级混凝土的强度按现行《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》CECS 188 的相关规定确定。

4.0.5 碳纤维布的安全性及适配性检验指标。

4.0.6 粘贴纤维和混凝土的胶粘剂，按其工艺的不同分为两种类型：

一类由配套的底胶、修补胶和浸渍、粘接胶组成；另一类为免底涂，且浸渍、粘接与修补兼用的单一胶粘剂；可根据工程需要任选一种类型，但厂商应出具免底涂胶粘剂的证书，使用单位应留档备查。

4.0.7 采用数值分析方法可以计算获得 CFRP-钢管混凝土轴压时轴压力 N 和纵向应变 ε_{sl} 之间的关系曲线。它代表 CFRP-钢管混凝土整体的荷载-应变关系，将 N 除以全截面面积 A_{cfsc} ，即得截面上的名义应力 $\sigma_{cfsc}=N/A_{cfsc}$ ， $\sigma_{cfsc}-\varepsilon_{sl}$ 关系也就是 CFRP-钢管混凝土的组合应力-应变关系，经与大量实测曲线比较，吻合程度很好。

$\sigma_{cfsc}-\varepsilon_{sl}$ 关系的各阶段都获得了数学表达式。定义由弹塑性阶段转入强化阶段的点为组合强度标准值 f_{cfscy} ，其表达式如下：

1 圆构件

$$f_{cfscy}=[1.14+1.02(\zeta_s+3\zeta_{cf})]f_{ck} \quad (4.0.7-1)$$

2 方构件

$$f_{cfscy}=(1.18+0.85\zeta)f_{ck} \quad (4.0.7-2)$$

在采用 f_{cfscy} 为设计 CFRP-钢管混凝土构件的承载力指标时，对轴心受压构件的承载力进行了可靠性分析。在收集和整理了众多试件的试验结果，按不同 CFRP 层数、钢号、混凝土强度等级、含钢率和荷载比的情况进行分析和计算，结果表明，采用本规定设计方法所确定的 CFRP-钢管混凝土构件的抗力满足现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 对延性破坏构件的可靠性要求。

4.0.8 从 CFRP-钢管混凝土轴压应力-应变关系曲线可导出组合轴压弹性模量，表达式如下：

$$E_{cfsc}=f_{cfscp}/\varepsilon_{cfscp} \quad (4.0.8-1)$$

比例极限

$$f_{cfscp}=[0.192(1-0.6\zeta_{cf})^2(f_y/235)+0.488(1-2.4\zeta_{cf})]f_{cfscy} \quad (\text{圆构件}) \quad (4.0.8-2)$$

$$f_{cfscp}=[0.263(f_y/235)+0.365(30/f_{cu})+0.104]f_{cfscy} \quad (\text{方构件}) \quad (4.0.8-3)$$

比例极限应变

$$\varepsilon_{cfscp}=3.25\times 10^{-6}f_y \text{ (圆构件)} \quad (4.0.8-4)$$

$$\varepsilon_{cfscp}=3.01\times 10^{-6}f_y \text{ (圆构件)} \quad (4.0.8-5)$$

4.0.9 考虑到构件受弯时混凝土开裂的可能，对混凝土部分的抗弯刚度宜适当折减。研究结果还表明，圆形钢管对其核心混凝土的约束效果要优于方形钢管，对其混凝土部分的抗弯刚度的折减可略小。

C80 及以下等级混凝土的弹性模量按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定确定，C80 以上等级混凝土的弹性模量按现行《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》CECS 188 的相关规定确定。

5 构件的承载力计算

5.1 一般规定

5.1.1 无论从理论推导还是实验分析，本节规定的 CFRP-钢管混凝土构件的设计和计算是建立在轴压、受弯、稳定和压-弯的静力荷载，以及压-弯滞回作用基础上的。

5.2 轴压短柱的承载力计算

5.2.1 根据参数分析的结果，综合各参数的影响规律，在 $f_y=200-400\text{MPa}$ 、 $f_u=30-120\text{MPa}$ 、 $\zeta_s=0.2-4$ 和 $\zeta_{cf}=0-0.6$ (圆构件)； $f_y=200-500\text{MPa}$ 、 $f_u=30-120\text{MPa}$ 、 $\alpha=0.03-0.2$ 和 $\zeta_{cf}=0-0.55$ (方构件)的参数范围内，确定 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的轴压强度 f_{cfsc} 和轴压承载力计算表达式(5.2.1-2) (参见：a)王庆利. CFRP-钢管混凝土. 北京:科学出版社, 2017. b) Wang Qingli, Shao Yongbo. Compressive performances of the concrete filled square CFRP-steel tubes (S-CFRP-CFST). Steel and Composite Structures. 2014, 16 (5): 455-480. c) Che Yuan, Wang Qingli (Corresponding author), Shao Yongbo. Compressive performances of the concrete filled circular CFRP-steel tube (C-CFRP-CFST). Advanced Steel Construction. 2012, 8 (4): 311-338.)。

对于圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱，钢管初应力延缓了钢管对混凝土的约束力，对约束力的值影响不大。对于方 CFRP-钢管混凝土轴压短柱，随着初应力的增加，构件承载力下降，刚度略有减小，平均约束应力的峰值也减小。

纵向刚度的计算

可用下式计算 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的纵向刚度 ($E_{cfsc}A_{cfsc}$):

$$E_{cfsc}A_{cfsc}=A_{cfsc}f_{cfscp}/\varepsilon_{cfscp} \quad (5.2.1-1)$$

如果没有 CFRP, 式(5.2.1-1)退化为钢管混凝土轴压短柱相应的

计算式(参见: a) Han L H, Yao G H, Zhao X L. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61 (9): 1241-1269.)。

轴压承载力的提高率

令钢管混凝土试件的轴压承载力为 N_{u0} , CFRP-钢管混凝土试件的轴压承载力为 N_{ui} , 则定义下式为承载力提高率 r :

$$r=(N_{ui}-N_{u0})/N_{u0}\times 100\% \quad (5.2.3-1)$$

5.3 轴压长柱的承载力计算

5.3.1 根据参数分析的结果, 综合各参数的影响规律, 在 $f_y=200-400\text{MPa}$ 、 $f_{cu}=30-120\text{MPa}$ 、 $\xi_s=0.2-4$ 、 $\xi_{cf}=0-0.6$ 和 $\eta=0-0.9$ 的参数范围内, 获得 CFRP-钢管混凝土轴压构件稳定系数 φ 与长细比 λ 之间的关系(参见: a)王庆利. CFRP-钢管混凝土. 北京: 科学出版社, 2017. b) Wang Qingli, Qu Shaoe, Shao Yongbo, Feng Liming. Static behavior of axially compressed circular concrete filled CFRP-steel tubular (C-CF-CFRP-ST) columns with moderate slenderness ratio. Advanced Steel Construction. 2016, 12 (3): 263-295. c) Wang Qingli, Zhao Zhan, Shao Yongbo, Li Qinglin. Static behavior of axially compressed square concrete filled CFRP-steel tubular (S-CF-CFRP-ST) columns with moderate slenderness. Thin-Walled Structure. 2017, 110 (1): 106-122.)。

当 $\lambda \leq \lambda_0$ 时, $\varphi=1$, 构件属于强度破坏; 当 $\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p$ 时, 构件属于弹塑性失稳破坏, 当 $\lambda > \lambda_p$ 时, 构件属于弹性失稳破坏。

参数分析的结果表明, 钢材屈服强度、混凝土强度和含钢率的提高可以显著提高 CFRP-钢管混凝土轴压中长柱的稳定承载力, 横向 CFRP 层数的增多仅使承载力略有提高, 而增大长细比会显著降低承载力和弹性阶段的刚度, 并且构件的荷载-变形曲线的形状也有所变化。

5.4 受弯构件的承载力计算

对于单向受弯构件考虑截面的塑性发展。

根据参数分析的结果，综合各参数的影响规律，在 $f_y=235-390\text{MPa}$ 、 $f_{cu}=30-120\text{MPa}$ 、 $\xi_s=0.2-4$ 、 $\xi_{cf}=0-0.6$ 、 $\eta=0-0.9$ 、 $E_s=206\text{GPa}$ 、 $\nu_s=0.3$ 、 $\nu_c=0.2$ 和 $E_c=4700f'_c{}^{0.5}$ (圆构件)； $B_s=120-400\text{mm}$ 、 $f_y=200-400\text{MPa}$ 、 $f_{cu}=30-120\text{MPa}$ 、 $\xi_s=0.5-4$ 、 $\xi_{cf}=0-0.6$ 、 $\eta=0-1$ 、 $E_s=206\text{GPa}$ 、 $\nu_s=0.3$ 、 $\nu_c=0.2$ 和 $E_c=4700f'_c{}^{0.5}$ (方构件)的参数范围内，定义 CFRP-钢管混凝土受弯构件受拉区最外纤维应变达到 ε_{\max} 时对应的弯矩为抗弯承载力（参见：a)王庆利. CFRP-钢管混凝土. 北京：科学出版社, 2017. b) Wang Qingli, Qu Shaoe, Shao Yongbo, Feng Liming. Static behavior of axially compressed circular concrete filled CFRP-steel tubular (C-CF-CFRP-ST) columns with moderate slenderness ratio. Advanced Steel Construction. 2016, 12 (3): 263-295. c) Wang Qingli, Zhao Zhan, Shao Yongbo, Li Qinglin. Static behavior of axially compressed square concrete filled CFRP-steel tubular (S-CF-CFRP-ST) columns with moderate slenderness. Thin-Walled Structure. 2017, 110 (1): 106-122.)）。

参数分析的结果表明，纵向 CFRP 层数和横向 CFRP 层数的增多以及混凝土强度的提高可以使抗弯承载力略有提高，对弹性阶段的刚度影响不大，而钢材屈服强度和含钢率的提高不但可以显著提高抗弯承载力，还可以使弹性阶段的刚度略有提高。

5.5 压-弯构件的承载力计算

5.5.1 对于单向受弯构件考虑截面的塑性发展。

通过数值计算分析，得到了轴力、弯矩共同作用下的 $N_{bc}/N_u-M_{bc}/M_u$ 相关曲线。在 $N_{bc}/N_u-M_{bc}/M_u$ 的相关关系中有一平衡点，位于 $N_{bc}/(f_{cfsc}A_{cfsc})=2\varphi^3\eta_0$ 处，导出压弯荷载共同作用下承载力的验算式(5.5.1-3)。当 $\lambda=0$ 时， $\varphi=1$ ，且不计及附加挠度影响系数，

$1/(1-0.4N/N_E)$ (圆构件), $1/(1-0.25N/N_E)$ (方构件), 则分别得到强度验算式(5.5.1-1)和(5.5.1-2)。

采用有限元法建立了 CFRP-钢管混凝土构件在压-弯作用下力学性能的分析模型。对压-弯构件的荷载-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 CFRP-钢管混凝土构件力学特性的影响规律。研究表明,加载路径对 CFRP-钢管混凝土构件的静力性能影响不大(参见: a)王庆利. CFRP-钢管混凝土. 北京:科学出版社,2017. b) Shao Yong-bo, Peng Kuan, Wang Qing-li. Analysis of Bearing Capacity of Circular Concrete Filled CFRP-Steel Tubular Beam-Column, KSCE Journal of Civil Engineering.2011,26(1):207-220. c) Wang Qing-li, Duan Chang-zhi, Peng Kuan, Shao Yong-bo. Study on concrete filled CFRP-steel tubular beam-column with square cross-section, Iranian Journal of Science and Technology. 2021: 1-15.)。

参数分析的结果表明,混凝土强度、钢材屈服强度和含钢率的提高可以显著提高 CFRP-钢管混凝土压-弯构件的抗压承载力,纵向 CFRP 层数和横向 CFRP 层数的增多仅使承载力略有提高;随着含钢率的提高,弹性阶段的刚度略有提高,而增大长细比或者偏心率会显著降低承载力和弹性阶段的刚度。

5.6 压-弯滞回构件的恢复力模型

根据参数分析的结果,综合各参数的影响规律,在 $n=0-0.8$ 、 $f_y=235-420\text{MPa}$ 、 $f_{cu}=30-90\text{MPa}$ 、 $\alpha=0.03-0.2$ 、 $\xi_{cf}=0-0.6$ 、 $\eta=0-0.9$ 和 $\lambda=10-80$ 的参数范围内,提出适用于 CFRP-钢管混凝土压-弯滞回性能构件的恢复力模型(参见: a)王庆利. CFRP-钢管混凝土. 北京:科学出版社,2017. b) Wang Qing-li, Chu Miao, Peng Kuan. Analysis on Experimental Performance of Hysteretic Behavior of Concrete-Filled

Circular CFRP Steel Tubular Beam-Column, *Front. Mater.* 2022: 75. c) Wang Qing-li, Yu Ling-feng, Peng Kuan. Hysteretic Behavior of Specimens of Circular Concrete-Filled CFRP-Steel Tubular Beam-Column, *Advances in Civil Engineering*.2021. d) Wang Qing-li, Peng Kuan, Guo Yi-huan, Shao Yong-bo. Experimental study on hysteretic behavior of concrete filled Square CFRP steel tubular Beam-Column, *ACI structural journal*. 2022, 119(3): 67-80. e) Shao Yong-bo, Peng Kuan, Wang Qing-li, Cao Yi-fang. Hysteretic Behavior and Restoring Force Model of Specimens of Square Concrete-Filled CFRP-Steel Tubular Beam-Column, *International Journal of Steel Structures*. 2022, 22(2): 488-501.)。

压-弯滞回恢复力模型中,当从模型中1点或4点卸载时,将按弹性阶段的刚度 K_a 进行卸载,并反向加载至2点或5点,2点或5点的纵坐标荷载值分别取1点纵坐标荷载值的 $(0.2+n)$ 倍和4点纵坐标荷载值的 $(0.2+1.2n)$ 倍,继续反向加载,模型进入软化段 $23'$ 或 $5D'$,点 $3'$ 和 D' 均在 OA 的延长线上,其纵坐标值分别与1(或3)点和4(或 D)点相同。随后,加载路径沿 $3'1'2'3'$ 或 $D'4'5'D$ 进行,软化段 $2'3'$ 和 $5'D'$ 的确定方法分别与 $23'$ 和 $5D'$ 的类似。

轴压比和纵向CFRP增强系数的增大可以提高试件的抗弯承载力和刚度,同时减缓刚度退化,但会降低试件的延性和累积耗能,轴压比在一定范围内对试件的抗震性能是有利的;圆试件的强度退化不显著,而方试件有一定强度退化现象;在加载后期,无轴压力的圆试件的承载力无下降,有轴压力的圆试件的承载力明显下降,所有方试件的承载力均下降。

参数分析的结果表明,纵向CFRP层数和横向CFRP层数的增多以及混凝土强度的提高可以使抗弯承载力略有提高,对弹性阶段的刚度影响不大,而钢材屈服强度和含钢率的提高不但可以显著提高抗弯承载力,还可以使弹性阶段的刚度略有提高。

6 节点和连接

6.0.1 本条指明了在 CFRP-钢管混凝土结构中的节点的基本规定。

6.0.2 CFRP-钢管因为材料长度、吊装能力或运输能力的影响，钢管的长度都是有限制的，需要在施工现场对接。等直径钢管对接时，可采用本规程的连接方法。

6.0.3 根据实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。而且由于加强环的存在，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。

1 针对本规程推荐的内衬筒外环板钢梁节点（6.0.3-1），包括节点间钢管 1、节点区钢管 2、碳纤维织物 3、内衬筒 5、钢环板 6 以及加强环腹板 7 等。其中，节点间钢管 1 与节点区钢管 2 通过内部设置的内衬筒 5 螺纹连接，节点间钢管 1 与节点区钢管 2 的管内设有内螺纹，内衬筒 5 的外表面设有外螺纹，内衬筒 5 的筒壁厚度大于节点间钢管 1 与节点区钢管 2 的管壁厚度。节点间钢管 1、节点区钢管 2 及内衬筒 5 的内部浇筑混凝土 12。节点区钢管 2 的外部加强环腹板 7 与钢梁腹板 9 通过高强螺栓 10 进行连接。钢环板 6 与钢梁翼缘 8 通过盖板 11 进行连接。

提前在加工厂完成节点区钢管 2 与钢环板 6 和加强环腹板 7 的焊接，制成组合体。施工中，首先将第一节 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后吊装组合体使之与 CFRP-钢管对齐，并使加强环腹板与梁对齐，然后通过内衬筒 5 将第一节 CFRP-钢管与组合体进行螺纹连接，浇筑第二次混凝土。第二节 CFRP-钢管通过内衬筒 5 与组合体连接，之后在节点处进行人工补贴碳纤维织物 4，浇筑第三次混凝土。最后将加强环腹板 7 和钢环板 6 与钢梁腹

板 9 和钢梁翼缘 8 通过螺栓连接。

2 针对本规程推荐的外套管外环板钢梁节点 (6.0.3-2), 包括钢管 1、碳纤维织物 2、外套管一 3、外套管二 4、钢环板 5 以及加强环腹板 6 等。其中, 上下部钢管 1 通过外套管一 3、外套管二 4 螺纹连接, 上下部钢管 1 外表面设有外螺纹, 外套管一 3、外套管二 4 内表面设有内螺纹, 外套管一 3、外套管二 4 的管壁厚度大于上下钢管 1 的管壁厚度, 外套管一 3 的内螺纹长度大于下部钢管 1 的外螺纹长度。在钢管 1 内部浇筑混凝土 11。节点区外套管二 4 的外部加强环腹板 6 与钢梁腹板 8 通过高强螺栓 9 进行连接。钢环板 5 与钢梁翼缘 7 通过盖板 10 进行连接。

提前在加工厂完成节点区外套管二 4 与钢环板 5 和加强环腹板 6 的焊接, 制成组合体。施工中, 首先将第一节 CFRP-钢管吊装在指定位置, 与外套管一 3 进行螺纹连接, 浇筑第一次混凝土。随后吊装组合体使之与 CFRP-钢管对齐, 并使加强环腹板与梁对齐, 然后通过外套管一 3 和外套管二 4 将第二节 CFRP-钢管与组合体进行螺纹连接, 浇筑第二次混凝土。之后在节点处进行人工补贴碳纤维织物, 最后将加强环腹板 6 和钢环板 5 与钢梁腹板 8 和钢梁翼缘 7 通过螺栓连接。

3 针对本规程推荐的法兰连接钢梁节点 (6.0.3-3), 包括节点间钢管 1、节点区钢管 2、碳纤维织物 3、法兰盘 4、钢环板 8 以及加强环腹板 9 等。其中, 节点间钢管 1 与节点区钢管 2 之间利用法兰盘连接, 钢管与法兰盘之间设有加劲肋 6, 上中下圆钢管通过法兰盘与高强螺栓 12 进行连接。节点间钢管 1 和节点区钢管 2 内部浇筑混凝土 13, 节点区钢管 2 的外部加强环腹板 9 通过高强螺栓 12 与钢梁腹板 11 连接。防止渗水的钢环板 8 与钢梁翼缘 10 通过盖板 7 和高强螺栓 12 进行连接。

提前在加工厂对圆钢管的端部进行法兰盘、加劲肋的焊接, 对

节点间钢管 1 进行大范围碳纤维织物 3 的粘贴，制成特殊的 CFRP-钢管，并对节点区钢管 2 连接钢环板 8 和加强环腹板 9。施工中，首先将预制好的 CFRP-钢管通过高强螺栓与节点区钢管 2 连接，随后将其吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。之后通过高强螺栓将其与第三节 CFRP-钢管连接，浇筑第二次混凝土。最后进行加强环腹板 9 与钢梁腹板 11 螺栓连接，钢环板 8 通过盖板 7 与钢梁翼缘 10 螺栓连接，并用钢箍 5 代替碳纤维织物 3 在节点区钢管 2 处发挥作用。

4 针对本规程推荐的螺栓盖板连接钢梁节点(6.0.3-4)，包括钢管 1、碳纤维织物 2、螺栓盖板 3、钢环板 6 以及加强环腹板 7 等。其中，螺栓盖板 3 的厚度大于圆钢管 1 的壁厚且螺栓盖板与上下圆钢管设有间隔相同、大小相同的孔位，上下圆钢管 1 与螺栓盖板 3 通过高强螺栓 4 连接。钢管 1 内部浇筑混凝土 7，钢管 1 的外部加强环腹板 7 通过高强螺栓 4 与钢梁腹板 9 连接。防止渗水的钢环板 6 与钢梁翼缘 8 通过盖板 5 和高强螺栓 4 进行连接。

提前在加工厂对圆钢管和螺栓盖板进行螺栓孔位的加工，对钢管进行大范围碳纤维织物 2 的粘贴，并在螺栓盖板上连接钢环板 6 和加强环腹板 7。施工中，首先将预制好的 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后套上螺栓盖板并将第二节 CFRP-钢管与之对齐并将孔位对正，将两节 CFRP-钢管与螺栓盖板通过高强螺栓进行连接，浇筑第二次混凝土。最后进行加强环腹板 7 与钢梁腹板 9 螺栓连接，钢环板 6 通过盖板 5 与钢梁翼缘 8 螺栓连接。

5 针对本规程推荐的灌浆套筒连接钢梁节点(6.0.3-5)，包括钢管 1、碳纤维织物 2、钢套筒 3、钢环板 6 以及加强环腹板 7 等。其中，上下圆钢管 1 通过灌入的微膨胀高强灌浆料连接，钢套筒 3 一侧设置进浆孔 11 和排浆孔 12，钢管 1 内部浇筑混凝土 10，在钢套筒 3 的内部设置抗剪键 4，钢管 1 的外部加强环腹板 7 通过高强螺栓与

钢梁腹板 9 连接。防止渗水的钢环板 6 与钢梁翼缘 8 通过盖板 5 和高强螺栓进行连接。

提前在加工厂对钢管进行大范围碳纤维织物 2 的粘贴，并在灌浆套筒上连接钢环板 6 和加强环腹板 7。施工中，首先将预制好的 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后套上灌浆套筒并将第二节 CFRP-钢管与之对齐，浇筑第二次混凝土。然后通过钢套筒下侧灌浆孔加入微膨胀高强灌浆料待到从排浆孔排出后停止。最后进行加强环腹板 7 与钢梁腹板 9 螺栓连接，钢环板 6 通过盖板 5 与钢梁翼缘 8 螺栓连接。

6 针对本规程推荐的内衬筒钢筋混凝土梁节点（6.0.3-6），包括节点间钢管 1、节点区钢管 2、碳纤维织物 3、内衬筒 5、抗剪环 6、钢筋混凝土环梁 7 以及钢筋混凝土梁 8 等。其中，节点间钢管 1 与节点区钢管 2 通过内部设置的内衬筒 5 螺纹连接，节点间钢管 1 与节点区钢管 2 的管内设有内螺纹，内衬筒 5 的外表面设有外螺纹，内衬筒 5 的筒壁厚度大于节点间钢管 1 与节点区钢管 2 的管壁厚度。节点间钢管 1、节点区钢管 2 及内衬筒 5 的内部浇筑混凝土 9。节点区钢管 2 通过抗剪环 6 连接钢筋混凝土环梁 7，钢筋混凝土环梁 7 与钢筋混凝土梁 8 连接。

提前在加工厂完成节点区钢管 2 与抗剪环 6 的焊接，制成组合体。施工中，首先将第一节 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后吊装组合体使之与 CFRP-钢管对齐，然后通过内衬筒 5 将第一节 CFRP-钢管与组合体进行螺纹连接，浇筑第二次混凝土。第二节 CFRP-钢管通过内衬筒 5 与组合体连接，之后在节点处进行人工补贴碳纤维织物 4，浇筑第三次混凝土。最后在周围绑扎钢筋浇筑钢筋混凝土环梁 7 与钢筋混凝土梁 8。

7 针对本规程推荐的外套管钢筋混凝土梁节点（6.0.3-7），包括钢管 1、碳纤维织物 2、外套管 3、抗剪环 4、钢筋混凝土环梁 5 以

及钢筋混凝土梁 6 等。其中，上下部钢管 1 通过外套管 3 螺纹连接，上下部钢管 1 外表面设有外螺纹，外套管 3 内表面设有内螺纹，外套管 3 的管壁厚度大于上下钢管 1 的管壁厚度。在钢管 1 内部浇筑混凝土 7。外套管 3 通过抗剪环 4 连接钢筋混凝土环梁 5，钢筋混凝土环梁 5 与钢筋混凝土梁 6 连接。

提前在加工厂完成节点区外套管 3 与抗剪环 4 的焊接，制成组合体。施工中，首先将第一节 CFRP-钢管吊装在指定位置，随后吊装组合体使之与 CFRP-钢管对齐，将第一节 CFRP-钢管与组合体通过外套管 3 螺纹连接，浇筑第一次混凝土。然后通过外套管 3 将第二节 CFRP-钢管与组合体进行螺纹连接，浇筑第二次混凝土。之后在节点处进行人工补贴碳纤维织物，最后在周围绑扎钢筋浇筑钢筋混凝土环梁 5 与钢筋混凝土梁 6。

8 针对本规程推荐的法兰连接钢筋混凝土梁节点(6.0.3-8)，包括钢管 1、碳纤维织物 2、法兰盘 3、钢筋混凝土环梁 6 以及钢筋混凝土梁 7 等。其中，钢管 1 与法兰盘 3 之间设有加劲肋 4，上下钢管通过法兰盘与高强螺栓 5 进行连接，上下钢管的连接处与钢筋混凝土环梁 6 连接，钢筋混凝土环梁 6 与钢筋混凝土梁 7 连接。

提前在加工厂对钢管的端部进行法兰盘以及加劲肋的焊接，之后进行大范围 CFRP 的粘贴，制成特殊的 CFRP-钢管。施工中，首先将制备好的 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后将其与第二节 CFRP-钢管通过高强螺栓进行连接，然后在节点区进行人工补贴一层碳纤维织物，浇筑第二次混凝土。最后在周围绑扎钢筋浇筑混凝土环梁与混凝土梁。

9 针对本规程推荐的螺栓盖板连接钢筋混凝土梁节点(6.0.3-9)，包括钢管 1、碳纤维织物 2、螺栓盖板 3、钢筋混凝土环梁 5 以及钢筋混凝土梁 6 等。其中，螺栓盖板 3 的厚度大于钢管 1 的壁厚且螺栓盖板与上下钢管设有间隔相同、大小相同的孔位，上下钢管与螺

栓盖板通过高强螺栓 4 连接，上下钢管的连接处与钢筋混凝土环梁 5 连接，钢筋混凝土环梁 5 与钢筋混凝土梁 6 连接。

首先将制备好的 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后套上螺栓盖板并将第二节 CFRP-钢管与之对齐并将孔位对正，将两节 CFRP-钢管与螺栓盖板通过高强螺栓进行连接，浇筑第二次混凝土。最后在节点周围绑扎钢筋浇筑混凝土环梁与混凝土梁。

10 针对本规程推荐的灌浆套筒连接钢筋混凝土梁节点 (6.0.3-10)，包括钢管 1、碳纤维织物 2、灌浆套筒 3、钢筋混凝土环梁 6 以及钢筋混凝土梁 7 等。其中，灌浆套筒内部设有抗剪键 4，外部设有抗剪环 5，上下设有两道封浆橡胶环 11。上下钢管通过灌入的微膨胀高强灌浆料连接，上下钢管和灌浆套筒连接处与钢筋混凝土环梁 6 连接，钢筋混凝土环梁 6 与钢筋混凝土梁 7 连接。

首先将制备好的 CFRP-钢管吊装在指定位置，浇筑第一次混凝土。随后套上灌浆套筒并将第二节 CFRP-钢管与之对齐，浇筑第二次混凝土。然后通过灌浆套筒下侧灌浆孔加入微膨胀高强灌浆料待到从排浆孔排出后停止。最后在节点周围绑扎钢筋浇筑混凝土环梁与混凝土梁。

6.0.4 刚性节点加强环板的类型可分为 4 种型式，I 和 II 型具有外形简单，便于制作的优点；III 和 IV 型外形曲线光滑，受力好，这 4 种型式都是工程中常用的型式，因而也作为本规程的推荐型式。

加强环板的设计计算，应满足以下两个条件：A、梁端等强过渡并符合构造要求；B、环板的设计承载力安全，可靠。环板的承载力受最大应力断面控制，但是不同型式的环板，控制断面位置不同。实验表明，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,本规定在对 AIJ (1997) 公式进行补充,并经简单变换后,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。对 III、IV 型环板的计算公式中引入了双向拉力比值。经与实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的和偏于安全的。

梁柱刚接节点试验表明,当梁端竖向剪力增至临界值时,梁端 ID 范围内的管壁可能产生局部鼓曲,致使节点刚度减小。为此,除采用梁端加腋等措施分散剪力,降低剪应力集度外,还应控制此范围内的剪应力值,以保证管壁不发生局部屈曲。

由于 CFRP-钢管混凝土柱具有较高的强度和良好的延性性质,用作抗震结构的柱是相当理想的。所以,节点的设计成为 CFRP-钢管混凝土框架结构抗震设计的关键。在框架结构中,不论是钢梁节点还是钢筋混凝土梁节点,只要满足计算和梁端构造上的要求,与钢筋混凝土框架节点相比,在低周反复荷载作用下,滞回特性、延性系数和强度储备均高得多,而且节点核心区不会破坏,梁端塑性铰位置易于控制。因此,采用 CFRP-钢管混凝土柱和钢梁或钢筋混凝土梁加强环节点组成的框架,更便于实现“强柱弱梁,节点更强”的抗震设计要求。

III、IV 型加强环板,由于其外形曲线光滑,无明显应力集中点,因而更适于承受反复荷载作用。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。

6.0.5 节点构造和计算基本同钢结构。应注意对地震区抗震支撑的板式节点的应力验算,防止剪应力集度过大,造成管壁的撕裂。根据工程经验,可加设加强肋板来加强节点分散应力。

6.0.6 参照已有工程设计经验。

7 施工与验收

7.1 一般规定

7.1.1 本章是作为特定要求钢结构工程的制作与施工标准，故在执行本规程时，还应遵守相关的国家标准和行业标准。

7.1.2 由制作单位根据已批准的设计文件编制施工详图，可较好地把握制作条件安装技术与原设计文件结合起来，使设计更趋完善。

7.1.3 CFRP-钢管混凝土构件常用作各种柱子，构造较为复杂，应根据工程特点，结合制作厂的条件编制制作工艺。制作工艺应包括：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。工艺中还应包括：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。

7.1.4 钢管结构和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。

7.1.5 为了保证正常施工和结构安全，浇灌钢管内的混凝土宜在钢构件安装并验收合格后进行。宜在钢构件安装完毕并经验收合格后浇灌钢管管内混凝土，是考虑到先行浇灌混凝土会使结构调整发生困难，甚至无法调整。

7.1.6 该条文说明了对钢管冬期施工的基本规定。

7.1.7 碳纤维是电的良导体，而有机胶粘剂属易燃物质，因此施工过程中应特别注意防火，电源、电器的使用安全。

7.2 钢构件的制作与施工

本节条文根据现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的相关内容制订。

7.3 混凝土施工

本节条文给出的泵送顶升浇灌、导管法及手工逐段浇捣等三种混凝土浇筑方法是目前国内钢管混凝土工程施工中较为成熟的方法。其中以泵送顶升浇灌法的质量最易控制。随着施工技术的发展，在工程实践中钢管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。

工程实践表明，合适的混凝土配合比、恰当的混凝土浇筑工艺和有效的混凝土浇筑质量检验措施对保证混凝土的施工质量都很重要（韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践（第三版），科学出版社，2016）。由于核心混凝土为外围钢管所包覆，具有一定的隐蔽性，从而导致对混凝土浇筑质量控制问题的特殊性和难度。应强调以控制过程来达到控制结果的目的（参见：于清，阎善章. 钢管混凝土中核心混凝土浇筑质量的过程控制方法探讨. 工业建筑，2008，38(9)，104-106.）。

7.4 冬期混凝土施工

7.4.1 实践证明，以室外日平均气温连续 5d 稳定低于 5°C 作为划定冬期施工的界限是合理的，但判断冬期施工的首要因素是当天温度低于 0°C ，即当日气温低于 0°C 时也要采取冬期施工措施。所以本条参照执行现行《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关规定，提出当室外最低气温连续 5d 稳定在 -3°C 以下时，也进入冬期施工。冬期施工期限以外，若某日气温骤降，即使连续 5d 室外日平均和日最低气温满足本条文要求，也要暂时进入冬期施工，待温度上升后，再正常施工，这样才能更好的保证工程质量。

7.4.2 本条参照执行现行《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关

规定。

7.4.3 本条参照执行现行《建筑工程冬期施工规程》JGJ 104 的有关规定。

7.4.5 应重视氯盐对钢管的腐蚀作用，不宜使用含氯盐防冻剂。为防止防冻剂中的钾、钠离子与骨料中的活性成分发生碱骨料反应，在掺用含有钾、钠离子的防冻剂混凝土中，不得采用活性骨料或在骨料中混有这类物质的材料。

7.4.6 本条参照执行现行《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关规定。

7.4.7 因钢材的导热系数较高，在钢管外包裹保温材料对 CFRP-钢管混凝土结构的冬期施工来说是最实用且效果最明显的方法之一，因此本条参照执行现行《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》CECS 188 的有关规定。

7.5 碳纤维织物粘贴施工

7.5.1 本条应注意的是：胶粘剂各组分的称量应准确；调胶应适量。所谓的适量是指每次配胶量应根据粘贴作业所需要的时间和环境温度来控制，从而使每次调的胶均能在产品说明书规定的适用期（可操作时间）内用完，以免过了胶的初凝时间。同时，应指出的是：倘若配胶掌握不当，胶液会突然发热、变稠，甚至结块。

7.5.2 碳纤维织物的粘贴作业应着重注意以下两点：

1 碳纤维织物极易折断，故在任何情况下均不允许折叠。同时，粘贴时还必须注意展平，不得有褶皱，以免影响其受力性能。

2 浸渍、粘结专用的结构胶能否顺畅地浸透到纤维束内，是保证粘贴施工质量的关键。因此，滚压一定要均匀而充分，以避免发生虚贴假贴现象，导致碳纤维复合材料失效。

7.5.4 为了保证检验时间确定的公平、公正性，以 7d 作为结构胶粘剂粘贴施工质量统一的检验期，是根据我国专业研究机构及有关厂

家达成的共识确定的。因为质量合格的结构胶，经过 7d 静置固化后，其粘结强度的增长已达到可接受的固化程度，可以开始进行力学性能检验，但为了使检验不致白做，一般应先测定胶层的硬度，据以判断胶的固化质量。如果用邵氏 D 型硬度计检测得到的硬度值 $HD < 70$ ，则表明该胶为劣质胶，应揭去重贴。

7.6 验 收

本节条文根据现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 相关内容制订。