

UDC

湖南省工程建设地方标准

P

DBJ43/T325—2017

活性粉末混凝土结构技术规程

Technical Specification for Reactive Powder Concrete Structures

2017-11-17 发布

2017-12-31 实施

湖南省住房和城乡建设厅 发布

前 言

活性粉末混凝土以其优良的物理力学性能被公认为是一种超高性能混凝土，在土木工程中具有广阔的应用前景。有关其材料制品方面的国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387-2015）已于 2015 年颁布执行，但目前国内尚无有关活性粉末混凝土结构设计与施工方面的技术规程和质量检验评定标准，已严重制约这种高性能材料的推广应用。基于此，湖南省住房和城乡建设厅将《活性粉末混凝土结构技术规程》列入其 2015 年度湖南省工程建设地方标准制订计划。

根据湖南省住房和城乡建设厅《关于印发 2015 年度科学技术项目计划的通知》（湘建科函[2015]182 号）的要求，湖南大学会同相关单位经科学研究，调查分析，实践经验总结，参考国内外相关规范，并在广泛征求专家意见和多次专家评审的基础上，编写了本技术规程。

本规程的主要内容包括：1.总则；2.术语和符号；3.材料；4.承载能力极限状态计算；5.正常使用极限状态验算；6.构造要求；7.抗震设计及构造；8.施工；9.施工质量验收等。

本规程由湖南省住房和城乡建设厅负责管理，由湖南大学土木工程学院负责具体技术内容的解释。执行本规程过程中，若有具体意见和建议，烦请函寄：湖南大学土木工程学院 方志 收（地址：长沙 岳麓山，邮编：410082）或发邮件至：fangzhi@hnu.edu.cn。

本规程主编单位：湖南大学、湖南明湘科技有限公司

本规程参编单位：湖南省交通勘察设计院有限公司、湖南路桥建设集团有限责任公司、湖南大学设计研究院有限公司、中国市政工程中南设计研究总院有限公司、中南大学、湖南工业大学、广东盖特奇新材料技术有限公司、湖南固特邦土木工程技术发展有限公司

本规程主要起草人：方志、胡建华、杨剑、吴罗明、刘玉兰、郑辉、苏捷、范毅雄、黄政宇、邓铁军、向建军、苏巧江、张贵明、黄贺明、李克忠、刘福财、童小龙、唐昌辉、单远铭、莫朝庆、彭勃、吴斌、马威

本规程主要审查人员：易伟建、朱晓鸣、颜东煌、陈浩、方萍

目 录

1 总则	3
2 术语、符号	2
2.1 术语.....	5
2.2 符号.....	6
3 材料.....	7
3.1 活性粉末混凝土材料要求.....	7
3.2 活性粉末混凝土强度.....	7
3.3 强度取值.....	7
3.4 弹性模量和泊松比	9
3.5 本构模型.....	9
3.6 热工系数.....	14
3.7 收缩	14
3.8 徐变.....	11
3.9 疲劳	14
4 承载能力极限状态计算.....	18
4.1 正截面承载力计算	14
4.2 斜截面受剪承载力计算.....	20
4.3 正截面受压承载力计算.....	24
4.4 正截面受拉承载力计算.....	28
4.5 抗冲切承载力计算	30
4.6 局部受压承载力计算.....	32
4.7 疲劳验算.....	38
4.8 预制构件结合部承载力计算.....	40
5 正常使用极限状态验算.....	43
5.1 裂缝控制验算	43
5.2 受弯构件挠度验算	45

6 构造要求	47
6.1 最小保护层厚度	47
6.2 钢筋选用及净距	47
6.3 最小配筋率	49
6.4 钢筋的锚固	50
6.5 钢筋的接头	50
6.6 结构构件的基本规定	52
6.7 预制构件的结合面	52
7 抗震设计及构造	53
7.1 一般规定	53
7.2 建筑结构的抗震设计	53
7.3 桥梁结构的抗震设计	58
8 施 工	61
8.1 一般规定	61
8.2 配合比	31
8.3 原材料贮存	63
8.4 计量	63
8.5 搅拌	64
8.6 运输	64
8.7 浇筑	65
8.8 养护	65
8.9 预制构件施工	67
9 施工质量验收	69
9.1 一般规定	69
9.2 原材料质量验收	69
9.3 拌合物质量验收	70
9.4 硬化活性粉末混凝土性能检验	70
9.5 活性粉末混凝土工程验收	71

本规程用词说明..... 75

引用标准名录..... 76

附：条文说明..... 77

1 总则

- 1.0.1** 活性粉末混凝土是以水泥、矿物掺合料等活性粉末材料以及细骨料、高强度微细钢纤维或有机合成纤维、外加剂和水等原料生产的纤维增强细骨料混凝土，依其特性可归于超高性能混凝土范畴。
- 1.0.2** 为规范活性粉末混凝土结构的设计和施工，贯彻国家的技术经济政策，统一质量检验标准，做到技术先进、经济合理、安全可靠、适用耐久、确保质量，特制定本规程。
- 1.0.3** 本规程适用于采用高强度微细钢纤维增强且钢纤维体积掺量在 1.5%~4.0%、强度等级在 RPC100~RPC180 之间活性粉末混凝土结构的设计、施工及质量验收。
- 1.0.4** 本规程适用于抗震设防烈度低于 8 度的建筑工程、桥梁工程钢筋活性粉末

混凝土、预应力活性粉末结构的设计、施工及质量验收。其它市政基础设施工程可参照使用。

1.0.5 本规程只对活性粉末混凝土结构不同于普通混凝土结构设计、施工及质量验收的专门要求做出规定，未明确规定的，可依据结构所属工程类别分别符合相应的国家和行业现行规范及规程要求。

1.0.6 本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计法，按分项系数的设计表达式进行设计。

1.0.7 作用取值及组合应依据结构物所属工程类别符合相关设计规范及规程。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 活性粉末混凝土 reactive powder concrete (RPC)

以水泥、矿物掺合料等活性粉末材料以及细骨料、外加剂、高强度微细钢纤维或有机合成纤维和水等原料生产的纤维增强细骨料混凝土，英文简称 RPC，依其特性可归于超高性能混凝土 UHPC (Ultra-High Performance Concrete) 范畴。

2.1.2 活性粉末混凝土基体 plain reactive powder concrete

不掺入微细钢纤维的素活性粉末混凝土。

2.1.3 微细钢纤维 fine steel fibre

由钢材加工制造的微细纤维，直径为 0.12~0.22mm，长度为 8~20mm，且长径比不应小于 60，不宜大于 100。

2.1.4 等效直径 equivalent diameter

当纤维截面为非圆形时，按截面面积相等原则换算的圆形截面直径。

2.1.5 纤维长径比 aspect ratio of fibre

纤维长度与直径或等效直径的比值。

2.1.6 纤维体积率 fraction of fibre by volume

纤维占活性粉末混凝土的体积百分数。

2.1.7 活性粉末混凝土结构 RPC structure

以活性粉末混凝土为主制作的结构，包括无筋活性粉末混凝土结构、钢筋活性粉末混凝土结构及预应力活性粉末混凝土结构。

2.1.8 预应力活性粉末混凝土结构 prestressed RPC structure

配置预应力筋的活性粉末混凝土结构。

2.1.9 现浇活性粉末混凝土结构 cast-in-situ RPC structure

在现场原位支模并整体浇筑而成的活性粉末混凝土结构。

2.1.10 装配式活性粉末混凝土结构 precast RPC structure

由活性粉末混凝土预制构件或部件装配、连接而成的结构。

2.1.11 活性粉末混凝土保护层 RPC cover

构件中钢筋或预应力筋管道外边缘至构件表面范围内用于保护钢筋或预应力

筋管道的活性粉末混凝土，简称保护层。

2.1.12 锚固长度 anchorage length

受力钢筋依靠其表面与活性粉末混凝土的粘结作用或端部构造的挤压作用而满足设计受力所需的长度。

2.1.13 剪跨比 ratio of shear span to effective depth

截面弯矩与剪力和截面有效高度乘积的比值。

2.1.14 配筋率 ratio of reinforcement

构件中配置的钢筋面积（或体积）与规定的混凝土截面面积（或体积）的比值。

2.1.15 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度 initial crack strength of RPC

活性粉末混凝土轴心抗拉时的基体抗拉强度。

2.1.16 活性粉末混凝土轴心抗拉强度 tensile strength of RPC

活性粉末混凝土轴心抗拉时的峰值抗拉强度。

2.2 符号

2.2.1 材料性能

E_c ——活性粉末混凝土弹性模量；

E_s ——钢筋弹性模量；

E_p ——预应力筋弹性模量；

RPC100 ——立方体抗压强度标准值为 100MPa 的活性粉末混凝土的强度等级；

HRB500 ——强度级别为 500MPa 的普通热轧带肋钢筋；

HRB400 ——强度级别为 400MPa 的普通热轧带肋钢筋；

$f_{cu,k}$ ——活性粉末混凝土立方体抗压强度标准值；

f_{ck} ——活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值；

f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值；

$f_{t0,k}$ ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值；

f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

f_{tk} ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值；

f_t ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_y ——纵向受拉钢筋抗拉强度设计值；

f'_y ——纵向受压钢筋抗压强度设计值；
 f_{py} ——预应力筋抗拉强度设计值；
 f'_{py} ——预应力筋抗压强度设计值；
 f_{yv} ——横向钢筋的抗拉强度设计值；
 ε_{cu} ——活性粉末混凝土的极限压应变；
 ε_{sh} ——活性粉末混凝土的收缩应变；
 ε_{cc} ——活性粉末混凝土的徐变应变；
 ϕ ——活性粉末混凝土的徐变系数。

2.2.2 作用与作用效应

N ——轴向力设计值；
 N_k 、 N_q ——按作用标准组合、准永久组合计算的轴向力值；
 N_{u0} ——构件轴向受压或轴心受拉承载力设计值；
 N_{p0} ——预应力构件混凝土法向预应力等于零时的预加力；
 M ——弯矩设计值；
 M_k 、 M_q ——按作用标准组合、准永久组合计算的弯矩值；
 M_u ——构件正截面受弯承载力设计值；
 M_{cr} ——构件的截面开裂弯矩值；
 V ——剪力设计值；
 V_{fc} ——活性粉末混凝土所提供的抗剪承载力；
 V_s ——箍筋所提供的抗剪承载力；
 V_p ——预加力所提供的构件抗剪承载力；
 F_l ——局部荷载设计值或集中反力设计值；
 σ_s 、 σ_p ——受拉边或受压较小边纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力；
 σ_{cp} ——预应力筋位置处混凝土的应力；
 σ_{pe} ——预应力筋的有效预应力；
 σ'_{p0} ——受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时受压区预应力筋的应力；
 τ ——混凝土剪应力；
 w_{lim} ——最大裂缝宽度的限值；
 w_{max} ——受弯构件的最大裂缝宽度。

2.2.3 几何参数

h ——截面高度；
 b ——矩形截面的宽度或 T 形截面的腹板宽度；
 h_0 ——截面有效高度；

h_w ——截面的腹板高度；
 x_b ——界限受压区高度；
 ξ_b ——界限相对受压区高度；
 A_c ——构件截面的混凝土面积；
 A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；
 A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积；
 A_{sb} 、 A_{pb} ——同一平面内弯起普通钢筋、弯起预应力筋的截面面积；
 A_{svu} ——与呈 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋面积；
 A_{sbu} ——与呈 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部弯起钢筋面积；
 α_s ——斜截面上弯起普通钢筋的切线与构件纵轴线的夹角；
 α_p ——斜截面上弯起预应力筋的切线与构件纵轴线的夹角；
 α_{sb} ——抗冲切弯起钢筋与板底面的夹角。
 a'_s ——受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边的距离；
 a'_p ——受压区纵向预应力筋合力点至截面受压边的距离；
 s ——沿构件长度方向的箍筋间距；
 d ——钢筋直径。
 a ——受拉区全部纵向钢筋合力点至截面受拉边缘的距离；
 a' ——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离；
 e ——轴向压力作用点至纵向受拉普通钢筋和预应力筋合力点的距离；
 l_0 ——受压构件的计算长度；
 e_i ——初始偏心距；
 e_0 ——轴向压力对截面重心的偏心距；
 e_a ——附加偏心距；
 l_f ——钢纤维长度；
 d_f ——钢纤维直径或等效直径；
 l_{ab} ——受拉钢筋的基本锚固长度。

2.2.4 计算系数及其它

α_{cv} ——斜截面混凝土抗剪承载力系数；
 φ ——构件的稳定系数；
 α ——锚固钢筋的外形系数；
 η_p ——抗冲切承载力计算影响系数；
 u_m ——抗冲切承载力计算时计算截面的周长；
 λ ——剪跨比；
 λ_f ——钢纤维含量特征值；

- α_1 ——等效矩形应力图换算时混凝土轴心抗压强度折减系数；
 β_1 ——等效矩形应力图换算时受压区高度折减系数；
 β_w ——钢纤维对裂缝宽度的影响系数；
 β_v ——钢纤维对活性粉末混凝土抗剪强度的影响系数；
 β_p ——钢纤维对活性粉末混凝土抗冲切强度的影响系数；
 β_B ——钢纤维对构件短期抗弯刚度的影响系数；
 B_{fs} ——考虑钢纤维影响的受弯构件截面短期抗弯刚度；
 B_s ——不考虑钢纤维影响的普通混凝土受弯构件截面的短期刚度；
 B_{fl} ——受弯构件截面的长期抗弯刚度；
 η ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数；
 ρ_f ——钢纤维体积率；
 ρ ——纵向受力钢筋配筋率；
 $\rho_{\min}$ ——纵向受力钢筋的最小配筋率；
 ρ_{sv} ——箍筋配筋率；
 $\rho_{sv\min}$ ——箍筋的最小配筋率。

3 材料

3.1 活性粉末混凝土材料应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的相应要求。

3.2 活性粉末混凝土的强度等级应按边长为 100mm 的立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度的测定应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

3.3 强度取值

3.3.1 活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 应按表 3.3.1 采用。

表3.3.1 活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值（MPa）

强度	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
f_{ck}	70	84	98	112	126

3.3.2 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值 $f_{t0,k}$ 宜由试验确定，当无试验数据时，可按表 3.3.2 采用。

表3.3.2 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值（MPa）

强度	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
$f_{t0,k}$	4.7	5.6	6.6	7.5	8.5

3.3.3 活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 宜由试验确定，当无试验数据时，可按式（3.3.3-1）计算。

$$f_{tk} = f_{t0,k}(1 + \alpha_f \lambda_f) \quad (3.3.3-1)$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (3.3.3-2)$$

式中： f_{tk} ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值；

$f_{t0,k}$ ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值，即基体抗拉强度

标准值，按表 3.3.2 取值；

α_f ——钢纤维对抗拉强度的影响系数，可取 0.15。

λ_f ——钢纤维含量特征参数；

ρ_f ——钢纤维体积率；

l_f ——钢纤维长度；

d_f ——钢纤维直径。

按式（3.3.3-1）计算的典型参数下活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值见表 3.3.3-1和表3.3.3-2，不同钢纤维体积掺量和钢纤维长径比下活性粉末混凝土的轴心抗拉强度也可根据表3.3.3-1和表3.3.3-2进行插值。

表3.3.3-1 典型参数下活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值（MPa，**钢纤维长径比40**）

强度等级 钢纤维体积掺量	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
1.5	5.1	6.2	7.1	8.2	9.2
2.0	5.2	6.3	7.4	8.4	9.4
3.0	5.6	6.7	7.8	8.9	10.0
4.0	5.8	7.0	8.1	9.4	10.5

表3.3.3-2 典型参数下活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值（MPa，**钢纤维长径比65**）

强度等级 钢纤维体积掺量	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
1.5	5.4	6.5	7.5	8.6	9.7
2.0	5.6	6.7	7.9	9.0	10.1
3.0	6.1	7.3	8.5	9.7	10.9
4.0	6.5	7.8	9.1	10.5	11.8

3.3.4 活性粉末混凝土的轴心抗压强度设计值 f_c 应按表3.3.4采用。

表3.3.4 活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值（MPa）

强度	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
f_c	48	58	68	77	87

3.3.5 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度的设计值 f_{t0} 应按表 3.3.5 采用。

表3.3.5 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值（MPa）

强度	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
f_{t0}	3.2	3.9	4.5	5.2	5.8

3.3.6 典型参数下活性粉末混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 按表 3.3.6 采用。

表3.3.6 典型参数下活性粉末混凝土轴心抗拉强度设计值（MPa，钢纤维长径比65）

强度等级 钢纤维体积掺量	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
1.5	3.7	4.5	5.2	5.9	6.7
2.0	3.9	4.6	5.4	6.2	7.0
3.0	4.2	5.0	5.9	6.7	7.5
4.0	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1

3.4 弹性模量和泊松比

活性粉末混凝土受压和受拉的弹性模量 E_c 应按表 3.4 采用或根据活性粉末混凝土的强度等级 $f_{cu,k}$ 按式（3.4）计算；泊松比 ν_c 按 0.2 采用；剪切变形模量 G_c 可取相应弹性模量值的 0.4 倍。

表3.4 活性粉末混凝土的弹性模量 ($\times 10^4 \text{MPa}$)

弹性模量	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
E_c	4.00	4.29	4.52	4.71	4.86

$$E_c = \frac{10^5}{1.5 + \frac{100}{f_{cu,k}}} \quad (3.4)$$

3.5 本构模型

3.5.1 单轴受压的应力-应变关系

活性粉末混凝土单轴受压的应力-应变关系可按式 (3.5.1) 确定：

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] \quad (\varepsilon_c < \varepsilon_0) \quad (3.5.1-1)$$

$$\sigma_c = f_c \quad (\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (3.5.1-2)$$

$$n = 1.2 - 0.001(f_{cu,k} - 100) \quad (3.5.1-3)$$

$$\varepsilon_0 = 0.0025 + (f_{cu,k} - 100) \times 10^{-5} \quad (3.5.1-4)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0042 - 0.3 \times (f_{cu,k} - 100) \times 10^{-5} \quad (3.5.1-5)$$

式中： σ_c ——活性粉末混凝土压应变为 ε_c 时的应力；

f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值，按本规程表 3.3.4 采用；

$f_{cu,k}$ ——活性粉末混凝土立方体抗压强度标准值；

ε_0 ——活性粉末混凝土峰值应力 f_c 对应的压应变；

ε_{cu} ——活性粉末混凝土极限压应变。

3.5.2 单轴受拉的应力-应变关系

活性粉末混凝土单轴受拉的应力-应变关系可按式 (3.5.2) 确定：

$$\sigma_t = E_c \varepsilon_t \quad (\varepsilon_t \leq \varepsilon_{t0}) \quad (3.5.2-1)$$

$$\sigma_t = f_t \quad (\varepsilon_{t0} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}) \quad (3.5.2-2)$$

式中, σ_t ——活性粉末混凝土拉应变为 ε_t 的拉应力;

f_t ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度设计值, 按表 3.3.6 采用;

ε_{t0} ——活性粉末混凝土拉应力达到 f_t 时的拉应变, 取值为 f_t/E_c ;

ε_{tu} ——活性粉末混凝土的极限拉应变。宜根据试验确定, 当无试验数据时, 可取 0.001。

3.6 热工系数

当温度在 0℃ 到 100℃ 范围内时, 活性粉末混凝土的热工参数可按下列规定取值:

线膨胀系数: $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$;

导热系数: $18.5 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$;

比热容: $1.3 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

3.7 收缩

不采用湿热养护时, 活性粉末混凝土的收缩应变 ε_{sh} 可按式 (3.7-1) 进行计算:

$$\varepsilon_{sh} = 700e^{-\left(\frac{2.5}{\sqrt{t-0.5}}\right)} \quad (3.7-1)$$

采用湿热养护时, 活性粉末混凝土的收缩应变 ε_{sh} 可按式 (3.7-2) 和式 (3.7-3) 进行计算:

$$\varepsilon_{sh} = 2.5 \times 10^{-4} t \quad (t \leq 2d) \quad (3.7-2)$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.0005 \quad (t > 2d) \quad (3.7-3)$$

式中: ε_{sh} ——活性粉末混凝土的收缩应变;

t ——龄期。

3.8 徐变

活性粉末混凝土的徐变应变 ε_{cc} 可按式 (3.8) 计算。

$$\varepsilon_{cc} = \phi \sigma_{cp} / E_{ct} \tag{3.8-1}$$

$$\phi = \phi_{\infty} \frac{(t-t_0)^{0.6}}{(t-t_0)^{0.6} + 10} \tag{3.8-2}$$

式中： ε_{cc} ——活性粉末混凝土的徐变应变；

ϕ ——徐变系数，按式 (3.8-2) 计算；

ϕ_{∞} ——徐变系数终值，可参考表 3.8 取值；

σ_{cp} ——持续工作应力；

t_0 ——加载龄期；

E_{ct} ——加载时刻活性粉末混凝土的弹性模量。湿热养护试件的 E_{ct}

可取表 3.4 中的弹性模量 E_c 值；当试件不采用湿热养护时，其值宜通过试验予以确定，当无试验数据时，可根据加载时活性粉末混凝土的强度按式 (3.4) 近似计算。

表3.8 活性粉末混凝土的徐变系数终值

加载龄期	徐变系数终值 ϕ_{∞}	
	常温保湿养护	湿热养护
4d	1.80	0.50
7d	1.70	0.48
14d	1.50	0.42
28d	1.20	0.30

3.9 疲劳

3.9.1 活性粉末混凝土轴心抗压疲劳强度设计值 f_c^f 、轴心抗拉初裂疲劳强度设计

值 f_{t0}^f 应分别按表 3.3.4、表 3.3.5 中的强度设计值乘疲劳强度修正系数 γ_ρ 确定，
疲劳强度修正系数 γ_ρ 应根据疲劳应力比值 ρ_c^f 分别按表 3.9.1-1、表 3.9.1-2 采用。

疲劳应力比值 ρ_c^f 应按下列公式计算：

$$\rho_c^f = \frac{\sigma_{c,\min}^f}{\sigma_{c,\max}^f} \quad (3.9.1)$$

式中： $\sigma_{c,\min}^f$ 、 $\sigma_{c,\max}^f$ ——构件疲劳验算时，截面同一纤维上混凝土的最小应力、
最大应力。

表3.9.1-1活性粉末混凝土受压疲劳强度修正系数 γ_ρ

ρ_c^f	$0 \leq \rho_c^f < 0.1$	$0.1 \leq \rho_c^f < 0.2$	$0.2 \leq \rho_c^f < 0.3$
γ_ρ	0.57	0.66	0.74
ρ_c^f	$0.3 \leq \rho_c^f < 0.4$	$0.4 \leq \rho_c^f < 0.5$	$\rho_c^f \geq 0.5$
γ_ρ	0.83	0.92	1.00

表3.9.1-2 活性粉末混凝土受拉初裂疲劳强度修正系数 γ_ρ

ρ_c^f	$0 < \rho_c^f < 0.1$	$0.1 \leq \rho_c^f < 0.2$	$0.2 \leq \rho_c^f < 0.3$	$0.3 \leq \rho_c^f < 0.4$
γ_ρ	0.7	0.73	0.77	0.80
ρ_c^f	$0.4 \leq \rho_c^f < 0.5$	$0.5 \leq \rho_c^f < 0.6$	$0.6 \leq \rho_c^f < 0.7$	$0.7 \leq \rho_c^f < 0.8$
γ_ρ	0.83	0.87	0.90	0.93
ρ_c^f	$\rho_c^f \geq 0.8$	——	——	——
γ_ρ	1.00	——	——	——

3.9.2 混凝土疲劳变形模量 E_c^f 应按表 3.9.1-2 采用。

表3.9.2 活性粉末混凝土的疲劳变形模量 ($\times 10^4 \text{MPa}$)

弹性模量	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
E_c^f	2.00	2.15	2.26	2.36	2.43

4 承载能力极限状态计算

4.1 正截面承载力计算

4.1.1 基本假定

- (1) 截面应变保持平面，即截面纤维应变与到中性轴的距离成线性关系；
- (2) 活性粉末混凝土的应力与应变关系采用 3.5 节中式 (3.5)；
- (3) 纵向受力钢筋的应力取钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其值应符合下列要求：

$$-f'_y \leq \sigma_{si} \leq f_y \quad (4.1.1-1)$$

$$\sigma_{p0i} - f'_p \leq \sigma_{pi} \leq f_{py} \quad (4.1.1-2)$$

式中： f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值；

f'_y 、 f'_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗压强度设计值；

σ_{si} 、 σ_{pi} ——第 i 层纵向普通钢筋、预应力筋的应力，正值代表拉应力，负值代表压应力；

σ_{p0i} ——第 i 层纵向预应力筋截面重心处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力；

- (4) 纵向受拉钢筋的极限拉应变取为 0.01；

- (5) 极限状态时，不考虑构件截面受拉区活性粉末混凝土的抗拉作用。

4.1.2 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时，为应用方便，受压区混凝土的压应力分布可简化为等效的矩形应力图块。

受压区等效矩形应力图块的高度 x 可根据平截面假定所确定的中性轴高度乘以系数 β_1 确定， β_1 可按表 4.1.2-1 中取值；矩形应力图块的应力值可取混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 的 α_1 倍， α_1 的取值见表 4.1.2-1。

表 4.1.2-1 受压区等效矩形应力图块系数

强度等级 系数	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
α_1	0.95	0.93	0.92	0.90	0.87
β_1	0.77	0.76	0.73	0.71	0.70

4.1.3 纵向受拉钢筋屈服与受压区混凝土压脆同时发生（即界限破坏）时的相对受压区高度 ξ_b 可按以下公式计算：

钢筋活性粉末混凝土构件：

有屈服点钢筋：

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (4.1.3-1)$$

无屈服点钢筋

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (4.1.3-2)$$

预应力活性粉末混凝土构件：

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_{py} - \sigma_{p0}}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (4.1.3-3)$$

式中： ξ_b ——相对界限受压区高度，取 $\xi_b = x_b / h_0$ ；

x_b ——界限受压区高度；

h_0 ——截面有效高度；

E_s ——钢筋弹性模量；

σ_{p0} ——受拉区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力；

ε_{cu} ——非均匀受压时活性粉末混凝土的极限压应变，取值见（3.5.1-5）；

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值；

β_1 ——等效矩形应力图块的受压区高度折减系数，按表 4.1.2-1 取值。

相对界限受压区高度计算结果如表 4.1.3 所示。

表 4.1.3 相对界限受压区高度 ξ_b

	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
HRB400	0.54	0.53	0.51	0.49	0.48
HRB500	0.51	0.50	0.48	0.46	0.45

4.1.4 矩形截面或翼缘位于受拉边的倒 T 形截面受弯构件，其正截面抗弯承载力计算应符合以下规定：

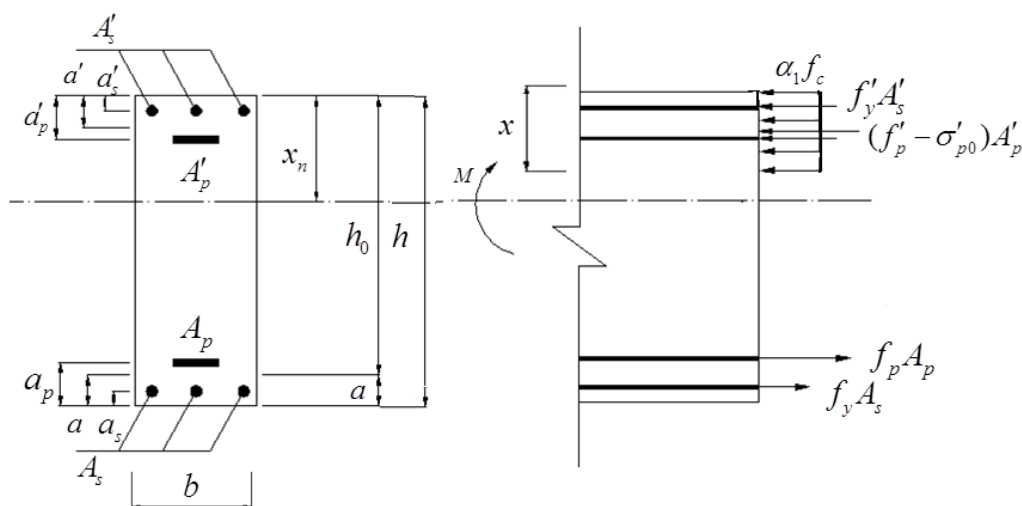


图 4.1.4 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

$$M \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p (h_0 - a'_p) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (4.1.4-1)$$

混凝土受压区高度由以下公式确定：

$$\alpha_1 f_c b x + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p + f'_y A'_s = f_{py} A_p + f_y A_s \quad (4.1.4-2)$$

混凝土受压区高度尚应符合以下条件：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (4.1.4-3)$$

$$x \geq 2a' \quad (4.1.4-4)$$

当构件中无纵向受压钢筋或不考虑纵向受压钢筋的作用时，不需要符合(4.1.4-4)。

式中： M ——弯矩设计值；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值；

f'_y 、 f'_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗压强度设计值；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积；

α_1 ——等效矩形应力图系数，按表 4.1.2-1 取值；

σ'_{p0} ——受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力；

b ——矩形截面的宽度；

h_0 ——截面有效高度；

h ——截面高度；

ξ_b ——相对界限受压区高度，按式(4.1.3)计算或表 4.1.3 取值；

x ——等效矩形应力图的混凝土受压区高度；

a_s 、 a_p ——受拉区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

a'_s 、 a'_p ——受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

a ——纵向普通受拉钢筋和预应力受拉钢筋的合力点至截面近边缘的距离；

a' ——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离，当受压区未配置纵向预应力筋或受压区纵向预应力钢筋应力($\sigma'_{p0} - f'_{py}$)为拉应力时，

式（4.1.4-4）中的 a' 用 a'_s 代替。

4.1.5 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面受弯构件，其正截面受弯承载力计算应符合以下规定：

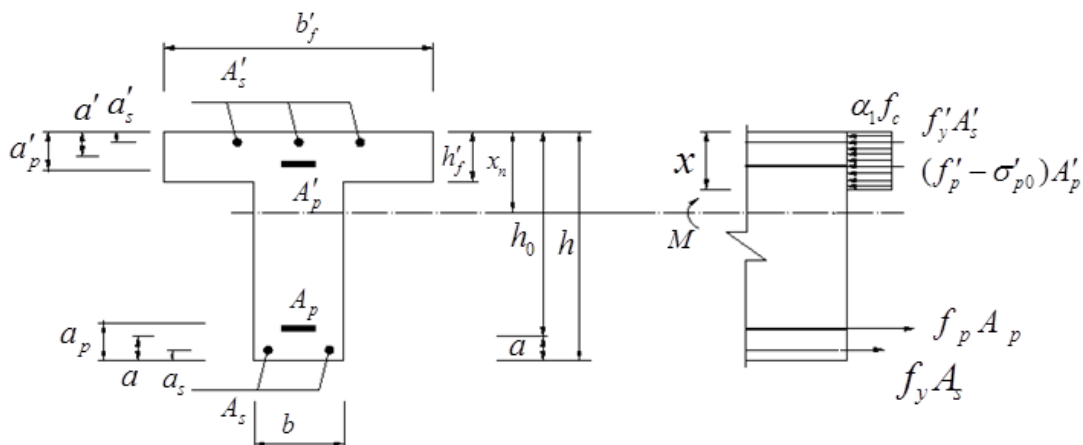


图 4.1.5 T 形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

1. 当满足式（4.1.5-1）时按矩形截面计算正截面承载能力。

$$f_p A_p + f_y A_s \leq \alpha_1 f_c b'_f h'_f + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p + f'_y A'_s \quad (4.1.5-1)$$

2. 当不满足式（4.1.5-1）时，应按式（4.1.5-2）计算正截面承载能力。

$$M \leq \alpha_1 f_c [bx(h_0 - \frac{x}{2}) + (b'_f - b)h'_f(h_0 - \frac{h'_f}{2})] + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p (h_0 - a'_p) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (4.1.5-2)$$

3. 混凝土受压区高度由式（4.1.5-3）确定。

$$\alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b)h'_f] + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p + f'_y A'_s = f_{py} A_p + f_y A_s \quad (4.1.5-3)$$

式中： M ——弯矩设计值；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值；

f'_y 、 f'_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗压强度设计值。

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积；

α_1 ——等效矩形应力图系数，按表 4.1.2-1 取值；

σ'_{p0} ——受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力；

b ——T 形截面的腹板宽度；

b'_f ——T 形面受压翼缘计算宽度；

h_0 ——截面有效高度；

h'_f ——T 形截面受压区的翼缘高度；

h ——截面高度；

ξ_b ——相对界限受压区高度，按式(4.1.3)计算或表 4.1.3 取值；

x ——等效矩形应力图的混凝土受压区高度；

a_s 、 a_p ——受拉区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受拉边缘的距离；

a'_s 、 a'_p ——受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

a ——受拉区全部纵向钢筋的合力点至截面受拉边缘的距离；

a' ——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离，当受压区未配置纵向预应力钢筋或受压区纵向预应力钢筋应力($\sigma'_{p0} - f'_{py}$)为拉应力时，式(4.1.4-4)中的 a' 用 a'_s 代替。

4.1.6 预应力损失计算

1 除混凝土收缩和徐变引起的预应力损失外，其余各项预应力损失依据结构所属工程类别分别按《混凝土结构设计规范》GB 50010 或《公路钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范》JTG D62 或其它相关规范及规程的相应公式进行

计算。

2 为减小温差损失,湿热养护的先张法构件宜采用四阶段养护工艺进行养护,具体的养护制度见本规程第 8.8.1 条规定。

3 由混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l6} 按式 (4.1.6-1) 计算:

$$\sigma_{l6} = \phi \frac{\sigma_c}{E_c} E_p + \varepsilon_{sh} E_p \quad (4.1.6-1)$$

式中: ϕ ——徐变系数,按式 (3.8) 计算;

σ_c ——预应力筋位置处混凝土的应力;

E_c ——活性粉末混凝土的弹性模量;

E_p ——预应力筋的弹性模量;

ε_{sh} ——收缩应变,按式 (3.7) 计算。

4.2 斜截面受剪承载力计算

4.2.1 矩形、T 形、I 形及箱型截面受弯构件的受剪截面应符合下列条件:

$$V \leq 0.1 f_c (1 + 0.15 \lambda_f) b h_0 \quad (4.2.1)$$

式中: V ——构件斜截面上的最大剪力设计值;

f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值;

b ——矩形截面的宽度或 T 形截面和箱型截面的腹板宽度;

h_0 ——截面有效高度;

λ_f ——钢纤维含量特征参数, $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率, l_f 为钢纤维的等效长度, d_f 为钢纤维的等效直径。

4.2.2 当仅配置箍筋时,矩形、T 形、I 形截面受弯构件的斜截面受剪承载力应符合下列条件:

$$V \leq V_{fc} + V_s + V_p \quad (4.2.2-1)$$

$$V_{fc} = \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 \quad (4.2.2-2)$$

$$V_s = f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (4.2.2-3)$$

$$V_p = 0.05 N_{p0} \quad (4.2.2-4)$$

式中： V_{fc} ——活性粉末混凝土所提供的抗剪承载力；

V_s ——箍筋所提供的抗剪承载力；

V_p ——由预加力提供的抗剪承载力；

α_{cv} ——斜截面活性粉末混凝土抗剪承载力系数，对于一般受弯构件取**错误!**

未找到引用源。 $\alpha_{cv} = 0.6$ ，对于集中荷载作用下的独立梁取

$\alpha_{cv} = 1.5 / (\lambda + 1)$ ，其中 λ 为剪跨比，当 λ 小于 1.5 时，取 1.5，当

错误!未找到引用源。 大于 3.0 时，取 3.0；

f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

$1 + \beta_v \lambda_f$ ——活性粉末混凝土中钢纤维对抗拉强度的提高系数， λ_f 为钢纤维含量

特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率， l_f 为

钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

β_v ——钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数，可取 $\beta_v = 0.6$ ；

b ——矩形截面的宽度，T 形截面或箱型截面的腹板宽度；

h_0 ——截面有效高度；

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距；

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值；

N_{p0} ——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力，对于预应力混

凝土连续梁以及允许出现裂缝的预应力混凝土简支梁，计算时应

不考虑 N_{p0} 的作用。

4.2.3 当配有箍筋和弯起钢筋时，矩形、T 形、I 形和箱型截面活性粉末混凝土受弯构件斜截面受剪承载力应符合下列条件：

$$V \leq V_{fc} + V_s + V_p + 0.75 f_{yv} A_{sb} \sin \alpha_s + 0.75 f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p \quad (4.2.3)$$

式中：V——配置弯起钢筋处的剪力设计值；

V_{fc} ——活性粉末混凝土所提供的抗剪承载力；

V_s ——箍筋所提供的抗剪承载力；

V_p ——由预加力所提供的抗剪承载力；

A_{sb} 、 A_{pb} ——分别为同一平面内的弯起普通钢筋、弯起预应力筋的截面面积；

α_s 、 α_p ——分别为斜截面上弯起普通钢筋、弯起预应力筋的切线与构件纵轴线的夹角。

4.2.4 矩形、T 形、I 形和箱型截面一般受弯构件，当符合下式要求时，可不进行斜截面受剪承载力计算，但其箍筋的配置应满足构造要求。

$$V \leq \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + 0.05 N_{p0} \quad (4.2.4)$$

式中： α_{cv} ——截面混凝土受剪承载能力系数，按本规程第 4.2.2 条取值。

f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

β_v ——钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数，可取 $\beta_v = 0.6$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量

百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

b ——矩形截面的宽度，T 形截面或箱型截面的腹板宽度；

h_0 ——截面有效高度；

N_{p0} ——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力，对于预应力混凝土连续梁以及允许出现裂缝的预应力混凝土简支梁，计算时应不考虑 N_{p0} 的作用。

4.2.5 不配箍筋和弯起钢筋的活性粉末混凝土一般板类受弯构件，其斜截面抗剪承载力应按下列规定：

$$V \leq 0.6 f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 \quad (4.2.5)$$

其中： f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

β_v ——钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数，可取 $\beta_v=0.6$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量

百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

b ——矩形截面的宽度，T形截面或箱型截面的腹板宽度；

h_0 ——截面有效高度。

4.2.6 矩形、T形、I形和箱型截面偏心受压构件，其斜截面受剪承载力应符合下式规定：

$$V \leq \frac{1.5}{1 + \lambda} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07 N \quad (4.2.6)$$

其中： f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

λ ——偏心受压构件计算截面的剪跨比。按《混凝土结构设计规范》GB50010 中矩形、T形、I形和箱型截面的偏心受压构件的相关规定确定；

β_v ——钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数，可取 $\beta_v=0.6$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量

百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

b ——矩形截面的宽度，T形截面或箱型截面的腹板宽度；

h_0 ——截面有效高度；

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距；

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值；

N ——与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值，当大于 $0.3 f_c A$ 时，取

$0.3f_c A$ ， f_c 为活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值， A 为构件的截面面积。

4.2.7 矩形、T形、I形和箱型截面的偏心受拉构件，其斜截面受剪承载力应符合下式规定：

$$V \leq \frac{1.5}{1+\lambda} f_{t0} (1+\beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 - 0.2N \quad (4.2.7)$$

其中： f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

λ ——偏心受压构件计算截面的剪跨比。按《混凝土结构设计规范》GB50010 中矩形、T形、I形和箱型截面的偏心受压构件的相关规定确定；

β_v ——钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数，可取 $\beta_v=0.6$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

b ——矩形截面的宽度，T形截面或箱型截面的腹板宽度；

h_0 ——截面有效高度。

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距；

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值；

N ——与剪力设计值 V 相应的轴向拉力设计值。

当式 (4.2.7) 右边的计算值小于 $f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 时，应取等于 $f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ ，且 $f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 值不应小于 $0.36 f_{t0} (1+\beta_v \lambda_f) b h_0$ 。

4.3 正截面受压承载力计算

4.3.1 轴心受压构件的承载能力

活性粉末混凝土轴心受压构件，其轴心受压承载力计算应符合以下规定：

$$N \leq 0.9\varphi(f_c A_c + f_y' A_s') \quad (4.3.1)$$

式中： N ——轴向压力设计值；

φ ——构件的稳定系数，按表 4.3.1 采用；

f_c ——活性粉末混凝土抗压强度设计值；

A_c ——活性粉末混凝土构件的截面面积；

f'_y ——纵向受压钢筋的抗压强度设计值；

A'_s ——纵向受压钢筋的面积。

表 4.3.1 活性粉末混凝土轴心受压构件的稳定系数

l_0/b	≤ 8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
l_0/d	≤ 7	8.5	10.5	12	14	15.5	17	19	21	22.5	24
l_0/i	≤ 28	35	42	48	55	62	69	76	83	90	97
φ	1.00	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65	0.60	0.56
l_0/b	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
l_0/d	26	28	29.5	31	33	34.5	36.5	38	40	41.5	43
l_0/i	104	111	118	125	132	139	146	153	160	167	174
φ	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19

注：表中 l_0 为构件的计算长度，依据结构所属工程类别按相应规程的规定确定； b 为矩形截面的短边尺寸； d 为圆形截面的直径； i 为截面的最小回转半径。

4.3.2 矩形截面偏心受压构件的正截面承载能力

矩形截面偏心受压构件正截面承载力应符合以下规定：

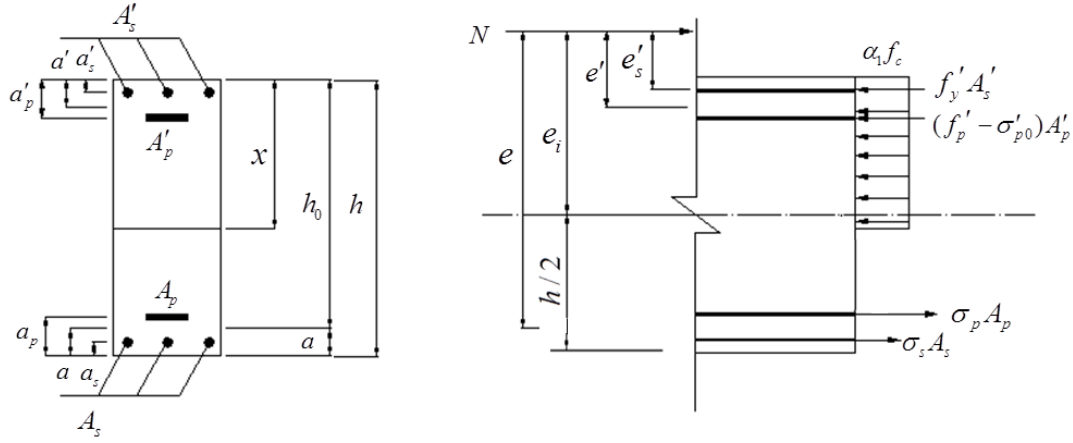


图 4.3.2 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力计算

$$N \leq \alpha_1 f_c b x + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p + f'_s A'_s - \sigma_p A_p - \sigma_s A_s \quad (4.3.2-1)$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + (f'_{py} - \sigma'_{p0}) A'_p (h_0 - a'_p) + f'_s A'_s (h_0 - a'_s) \quad (4.3.2-2)$$

$$e = \eta e_i + \frac{h}{2} - a \quad (4.3.2-3)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (4.3.2-4)$$

式中： N ——轴向压力设计值；

e ——轴向压力作用点至纵向普通受拉钢筋和预应力受拉钢筋合力点的距离；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值；

f'_y 、 f'_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗压强度设计值。

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积；

α_1 ——等效矩形应力图系数，按表 4.1.2-1 取值；

σ'_{p0} ——受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力筋应力；

b ——矩形截面的宽度；

h_0 ——截面有效高度；

h ——截面高度；

x ——等效矩形应力图块的高度；

a ——纵向普通受拉钢筋和预应力受拉钢筋的合力点至截面近边缘的距离；

a_s 、 a_p ——受拉区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受拉边缘的距离；

a'_s 、 a'_p ——受压区纵向普通钢筋合力点、预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

η ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数，按式（4.3.2-5）计算：

$$\eta=1+\frac{1}{1200(e_i/h_0)}\left(\frac{l_0}{h}\right)^2\zeta_1\zeta_2, \quad (4.3.2-5)$$

式中： $\zeta_1=0.2+2.7\frac{e_0}{h_0}\leq 1$ ， $\zeta_2=1.15-0.01\frac{l_0}{h}\leq 1$ ；

e_i ——初始偏心距，且 $e_i = e_0 + e_a$ ；

e_0 ——轴向压力对截面重心的偏心距， $e_0 = \frac{M}{N}$ ；

e_a ——附加偏心距，其值取 20mm 和偏心方向截面最大尺寸 1/30 两者中的较大值；

l_0 ——受压构件的计算长度，依据结构所属工程类别按相应规程的规定确定；

σ_p 、 σ_s ——分别为受拉边或受压较小边纵向普通钢筋和预应力钢筋的应力，应符合下列要求：

（1）当相对受压区高度 ξ 不大于界限相对受压区高度 ξ_b 时，为大偏压构件，取 σ_s 为 f_y ；

(2) 当相对受压区高度 ξ 大于界限相对受压区高度 ξ_b 时, 为小偏压构件, 按式 (4.3.2-6) 计算。

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{\beta_1 h_{0i}}{x} - 1 \right) \quad (4.3.2-6)$$

式中 h_{0i} 为第 i 层纵向钢筋截面重心至截面受压边缘的距离。

4.3.3 对称配筋矩形截面小偏心受压构件正截面承载能力

对称配筋矩形截面小偏心受压构件的承载能力可按下列公式近似计算纵向普通钢筋截面面积:

$$A'_s = \frac{Ne - \xi(1 - 0.5\xi)\alpha_1 f_c b h_0^2}{f_y'(h_0 - a'_s)} \quad (4.3.3-1)$$

此处, 相对受压区高度 ξ 可按下列式计算:

$$\xi = \frac{N - \xi_b \alpha_1 f_c b h_0}{\frac{Ne - 0.43 \alpha_1 f_c b h_0^2}{(\beta_1 - \xi_b)(h_0 - a'_s)} + \alpha_1 f_c b h_0} + \xi_b \quad (4.3.3-2)$$

4.3.4 矩形、T 形和 I 形截面偏心受压构件除应计算弯矩作用平面抗压作用承载力外, 尚应按轴心受压构件验算垂直于弯矩作用平面的抗压承载力。此时不考虑弯矩作用, 但应考虑稳定系数 φ 的影响。

4.4 正截面受拉承载力计算

4.4.1 轴心受拉构件正截面受拉承载力应符合以下规定:

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (4.4.1)$$

式中: N ——轴向拉力设计值;

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋抗拉强度设计值;

A_s 、 A_p ——纵向普通钢筋、预应力筋的全部截面面积。

4.4.2 矩形截面偏心受拉构件的正截面受拉承载力应符合以下规定:

(1) 小偏心受拉构件

当轴向拉力作用在钢筋 A_s 与 A_p 的合力点和 A'_s 与 A'_p 的合力点之间时（图 4.4.2a）：

$$Ne \leq f_y A'_s (h_0 - a'_s) + f_{py} A'_p (h_0 - a'_p) \quad (4.4.2-1)$$

$$Ne' \leq f_y A_s (h'_0 - a_s) + f_{py} A_p (h'_0 - a_p) \quad (4.4.2-2)$$

(2) 大偏心受拉构件

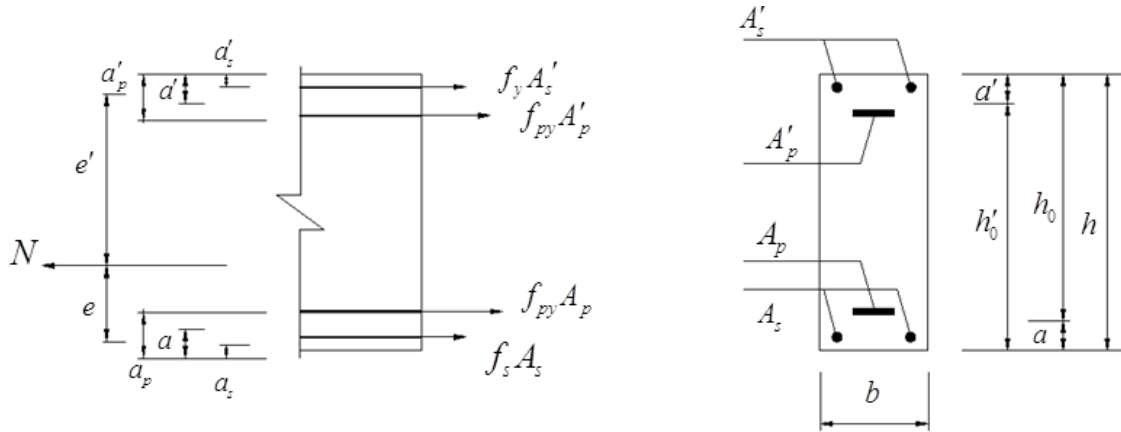
当轴向拉力不作用在钢筋 A_s 与 A_p 的合力点和 A'_s 与 A'_p 的合力点之间时（图 4.4.2b）：

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p - f'_y A'_s + (\sigma'_{p0} - f''_{py}) A'_p - \alpha_1 f_c b x \quad (4.4.2-1)$$

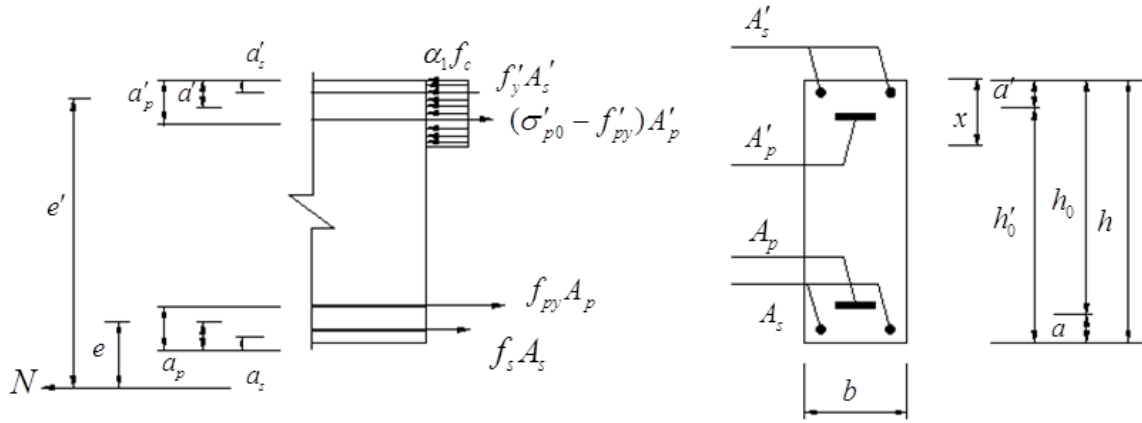
$$Ne \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (4.4.2-2)$$

此时，活性粉末混凝土受压区高度应满足式（4.1.4-3）的要求。当计算中计入纵向受压钢筋时，尚应满足本规程公式（4.1.4-4）的条件；当不满足时，可按公式（4.4.2-2）计算。

(3) 对称配筋的矩形截面偏心受拉构件，不论大、小偏心受拉情况，均可按公式（4.4.2-2）计算。



(a) 小偏心受拉构件



(b) 大偏心受拉构件

图 4.4.2 矩形截面偏心受拉构件正截面受拉承载力计算

4.5 抗冲切承载力计算

4.5.1 在局部荷载或集中反力作用下，不配置箍筋或弯起钢筋活性粉末混凝土板的抗冲切承载力应按下式计算：

$$F_1 \leq 0.7 \beta_h f_{t0} (1 + \beta_p \lambda_f) \eta u_m h_0 \quad (4.5.1)$$

式中： F_1 ——活性粉末混凝土板的冲切力设计值，按《混凝土结构设计规范》

GB50010 中相关规定确定；

β_h ——截面高度影响系数，当 $h \leq 800\text{mm}$ 时，取为 1.0，当 $h \geq 2000\text{mm}$ 时，取为 0.9，其间按线性内插处理；

f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

β_p ——钢纤维对活性粉末混凝土板抗冲切能力的影响系数，可取 $\beta_p = 0.4$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

η ——冲切承载力计算影响系数，按《混凝土结构设计规范》GB50010 中受冲切承载力计算的相关规定确定；

u_m ——计算截面的周长，取距离局部荷载或集中反力作用面积周边 $h_0 / 2$ 处板垂直截面的最不利周长，如计算位置临近孔洞，应按《混凝土结

构设计规范》GB50010 中有关规定考虑孔洞的影响；

h_0 ——截面有效高度，取两个方向配筋的截面有效高度平均值。

4.5.2 局部荷载或集中反力作用下，当板的抗冲切承载力不满足本规定 4.4.1 条的要求时，可配置抗冲切箍筋或弯起钢筋。此时，受冲切截面及抗冲切承载力应符合下列要求：

1. 配置抗冲切钢筋的活性粉末混凝土构件，受冲切截面限制条件：

$$F_l \leq 1.05 f_{t0} (1 + \beta_p \lambda_f) \eta u_m h_0 \quad (4.5.2-1)$$

2. 配置箍筋或弯起钢筋时的受抗冲切承载力：

$$F_l \leq 0.35 \beta_h f_{t0} (1 + \beta_p \lambda_f) \eta u_m h_0 + 0.75 f_{yv} A_{svu} + 0.75 f_y A_{sbu} \sin \alpha_{sb} \quad (4.5.2-2)$$

式中： F_l ——活性粉末混凝土板的冲切力设计值；

β_h ——截面高度影响系数，当 $h \leq 800\text{mm}$ 时，取为 1.0，当 $h \geq 2000\text{mm}$ 时，取为 0.9，其间按线性内插处理；

f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

β_p ——钢纤维对活性粉末混凝土板抗冲切能力的影响系数，可取 $\beta_p = 0.4$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径；

η ——冲切承载力计算影响系数，按《混凝土结构设计规范》GB50010 中受冲切承载力计算的相关规定确定；

u_m ——计算截面的周长，取距离局部荷载或集中反力作用面积周边 $h_0 / 2$ 处板垂直截面的最不利周长；

h_0 ——截面有效高度，取两个方向配筋的截面有效高度平均值；

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值；

A_{svu} ——与 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋面积；

A_{sbu} ——与 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部弯起钢筋面积；

α_{sb} ——弯起钢筋与板底面的夹角。

4.5.3 配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外的截面，尚应按本规程第 4.5.1 条的规定进行受冲切承载力计算，此时， u_m 应取配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外 $0.5h_0$ 处的最不利周长。

4.6 局部受压承载力计算

4.6.1 不配间接钢筋的活性粉末混凝土构件局部受压计算应符合下列规定：

$$F_l \leq \omega \beta_c \beta_l f_c (1 + \beta_n \lambda_f) A_{ln} \quad (4.6.1-1)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (4.6.1-2)$$

式中： F_l ——活性粉末混凝土局部压力设计值；

ω ——荷载分布影响系数，按《混凝土结构设计规范》GB50010 中附录 D 有关规定进行计算；

β_c ——活性粉末混凝土的强度影响系数，可取 $\beta_c = 0.5$ ；

β_l ——活性粉末混凝土局部受压时强度提高系数；

A_b ——局部受压的计算底面积，按《混凝土结构设计规范》GB50010 中有关规定进行计算；

A_l ——活性粉末混凝土局部受压面积；

A_{ln} ——活性粉末混凝土局部受压净面积，对于后张法构件，应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积；

β_n ——钢纤维对活性粉末混凝土构件局部受压承载力的影响系数，宜通过试验确定，无试验结果时可取 $\beta_n = 0.3$ 进行计算；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺

量百分率, l_f 为钢纤维的等效长度, d_f 为钢纤维的等效直径。

4.6.2 配置间接钢筋的活性粉末混凝土构件, 其间接钢筋的配置范围和构造应符合《混凝土结构设计规范》GB50010 中的有关规定。其局部受压区的截面尺寸应符合下式规定:

$$F_l \leq 1.3\beta_c\beta_l f_c(1 + 0.15\lambda_f)A_{ln} \quad (4.6.2)$$

式中: β_c ——活性粉末混凝土的强度影响系数, 可取 $\beta_c=0.5$;

β_l ——活性粉末混凝土局部受压时强度提高系数, 按式(4.6.1-2)确定;

λ_f ——钢纤维含量特征参数, $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率, l_f 为钢纤维的等效长度, d_f 为钢纤维的等效直径;

A_{ln} ——活性粉末混凝土局部受压净面积, 对于后张法构件, 应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积。

4.6.3 配置间接钢筋的活性粉末混凝土构件, 其间接钢筋的配置范围和构造应符合《混凝土结构设计规范》GB50010 中的有关规定。局部承压承载力应符合下式规定:

$$F_l \leq 0.9(\beta_c\beta_l f_c(1 + \beta_{fl}\lambda_f) + 2\rho_v\beta_{cor}f_{yv}) A_{ln} \quad (4.6.3)$$

式中: β_c ——活性粉末混凝土的强度影响系数, 可取 $\beta_c=0.5$ 。

β_l ——活性粉末混凝土局部受压时强度提高系数, 按式(4.6.1-2)确定;

λ_f ——钢纤维含量特征参数, $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率, l_f 为钢纤维的等效长度, d_f 为钢纤维的等效直径。

A_{ln} ——活性粉末混凝土局部受压净面积, 对于后张法构件, 应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积;

β_{fl} ——钢纤维对活性粉末混凝土构件的局部受压承载力影响系数, 宜通过试验确定, 无试验结果时可取 $\beta_{fl}=0.3$ 进行计算;

λ_f ——钢纤维含量特征参数, $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率, l_f 为钢纤维的等效长度, d_f 为钢纤维的等效直径;

ρ_v ——间接钢筋的体积配筋率, 按《混凝土结构设计规范》GB50010 中的有关规定进行计算;

β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数, 按《混凝土结构设计规范》GB50010 中的有关规定进行计算。

4.7 疲劳验算

4.7.1 受弯构件的正截面疲劳应力验算时, 可采用下列基本假定:

1. 截面应变保持平面;
2. 活性粉末混凝土受压区的法向应力图形为三角形;
3. 对于允许开裂的活性粉末混凝土构件, 不考虑受拉区活性粉末混凝土的抗拉作用, 拉力全部由纵向钢筋承受; 对于不允许开裂的活性粉末混凝土构件, 受拉区活性粉末混凝土的法向应力图形取为三角形;
4. 采用换算截面计算。

4.7.2 在疲劳验算中, 荷载应取用标准值; 动力荷载应乘以动力系数, 并应根据工程所属类别分别符合相应规范或规程的规定。

4.7.3 活性粉末混凝土受弯构件疲劳验算时, 应计算正截面受压区边缘的活性粉末混凝土应力和纵向受拉钢筋的应力幅。

4.7.4 活性粉末混凝土和预应力活性粉末混凝土受弯构件正截面疲劳应力应符合下列要求:

1. 受压区边缘纤维的活性粉末混凝土压应力

$$\sigma_{cc,max}^f \leq f_c^f \quad (4.7.4-1)$$

2. 预应力活性粉末混凝土构件受拉区边缘纤维的活性粉末混凝土拉应力

$$\sigma_{ct,max}^f \leq f_{t0}^f \quad (4.7.4-2)$$

3. 受拉区纵向普通钢筋的应力幅

$$\Delta\sigma_{si}^f \leq \Delta f_y^f \quad (4.7.4-3)$$

4. 受压区纵向预应力筋的应力幅

$$\Delta\sigma_p^f \leq \Delta f_{py}^f \quad (4.7.4-4)$$

式中： $\sigma_{cc,max}^f$ ——疲劳验算时截面受压区边缘纤维的活性粉末混凝土压应力，按式(4.7.5-1)计算；

$\sigma_{ct,max}^f$ ——疲劳验算时预应力活性粉末混凝土截面受拉区边缘纤维的活性粉末混凝土拉应力，按 4.7.8 条计算；

$\Delta\sigma_{si}^f$ ——疲劳验算时截面受拉区第*i*层纵向钢筋的应力幅，按式(4.7.5-2)计算；

$\Delta\sigma_p^f$ ——疲劳验算时截面受拉区最外层纵向预应力筋的应力幅，按式(4.7.8-3)计算；

f_c^f 、 f_{t0}^f ——分别为活性粉末混凝土轴心抗压、轴心抗拉初裂疲劳强度设计值，按本规程第 3.9.1 条确定；

Δf_y^f ——钢筋的疲劳应力幅限值，按《混凝土结构设计规范》GB50010 采用；

Δf_{py}^f ——预应力筋的疲劳应力幅限值，按《混凝土结构设计规范》GB50010 采用。

注：当纵向受拉钢筋为同一钢种时，可仅验算最外层钢筋的应力幅。

4.7.5 活性粉末混凝土受弯构件正截面的活性粉末混凝土压应力以及钢筋的应力幅应按下列公式计算：

1. 受拉区边缘纤维的活性粉末混凝土压应力

$$\sigma_{cc,max}^f = \frac{M_{max}^f x_0}{I_0^f} \quad (4.7.5-1)$$

2. 纵向受拉钢筋的应力幅

$$\Delta\sigma_{si}^f = \sigma_{si,\max}^f - \sigma_{si,\min}^f \quad (4.7.5-2)$$

$$\sigma_{si,\min}^f = \alpha_E^f \frac{M_{\min}^f (h_{0i} - x_0)}{I_0^f} \quad (4.7.5-3)$$

$$\sigma_{si,\max}^f = \alpha_E^f \frac{M_{\max}^f (h_{0i} - x_0)}{I_0^f} \quad (4.7.5-4)$$

式中： $M_{\max}^f$ 、 $M_{\min}^f$ ——疲劳验算同一截面上在相应荷载组合下产生的最大、最小弯矩值；

$\sigma_{si,\min}^f$ 、 $\sigma_{si,\max}^f$ ——由弯矩 $M_{\min}^f$ 、 $M_{\max}^f$ 引起相应截面受拉区第 i 层纵向钢筋的应力；

α_E^f ——钢筋的弹性模量与活性粉末混凝土疲劳变形模量的比值；

I_0^f ——疲劳验算时相应于弯矩 $M_{\max}^f$ 与 $M_{\min}^f$ 为相同方向时的换算截面惯性矩；

x_0 ——疲劳验算时相应于弯矩 $M_{\max}^f$ 与 $M_{\min}^f$ 为相同方向时的换算截面受压区高度；

h_{0i} ——相应于弯矩 $M_{\max}^f$ 与 $M_{\min}^f$ 为相同方向时的截面受压区边缘至受拉区第 i 层纵向钢筋截面重心的距离。

当弯矩 $M_{\min}^f$ 与弯矩 $M_{\max}^f$ 的方向相反时，式(4.7.5-3)中 h_{0i} 、 x_0 和 I_0^f 应以截面相反位置的 h_{0i}' 、 x_0' 和 $I_0^{f'}$ 代替。

4.7.6 活性粉末混凝土受弯构件疲劳验算时，换算截面的受压区高度 x_0 、 x_0' 和惯性矩 I_0^f 、 $I_0^{f'}$ 应按下列公式计算：

1. 矩形及翼缘位于受拉区的 T 形截面

$$\frac{bx_0^2}{2} + \alpha_E^f A_s'(x_0 - a_s') - \alpha_E^f A_s(h_0 - x_0) = 0 \quad (4.7.6-1)$$

$$I_0^f = \frac{bx_0^3}{3} + \alpha_E^f A_s' (x_0 - a_s')^2 + \alpha_E^f A_s (h_0 - x_0)^2 \quad (4.7.6-2)$$

2. I 形及翼缘位于受压区的 T 形截面

1) 当 x_0 大于 h_f' 时

$$\frac{b_f' x_0^2}{2} - \frac{(b_f' - b)(x_0 - h_f')^2}{2} + \alpha_E^f A_s' (x_0 - a_s') - \alpha_E^f A_s (h_0 - x_0) = 0 \quad (4.7.6-3)$$

$$I_0^f = \frac{b_f' x_0^3}{3} - \frac{(b_f' - b)(x_0 - h_f')^3}{2} + \alpha_E^f A_s' (x_0 - a_s')^2 + \alpha_E^f A_s (h_0 - x_0)^2 \quad (4.7.6-4)$$

2) 当 x_0 不大于 h_f' 时, 按宽度为 b_f' 的矩形截面计算。

3. x_0' 、 I_0^f 的计算, 仍可采用上述 x_0 、 I_0^f 的相应公式; 当弯矩 $M_{\min}^f$ 与 $M_{\max}^f$ 的方向相反时, 与 x_0' 、 x_0 相应的受压区位置分别在该截面的下侧和上侧; 当弯矩 $M_{\min}^f$ 与 $M_{\max}^f$ 的方向相同时, 可取 $x_0 = x_0'$ 、 $I_0^f = I_0^f$ 。

注:

1. 当纵向受拉钢筋沿截面高度分成多层布置时, 式(4.7.6-1)、式(4.7.6-3)中

$\alpha_E^f A_s (h_0 - x_0)$ 项可用 $\alpha_E^f \sum_{i=1}^n A_{si} (h_{0i} - x_0)$ 代替, 式(4.7.6-2)、式(4.7.6-4)中

$\alpha_E^f A_s (h_0 - x_0)^2$ 项可用 $\alpha_E^f \sum_{i=1}^n A_{si} (h_{0i} - x_0)^2$ 代替, 此处, n 为纵向受拉钢筋的总层数,

A_{si} 为第 i 层全部纵向钢筋的截面面积;

2. 纵向受压钢筋的应力符合 $\alpha_E^f \sigma_c^f \leq f_y'$ 的条件; 当 $\alpha_E^f \sigma_c^f > f_y'$ 时, 本条各公式中 $\alpha_E^f A_s'$ 应以 $f_y' A_s' / \sigma_c^f$ 替代, 此处, f_y' 为纵向钢筋的抗压强度设计值, σ_c^f 为纵向受压钢筋合力作用点出的活性粉末混凝土应力。

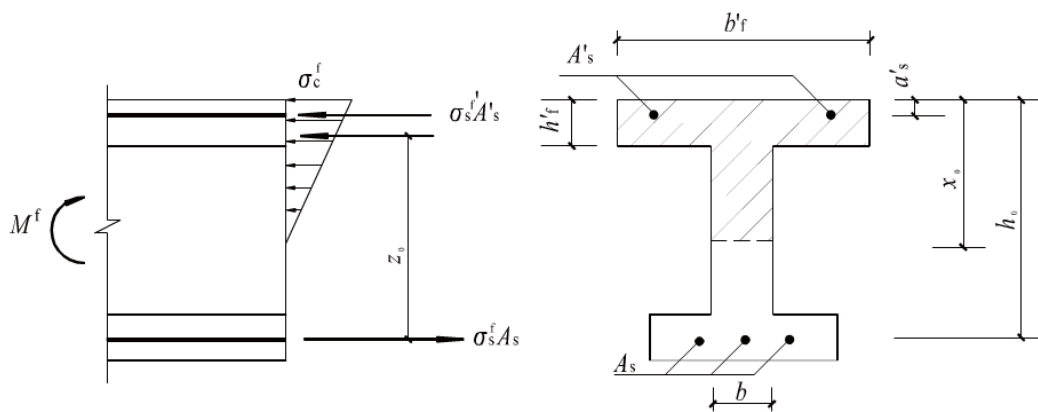


图 4.7.6 活性粉末混凝土受弯构件正截面疲劳应力计算

4.7.7 预应力活性粉末混凝土受弯构件疲劳验算时，应计算下列部位的应力、应力幅：

1. 正截面受拉区和受压边缘纤维的活性粉末混凝土应力及受拉区纵向预应力筋、普通钢筋的应力幅；
2. 截面重心及截面宽度剧烈改变处活性粉末混凝土的主拉应力。

注：1.受压区纵向钢筋可不进行疲劳验算；

2.一级裂缝控制等级的预应力活性粉末混凝土构件的钢筋可不进行疲劳验算。

4.7.8 要求不出现裂缝的预应力活性粉末混凝土受弯构件，其正截面活性粉末混凝土、纵向预应力筋和普通钢筋的最小、最大应力和应力幅应按下列公式计算：

1. 受拉区或受压区边缘纤维的活性粉末混凝土应力

$$\sigma_{c,\min}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\max}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_0 \quad (4.7.8-1)$$

$$\sigma_{c,\max}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\min}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_0 \quad (4.7.8-2)$$

2. 受拉区纵向预应力筋的应力及应力幅

$$\Delta\sigma_p^f = \sigma_{p,\max}^f - \sigma_{p,\min}^f \quad (4.7.8-3)$$

$$\sigma_{p,\min}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{pe} \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0p} \quad (4.7.8-4)$$

$$\sigma_{p,\max}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{pe} \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0p} \quad (4.7.8-5)$$

3. 受拉区纵向普通钢筋的应力及应力幅

$$\Delta\sigma_s^f = \sigma_{s,\max}^f - \sigma_{s,\min}^f \quad (4.7.8-6)$$

$$\sigma_{s,\min}^f = \sigma_{so} + \alpha_E \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0s} \quad (4.7.8-7)$$

$$\sigma_{s,\max}^f = \sigma_{so} + \alpha_E \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0s} \quad (4.7.8-8)$$

式中：

$\sigma_{c,\min}^f$ 、 $\sigma_{c,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区或受压区边缘纤维活性粉末混凝土的最小、最大应力，最小、最大应力以其绝对值进行判断；

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后，由预应力在受拉区或受压区边缘纤维处产生的活性粉末混凝土法向应力；

$M_{\max}^f$ 、 $M_{\min}^f$ ——疲劳验算时同一截面上在相应荷载组合下产生的最大、最小弯矩值；

α_{pE} ——预应力钢筋弹性模量与活性粉末混凝土弹性模量的比值；

I_0 ——换算截面的惯性矩；

y_0 ——受拉区边缘或受压区边缘至换算截面重心的距离；

$\sigma_{p,\min}^f$ 、 $\sigma_{p,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层预应力筋的最小、最大应力；

σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后受拉区最外层预应力筋的有效预应力；

y_{0s} 、 y_{0p} ——受拉区最外层普通钢筋、预应力钢筋截面重心至换算截面重心的距离；

$\sigma_{s,\min}^f$ 、 $\sigma_{s,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层普通钢筋的最小、最大应力；

$\Delta\sigma_s^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层普通钢筋的应力幅；

σ_{so} ——消压弯矩 M_{po} 作用下受拉区最外层普通钢筋中产生的应力；

此处， M_{po} 为受拉区最外层普通钢筋重心处的混凝土法向预加应力等于零时的相应弯矩值。

注：公式(4.7.8-1)、公式(4.7.8-2)中的 σ_{pc} 、 $\frac{M_{\min}^f}{I_0} y_0$ 、 $\frac{M_{\max}^f}{I_0} y_0$ ，当为拉应力时为正值代

入；当为压应力时以负值代入；公式(4.7.8-7)、公式(4.7.8-8)中的 σ_{s0} 以负值代入。

4.7.9 预应力活性粉末混凝土受弯构件斜截面混凝土的主拉应力应符合下列规定：

$$\sigma_{tp}^f \leq f_{t0}^f \quad (4.7.9)$$

式中： σ_{tp}^f ——预应力活性粉末混凝土受弯构件斜截面疲劳验算纤维处的活性粉末混凝土主拉应力；对于动力荷载，应计入动力系数。

4.8 预制构件结合部承载力计算

4.8.1 预制构件结合面应采取有效的连接措施，使装配后构件及整体结构的刚度、承载能力及耐久性类同于现浇构件及结构。

4.8.2 采用预应力体系进行节段预制拼装构件的正截面抗弯和斜截面抗剪承载力计算按本规程相应计算公式并考虑承载力折减系数，折减系数见表 4.8.2。受弯构件正截面抗弯承载力计算，不计普通钢筋的作用。

图 4.8.2 承载力折减系数

类型	折减系数	
	有粘结预应力体系	无粘结预应力体系
抗弯承载力折减系数	A 类接缝 0.95	A 类接缝 0.90 B 类接缝 0.85
抗剪承载力折减系数	A 类接缝 0.85	A 类接缝 0.85 B 类接缝 0.65

注：1、A 类接缝为预制节段间的湿接缝或环氧树脂接缝；

2、B 类接缝为预制节段间的干接缝。

4.8.3 当预制拼装构件结合面的抗剪传力机构采用钢筋销栓抗剪时，其结合面的剪切摩擦抗剪强度设计值按下列公式计算：

$$\tau_R = 0.9\mu p_s f_y \leq 0.3f_c \quad \text{错误!未找到引用源。} \quad (4.8.3)$$

式中： μ ——摩擦系数。接合面表面不处理时取 0.6，表面凸凹不小于 6mm 时取 1.0，现浇混凝土取 1.4；

p_s ——单位面积内横穿接合面的钢筋面积。当钢筋与接合面法向夹角为 θ 时，乘 $\cos \theta$ 折减；

f_y ——纵向受拉钢筋抗拉强度设计值。

f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值；

4.8.4 当预制拼装构件结合面的抗剪传力机构采用剪力键抗剪时，其接合部的抗剪承载能力取剪力键凸出部的承压承载能力设计值和剪力键剪切承载能力设计值二者较小者：

$$V_R = 0.75(\tau_k A_{K1} + \mu \sigma_{pe} A_{cw}) \leq 0.9\beta_c f_c (1 + \beta_n \lambda_f) A_{K2} \quad (4.8.4-1)$$

$$\tau_k = \sqrt{\left(f_t + \frac{\sigma_{pe}}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{pe}}{2}\right)^2} \quad (4.8.4-2)$$

式中： f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值；

f_t ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度设计值；

A_{K1} ——各剪力键根部的剪切面积之和；

A_{K2} ——各剪力键凸出部的承压面积之和；

A_{cw} ——剪切破坏面上接缝受压接触面的面积；

σ_{pe} ——接缝截面的平均永存预压应力；

μ ——光滑混凝土表面之间的摩擦系数，取 0.36；

β_c ——活性粉末混凝土的强度影响系数，可取 $\beta_c = 0.5$ 。

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径。

β_{fl} ——钢纤维对活性粉末混凝土构件的局部受压承载力影响系数，宜通过试验确定，无试验结果时可取 $\beta_{\text{fl}}=0.3$ 进行计算；

5 正常使用极限状态验算

5.1 裂缝控制验算

5.1.1 钢筋活性粉末混凝土和预应力活性粉末混凝土构件，应按下列规定进行受拉边缘应力或正截面抗裂验算：

一级裂缝控制等级构件，在荷载标准组合下，受拉边缘应力应符合下列规定：

$$\sigma_{st} - 0.85\sigma_{pc} \leq 0 \quad (5.1.1-1)$$

二级裂缝控制等级构件，在荷载标准组合下，受拉边缘应力应符合下列规定：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0.7f_{tk} \quad (5.1.1-2)$$

三级裂缝控制等级构件，钢筋活性粉末混凝土构件的最大裂缝宽度可按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的效应计算，预应力活性粉末混凝土构件的最大裂缝宽度可按荷载标准组合并考虑长期作用影响的效应计算，且裂缝宽度应满足式（5.1-3）的要求。

$$w_{\max} \leq w_{\lim} \quad (5.1.1-3)$$

式中：

$\sigma_{ck}(\sigma_{st})$ ——荷载标准组合（短期效应组合）下抗裂验算边缘的混凝土法向应力；

σ_{pc} ——扣除预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值；

$w_{\max}$ ——按荷载标准组合（短期效应组合）并考虑长期影响的最大裂缝宽度计算值；

$w_{\lim}$ ——最大裂缝宽度限值；

5.1.2 活性粉末混凝土构件的最大裂缝宽度不宜超过表 5.1.2 的限值。

表 5.1.2 活性粉末混凝土构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值(mm)

环境类别	环境等级	最大裂缝宽度限值 (mm)	
		钢筋混凝土构件	B 类预应力构件
碳化环境	I-A	0.30 (0.40)	0.20
	I-B	0.20 (0.30)	0.15(0.2)
	I-C	0.20	0.10
冻融破坏环境	II-C	0.20	0.10
	II-D	0.15	—
	II-E	0.15	—
海洋氯化物环境	III-C	0.20	0.10
	III-D	0.20	—
	III-E	0.15	—
	III-F	0.15	—
除冰盐等其它氯化物环境	IV-C	0.20	0.10
	IV-D	0.20	—
	IV-E	0.15	—
盐结晶环境	V-E	0.15	—
	V-F	0.15	—
化学腐蚀环境	VI-C	0.20	0.10
	VI-D	0.15	—
	VI-E	0.15	—

注 当有可靠依据并经专门论证，裂缝宽度限值可适当放宽并取表中括号内数值。

5.1.3 按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响的活性粉末混凝土构件最大裂缝宽度可按下列公式计算：

$$w_{f \max} = w_{\max} (1 - \beta_w \lambda_f) \quad (5.1.3)$$

式中：

$w_{\max}$ ——不考虑钢纤维影响的普通钢筋混凝土受弯构件的最大裂缝宽度 (mm)，可按《混凝土结构设计规范》GB50010 的相应公式进行计算或依据结构所属工程类别分别按相应的规范公式进行计算；

β_w ——钢纤维影响系数，宜通过试验确定，当无试验数据时取

$$\beta_{cw} = 0.4;$$

λ_f ——钢纤维含量特征值， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ ，其中 ρ_f 为钢纤维体积率， l_f 为钢纤维长度， d_f 为钢纤维直径或等效直径。

5.2 受弯构件挠度验算

5.2.1 挠度控制限值

正常使用极限状态下，活性粉末混凝土构件的挠度可按结构力学方法进行计算。荷载组合中均应考虑荷载长期作用的影响，计算挠度限值如下：

1 梁式桥梁：在消除结构自重产生的长期挠度后两端支承受弯构件的最大挠度不宜超过计算跨径的 1/800；悬臂构件悬臂端的最大挠度不宜超过悬臂长度的 1/400。

2. 斜拉桥主梁在汽车荷载（不计冲击力）引起的最大竖向挠度值不应大于 L/500。

3 房屋结构：受弯构件的挠度计算值不应超过表 5.2.1 规定的挠度限制。

表 5.2.1 受弯构件的挠度限值

构件类型		挠度限值
吊车梁	手动吊车	$l_0 / 500$
	电动吊车	$l_0 / 600$
屋盖、楼盖 及楼梯构件	当 $l_0 < 7m$ 时	$l_0 / 200 (l_0 / 250)$
	当 $7m \leq l_0 \leq 9m$ 时	$l_0 / 250 (l_0 / 300)$
	当 $l_0 > 9m$ 时	$l_0 / 300 (l_0 / 400)$

注:表中括号内数值适用于使用上对挠度有较高要求的构件

4 当有可靠依据时，以上挠度限值可适当放宽。

5.2.2 活性粉末混凝土受弯构件的挠度可按结构力学方法计算，且不应超过本规程 5.2.1 条规定的挠度限值。

在等截面构件中，可假定各同号弯矩区段内的刚度相等，并取用该区段内最大弯矩截面的刚度。当计算跨度内的支座截面刚度不大于跨中截面刚度的 2 倍或不小于跨中截面刚度的 1/2 时，该跨仍可按等刚度构件计算，其构件截面刚度可取跨中最大弯矩截面的刚度。

5.2.3 受弯构件截面的刚度确定

(1) 活性粉末混凝土构件开裂前的弹性工作阶段，其截面的短期抗弯刚度 B_{fs} 按式 (5.2.3-1) 确定。

$$B_{fs} = 0.9E_c I_0 \quad (5.2.3-1)$$

式中：

E_c ——活性粉末混凝土的弹性模量，按本规程 3.4 条确定；

I_0 ——换算截面惯性矩。

(2) 使用阶段受拉区出现裂缝的活性粉末混凝土受弯构件截面短期刚度应按式 (5.2.3-2) 计算。

$$B_{fs} = B_s (1 + \beta_B \lambda_f) \quad (5.2.3-2)$$

式中：

B_s ——不考虑钢纤维影响的普通钢筋混凝土受弯构件截面的短期刚度，可按

《混凝土结构设计规范》GB50010 相应公式进行计算或依据结构所属工程类别分别按相应的规范公式进行计算；

β_B ——构件截面短期抗弯刚度的钢纤维影响系数，可取 $\beta_B = 0.2$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ ； ρ_f 、 l_f 、 d_f 分别为钢纤维的体积率、长度和直径。

(3) 活性粉末混凝土受弯构件截面的长期刚度 B_{fl} 可按式 (5.2.3-3) 计算。

$$B_{\text{fl}} = \frac{M_k}{M_q(\theta-1) + M_k} B_{\text{fs}} \quad (5.2.3-3)$$

式中：

B_{fs}—活性粉末混凝土受弯构件截面的短期刚度，按式（5.2.3-2）计算；

M_k—按荷载标准组合计算的弯矩值，取计算区段内的最大弯矩值；

M_q—按荷载准永久组合计算的弯矩值，取计算区段内的最大弯矩值；

θ—考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数，对于采用常温保湿养护和湿热养护的受弯构件，**θ**可分别取 1.6 和 1.2。

6 构造要求

6.1 最小保护层厚度

构件中普通钢筋及预应力筋的活性粉末混凝土最小保护层厚度应同时满足以下要求：

1. 不小于纵向受力钢筋公称直径的 1/2；
2. 最外层钢筋的保护层厚度不应小于表 6.1-1 中的数值。

表 6.1-1 活性粉末混凝土保护层的最小厚度 c(mm)

环境类别	板、墙、壳	梁、柱、杆
I	10	15
II	15	20
III	20	25
IV	25	30

注：1. 表中数据为设计使用年限为 50 年的活性粉末混凝土结构，对于设计使用年限为 100 的活性粉末混凝土结构，最外层钢筋的保护层厚度不应小于表 6.1-1 中数值的 1.4 倍。

2. I、II 类环境下，活性粉末混凝土预制构件的保护层厚度最小值可取为 10mm。

6.2 钢筋选用及净距

6.2.1 梁、板纵向钢筋选用及净距

梁、板内的纵向受力钢筋应优先采用 HRB400 和 HRB500 级钢筋，梁、板内纵向钢筋的最小净距应满足下列要求。

1. 纵向钢筋的净距不应小于纵向受力钢筋的直径，且不应小于钢纤维长度及不小于 20mm；
2. 受拉区钢筋按两根至三根成束布置时，钢筋的净距不得小于钢筋直径，且不应小于钢纤维长度及不小于 25mm。
3. 当钢筋（包括成束钢筋）层数等于或多于三层时，其净距横向不得小于 1.5 倍钢筋直径并不得小于 35mm，竖向仍不得小于钢筋直径并不得小于 20mm。
4. 其它构造要求可参照《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的规定。

6.2.2 梁中的箍筋应符合下列规定：

1 对于按本规程条文 4.2.4 计算不需要配置箍筋的梁，当截面高度大于 300mm 时，应沿梁长全长设置构造箍筋；当截面高度在 150mm~300mm 之间时，可仅在构件端 $l_0/4$ 范围内设置构造箍筋，这里 l_0 为梁的跨度。但当构件中部 $l_0/2$ 范围内有集中荷载时，则应沿梁全长设置箍筋，当截面高度小于 150mm 时，可不设置箍筋。

2 截面高度大于 800mm 的梁，箍筋直径不宜小于 8mm，截面高度不大于 800mm 的梁，不宜小于 6mm，梁内配有纵向受压钢筋时，箍筋直径尚不应小于受压钢筋最大直径 d 的 $1/4$ ， d 为纵向受压钢筋的最大直径。

3 箍筋间距不应大于梁高的 $1/2$ 且不大于 400mm；当所箍钢筋为按受力需要的纵向受压钢筋时，箍筋间距不应大于 400mm 且不大于 15 倍受压钢筋直径。

4 梁内箍筋的其它构造要求可依据构件所处结构类别参照相应的设计规范或规程取值。

6.2.3 柱中纵向钢筋的配置应符合下列规定：

- 1 纵向受力钢筋直径不宜小于 12mm；全部纵向钢筋的配筋率不宜大于 5%；
- 2 柱中纵向钢筋的净间距不应小于 50mm，且不宜大于 300mm；
- 3 偏心受压柱的截面高度不小于 600mm 时，在柱的侧面上应设置直径不小于 10mm 的纵向构造钢筋，并相应设置复合箍筋或拉筋；
- 4 配有螺旋式或焊接环式间接钢筋的轴心受压构件纵向受力钢筋截面面积不应小于箍筋圈内核心截面面积的 0.5%，核心截面面积不应小于构件整个截面面

积的 2/3。

5 在偏心受压柱中，垂直于弯矩作用平面侧面上的纵向受力钢筋以及轴心受压柱中各边的纵向受力钢筋，其中距不宜大于 300mm。

注：水平浇筑的预制柱，纵向钢筋的最小净间距可按本规范第 6.2.1 条关于梁的有关规定取用。

6.2.4 柱中箍筋应符合下列规定：

- 1 箍筋直径不应小于 $d/4$ ，且不应小于 6mm， d 为纵向钢筋的最大直径；
- 2 箍筋间距不应大于 400mm 及构件截面的短边尺寸，且不大于 $15d$ ， d 为纵向钢筋的最小直径；
- 3 柱及其他受压构件中的周边箍筋应做成封闭式；对圆柱中的箍筋，搭接长度不应小于《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的有关规定，且末端应做成 135° 弯钩，弯钩末端平直段长度不应小于 $5d$ ， d 为箍筋直径；
- 4 当柱截面短边尺寸大于 400mm 且各边纵向钢筋多于 3 根时，或当柱截面尺寸不大于 400mm 但各边纵向钢筋多于 4 根时，应设置复合箍筋；
- 5 柱中全部纵向受力钢筋的配筋率大于 3% 时，箍筋直径不应小于 8mm，间距不应大于 $10d$ ，且不应大于 200mm。末端应做成 135° 弯钩，弯钩末端平直段长度不应小于 $10d$ ， d 为纵向钢筋的最小直径；
- 6 在配有螺旋式或焊接环式箍筋的柱中，如在正截面受压承载力计算中考虑间接钢筋的作用时，箍筋间距不应大于 80mm 及 $d_{cor}/5$ ，且不宜小于 40mm， d_{cor} 为按箍筋内表面确定的核心截面直径。

6.3 最小配筋率

6.3.1 纵向受力钢筋最小配筋率

活性粉末混凝土结构纵向受力钢筋的配筋百分率 ρ_{min} 不应小于表 6.3.1 规定的数值。

表 6.3.1 纵向受力钢筋的最小配筋百分率 ρ_{min} (%)

受力类型			最小配筋百分率
受压构件	全部纵向钢筋	强度等级 400MPa	0.50

	强度等级 500MPa	0.55
	一侧纵向钢筋	0.20
受弯构件、偏心受拉、轴心受拉构件一侧的受拉钢筋		0.20 和 $45 f_t/f_y$ 中的较大值

6.3.2 最小配箍率

活性粉末混凝土受弯构件内抗剪箍筋的配箍率 $\rho_{sv\min}$ 不应小于 $\frac{0.4f_{t0}}{f_{yv}}(1-1.5\beta_v\lambda_f)$ 及 0.12% 的较大值。

其中： f_{t0} 为活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值； f_{yv} 为箍筋的抗拉强度设计值； β_v 为钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数，可取 $\beta_v=0.6$ ； λ_f 为钢纤维含量特征参数， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ ， ρ_f 为钢纤维的体积掺量百分率， l_f 为钢纤维的等效长度， d_f 为钢纤维的等效直径。

6.4 钢筋的锚固

活性粉末混凝土中纵向受拉钢筋的基本锚固长度按式（6.4-1）或（6.4-2）确定。

$$\text{普通钢筋：} \quad l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (6.4-1)$$

$$\text{预应力筋：} \quad l_{ab} = \alpha \frac{f_{py}}{f_t} d \quad (6.4-2)$$

式中： l_{ab} —纵向受拉钢筋的基本锚固长度；

f_y 、 f_{py} —纵向受力普通钢筋、预应力筋的抗拉强度设计值；

f_t —活性粉末混凝土的抗拉强度设计值；

d —锚固钢筋的直径；

α —锚固钢筋的外形系数，按表 6.4.1 取值。

表 6.4.1 锚固钢筋的外形系数 α

钢筋类型	光圆钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢筋	三股钢绞线	七股钢绞线
α	0.16	0.14	0.13	0.16	0.17

6.5 钢筋的接头

6.5.1 钢筋接头优先采用焊接接头和钢筋机械连接接头，当施工或构造有困难时，也可采用绑扎接头。钢筋接头宜设在受力较小区段，并宜错开布置。绑扎接头的钢筋直径一般不宜大于 28mm，但轴心受压和偏心受压构件中的受压钢筋，可不大于 32mm。

6.5.2 受拉钢筋绑扎接头的搭接长度 l_s 为 $\zeta_l \zeta_a l_{ab}$ ；受压钢筋绑扎接头的搭接长度 l_s 为 $0.7 \zeta_l \zeta_a l_{ab}$ 。

ζ_l 取值按表 6.5.2 取用。

表 6.5.2 纵向受拉钢筋搭接长度修正系数

纵向搭接钢筋接头面积百分率（%）	≤ 25	50	100
ζ_l	1.2	1.4	1.6

ζ_a 取值为：

- 1 当带肋钢筋的直径大于 25mm 时取应 1.10；
- 2 环氧树脂涂层带肋钢筋取 1.25；
- 3 施工过程中易受扰动的钢筋取 1.10；

6.5.3 在任一绑扎接头中心至搭接长度 l_s 的 1.3 倍长度区段 l 内，同一根钢筋不得有两个接头；在该区段内有绑扎接头的受力钢筋截面面积占受力钢筋总截面面积的百分数，受拉区不宜超过 25%，受压区不宜超过 50%。当绑扎接头的受力钢筋截面面积占受力钢筋总截面面积超过上述规定时，搭接长度 l_s 应乘以下列系数：当受拉钢筋绑扎接头截面面积大于 25%，但不大于 50%时，乘以 1.4，当大于 50%时，乘以 1.6；当受压钢筋绑扎接头截面面积大于 50%时，乘以 1.4。

绑扎接头部分钢筋的横向净距不应小于钢筋直径且不应小于 25mm, 同时非接头部分钢筋净距仍应符合本规范第 6.2 条规定。

束筋的搭接接头应先由单根钢筋错开搭接, 接头中距为 1.3 倍的单根钢筋搭接长度; 再用一根其长度为 $1.3(n+1)l_s$ 的通长钢筋进行搭接绑扎, 其中 n 为组成束筋的单根钢筋根数, l_s 为单根钢筋搭接长度。

6.6 结构构件的基本规定

6.6.1 在满足最小保护层厚度、钢筋布置要求的条件下, 配筋活性粉末混凝土板应满足结构承载能力、刚度及局部稳定等要求且板的最小板厚不应小于 50mm。

6.6.2 活性粉末混凝土桥梁的 T 梁、I 形梁或箱梁的腹板宽度不应小于 100mm; 其上下承托之间的腹板高度, 当腹板内设有竖向预应力筋时, 不应大于腹板宽度的 20 倍, 当腹板内不设竖向预应力筋时, 不应大于腹板宽度的 15 倍。当腹板宽度有变化时, 其过渡段长度不宜小于 12 倍腹板宽度差。当 T 梁、I 形梁或箱梁承受扭矩时, 其腹板平均宽度应满足构件的抗扭承载力。

6.7 预制构件的结合面

6.7.1 预制构件的连接宜设置在结构受力较小处并便于施工; 结构构件之间的连接构造应满足结构传递内力的要求;

6.7.2 采用预制块件拼装的预应力活性粉末混凝土结构, 预制块件端部应配置直径不小于 10mm 的钢筋网, 接缝间应采用环氧树脂粘结或用活性粉末混凝土填充。环氧树脂接缝, 块件端头应密贴平整, 涂层厚度均匀, 接缝应进行挤压。活性粉末混凝土接缝的缝宽不应小于 60mm, 混凝土强度等级不应低于预制块件混凝土强度等级。预制块件拼装结构不应作部分预应力混凝土设计。

7 抗震设计及构造

7.1 一般规定

7.1.1 抗震设防的活性粉末混凝土结构，除应符合本规程第 1 章～第 6 章的要求外，尚应按照工程类别分别依据《建筑抗震设计规范》GB 50011、《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01 及《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 规定的抗震设计原则，按本章的规定进行结构构件的抗震设计。

7.1.2 本章只对活性粉末混凝土结构抗震设计中不同于普通混凝土结构设计的专门要求做出规定，未明确规定的，可依据结构所属工程类别分别符合相应的国家和行业现行规范及规程要求。

7.2 建筑结构的抗震设计

7.2.1 考虑地震组合的矩形、T 形和 I 形截面活性粉末混凝土框架梁，其受剪截面应符合下列条件：

$$V_b \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[0.10 f_c (1 + 0.15 \lambda_f) b h_0 \right] \quad (7.2.1)$$

式中， γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，按《混凝土结构设计规范》GB50010 有关规定取值；其它符号的意义与式（4.2.1）相同。

7.2.2 考虑地震组合的矩形、T 形和 I 形截面的活性粉末混凝土框架梁，其斜截面受剪承载力应符合下列规定：

$$V_b \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[0.6 \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \right] \quad (7.2.2)$$

式中：

γ_{RE} ——承载能力抗震调整系数；其它符号的意义与式（4.2.2-2）

相同。

7.2.3 活性粉末混凝土框架梁截面尺寸除满足地震组合下承载能力要求外，尚应满足刚度与稳定性要求。

7.2.4 活性粉末混凝土框架梁纵向受拉钢筋的配筋率不应小于下表规定的数值。

表 7.2.4 框架梁纵向受拉钢筋的最小配筋百分率（%）

抗震等级	梁中位置	
	支座	跨中
一级	0.40 和 $80 f_{t0} / f_y$ 中的较大值	0.30 和 $65 f_{t0} / f_y$ 中的较大值
二级	0.30 和 $80 f_{t0} / f_y$ 中的较大值	0.25 和 $55 f_{t0} / f_y$ 中的较大值
三、四级	0.25 和 $80 f_{t0} / f_y$ 中的较大值	0.20 和 $45 f_{t0} / f_y$ 中的较大值

7.2.5 梁端设置的第一个箍筋距框架节点边缘不应大于 50mm。非加密区的箍筋间距不宜大于加密区箍筋间距的 2 倍。

沿梁全长箍筋的面积配筋率 ρ_{sv} 应符合下列规定：

一级抗震等级

$$\rho_{sv} \geq 0.30 \frac{f_{t0}}{f_{yv}} \quad (7.2.5-1)$$

二级抗震等级

$$\rho_{sv} \geq 0.28 \frac{f_{t0}}{f_{yv}} \quad (7.2.5-2)$$

三、四级抗震等级

$$\rho_{sv} \geq 0.26 \frac{f_{t0}}{f_{yv}} \quad (7.2.5-3)$$

7.2.6 考虑地震组合的矩形截面活性粉末混凝土框架柱和框支柱，其受剪截面应符合下列条件：

$$V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[0.10 f_c (1 + 0.15 \lambda_f) b h_0 \right] \quad (7.2.6)$$

7.2.7 考虑地震组合的矩形截面活性粉末混凝土框架柱和框支柱，其斜截面受剪承载力应符合下列规定：

$$V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[\frac{0.90}{1 + \lambda} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.056 N \right] \quad (7.2.7)$$

式中： λ —— 框架柱、框支柱的计算剪跨比；当 λ 小于 1.0 时，取 1.0；当 λ 大于 3.0 时，取 3.0；

N —— 考虑地震组合的框架柱、框支柱轴向压力设计值，当 N 大于 $0.3 f_c A$ 时，取 $0.3 f_c A$ 。

7.2.8 考虑地震组合的矩形截面活性粉末混凝土框架柱和框支柱，当出现拉力时，其斜截面抗震受剪承载力应符合下列规定：

$$V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[\frac{0.90}{1 + \lambda} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 - 0.2 N \right] \quad (7.2.8)$$

式中： N —— 考虑地震组合的框架柱轴向拉力设计值。

当式 (7.2.8) 右边括号内的计算值小于 $f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 时，取等于 $f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ ，且 $f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 值不应小于 $0.36 f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0$ 。

7.2.9 活性粉末混凝土框架柱和框支柱中全部纵向受力钢筋的配筋百分率不应小于表 7.2.9 规定的数值，同时，每一侧的配筋百分率不应小于 0.2；对 IV 类场地上较高的高层建筑，最小配筋百分率应增加 0.1。

表 7.2.9 柱全部纵向钢筋最小配筋百分率 (%)

柱类型	抗震等级			
	一级	二级	三级	四级

中柱、边柱	1.0 (1.1)	0.8 (0.9)	0.7 (0.8)	0.6 (0.7)
角柱、框架柱	1.2	1.0	0.9	0.8

注：表中括号内数值用于框架结构的柱。

7.2.10 一、二、三、四级抗震等级的各类结构的框架柱、框支柱，其轴压比不宜大于表7.2.10规定的限值。对IV类场地上较高的高层建筑，柱轴压比限值应适当减小。

表 7.2.10 柱轴压比限值

结构体系	抗震等级			
	一级	二级	三级	四级
框架结构	0.55	0.65	0.75	0.80
框架-剪力墙、筒体结构	0.65	0.75	0.80	0.85
部分框支剪力墙结构	0.60	0.70	——	

注：1 轴压比指柱地震作用组合的轴向压力设计值与柱的全截面面积和混凝土轴心抗压强度设计值乘积之比值：

2 表内限值适用于剪跨比大于2的柱；剪跨比不大于2的柱轴压比限值应降低0.05；剪跨比小于1.5的柱，轴压比限值应专门研究并采取特殊构造措施；

3 沿柱全高采用井字复合箍，且箍筋间距不大于100mm、肢距不大于200mm、直径不小于12mm，或沿柱全高采用复合螺旋箍，且螺距不大于100mm、肢距不大于200mm、直径不小于12mm，或沿柱全高采用连续复合矩形螺旋箍，且螺旋净距不大于80mm、肢距不大于200mm、直径不小于10mm时，轴压比限值均可按表中数值增加0.10；

4 当柱截面中部设置由附加纵向钢筋形成的芯柱，且附加纵向钢筋的总截面面积不少于柱截面面积的0.8%时，轴压比限值可按表中数值增加0.05；此项措施与注3的措施同时采用时，轴压比限值可按表中数值增加0.15，但箍筋的配箍特征值仍应按轴压比增加0.10的要求确定；

5 调整后的柱轴压比限值不应大于1.05。

7.2.11 活性粉末混凝土框架梁柱节点核心区的受剪水平截面应符合下列条件：

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} [0.15\eta_j f_c (1 + 0.15\lambda_f) b_j h_j] \quad (7.2.11)$$

式中： h_j ——框架节点核心区的截面高度，可取验算方向的柱截面高度 h_c ；

b_j ——框架节点核心区的截面有效验算宽度，当 b_b 不小于 $b_c/2$ 时，可取 b_c ；当 b_b 小于 $b_c/2$ 时，可取 $(b_b + 0.5h_c)$ 和 b_c 中的较小值；当梁与柱的中线不重合且偏心距 e_0 均不大于 $b_c/4$ 时，可取 $(b_b + 0.5h_c)$ 、 $(0.5b_b + 0.5b_c + 0.25h_c - e_0)$ 和 b_c 三者中的最小值。此处， b_b 为验算方向梁截面宽度， b_c 为该侧柱截面宽度；

η_j ——正交梁对节点的约束影响系数：当楼板为现浇、梁柱中线重合、四侧各梁截面宽度不小于该侧柱截面宽度 $1/2$ ，且正交方向梁高度不小于较高框架梁高度的 $3/4$ 时，可取 η_j 为 1.50 ，但对 9 度设防烈度宜取 η_j 为 1.25 ；当不满足上述条件时，应取 η_j 为 1.00 。

7.2.12 活性粉末混凝土框架梁柱节点的抗震受剪承载力应符合下列规定：

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[1.1\eta_j f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b_j h_j + 0.05\eta_j N \frac{b_j}{b_c} + f_{yv} A_{svj} \frac{h_{b0} - a'_s}{s} \right] \quad (7.2.12)$$

式中： N ——对应于考虑地震组合剪力设计值的节点上柱底部的轴向力设计值；当 N 为压力时，取轴向压力设计值的较小值，且当 N 大于 $0.5f_c b_c h_c$ 时，取 $0.5f_c b_c h_c$ ；当 N 为拉力时，取为 0 ；

A_{svj} ——核心区有效验算宽度范围内同一截面验算方向箍筋各肢的全部截面面积；

h_{b0} ——框架梁截面有效高度，节点两侧梁截面高度不等时取平均值。

7.2.13 圆柱框架的梁柱节点，当梁中线与柱中线重合时，其受剪水平截面应符合下列条件：

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[0.15\eta_j f_c (1 + 0.15\lambda_f) A_j \right] \quad (7.2.13)$$

式中： A_j ——节点核心区有效截面面积：当梁宽 $b_b \geq 0.5D$ 时，取 $A_j = 0.8D^2$ ；当 $0.4D \leq b_b < 0.5D$ 时，取 $A_j = 0.8D(b_b + 0.5D)$ ；

D ——圆柱截面直径；

b_b ——梁的截面宽度；

η_j ——正交梁对节点的约束影响系数，按本规程第 7.2.11 条取用。

7.2.14 圆柱框架的梁柱节点，当梁中线与柱中线重合时，其抗震受剪承载力应符合下列规定：

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[1.5\eta_j f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) A_j + 0.05\eta_j \frac{A}{D^2} + 1.57 f_{yv} A_{sh} \frac{h_{b0} - a'_s}{s} + f_{yv} A_{svj} \frac{h_{b0} - a'_s}{s} \right] \quad (7.2.14)$$

式中： h_{b0} ——梁截面有效高度；

A_{sh} ——单根圆形箍筋的截面面积；

A_{svj} ——同一截面验算方向的拉筋和非圆形箍筋各肢的全部截面面积。

7.3 桥梁结构的抗震设计

7.3.1 桥梁抗震设计基本要求，场地、地基与基础，地震作用，抗震分析方法，验算原则和内容以及构造措施应依据结构类型分别按《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01 及《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 确定。

7.3.2 设防烈度 7 度地区，墩柱潜在塑性铰区域内加密箍筋的配置应符合下列要求：

1 加密区的长度不应小于墩柱弯曲方向截面宽度的 1.0 倍或墩柱上弯矩超过最大弯矩 80% 的范围；当墩柱的高度与横截面高度之比小于 2.5 时，墩柱加密区的

长度应取全高。

2 加密箍筋的最大间距不应大于 10cm 或 $6d_s$ 或 $b/4$ ，其中 d_s 为纵向钢筋的直径， b 为墩柱弯曲方向的截面宽度。

3 箍筋的直径不应小于 10mm。

4 螺旋式箍筋的接头必须采用对接，矩形箍筋应有 135° 弯勾，并伸入核心混凝土之内 $6d_s$ 以上。

5 加密区箍筋肢距不宜大于 25cm。

6 加密区外箍筋量应逐渐减少。

7.3.3 防烈度 7 度地区，圆形、矩形墩柱潜在塑性铰区域内加密箍筋的最小体积含箍率 $\rho_{s,\min}$ 按以下各式计算。

圆形截面：

$$\rho_{s,\min} = \left[0.14\eta_k + 5.84(\eta_k - 1)(\rho_t - 0.01) + 0.028 \right] \frac{f_{ck}}{f_y} \geq 0.004 \quad (8.4.2.1-1)$$

矩形截面：

$$\rho_{s,\min} = \left[0.1\eta_k + 4.17(\eta_k - 1)(\rho_t - 0.01) + 0.02 \right] \frac{f_{ck}}{f_y} \geq 0.004 \quad (8.4.2.1-1)$$

式中： η_k ——轴压比，指结构的最不利组合轴线压力与柱的全截面面积和活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值乘积之比。

ρ_t ——纵向配筋率。

f_{ck} ——活性粉末混凝土抗压强度标准值。

f_s ——箍筋抗拉强度设计值。

7.3.4 墩柱潜在塑性铰区域以外箍筋的体积配箍率不应小于塑性铰区域加密箍筋体积配箍率的 50%。

7.3.5 墩柱的纵向钢筋宜对称配筋，纵向钢筋的面积不宜小于 $0.006A_b$ ，不应超过 $0.04 A_b$ ，其中 A_b 为墩柱截面面积。

7.3.6 墩柱的纵向钢筋之间的距离不应超过 20cm，至少每隔一根宜用箍筋或拉筋固定。

7.3.7 空心截面墩柱塑性铰区域内加密箍筋应配置内外两层环形箍筋，在内外两层环形箍筋之间应配置足够的拉筋，如图 7.3.7 所示。且加密箍筋的配置应满足本规程第 7.3.2 条、7.3.3 条和第 7.3.4 条的规定。

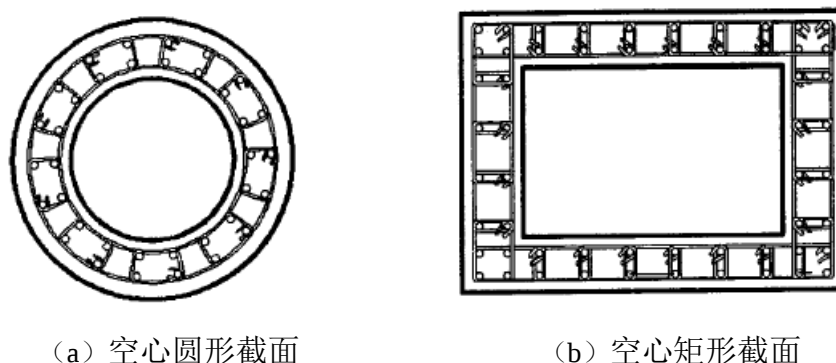


图 7.3.7 常用空心截面类型

7.3.8 墩柱的纵向钢筋应尽可能地伸至盖梁和承台的另一侧面，纵向钢筋的锚固和搭接长度应在本规程 6.3 节要求的基础上增加 $10d_s$ ， d_s 为纵向钢筋的直径，不应在塑性铰区域进行纵向钢筋的连接。

7.3.9 塑性铰加密区域配置的箍筋应延伸到盖梁和承台内，延伸到盖梁和承台的距离不应小于墩柱长边尺寸的 $1/2$ ，并不小于 0.5m。

8 施 工

8.1 一般规定

8.1.1 活性粉末混凝土的施工应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387、《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 等的有关规定，并应根据结构所属工程类别分别符合相应的现行规范及规程要求。

8.1.2 在施工之前，应制订活性粉末混凝土专项施工技术方案。

8.1.3 活性粉末混凝土可采用集中搅拌或现场搅拌方式生产。

8.1.4 活性粉末混凝土可在工厂将各种干燥的固体原料预拌为固态混合物，运输到施工现场或预拌混凝土生产场所，加水与液体组分拌制成拌合物。预拌与运输应保证混合物不离析。

8.1.5 活性粉末混凝土的搅拌、运输、浇筑及构件静停应在 10℃ 以上的环境中完成。

8.1.6 在活性粉末混凝土拌合物的运输及浇筑过程中，严禁往拌合物中加水。

8.2 配合比

8.2.1 一般规定

8.2.1.1 活性粉末混凝土配合比设计应考虑结构形式特点、施工工艺以及环境作用等因素。应根据混凝土工作性能、强度、耐久性以及其他必要性能要求计算初始配合比。设计配合比应经试配、调整，得出满足工作性要求的基准配合比，并经强度等技术指标复核后确定。

8.2.1.2 活性粉末混凝土配合比设计宜采用绝对体积法。

8.2.1.3 当需要改善活性粉末混凝土的密实度时，宜增加粉体材料用量；当需要改善拌合物的粘聚性和流动性时，宜调整减水剂的掺量。

8.2.2 配合比设计

8.2.2.1 活性粉末混凝土的配制强度按式（8.2.2）计算确定。

$$f_{\text{cu},0} \geq 1.1f_{\text{cu},k} \quad (8.2.2)$$

式中： $f_{\text{cu},0}$ ——活性粉末混凝土的配制强度，单位为 MPa；

$f_{\text{cu},k}$ ——设计要求的活性粉末混凝土的强度等级，单位为 MPa。

8.2.2.2 活性粉末混凝土的水胶比、胶凝材料用量和钢纤维掺量应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的要求。

8.2.2.3 硅灰用量不宜小于胶凝材料用量的 10%，水泥用量不宜小于胶凝材料用量的 50%。

8.2.2.4 骨料体积的计算应为混凝土总体积减去水、胶凝材料和钢纤维的体积，以及含气量得到。骨料的总用量应由骨料体积乘以骨料的密度得到。

8.2.2.5 骨料各个粒级的相对比例应遵循最密实堆积理论，并经过试配，确认拌合物的工作性满足要求后确定。必要时可掺加适量的石英粉，改善硬化混凝土的密实性。

8.2.2.6 活性粉末混凝土试配、配合比调整与确定应符合下列规定：

(1) 活性粉末混凝土试配时应采用工程实际使用的原材料，每盘混凝土的最小搅拌量不宜小于 15L；

(2) 试配时，首先应进行试拌，检查拌合物工作性。当试拌所得拌合物的工作性不能满足要求时，应在水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下，调整胶凝材料用量、外加剂用量或不同粒级砂的体积分数等，直到符合要求为止。根据试拌结果提出活性粉末混凝土强度试验用的基准配合比；

(3) 活性粉末混凝土强度试验时应至少采用 3 个不同的配合比。当采用不同的配合比时，其中一个应为 8.2.2.6 中 (2) 确定的基准配合比，另外两个配合比的水胶比宜较基准配合比分别增加和减少 0.01；；用水量与基准配合比相同，砂的体积分数可分别增加和减少 1%；

(3) 制作活性粉末混凝土强度试验试件时，应验证拌合物工作性能是否达到设计要求，并以该结果代表相应配合比的活性粉末混凝土拌合物性能指标；

(4) 活性粉末混凝土强度试验时每种配合比应至少制作一组（3 块）试件，按规定的条件养护到要求的龄期试压。如有耐久性要求时，还应制作相应的试件并检测相应的指标；

- (5) 根据试配结果对基准配合比进行调整，确定的配合比为设计配合比；
- (6) 对于应用条件特殊的工程，宜对确定的设计配合比进行模拟试验。

8.3 原材料贮存

8.3.1 各种原材料应分仓储存，并应有明显的标识。

8.3.2 各种原材料贮存应符合下列要求：

1 水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别标识和储存，并采取防潮措施。贮存的水泥用于生产时的温度不宜高于 60℃。不得使用受潮、结块及污染的水泥。不应使用储存期超过 3 个月的水泥。

2 粒状骨料堆场应为能排水的硬质地面，并应有防尘和遮雨设施。石英粉应分别标识和储存，并应防潮、防雨。不同品种、规格的骨料应分别储存，避免混杂或污染。

3 外加剂应按品种和生产厂家分别标识和储存。粉状外加剂应防止受潮结块，如有结块，应进行检验，合格者应经粉碎至全部通过 600 **错误!未找到引用源。**mm 筛孔后方可使用。液态外加剂应贮存在密闭容器内，并应防晒和防冻。如有沉淀等异常现象，应经检验合格后方可使用。

4 矿物掺合料应按品种、质量等级和产地分别标识和储存，不应与水泥等其他粉状料混杂，并应防潮、防雨。

5 纤维应按品种、规格和生产厂家分别标识和储存，并应防潮、防锈。

8.4 计量

8.4.1 原材料计量应采用电子计量设备，其精度应符合现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 的规定。混凝土生产单位每月应至少自检一次。每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准。

8.4.2 原材料的计量允许偏差不应大于表 8.4.2 规定的范围，并应每班检查 1 次。

表 8.4.2 混凝土原材料计量允许偏差（单位：%）

原材料品种	水泥	骨料	水	外加剂	掺合料	纤维
每盘计量允许偏差	±2	±3	±1	±1	±2	±1
累计计量允许偏差 ^a	±1	±2	±1	±1	±1	±1
a 累计计量允许偏差是指每一运输车中各盘混凝土的每种材料计量和的偏差。						

8.4.3 在原材料的计量过程中，应根据骨料的含水率的变化及时调整水和骨料的称量。

8.5 搅拌

8.5.1 活性粉末混凝土搅拌应使用强制式搅拌机。

8.5.2 生产活性粉末混凝土的拌合站（楼）应符合现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 的规定。

8.5.3 搅拌应保证活性粉末混凝土拌合物质量均匀；同一盘混凝土的匀质性应符合《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

8.5.4 搅拌时的投料顺序宜为骨料、钢纤维、水泥、矿物掺合料。干料先预搅拌 4min，加水 and 外加剂后再搅拌 4min 以上；或投入固态混合物，加水 and 外加剂后再搅拌 4min 以上。混凝土搅拌机应有防止钢纤维结团的装置。

8.5.5 活性粉末混凝土拌合物的出机性能应根据施工方式与运输距离而定。

8.6 运输

8.6.1 混凝土搅拌运输车应符合《混凝土搅拌运输车》GB/T 26408 的规定。对于寒冷、严寒或炎热的气候情况，混凝土搅拌运输车的搅拌罐应有保温或隔热措施。运输车在运输时应保证活性粉末混凝土拌合物均匀并不产生分层、离析。翻斗车应仅限用于运送塌落度小于 80mm 的活性粉末混凝土拌合物。

8.6.2 混凝土搅拌运输车在装料前应将搅拌罐内积水排尽，装料后严禁向搅拌罐内的活性粉末混凝土加水。

8.6.3 活性粉末混凝土拌合物从搅拌机卸入搅拌运输车至卸料时的时间不宜长于 90min，如需延长运送时间，应采取有效技术措施，并通过试验验证。当采用翻斗车运输时，运输时间不宜长于 45min。活性粉末混凝土拌合物的运输应保证混

凝土浇筑的连续性。

8.7 浇筑

8.7.1 活性粉末混凝土浇筑前，应检查模板支撑的稳定性以及接缝的密合情况，并应保证模板在混凝土浇筑过程中不失稳、不跑模和不漏浆；天气炎热时，宜采取遮挡措施避免阳光照射金属模板，或从金属模板外侧进行浇水降温。

8.7.2 现场浇筑的活性粉末混凝土应采用分层浇筑，每层的厚度不应大于 300mm，并保持表面湿润，不应出现层间冷缝。

8.7.3 工厂预制的活性粉末混凝土构件应采用平板振捣器或模外振捣器振捣成型，浇筑和成型过程中应保证活性粉末混凝土密实、纤维分布均匀以及构件的整体性，避免出现拌合物离析、分层以及纤维外露出构件表面。

8.7.4 活性粉末混凝土拌合物浇筑倾落的自由高度不应超过 1.5m。当倾落高度大于 1.5m 时，应加串筒、斜槽、溜管等辅助工具。

8.7.5 浇筑大体积活性粉末混凝土时，应采取温控措施，温控应符合现行国家标准《大体积混凝土施工规程》GB 50496 的规定。

8.8 养护

8.8.1 工厂预制活性粉末混凝土成型后应采用蒸汽养护，养护过程中的温度控制应采用自动控制系统。蒸汽养护过程分为四阶段养护及三阶段养护。

8.8.1.1 四阶段养护

（1）静停。静停时的环境温度应在 10℃ 以上、相对湿度 60% 以上，静停时间不应少于 6h。

（2）初养。静停完毕的构件应进行蒸汽养护，升温速度不应大于 12℃/h，升温至 40℃ 后，保持恒温（40℃±3℃）24h 或直至同条件养护试件的抗压强度达到 40MPa。再以不超过 15℃/h 的降温速度降至构件表面温度与环境温度之差不大于 20℃ 的温度范围内。初养过程的环境相对湿度应保持在 70% 以上。拆模。活性粉末混凝土构件应在初养结束后拆模。拆模时构件表面温度与环境温度之差不应大于 20℃。

（3）终养。拆模后的活性粉末混凝土构件应再次进行蒸汽养护，升温速度不应

大于 $12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，升温至 70°C 后，保持恒温 ($70^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$) 48h 以上，或直至同条件养护试件的抗压强度达到设计值。再以不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的降温速度降至构件表面温度与环境温度之差不大于 20°C 的温度范围内，并控制降温过程中混凝土表面不应快速出现裂缝（纹）。养护结束后，撤除保温设施。终养过程的环境相对湿度应保持在 95% 以上。

（4）自然养护。活性粉末混凝土构件终养结束后应进行自然养护，环境平均气温宜高于 10°C ，构件表面应保持湿润不少于 7d。当环境平均气温低于 10°C 或最低气温低于 5°C 时，应按冬期施工处理，采取保温措施。

8.8.1.2 三阶段养护

（1）静停。与 8.8.1.1（1）相同

（2）升温养护。静停完毕的构件应进行蒸汽养护，升温速度不应大于 $12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，升温至 70°C 后，保持恒温 ($70^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$) 72h 或升温至 90°C 后，保持恒温 ($90^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$) 48h 直至同条件养护试件的抗压强度达到设计值。再以不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的降温速度降至构件表面温度与环境温度之差不大于 20°C 的温度范围内。升温养护过程的环境相对湿度应保持在 95% 以上。升温养护结束后可拆模。拆模时构件表面温度与环境温度之差不应大于 20°C 。

（3）自然养护。与 8.8.1.1（4）相同

8.8.2 现场浇筑的活性粉末混凝土养护可采用常温保湿养护及现场蒸汽养护。

8.8.3 若采用常温保湿养护，活性粉末混凝土浇筑完成后，应尽早采用养生薄膜进行覆盖，保湿养护 7d 以上。同条件养护试件的抗压强度达到 20MPa 后方可拆模。养护时环境平均气温宜高于 10°C ，当环境平均气温低于 10°C 或最低气温低于 5°C 时，应按冬季施工处理，采取保温措施。

8.8.4 现场蒸汽养护可通过蒸汽锅炉、蒸汽管道和蒸汽养护棚等设施实现。养护前，应根据养护构件规模确定蒸汽锅炉功率、蒸汽管道和蒸汽养护棚的规格和数量及布置方式；养护过程中的温度和湿度宜通过传感器调整蒸汽量的大小实现；养护温度控制在 $70^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时，养护时间不应小于 72h，养护温度控制在 $90^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时，养护时间不应小于 48h；升温节段，升温速度不应大于 $12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，养护结束后以不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的降温速度降至构件表面温度与环境温度之差不大于 20°C 的温度范围内。养护过程的养护棚相对湿度应保持在 95% 以上。

8.9 预制构件施工

8.9.1 节段预制前应进行构件拆分并编号，制定预制计划及安装方案。应根据实际条件综合考虑后确定采用短线法或长线法进行节段的预制。

8.9.2 预制构件设置的预埋件、预埋孔、局部加固构件、节段间临时预紧结构，应符合设计及工艺要求。

8.9.3 预制场地的布置应便于预制构件移动、堆放、养护及转场，场地应平整、坚实，设有排水和养护系统。预制台座及场内道路应有足够的承载能力。

8.9.4 预制构件在存放场地上宜采用垫木、橡胶板等弹性支撑物支承应符合设计要求。

8.9.5 节段预制拼接构件模板的安装质量应符合表 8.9.5 要求。

表 8.9.5 模板安装质量标准

序号	项目		规定值或 允许偏差 (mm)	检验频率		检验方法	
				范围	点数		
1	两板表面高低差		2	每个节段	4	钢尺测量	
2	表面平整度		3		4	2m 直尺测量	
3	垂直度		H/1000 且≤3		4	铅垂线测量	
4	模内尺寸	长度	-1, +3		3	钢尺测量	
		宽度	-2, +3		2		
		高度	-2, 0		4		
5	轴线偏移量		2		1	经纬仪测量	
6	匹配节段 定位	纵轴线	2		1	经纬仪测量	
		高程	±2		4	水准仪测量	
7	预 埋 件	剪力键	位置	每个剪力 键	1	钢尺测量	
			平面高 度		2	1	水准仪测量
		支座板、锚 垫板等预 埋钢板	位置	每个预埋 件	1	钢尺测量	
			平面高 度		2	1	水准仪测量
		螺栓、锚筋 等	位置		10	1	钢尺测量
					±2	1	钢尺测量
8	吊孔	位置	2	每个预留	1	钢尺测量	

	预应力筋孔道	位置	10	孔洞	1	钢尺测量
--	--------	----	----	----	---	------

注：H 为预制构件高度

9 施工质量验收

9.1 一般规定

9.1.1 应根据全面质量管理要求，建立健全有效的质量保证体系，对施工各工序的质量进行检查、控制，并应达到所规定的质量要求，确保施工质量。

9.1.2 活性粉末混凝土质量检验分为出厂检验和交货检验。出厂检验由生产企业承担；交货检验执行见证取样送检制度，生产企业、工厂监理单位旁站见证，由施工单位按规定在活性粉末混凝土浇注的工程部位随机取样和制样。预拌活性粉末混凝土质量应以交货检验结果为依据。

9.1.3 交货检验检测活性粉末混凝土的立方体抗压强度。

9.2 原材料质量验收

9.2.1 活性粉末混凝土原材料进场前，供方应按规定批次向需求方提供质量证明文件，质量证明文件应包括型式检验报告、出厂检验报告和合格证等，纤维及外加剂还应提供使用说明书。

9.2.2 活性粉末混凝土原材料进场后，应进行现场检验；在施工过程中还应对活性粉末混凝土原材料进行抽查。

9.2.3 活性粉末混凝土原材料进场检验和工程中的抽检项目应符合下列规定：

- 1 钢纤维抽检项目应包括抗拉强度、弯折性能、尺寸偏差和杂质含量；
- 2 其他原材料抽检项目应符合《混凝土质量验收标准》GB50164 相关规定。

9.2.4 活性粉末混凝土原材料的检验规则应符合下列要求：

- 1 用于同一工程的同品种和同规格的钢纤维，应按 20t 为一个检验批；
- 2 散装水泥应按每 500t 为一个检验批，袋装水泥应按每 200t 为一个检验批；其他胶凝材料、矿物拌合物及骨料应按 200t 为一个检验批；
- 3 外加剂应按 50t 为一个检验批；
- 4 不同批次或非连续供应的活性粉末混凝土原材料，在不足一个检验批量的情况下，应按同品种和同规格（或等级）材料每批次检验一次。

9.2.5 活性粉末混凝土原材料的质量应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 中的

有关规定。

9.3 拌合物质量验收

9.3.1 活性粉末混凝土制备系统各种计量仪器设备在投入使用前应经标定合格后方可使用。原材料计量偏差应每班检查 2 次，检查结果应符合本规程 7.4.2 的规定。

9.3.2 活性粉末混凝土拌合物的抽检项目应包括坍落度、塌落度经时损失、凝结时间、离析、泌水、粘稠度、保水性、扩展度、含气量和表观密度。活性粉末混凝土中钢纤维的体积掺量应符合设计要求。坍落度、离析、泌水、粘稠度、保水性、扩展度、含气量和表观密度，应在搅拌地点和浇筑地点分别取样检验；钢纤维体积掺量应在浇筑地点取样检验。

9.3.3 坍落度、离析、泌水、粘稠度、保水性、扩展度、含气量和表观密度，每个工作班应至少检验 2 次，塌落度经时损失和凝结时间应 24h 检验 1 次。

9.3.4 活性粉末混凝土中钢纤维的体积掺量宜采用水洗法进行检验。活性粉末混凝土拌合物的其他性能的试验方法应符合《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定。

9.4 硬化活性粉末混凝土性能检验

9.4.1 在活性粉末混凝土浇筑过程中，应随机抽样制作同条件试件。同条件试件应在与结构或构件相同的环境条件中成型和养护。

9.4.2 活性粉末混凝土的抗压强度每 50m³ 检验一次。批量不到 50m³，按 50m³ 计算。每班次应至少检验一次，每次检验应至少留置两组试件。试件应在浇筑地点随机取样制作。

9.4.3 工厂预制的活性粉末混凝土试件应采用 7.8 规定的条件养护，在成型后 7d 时进行试验。现场浇筑的活性粉末混凝土应采用标准条件（环境温度 20℃±2℃，相对湿度大于 95%）养护的试件，在成型后 28d 时进行试验。

9.4.4 活性粉末混凝土的抗压强度试验应采用 100mm×100mm×100mm 立方体试件确定。

9.4.5 活性粉末混凝土的长期性能和耐久性能的试验应符合《普通混凝土长期性

能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082 规定。

9.5 活性粉末混凝土工程验收

9.5.1 活性粉末混凝土工程质量验收除应执行本规定外，尚应符合国家现行标准的规定。

9.5.2 对设计文件或合同中要求的其它检验项目，其试验方法应符合国家现行有关标准的规定，没有标准的应按设计文件或合同规定执行。

本规范用词说明

1. 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

(1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

(2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

(3) 表示允许稍有选择，在条件允许时首先这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

(4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2. 规范中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为：“应按……执行”或“应符合……要求（规定）”。

引用标准名录

1. 《活性粉末混凝土》GB/T 31387
2. 《钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1
3. 《钢筋混凝土用钢 第2部分：带肋钢筋》GB 1499.2
4. 《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223
5. 《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224
6. 《预应力混凝土用螺纹钢筋》GB/T 20065
7. 《工程结构可靠度设计统一标准》GB50153
8. 《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068
9. 《公路工程结构设计统一标准》GB/T50283
10. 《混凝土结构设计耐久性规范》GB/T 50476
11. 《混凝土结构设计规范》GB50010
12. 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62
13. 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60
14. 《城市桥梁设计规范》CJJ 11
15. 《建筑抗震设计规范》GB 50011
16. 《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01
17. 《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166
18. 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
19. 《公路桥梁施工技术规范》JTJ041
20. 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ_2
21. 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
22. 《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规程》CJJ-T111
23. 《装配式混凝土结构技术规程》JGJ1
24. 《建筑工程质量检验评定标准》GB50301
25. 《公路工程质量检验评定标准》JTGF801

湖南省工程建设地方标准

P

DBJ43/T325—2017

活性粉末混凝土结构技术规程

Technical Specification for Reactive Powder Concrete Structures

条文说明

2 总则

1.0.1 活性粉末混凝土定义依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387

1.0.3 就规程适用的材料而言，本规程规定适用于采用高强度微细钢纤维增强且钢纤维体积掺量在 1.5%~4.0%、强度等级在 RPC100~RPC180 之间的活性粉末混凝土结构主要基于以下基点：

1. 试验研究表明：当钢纤维体积掺量小于 1.5% 时，活性粉末混凝土表现出拉伸软化，而当钢纤维体积掺量不小于 1.5% 时，活性粉末混凝土则表现出希望的拉伸强化。

2. 当钢纤维体积掺量小于 1.0% 时，单轴受压疲劳荷载作用下，活性粉末混凝土棱柱体一般表现出没有明显预兆的劈裂破坏，而当钢纤维体积掺量大于 1.0% 时，则为有一定预兆的剪切破坏。

3. 当钢纤维体积掺量大于 4.0% 时，活性粉末混凝土难以搅拌均匀，施工不便且可收集到的钢纤维体积掺量大于 4.0% 的研究样本数据亦较少。

4. 已有研究表明：活性粉末混凝土中钢纤维的最佳体积掺量为 2%~3%。

5. 《活性粉末混凝土》GB/T 31387 规定的强度等级为 RPC100~RPC180。为方便材料的规范配制及质量评定，宜与国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387-2015）规定的强度等级范围一致。

因此，本规程规定钢纤维的合适体积掺量为 1.5%~4.0%，并规定本规程仅适用于钢纤维体积掺量在 1.5%~4.0%、强度等级在 RPC100~RPC180 之间的活性粉末混凝土结构。

1.0.4 本条规定了本规程适用的工程类别和抗震设防标准。

1. 就规程适用的工程类别而言，为更好地促进活性粉末混凝土这种高性能材料的推广应用，规程编制时兼顾了公路桥梁、城市桥梁和建筑工程的可靠度需求。考虑到目前相关规范桥梁结构设计的可靠指标高于建筑结构，而规程编制时，基于就高不就低的原则，确定了相应的分项系数及相关设计计算公式中的参数取值。因此，本规程应用于建筑结构设计时，将偏于安全。考虑到活性粉末混凝土这种新型材料在国内的应用尚属开始，如此考虑亦较合理。故就工程类别而言，本规程适用于桥梁工程和建筑工程的结构设计、施工及质量评定，对于其它类型

工程，只要其要求的目标可靠指标不高于桥梁工程即可参照使用。

2. 就规程适用的抗震设防标准而言，本规程只对抗震设防烈度低于 8 度的活性粉末混凝土结构的设计做出了规定。配筋混凝土构件的抗震性能主要取决于所使用混凝土材料和钢材的性能。试验结果表明：活性粉末混凝土的变形性能（极限压应变约为 $4143 \sim 5270 \mu\epsilon$ ，极限轴拉应变约为 $1000 \sim 2000 \mu\epsilon$ ）均优于普通混凝土和高强混凝土，在配筋条件及构造相同时，活性粉末混凝土构件的延性和耗能能力应优于普通混凝土构件和高强混凝土构件，因此其抗震性能也会更好。但由于目前对活性粉末混凝土结构抗震性能的研究尚不充分，因此，本规程仅对抗震设防烈度低于 8 度的活性粉末混凝土结构的设计做出了规定。

2 术语、符号

2.1 术语

术语是依据现行国家标准《工程结构设计基本术语和通用符号》GBJ131、《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T50083 并结合本规程具体情况给出的。

2.2 符号

本规程基本沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 和《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的符号。

3 材料

3.2 活性粉末混凝土的强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。

1.立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 是本规程活性粉末混凝土各项力学性能指标的基本代表值。系指按标准方法制作、养护的边长为 100mm 立方体试件,在 28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95%保证率的抗压强度标准值。

2. 国内外研究结果表明:活性粉末混凝土立方体抗压强度的尺寸效应不明显。因此,本规程沿用《活性粉末混凝土》GB/T 31387 第 9 条规定:立方体抗压强度标准值的测定采用边长 100mm 的立方体试件作为标准试件。活性粉末混凝土强度等级的保证率取为 95%。

3. 由于活性粉末混凝土中添加较多掺合料,且有常温保湿养护、标准养护和湿热养护等多种不同的养护方法,不同种类和用量掺合料和不同养护方法下活性粉末混凝土强度的发展规律会有所不同,因此本规程规定确定其立方体抗压强度的试验龄期不仅限于 28d,还可根据工程实际情况予以适当调整,具体取值规定可由设计文件确认。

3.3 强度取值

3.3.1 活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{ck}

1.活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 由立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 经计算确定。

2.考虑到工程实际结构中活性粉末混凝土的实体强度与立方体试件强度之间的差异,参照《混凝土结构设计规范》GB50010 中混凝土轴心抗压强度的计算方法,活性粉末混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 按式(附 3.3.1-1)计算确定:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (\text{附 3.3.1-1})$$

式中:系数 0.88 为考虑实际工程构件与立方体试件活性粉末混凝土强度之间的差异而取用的折减系数; α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度之比值; α_{c2} 为脆性

折减系数。

3.已有研究表明钢纤维掺量为 2%的活性粉末混凝土立方体试件与相应工程中钻芯试件的对比试验，实测折减系数为 0.90。此外，活性粉末混凝土构件更适宜以工业化生产的预制构件为主，养护方式多为热水或蒸汽等湿热养护，使得活性粉末混凝土预制构件中材料的均质性与施工质量会明显优于现浇的普通混凝土构件。但考虑所收集到的试验数据最高强度仅为 140MPa，国内外对更高强度等级活性粉末混凝土该折减系数的相关研究尚不充分，故本规程的折减系数仍取《混凝土结构设计规范》GB50010 中的 0.88。

4. 已有研究结果结果表明 α_{c1} 在 0.74~0.99 之间，平均值为 0.887，标准差为 0.053，因而本规程 α_{c1} 偏安全取为 0.80。

5.活性粉末混凝土峰值应变分布为 3364~4110 $\mu\epsilon$ ，高于普通混凝土的约 2000 $\mu\epsilon$ 和高强混凝土的约 3000 $\mu\epsilon$ 。由于钢纤维的掺入，使得活性粉末混凝土的脆性会明显低于普通混凝土，且本规程规定活性粉末混凝土中钢纤维的体积掺量不低于 1.5%，故脆性折减系数 α_{c2} 取值为 1.0。

6. 将所确定的各系数带入式（附 3.3.1-1）即可得到轴心抗压强度标准值计算式为：

$$f_{ck} = 0.7 f_{cu,k} \quad (\text{附 3.3.1-2})$$

7. 其它强度等级活性粉末混凝土的强度取值可由表 3.3.1 线性内插确定。

3.3.2 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值 $f_{t0,k}$

1.本规程规定活性粉末混凝土轴心抗拉时基体的抗拉强度为其抗拉初裂强度，峰值强度为其轴心抗拉强度。

2. 由于实际工程中所采用钢纤维、混凝土原材料品种和养护方法较多，难以标准化，且抗拉强度测试时的离散性较大，故本规程规定活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度宜根据工程所采用的材料由试验确定，当无试验数据时，可近似按表 3.3.2 采用。

3. 已有研究表明活性粉末混凝土试件轴心抗拉初裂强度与边长 100mm

立方体试件抗压强度平均值之间的统计关系可取为：

$$\mu_{t0} = 0.053\mu_{f100} \quad (\text{附 3.3.2-1})$$

式中： μ_{t0} 为实测活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度的平均值， μ_{f100} 为实测活性粉末混凝土抗压强度的平均值。

4.因目前尚无工程实际结构中活性粉末混凝土实体轴拉强度与试件轴拉强度之间差异的测试数据，本规程仍近似沿用抗压强度的相应系数值 0.88，则活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值 $f_{t0,k}$ 可采用式（附 3.3.2-2）计算：

$$f_{t0,k} = 0.88 \times \mu_{t0} (1 - 1.645\delta_{ft0}) = 0.88 \times 0.053\mu_{f100} (1 - 1.645\delta_{ft0}) \quad (\text{附 3.3.2-2})$$

式中的 δ_{ft0} 为活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度的变异系数，这里近似取为与立方体抗压强度的相同，则式（附 3.3.2-2）可简化为：

$$\begin{aligned} f_{t0,k} &= 0.88 \times 0.053 \left(\frac{f_{cu,k}}{1 - 1.645\delta} \right) (1 - 1.645\delta) \\ &= 0.047 f_{cu,k} \end{aligned} \quad (\text{附 3.3.2-3})$$

3.3.3 活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk}

1.由于实际工程中所采用钢纤维的品种较多，难以标准化，因此这里规定活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 宜由试验确定，当无试验数据时，可近似按式（3.3.3-1）计算。

2. 已有研究结果钢纤维对抗拉强度的影响系数 α_f 偏安全可取为 0.15。

3.3.4-3.3.6 活性粉末混凝土的材料强度分项系数

1. 活性粉末混凝土的强度设计值由强度标准值除以材料强度分项系数 γ_c 确定，按式（附 3.3.5）计算。

$$f_c = f_{ck} / \gamma_c \quad (\text{附 3.3.5-1})$$

$$f_{t0} = f_{t0,k} / \gamma_c \quad (\text{附 3.3.5-2})$$

$$f_t = f_{tk} / \gamma_c \quad (\text{附 3.3.5-3})$$

式中： f_c ——活性粉末混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{ck} ——活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值；

f_{t0} ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值；

$f_{t0,k}$ ——活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值；

f_t ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_{tk} ——活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值；

γ_c ——活性粉末混凝土材料强度分项系数，这里取值 1.45。

2.材料分项系数 γ_c 的取值结合《混凝土结构设计规范》GB50010（ $\gamma_c=1.40$ ）和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62（ $\gamma_c=1.45$ ）的取值，取为 1.45。

3. 已有研究结果表明各强度等级活性粉末混凝土抗压强度变异系数如附表 3.3.6。由附表 3.3.6 可知，活性粉末混凝土抗压强度变异系数低于普通混凝土和高强混凝土。此外，活性粉末混凝土构件以工业化生产的预制构件为主，养护方式多为湿热养护，使得活性粉末混凝土预制构件中材料的均质性与施工质量会明显优于现浇的普通混凝土构件。因此，本规程活性粉末混凝土材料强度分项系数结合《混凝土结构设计规范》GB50010 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62，偏于安全地取为 1.45。

附表3.3.6 活性粉末混凝土抗压强度变异系数

变异系数	强度等级				
	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
δ	0.04981	0.04952	0.04311	0.04297	0.04186

3.4 弹性模量和泊松比

1.活性粉末混凝土受压和受拉的弹性模量 E_c 系基于国内外相关研究成果提出了公式（附 3.4），表 3.4 结果系根据强度等级值 $f_{cu,k}$ 按公式（附 3.4）进行计算所得。

$$E_c = \frac{10^5}{1.5 + \frac{100}{f_{cu,k}}} \quad (\text{附 3.4})$$

2. 已有研究结果表明活性粉末混凝土的弹性模量 E_c 受钢纤维掺量影响很小，故本规程不考虑钢纤维掺量对弹性模量的影响，仅根据强度等级值 $f_{cu,k}$ 按式 (3.4) 进行计算。

3. 国内外研究结果表明活性粉末混凝土的泊松比 ν_c 不随轴心抗压强度变化而变化，其值分布在 0.18~0.22，均值为 0.205，故本规程活性粉末混凝土的泊松比 ν_c 取为 0.2。

5. 根据弹性材料力学，剪切模量 $G_c = E_c / 2(1 + \nu_c)$ ，约为相应弹性模量的 0.42 倍，参照《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定，这里也近似取为弹性模量的 0.4 倍。

3.5 本构模型

3.5.1 单轴受压的应力-应变关系

1. 活性粉末混凝土的受压应力-应变关系与普通混凝土和高强混凝土有所不同，其上升段基本接近线弹性。虽然活性粉末混凝土中含有钢纤维，增韧效果明显，其峰值应变和极限应变均明显大于普通混凝土，但随活性粉末混凝土强度等级的提高，其峰值应力对应的应变逐渐增大、峰值应变与极限应变（一般指应力下降至峰值应力 85% 时的应变）间的差值逐渐减小这一规律与普通混凝土相同。考虑到《混凝土结构设计规范》GB50010 的表达形式尚较简单实用且为设计人员所熟悉，因此本规程也采用类似的形式表达。

2. 随钢纤维体积掺量的增加，活性粉末混凝土的韧性增强、极限压应变增大，因此活性粉末混凝土的峰值应变特别是极限应变大小与钢纤维的体积掺量密切相关。国内外研究结果表明活性粉末混凝土的峰值应变为 3364~4110 $\mu\epsilon$ ，高于普通混凝土的约 2000 $\mu\epsilon$ 和高强混凝土的约 3000 $\mu\epsilon$ ；极限压应变约为峰值应变

的 1.1~1.4 倍，为 4143~5270 $\mu\epsilon$ 。由于本规程规定钢纤维的掺量不小于 1.5%、不高于 4%且实际工程中钢纤维掺量 2-3%的活性粉末混凝土应用最为广泛。因此，为简便起见，本规程取钢纤维掺量为 2%时的相应结果作为代表值，对于钢纤维掺量大于 2%的活性粉末混凝土，亦偏安全地取钢纤维掺量 2%时的结果。因此式（3.5.1）所示本构关系中不包含钢纤维掺量这一参数而使应用趋于简便。根据强度等级不同，偏安全地取活性粉末混凝土的极限压应变为 3900~4200 $\mu\epsilon$ 。

3.5.2 单轴受拉的应力-应变关系

1.国内外研究结果表明拉应力从 0 至峰值应力这一区间，应力-应变关系接近线性，峰值应力后视钢纤维掺量的不同，表现为高掺量时的应变强化和低掺量时的应变软化。本规程规定钢纤维的掺量不小于 1.5%、不高于 4%，偏安全地取钢纤维掺量为 1.5%时的极限拉应变作为代表值，对于钢纤维掺量大于 1.5%的活性粉末混凝土，亦偏安全地取钢纤维掺量 1.5%时的结果，且峰值应力后不考虑轴心受拉时的应变强化。因此单轴受拉本构关系中不包含钢纤维掺量这一参数且峰值应力后取水平直线而使应用趋于简便。

2. 活性粉末混凝土极限轴拉应变的大小与钢纤维的种类和掺量密切相关。国内外研究结果表明极限轴拉应变在 400~2000 $\mu\epsilon$ 之间；钢纤维掺量 2%时，在 1000~2000 $\mu\epsilon$ 之间，变化范围较大，故本规程规定其值宜基于所采用活性粉末混凝土的试验结果确定。当无试验数据时，偏安全取钢纤维掺量为 1.5%时的极限拉应变作为代表值。

3.6 热工系数

本条给出了活性粉末混凝土的线膨胀系数、导热系数和比热容等热工参数。已有研究结果表明活性粉末混凝土线膨胀系数为 $1.05\sim 1.28\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、导热系数为 17.4~19.3 kJ/（m·h· $^{\circ}\text{C}$ ），比热容为 1.21~1.40 kJ /（kg· $^{\circ}\text{C}$ ），据此确定本规程的相应值。

3.7 收缩

1.本条给出的活性粉末混凝土收缩应变的发展规律和相应计算公式，依据国内外试验研究结果和相应设计规范、指南给出。

2.活性粉末混凝土当采用本规程 7.6 条规定的湿热养护方式时，活性粉末混凝土收缩在 2d 内基本完成，亦即收缩在养护期内就已基本完成，后期收缩增量很小可忽略。

3.8 徐变

1.本条活性粉末混凝土徐变应变的计算系参照法国超高性能混凝土设计规范给出。

2.目前国内外对活性粉末混凝土弹性模量随龄期变化规律的研究较少，且弹性模量的增长受原材料、配合比和养护环境等参数的影响较大，故本规程建议加载时刻的弹性模量 E_{ct} 宜通过试验确定。当试件采用湿热养护时，在湿热养护阶段活性粉末混凝土试件弹性模量增长较快，可以认为湿热养护结束后活性粉末混凝土的弹性模量已达到最终值。基于此，本规程提出对采用湿热养护的试件，弹性模量 E_{ct} 可采用 E_c ；对不采用湿热养护的试件，其值宜通过试验予以确定，当无试验数据时，可根据加载时活性粉末混凝土的强度按式（3.4）近似计算。

3.9 疲劳

3.9.2 混凝土疲劳变形模量 E_c^f

1. 本规程以等幅疲劳 2×10^6 次的试验研究结果给出活性粉末混凝土疲劳强度设计值和疲劳变形模量。活性粉末疲劳强度设计值由活性粉末混凝土的静力强度设计值乘疲劳强度修正系数 γ_p 后获得。

2. 已有研究结果表明活性粉末混凝土考虑存活率 的 $S-N$ 关系方程为

$$\lg S = 0.1141 - 0.0615(1-R)\lg N \quad (\text{附 3.9})$$

3. 已有研究结果表明：活性粉末混凝土疲劳变形模量取静载弹性模量的 50%，且随着钢纤维掺量的提高，疲劳强度有所增加；当活性粉末混凝土经初次加载后处于受拉应力-应变曲线的弹性段、强化段和软化段时，当应力比为 0.1 时，其受

拉初裂疲劳强度修正系数 γ_ρ 取 0.7。参考《混凝土结构设计规范》GB50010，当应力比超过 0.8 时， γ_ρ 取 1.0。当应力比介于 0.1~0.8 之间时，活性粉末混凝土轴心受拉初裂疲劳强度折减系数按线性插值确定。

4 承载能力极限状态计算

4.1 正截面承载力计算

4.1.1 基本假定

1. 已有研究结果表明在纵向受拉钢筋的应力达到屈服强度之前及达到屈服强度后的一定塑性范围内，截面的平均应变基本符合平截面假定。国际上关于配筋活性粉末混凝土构件正截面抗弯能力分析计算方面论文及规范也均采用这一假定。故本规程对这一假定也予以沿用。

2. 活性粉末混凝土构件正截面承载力计算时不考虑受拉区活性粉末混凝土的抗拉作用。研究表明活性粉末混凝土的抗拉强度对受弯构件正截面受弯承载力影响较小。因此本规程为计算方便，偏安全地忽略构件截面受拉区活性粉末混凝土的抗拉强度对承载能力的贡献。

4.1.2 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时的等效矩形应力图块系数。

1. 为方便计算，活性粉末混凝土结构正截面承载力计算时仍沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 等规范的习惯，采用等效矩形应力图块代替实际的应力图形分布。根据 3.5 节活性粉末混凝土本构关系，可计算 RPC100~RPC180 活性粉末混凝土的换算系数 α_1 和 β_1 如附表 4.1.2-2 所示。可见，RPC100~RPC180 范围内， $\alpha_1=0.87\sim0.95$ ， $\beta_1=0.70\sim0.77$ 。

附表 4.1.2-2 等效矩形应力图换算系数

强度等级	k_1	k_2	α_1	β_1
RPC100	0.7300	0.6164	0.95	0.77
RPC120	0.7083	0.6182	0.93	0.76
RPC140	0.6716	0.6350	0.92	0.73
RPC160	0.6404	0.6435	0.90	0.71
RPC180	0.6078	0.6511	0.87	0.70

4.1.3 活性粉末混凝土受弯构件的破坏特征与普通混凝土构件基本相同，构件截面的界限破坏亦为受拉钢筋屈服与受压区混凝土压脆同时发生的破坏状态。根据平截面假定，可得截面相对受压区 ξ_b 的公式。

4.1.4 研究表明活性粉末混凝土的抗拉强度对受弯构件正截面受弯承载能力影响较小。如不考虑 RPC 抗拉强度，可以与混凝土结构设计规范一致并简化计算。因此本规程正截面承载力计算中不考虑活性粉末混凝土的抗拉强度。

4.1.6 预应力损失计算

1. 预应力损失的合理估计对预应力活性粉末混凝土结构正常使用极限状态的合理确定具有重要影响，而影响预应力损失的因素较多且较为复杂，因此各项预应力损失值宜尽可能考虑工程具体条件由试验确定，当无条件进行试验或无可靠的实测资料时，可根据规范给出的相应参数和计算公式予以确定；

2. 预应力筋与锚圈口间的摩擦影响，可通过试验或厂家及施工单位积累的实测数据确定；

3. 后张构件中的孔道偏差影响系数和孔道壁摩擦系数宜通过试验确定；

4. 后张活性粉末混凝土构件经热养护后，基本消除了收缩的影响，此时可不考虑式（4.1.6）中由收缩引起的预应力损失；

4.2 斜截面受剪承载力计算

4.2.1 活性粉末混凝土受弯构件受剪承载力截面限制条件

1. 活性粉末混凝土受弯构件受剪承载力截面限制条件参照《混凝土结构设计规范》GB50010 中的形式，并根据《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 及试验结果确定公式（4.2.1）中的系数。

2. 根据《钢纤维混凝土结构设计》CECS 38，对钢纤维混凝土受弯构件受剪截面的限制条件计算时， f_c 可用 $f_c(1+0.15\lambda_f)$ 代替。

3. 受剪截面限制条件实际上规定了截面抗剪承载能力的上限值并借此防止斜压破坏的发生。已有研究表明受剪截面承载能力系数偏严控制可取为

0.10, 防止脆性的抗剪破坏而言, 其安全储备尚较合理。

4.2.2 仅配置箍筋时, 矩形、T 形、I 形截面受弯构件的斜截面受剪承载力计算公式的确定

1. 活性粉末混凝土受弯构件斜截面受剪承载力计算沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 和《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 的计算模式。

2. 目前各国抗剪承载能力的计算模式主要有两项和及两项积两种表达方式, 前者如《混凝土结构设计规范》GB50010 将混凝土和箍筋的抗剪贡献以和的形式表达, 后者如《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTGD62 将混凝土和箍筋的抗剪贡献以积的形式表达。考虑到两项和的模式应用较方便, 故本规程亦采用这一模式。

3. 已有研究结果表明: 钢纤维的掺入能提高混凝土结构的抗剪能力。参照《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38, 本规程中钢纤维对活性粉末混凝土构件受剪承载力的贡献定义如下:

$$V_{fc} = V_c (1 + \beta_v \lambda_f) \quad (\text{附 } 4.2.2-1)$$

其中: V_c 为普通混凝土的抗剪承载能力。钢纤维对受剪承载力的影响系数 β_v 通过试验结果进行统计回归。国内研究结果表明 β_v 的取值变化对梁抗剪承载能力的影响并不敏感。当 β_v 取值为 0.6 时, 对抗剪承载力计算而言, 安全储备尚较合理。

4. 本规程受弯构件的斜截面受剪承载力采用《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式。由于本规程适用于建筑工程和桥梁工程, 可靠指标需要同时满足这两类结构要求。因桥梁结构可靠指标比建筑结构高, 因此, 本规程按桥梁规范规定的可靠指标确定抗剪承载力计算公式 (4.2.2-2) 中系数 α_{cv} 。分析结果表明 α_{cv} 取 0.6 时不同荷载效应比时受弯构件斜截面受剪承载力的可靠指标均不低于目标可靠指标 4.7。

5. 本规程式 (3.3.3-1) 中钢纤维对活性粉末混凝土轴心抗拉强度的影响系数取值为 0.15, 而式 (4.2.2-2) 中钢纤维对活性粉末混凝土抗剪能力的影响系数 β_v

却取为 0.6，二者相差较大。表面看，式（4.2.2-2）中的 β_v 也是考虑活性粉末混凝土轴心抗拉强度的影响系数，但实际上式（4.2.2-2）针对的是剪压破坏，因此 β_v 本质上表征的是钢纤维掺量对活性粉末混凝土剪压强度的影响。但由于混凝土的剪压强度与剪压比有关，确定较复杂，若在公式中体现，则公式应用不便。此外，配筋混凝土梁的受剪破坏机理复杂，迄今尚无公认统一的计算模式，国内外规范相应的抗剪承载力计算公式均为经验公式。《混凝土结构设计规范》GB50010 中也是简单地借助混凝土的抗拉强度来表达，考虑到其已为广大设计人员所熟悉，故本规程也采用相同的处理方式。

6.活性粉末混凝土受弯构件斜截面剪压破坏研究表明：斜裂缝倾角受配箍率影响较小、受剪跨比影响较大。《混凝土结构设计规范》GB50010 偏安全地取临界斜裂缝倾角为 45° ，本规程箍筋提供的抗剪承载力 V_s 亦偏安全地按《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定进行计算。

4.2.3 弯起钢筋或斜筋提供的斜截面抗剪承载力偏安全地按《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTGD62 计算，弯起钢筋或斜筋受力的不均匀系数取为 0.75 而非《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的 0.8。

4.2.4 矩形、T 形、I 形和箱型截面一般受弯构件，当不进行斜截面受剪承载力计算时，其箍筋的配置应满足构造要求。

1. 按构造配置箍筋的条件，《混凝土结构设计规范》GB50010 所采用的计算模式比《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTGD62 的规定具有更明确的物理意义，即当设计剪力不超过无腹筋梁所能提供的抗剪承载力时，可按构造配置箍筋。因此本规程参照《混凝土结构设计规范》GB50010 予以确定，仅将 f_t 以 $f_{t0}(1+\beta_v\lambda_f)$ 代替， β_v 按本规程 4.2.2 取值。

2. 已有研究表明：虽然提高钢纤维含量可在一定程度上改善试验梁的抗弯曲疲劳性能，但其抗剪切疲劳性能仍然很差，对初始缺陷（原施工缝）的反应敏感，破坏时会突然断裂；无箍筋活性粉末混凝土试验梁仅在几万次的疲劳荷载作用下，就会突然发生脆性的斜拉破坏，因此对于承受疲劳及直接承受动力荷载的构件不能过高估计钢纤维的作用而取消抗剪腹筋。

4.活性粉末混凝土中胶凝材料约为 $800\sim 1000\text{kg/m}^3$, 是普通混凝土的 2 倍左右, 且因活性粉末混凝土强度较高, 相应的结构一般设计为薄壁构件, 由此导致活性粉末混凝土构件易出现由早期收缩引起的初始裂纹, 因此适当地配置抗剪腹筋可有效防止活性粉末混凝土构件因不可避免的初始缺陷而导致突然破坏。

综上所述, 结构轻薄的活性粉末混凝土结构适宜在重要的大跨结构中应用且施工缺陷对结构性能的影响更为敏感, 加之活性粉末混凝土结构的应用经验尚较少, 故本规程规定了活性粉末混凝土梁的最小配箍要求, 详见 6.3.2 条, 亦即不允许采用不配箍筋的无腹筋梁。

4.2.5 不配箍筋和弯起钢筋的活性粉末混凝土板类受弯构件, 仅考虑活性粉末混凝土承受的抗剪承载力且沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式, 但将 f_t 以 $f_{t0}(1+\beta_v\lambda_f)$ 代替, β_v 按本规程 4.2.2 取值。

4.2.6 矩形、T 形、I 形和箱型截面偏心受压构件的斜截面受剪承载力计算

1. 偏心受压构件受剪承载力的计算方法仍采用现行《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式, 混凝土提供的受剪承载力应考虑钢纤维的作用, 即活性粉末混凝土所提供受剪承载力为 V_{fc} , V_{fc} 的计算方法按本规程 4.2.2 条采用。

2. 已有研究结果式 (4.2.6) 的安全储备尚较合理。

4.2.7 偏心受拉构件受剪承载力的计算方法仍采用现行《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式, 但混凝土提供的受剪承载力应考虑钢纤维的作用, 即活性粉末混凝土所提供受剪承载力为 V_{fc} , V_{fc} 的计算方法按本规程 4.2.2 条采用。

4.3 正截面受压承载力计算

4.3.1 活性粉末混凝土轴心受压构件计算采用《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式。已有研究表明当承载能力折减系数取为 1.0 时, RPC 轴心受压柱的可靠指标可靠指标均大于 5.2。考虑试验样本数据较少, 且为了与《混凝土结构设计规范》GB50010 衔接, 活性粉末混凝土轴心受压构件承载能力折减系

数仍取 0.9。

4.3.2 矩形截面偏心受压构件的正截面承载能力

1. 活性粉末混凝土轴心受压构件计算基本沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算体系；但采用偏心距增大系数来考虑二阶弯矩对截面抗压承载力的影响，偏心距增大系数的计算公式参照《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTGD62 的计算模式并按活性粉末混凝土的材料特征系数推导而得。

2. 对于反弯点位于柱中部的非单曲率变形的偏压构件，由轴向压力在挠曲杆件中产生的二阶效应（P- δ 效应）虽能增大构件除两端区域外各截面的曲率和弯矩，但其增大的幅度较单曲率柱小且增大后的弯矩一般仍不可能超过柱两端控制截面的弯矩，因此这种情况下，采用依据单曲率变形推导的偏心距增大系数计算公式（4.3.2-5）来考虑二阶效应应该偏于安全。故本规程仍参照《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTGD62 的计算模式确定相应的偏心距增大系数。

3. 对活性粉末混凝土偏心受压构件受力全过程的荷载-位移关系进行研究可得到偏心距增大系数公式为：

$$\eta=1+\frac{1}{1200(e_0/h_0)}\left(\frac{l_0}{h}\right)^2\zeta_1\zeta_2 \quad (\text{附 4.3.2-7})$$

$$\zeta_1=0.2+2.7\frac{e_0}{h_0}\leq 1 \quad (\text{附 4.3.2-8})$$

$$\zeta_2=1.15-0.01\frac{l_0}{h}\leq 1 \quad (\text{附 4.3.2-9})$$

4.3.3 求解对称配筋小偏心受压构件承载力时，将出现相对受压区高度 ξ 的三次方程，采用（4.3.3-2）的简化计算公式，便于直接求解小偏压构件所需的钢筋面积。

由于小偏压构件 ξ 大于 ξ_b 。式(4.3.3-2)中仍参照《混凝土结构设计规范》GB50010 取 $\alpha_1 f_c b h_0^2$ 项前的系数为 0.43。

4.4 正截面受拉承载力计算

4.4.2 矩形截面偏心受拉构件钢筋屈服时的应变约为 0.002(以 HRB400 钢筋为例), 大于活性粉末混凝土的极限拉应变 0.001, 偏安全考虑, 活性粉末混凝土偏心受拉构件正截面承载力计算时亦不考虑活性粉末混凝土抗拉强度的作用。

4.5 抗冲切承载力计算

4.5.1 在局部荷载或集中反力作用下, 不配置箍筋或弯起钢筋活性粉末混凝土板的抗冲切承载力计算

1. 活性粉末混凝土板的抗冲切承载能力计算采用《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式(《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的计算模式与此相同), 偏安全地按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中系数进行取值。并根据《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 考虑了钢纤维对活性粉末混凝土板抗冲切能力的贡献。

2. 已有研究结果表明: 钢纤维的掺入能提高混凝土结构的抗冲切能力, 本规程在钢筋混凝土抗冲切公式中引入了纤维增强项 $(1 + \beta_p \lambda_f)$, 钢纤维对活性粉末混凝土板抗冲切承载力的影响系数 $\beta_p = 0.4$ 。

4.5.2 对于配置抗冲切钢筋的活性粉末混凝土构件, 其中抗冲切钢筋的贡献沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的计算模式, 偏安全地《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中系数进行取值, 并根据《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 考虑钢纤维对活性粉末混凝土板抗冲切能力的贡献。弯起钢筋或斜筋提供的抗冲切承载力偏安全地按《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTGD62 计算, 弯起钢筋或斜筋受力的不均匀系数取为 0.75, 而非《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的 0.8。

4.5.3 对于配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外的截面受冲切承载力计算参照《混凝土结构设计规范》GB50010 及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的计算模式, 偏安全地取值。

4.5.4 对于配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外的截面受冲切承载力计算采用《混凝土结构设计规范》GB50010 及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的计算模式，并偏安全地对计算系数进行取值。冲切试验结果表明：钢纤维的掺入能提高混凝土结构的抗冲切能力，本规程在钢筋混凝土抗冲切公式中引入了纤维增强项 $(1 + \beta_p \lambda_f)$ ，钢纤维对抗冲切承载力的影响系数 $\beta_p = 0.4$ 。

4.6 局部受压承载力计算

4.6.1 不配间接钢筋的活性粉末混凝土构件局部受压计算

1. 本条给出了无筋活性粉末混凝土构件局部受压承载力计算公式。无筋活性粉末混凝土构件局部受压承载力计算公式依据《混凝土结构设计规范》GB50010 和《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 及试验结果确定。

2. 掺钢纤维的活性粉末混凝土构件的局部受压强度提高系数 β_n 可根据试验数据确定，当无试验数据时，可依据《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 取值。对于铣削形钢纤维 ($l_f / d_f = 35$)， $\beta_n = 0.65$ 、对于端部有大头的 ZH-06 型剪切钢纤维 ($l_f / d_f = 50$)， $\beta_n = 0.45$ 、对于剪平直形钢纤维， $\beta_n = 0.34$ 。考虑到活性粉末混凝土材料尚未广泛应用，积累的经验不多，当无试验数据时本规程 β_n 取较小值 0.3。

3. 已有研究表明：活性粉末混凝土强度影响系数 $\beta_c = 0.5$ ，该系数小于高强混凝土局压强度提高系数，如混凝土强度等级为 C80 时取 $\beta_c = 0.8$ 。由于试验数据有限，本规程偏安全取活性粉末混凝土强度影响系数 $\beta_c = 0.5$ 。

4. 当局部受压面上尚有非局部荷载作用时，应按《混凝土结构设计规范》GB50010 中附录 D 有关规定考虑非局部荷载设计产生的应力影响。

4.6.2 配置间接钢筋的活性粉末混凝土构件的局部受压区的截面尺寸条件

1. 配置间接钢筋的活性粉末混凝土构件的局部受压区截面尺寸依据《混凝

土结构设计规范》GB50010 进行计算,《混凝土结构设计规范》GB50010 中局部受压区的截面尺寸应符合下式要求:

$$F_1 \leq 1.35\beta_c\beta_l f_c A_n \quad (\text{附-4.6.2-1})$$

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中局部受压区的截面尺寸应符合下式要求:

$$F_1 \leq 1.3\beta_c\beta_l f_c A_n \quad (\text{附-4.6.2-2})$$

本规程适用于桥梁工程和建筑结构, 偏安全的取系数为 1.3。

2. 根据《钢纤维混凝土结构设计》CECS 38, 对钢纤维混凝土构件局部受压区的截面限制条件计算时, f_c 可用 $f_c(1+0.15\lambda_f)$ 代替

3. 已有研究表明: 配置间接钢筋使轴心局压荷载下约束活性粉末混凝土破坏特征表现为一定延性的破坏, 局压破坏后试件具有较好的整体性。式(4.6.2)对防止脆性的局部受压破坏而言, 其安全储备尚较合理。

4.6.3 配置间接钢筋的活性粉末混凝土构件的局部承压承载力计算:

1. 对于配置间接钢筋的活性粉末混凝土构件, 其局部承压承载力沿用《混凝土结构设计规范》GB50010 及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的计算模式, 计算参数依据《纤维混凝土结构技术规程》CECS 38 和试验结果确定。

2. 已有研究表明式(4.6.3)对防止局部受压破坏而言, 其安全储备尚较合理。

4.7 疲劳验算

4.7.1 活性粉末混凝土受弯构件的正截面疲劳应力验算仍采用普通混凝土构件的基本假定。

4.7.2 活性粉末混凝土结构疲劳验算荷载取值采用《混凝土结构设计规范》GB50010 的方法。

4.7.3 活性粉末混凝土受弯构件疲劳验算时，应计算正截面受压区边缘的活性粉末混凝土应力和纵向受拉钢筋的应力幅。

4.7.4 活性粉末混凝土和预应力活性粉末混凝土受弯构件正截面疲劳验算采用《混凝土结构设计规范》GB50010 的计算模式。

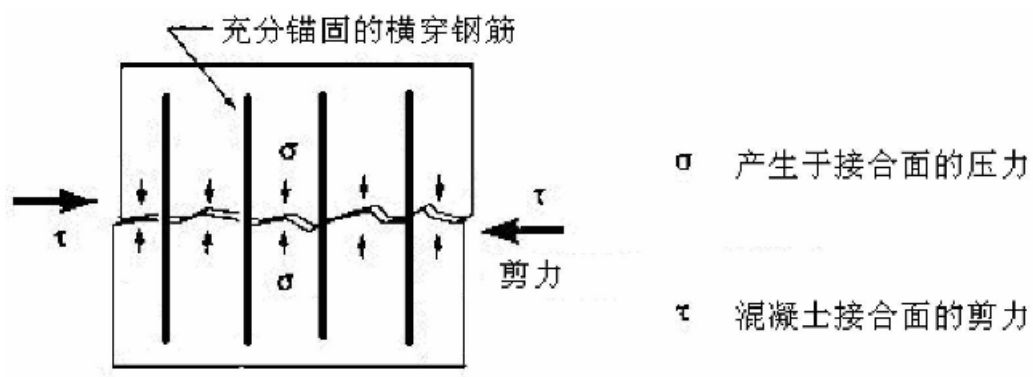
4.7.6 根据第 4.7.1 条的基本假设，具体给出了活性粉末混凝土受弯构件正截面疲劳验算中所需的截面特征值及其相应的应力和应力幅计算公式。

4.7.9 按条文公式计算的活性粉末混凝土应力 $\sigma_{c,min}^f$ 和 $\sigma_{c,max}^f$ ，是指在截面同一层纤维计算点处一次循环过程中的最小应力和最大应力，其最小、最大以其绝对值进行判别，且拉应力为正、压应力为负；在计算 $\rho_c^f = \sigma_{c,min}^f / \sigma_{c,max}^f$ 时，应注意应力的正负号及最大、最小应力的取值。

4.8 预制构件结合部承载力计算

4.8.2 本条文主要给出了节段预制拼装构件正截面抗弯和斜截面抗剪强度计算原则。承载能力折减系数的取值参照美国 AASHTO 的《节段式混凝土桥梁设计和施工指导性规范》(Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges)确定。

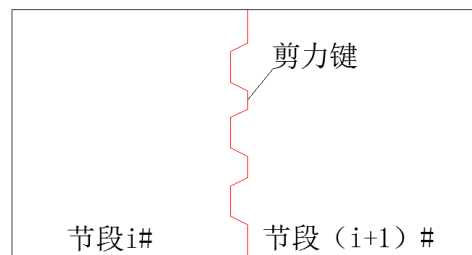
4.8.3 当穿过混凝土结合面的钢筋在两侧混凝土内有充分锚固时，如果结合面发生滑移变形，在结合面产生压应力，生成剪切抗剪摩擦（简称“剪摩擦”）。如附图 4.8.3 所示。



附图 4.8.3 剪切抗剪摩擦

研究表明, 剪切摩擦抗剪承载力的计算可采用两种模型, 一种是与混凝土强度无关的计算方法, 如 ACI 318: $\tau_R = \mu p_s f_y \leq \min(0.2 f_c, 5.5)$ 及日本规范 $\tau_R = \mu(p_s f_y + \sigma_0) \leq 0.3 f_c$; 另一种是与混凝土强度相关的计算方法, 如欧洲 EC2: $\tau_R = \mu p_s f_y + c f_t \leq 0.5(1 - f_c / 250) f_c$ 。由于缺乏活性粉末混凝土剪切摩擦抗剪破坏试验, 本规程采用与混凝土强度无关的计算方法。结合《预制装配整体式钢筋混凝土结构技术规范》SJG18 中研究成果, 取 $\tau_R = 0.9 \mu p_s f_y$ 。EC2 规范中剪切摩擦抗剪承载力上限值与混凝土抗压强度相关, 取 RPC180 对应的 f_c 计算得到剪切摩擦抗剪承载力上限值为 $0.326 f_c$ 。考虑到活性粉末混凝土强度较高且缺乏相关试验结果, 本规程取上限值为 $0.3 f_c$, 小于《预制装配整体式钢筋混凝土结构技术规范》SJG18 中规定的 $0.4 f_c$ 。

4.8.4 剪力键是指通过凹凸形状的混凝土传递剪力的抗剪机构, 在剪应力达到抗剪强度以前几乎不发生结合面滑移变形。剪力键示意图如附图 4.8.4 所示。



附图 4.8.4 剪力键示意

剪力键的承载力是由剪力键凸出部的承压强度和剪力键剪切强度二者较小值决定。已有研究结果表明光滑混凝土表面之间的摩擦系数为 0.36~0.46, 本规程取为 0.3。

此外, 在结合面通过剪力键传力时, 混凝土局部会有很大的压力, 为避免发生过大大变形或混凝土局部破坏, 混凝土承压验算按本规程 4.6.1 节规定计算。

5 正常使用极限状态验算

5.1 裂缝控制验算

5.1.1 钢筋活性粉末混凝土和预应力活性粉末混凝土构件抗裂验算：

1.本规程中仍采用《混凝土结构设计规范》GB50010 中裂缝控制等级的划分标准。由于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 对应力水平控制更严，因此，本规程采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的抗裂验算条件。

2. 对活性粉末混凝土结构的抗裂验算，不同国家规范或建议的处理有所不同。

《Ultra High Performance Fibre-reinforced Concrete Recommendations》：认为对于普通活性粉末混凝土结构不需限制混凝土拉应力，而是限制裂缝宽度来满足结构耐久性要求。

《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》：规定短期荷载作用下非预应力构件的最大名义拉应力不应超过 6.0MPa；对于预应力构件，短期荷载作用下的最大名义拉应力如果不超过 8.0MPa，则弯曲裂缝宽度可以得到控制，如果超过了，则在受拉边设置普通钢筋并且钢筋应力不应大于 200MPa。

《Recommendations for design and construction of high performance fibre reinforced cement composites with multiple fine cracks》：由于缺乏足够试验数据，有关裂缝宽度的限制及裂缝宽度的计算公式仍偏安全地参照普通混凝土结构的公式进行计算。

5.1.2 活性粉末混凝土构件的最大裂缝宽度限值。

1. 表 5.1.2 中环境作用等级及最大裂缝宽度是依据《混凝土结构设计耐久性规范》GB/T 50476 中规定给出的，结构所处环境按其对钢筋和混凝土材料的腐蚀机理可分为 5 类，并按附表 5.1.2-1 确定。环境对配筋混凝土结构的作用程度采用环境作用等级表达，并应符合表附表 5.1.2-2 的规定。

附表 5.1.2-1 环境类别

环境类别	名称	腐蚀机理
I	一般环境	保护层混凝土碳化引起钢筋锈蚀
II	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
III	海洋氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
V	化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀

注：一般环境系指无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用。

附表 5.1.2-2 环境作用等级

环境作用等级 环境类别	A 轻微	B 轻度	C 中度	D 严重	E 非常严重	F 极端严重
一般环境	I -A	I -B	I -C			
冻融环境			II -C	II -D	II -E	
海洋氯化物环境			III-C	III-D	III-E	III-F
除冰盐等其他氯化物环境			I V -C	I V -D	I V -E	
化学腐蚀环境			V -C	V -D	V -E	

2. 对于掺钢纤维的活性粉末混凝土，由于活性粉末混凝土基体具有良好的材料匀质性、高密实度以及孔隙率少等特征，使活性粉末混凝土具有优异的耐久性，且活性粉末混凝土中乱向纤细钢纤维会挠乱裂缝处钢筋电化锈蚀的通路，降低锈蚀程度。当钢筋产生“锈胀”时，由于钢纤维的约束，其危害会降低。因此，本规程规定最大裂缝宽度“不宜”而非“不应”超过表 5.1.2 的裂缝宽度限值。当有可靠依据并经专门论证，表 5.1.2 中的裂缝宽度限值可适当放宽。

3. 其它规范的限值

《Ultra High Performance Fibre-reinforced Concrete Recommendations》：不同环境下活性粉末混凝土构件裂缝宽度限值规定为：0.1mm(严重腐蚀环境)、0.2mm（一般环境构件）和 0.3mm(有保护措施构件)，取值与 CEB-FIP 混凝土结构设计模式规范一致。

《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》：没有规定活性粉末混凝土构件最大裂缝宽度的限值，仅规定通过短期荷载作用下的最大名义拉应

力不超过 6.0MPa 予以间接控制。

《Recommendations for design and construction of high performance fibre reinforced cement compsites with multiple fine cracks》：认为活性粉末混凝土构件具有良好的控制裂缝宽度的能力，因此规定采用日本《混凝土结构标准说明》中的裂缝控制条件，一般环境下的允许裂缝宽度为 0.3mm。

《混凝土结构设计规范》GB50010 规定计算的最大裂缝宽度不应超过以下值：

附表 5.1.2-1 裂缝宽度限值（GB50010）

环境类别	钢筋活性粉末混凝土构件		预应力活性粉末混凝土构件	
	裂缝控制等级	w_{lim}	裂缝控制等级	w_{lim}
一	三级	0.30（0.40）	三级	0.20
二 a		0.2		0.10
二 b			二级	—
三			一级	—

《公路钢筋混凝土和预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 规定计算的最大裂缝宽度不应超过以下值：

附表 5.1.2-2 裂缝宽度限值(JTG D62)

构件	环境类别	最大裂缝宽度限值(mm)
钢筋混凝土构件	I 类和 II 类	0.20
	III 类和 IV 类	0.15
采用精轧螺纹钢的预应力混凝土构件	I 类和 II 类	0.20
	III 类和 IV 类	0.15
采用钢丝或钢绞线的预应力混凝土构件	I 类和 II 类	0.10
	III 类和 IV 类	不得采用带裂缝的 B 类构件

考虑以上国内外设计规范中关于普通混凝土和活性粉末混凝土构件允许裂缝

宽度的限值，本规程依据《混凝土结构设计耐久性规范》GB/T 50476 的相应规定给出了活性粉末混凝土构件的裂缝宽度限值。

5.1.3 活性粉末混凝土构件最大裂缝宽度计算:

1. 式(5.1.3)是通过计算活性粉末混凝土基体裂缝宽度 $w_{\max}$ 再考虑钢纤维对裂缝宽度约束效应建立的。

2. 式(5.1.3)中的参数 $(1-\beta_w\lambda_f)$ 本质是用来修正平均裂缝间距的，为了方便计算以及与《混凝土结构设计规范》GB50010 中裂缝宽度计算公式协调，将此参数表达为修正不考虑钢纤维影响的普通钢筋混凝土受弯构件的最大裂缝宽度。

3. 《钢纤维混凝土结构技术规程》CECS38 中钢纤维影响系数 $\beta_{cw}=0.35$ ，但由于活性粉末混凝土中无粗骨料，使微细钢纤维在活性粉末混凝土中分散更均匀，因此钢纤维影响系数 β_{cw} 可适当放宽取值。

4. 已有研究结果表明式（5.1.3）计算结果与试验值符合较好且计算值均大于试验值而偏于安全。

5.2 受弯构件挠度验算

5.2.1 挠度控制限值

1. 对桥梁挠度进行限制是为了避免高速行驶时产生振动颠簸和冲击以保证行车舒适度和减少振动损害，并由此给出了经验性的挠度限值。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 关于桥梁主梁的挠度限值规定为：在消除结构自重产生的长期挠度后两端支承受弯构件的最大挠度不应超过计算跨径的 1/600；悬臂构件悬臂端的最大挠度不应超过悬臂长度的 1/300。

《混凝土结构设计规范》GB50010 中规定“构件变形挠度的限值应以不影响结构的使用功能、外观及与其它构件的连接等要求为目的”，《混凝土结构设计规范》GB50010 中关于普通混凝土受弯构件的挠度限值如表 5.2.1 所示。

《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》中建议关于活性粉末混凝土桥梁构件的挠度限值相对较严，其规定活载作用下的桥梁受弯构件挠度

不超过计算跨径的 $1/800$ ，悬臂构件挠度不超过计算跨径的 $1/400$ ，该值与美国桥梁结构挠度限值委员建议的限值相同。

由于《混凝土结构设计规范》GB50010、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 及《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》中挠度限值相差较大，难以统一，而本规程适用范围包括了桥梁工程与建筑工程，因此本规程针对桥梁和建筑工程分别给出了不同的挠度限值。

2. 与普通混凝土梁式构件挠度限值一般不会控制设计的情形不同，活性粉末混凝土构件因材料的高强可使构件做得较为轻薄，挠度有可能成为设计的控制因素。考虑到活性粉末混凝土这种新型材料的应用经验尚不太充足，故本规程建议桥梁结构挠度限值采用澳大利亚相关建议的取值规定，建筑结构采用《混凝土结构设计规范》GB50010 中取值规定。但考虑到梁式构件挠度限值的大小主要影响结构的正常使用性能，对结构的安全性不至于有决定性的影响，而我国《混凝土结构设计规范》GB50010 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的相关规定经多年使用验证了其适用性。因此，本规程对所规定的挠度限值仅要求宜遵守，当有可靠依据时，该挠度限值可适当放宽。

5.2.2 受弯构件的挠度计算方法和截面抗弯刚度的分布均参照《混凝土结构设计规范》GB50010 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的规定，挠度计算方法采用结构力学方法，截面的刚度分布采用最小刚度原则确定。

5.2.3 截面抗弯刚度的确定

1. 对于活性粉末混凝土构件开裂前弹性工作阶段截面的短期抗弯刚度 B_{fs} ，参考《混凝土结构设计规范》GB50010 中的 $B_{fs} = 0.85E_c I_0$ 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的 $B_{fs} = 0.95E_c I_0$ 中的规定，取式 (5.2.3-1) 所示的 $B_{fs} = 0.9E_c I_0$ 。

2. 参照《纤维混凝土结构技术规程》CECS38 的方式，引入钢纤维影响系数

β_b 和钢纤维含量特征值 λ_f 来考虑钢纤维对活性粉末混凝土构件刚度的影响。已有研究表明：式（5.2.3-2）计算值与试验值吻合较好且略偏于安全。

3. 受弯构件长期刚度的降低主要是由于混凝土的徐变所致。基于试验结果，常温保湿和湿热养护条件下活性粉末混凝土的徐变系数列于本规程表 3.8。可见：由于活性粉末混凝土的高致密性，常温保湿养护条件下活性粉末混凝土的徐变小于相同养护条件下的普通高强混凝土，湿热养护条件下活性粉末混凝土的徐变更是远小于常温保湿养护条件下的高强混凝土。因此，活性粉末混凝土受弯构件截面的长期抗弯刚度亦大于相同养护条件下普通高强混凝土的相应值。式（5.2.3-3）参考《混凝土结构设计规范》GB50010 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的相关规定，分析可知：式（5.2.3-3）中的 $(\theta-1)$ 即为表征混凝土徐变对结构变形增大效应的影响，可假定其与混凝土材料徐变系数正相关。《混凝土结构设计规范》GB50010 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中对于普通钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件，规定 θ 的最大值取 2.0，即 $(\theta-1)=1.0$ ，而根据本规程表 3.8 与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 表 6.2.7 的对比可知，常温保湿和湿热养护条件下活性粉末混凝土的徐变系数约分别为相同加载龄期普通混凝土徐变系数的 0.6 倍和 0.2 倍。因此，对于这两种不同养护条件下活性粉末混凝土受弯构件， $(\theta-1)$ 可分别取 0.6 和 0.2，即 θ 取值分别为 1.6 和 1.2。

6 构造要求

6.1 最小保护层厚度

1. 根据日本《Recommendations for design and construction of high performance fibre reinforced cement composites with multiple fine cracks》中的试验结果及建议, 最小保护层厚度可取为不小于钢筋公称直径的 $1/2$;

2. 对活性粉末混凝土预制构件, 有较好的质量保证, 参照法国《Ultra high performance fibre-reinforced concretes Recommendations》中的相关规定, 对一、二类环境下预制构件的最小保护层厚度可取值 10mm。

6.2 钢筋选用及净距

6.2.1 由于活性粉末混凝土强度很高, 为了充分发挥活性粉末混凝土和钢筋的性能, 因此梁、板内纵向受拉钢筋宜采用高强度钢筋。

1. 已有研究结果表明钢筋净距不小于 1 倍钢筋直径时, 钢筋的粘结强度基本不受影响。因此, 为保证钢筋具有足够的粘结强度, 钢筋的净距应大于其直径;

2. 与普通混凝土材料不同的是, 活性粉末混凝土中不含粗骨料。因此对活性粉末混凝土构件无要求钢筋净距大于最大骨料直径。

3. 为保证活性粉末混凝土中的钢纤维在振捣过程中不受纵向钢筋阻碍而分布均匀, 因此瑞士规范规定纵向钢筋净距不应小于钢纤维的长度。考虑到目前工程中采用的短细钢纤维的长度一般为 20mm 左右, 故为应用方便, 规定钢筋净距不应小于钢纤维长度且不小于 20mm。

6.2.2 内掺钢纤维的活性粉末混凝土, 其内的钢纤维可部分替代箍筋的作用。法国规范提出可采用无箍筋梁。但基于本规程第 4.2.4 款的条文说明, 本规程规定不允许采用无箍筋梁, 并应满足箍筋配置的最低要求。由于目前活性粉末混凝土的工程应用经验不足, 因此其构造要求偏安全地参照现行普通混凝土结构设计规范的相应规定。

6.2.4 柱宜采用大直径钢筋作为受力钢筋，配置一定量的纵向钢筋用以保证柱的延性。为防止配筋过多的柱在长期受压混凝土徐变后的卸载、钢筋弹性回复会在柱中引起横裂，故应对柱最大配筋率作出限制。

6.3 最小配筋率

6.3.1 纵向受力钢筋最小配筋率

受弯构件的最小配筋率是根据活性粉末混凝土受弯构件截面的抗弯承载能力应不小于截面开裂弯矩的原则确定的，由于不考虑活性粉末混凝土抗拉强度的作用，因此其纵向受拉钢筋的最小配筋与普通混凝土结构的相同。

6.3.2 最小配箍率

1. 基于本规程第 4.2.4 款的条文说明，本规程规定不允许采用无箍筋梁，且箍筋应满足最小配箍率要求。本条给出活性粉末混凝土受弯构件内抗剪箍筋最小配箍率的要求。

2. 对于混凝土受弯构件，最小配箍用量的确定受最大斜裂缝宽度影响。配置最小配箍用量的一般受弯构件受剪破坏时的极限剪力 V_n 应略大于开裂剪力 V_{cr} 。

本规程取 $V_n = V_{cr}$ 确定最小配箍用量。

活性粉末混凝土受弯构件初裂剪力 V_{cr} ：

$$V_{cr} = f_{t0} b h_0 \quad (\text{附 6.4.2-1})$$

不考虑轴向力作用斜截面受剪承载力 V_n 为：

$$V_n \leq 0.6 f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (\text{附 6.4.2-2})$$

由 $V_n = V_{cr}$ ，可得：

$$0.6 f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 = f_{t0} b h_0 \quad (\text{附 6.4.2-3})$$

可得：

$$\rho_{sv, \min} \approx 0.4 \frac{f_{t0}}{f_{yv}} (1 - 1.5 \beta_v \lambda_f) \quad (\text{附 6.4.2-4})$$

由式（附 6.4.2-4）可知，活性粉末混凝土受弯构件最小配箍率与活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值、钢筋抗拉设计值、纤维掺量及类型相关。

钢纤维体积掺量为 1.5%（ $l_f/d_f=60$ ）时，最小配箍率为 0.06%。当钢纤维体积掺量为 2.0%（ $l_f/d_f=65$ ）时，按式（附 6.4.2-4）计算得到的最小配箍率为负数，表明此时可以不配置箍筋。由于缺乏足够的试验数据，需慎重考虑活性粉末混凝土梁内钢纤维对抗剪承载能力的贡献，此外，活性粉末混凝土构件一般设计为薄壁构件，在抗剪钢筋满足构造要求的情况下，最小配箍率一般不控制设计。因此，在试验数据不充分的情况下，本规程综合《混凝土结构设计规范》GB50010 及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范》JTG D62 中的有关规定偏安全的给定一个最小配箍率为 0.12%。

综上，活性粉末混凝土受弯构件内抗剪箍筋的配箍率 ρ_{svmin} 不应小于

$$\frac{0.4f_{t0}}{f_{yv}}(1-1.5\beta_v\lambda_f) \text{ 及 } 0.12\% \text{ 的较大值。}$$

6.4 钢筋的锚固

已有研究结果表明：钢筋与活性粉末混凝土的粘结性能优于钢筋与普通混凝土间的粘结性能，并提出活性粉末混凝土构件内锚固钢筋的外形系数为 0.16。当换算成活性粉末混凝土抗拉强度设计值后，活性粉末混凝土构件内锚固钢筋的外形系数为 0.11，该值小于《混凝土结构设计规范》GB50010 中的取值 0.14。由于试验中仅对 HRB335 钢筋进行了粘结性能研究，使试验样本和试验数据有限，因此本规程中锚固钢筋的外形系数仍依据《混凝土结构设计规范》GB50010 中的取值规定。

6.5 钢筋的接头

6.5.2 钢筋绑扎接头的搭接长度

1. 纵向受拉钢筋搭接长度计算公式依据《混凝土结构设计规范》GB50010 制定。

2. 已有研究结果表明 HRB400 钢筋的搭接长度为 $7.5d$ ，小于 $\zeta_l \zeta_a l_{ab} = 17.4d$ ，

由此表明本规程 6.5.2 条规定的搭接长度能保证钢筋接头的传力性能。

6.6 结构构件的基本规定

由于板和梁的最小厚度是依据结构安全性和舒适度（刚度）要求确定的，而活性粉末混凝土的弹性模量比普通混凝土的约高 20%，因此活性粉末混凝土板和梁的最小厚度可取为普通混凝土构件的 0.9。

配筋活性粉末混凝土构件一般为薄壁构件，因此在满足最小保护层厚度、钢筋布置要求的条件下，配筋活性粉末混凝土板不仅要满足结构安全性和刚度要求，还应满足局部稳定的要求。

7 抗震设计及构造

7.1 一般规定

活性粉末混凝土构件的抗震性能取决于活性粉末混凝土材料和钢材的性能。目前国内外研究成果表明活性粉末混凝土的变形性能（极限压应变约为 $4143\mu\varepsilon \sim 5270\mu\varepsilon$ ，极限轴拉应变约为 $1000 \sim 2000\mu\varepsilon$ ）均优于普通混凝土和高强混凝土，在配筋条件相同时，活性粉末混凝土构件的延性和耗能能力均优于普通混凝土构件和高强混凝土构件，因此其抗震性能也会更好。由于活性粉末混凝土结构的抗震性能目前研究尚不充分，因此，本规程基本按照《混凝土结构设计规范》GB50010、《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01 及《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 的相关规定提出活性粉末混凝土构件的抗震构造要求和参数取值，无疑偏于安全。

7.2 建筑结构的抗震设计

7.2.9 活性粉末混凝土柱最小配筋率

由于缺乏相应的依据，活性粉末混凝土柱全部纵向钢筋最小配筋百分率取《混凝土结构设计规范》GB50010 中 C80 对应的值。在配筋条件相同时，活性粉末混凝土构件的延性和耗能能力均优于普通的 C80 混凝土构件，因此活性粉末混凝土柱全部纵向钢筋最小配筋百分率取《混凝土结构设计规范》GB50010 中 C80 对应的值应偏于安全。

7.2.10 一、二、三、四级抗震等级的各类结构的框架柱、框支柱的轴压比

表 7.2.9 和表 7.2.10 是依据《混凝土结构设计规范》GB 50010 中有关规定给出的。活性粉末混凝土柱的抗震性能优于普通混凝土 C80，表中最小配筋百分率和轴压比与《混凝土设计规范》GB 50010 中对应 C80 混凝土的取值一致，偏于安全。

8 施 工

8.1 一般规定

8.1.1 活性粉末混凝土的施工要求严于常规的普通混凝土，因此，在符合《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 等的有关规定的情况下，还需要符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 及本规程的相关要求。

8.1.2 活性粉末混凝土施工技术方案可分为两个方面：一方面是搅拌站的生产技术方案（涉及原材料、活性粉末混凝土的制备及运输等），进行生产质量控制；另一方面是工程现场的施工技术方案（涉及浇筑、成型、养护及其相关的工艺及技术等），进行现场施工质量控制。这两方面也可以合为一体。

8.1.3 一般情况下，活性粉末混凝土应优先采用具有自动控制系统的混凝土搅拌楼集中搅拌的方式生产。在野外工程使用少量活性粉末混凝土时，可采用现场搅拌方式生产，但需要严格控制原材料的计量精度，不得使用自落式混凝土搅拌机生产。

8.1.4 一些公司将活性粉末混凝土所需的各种干燥的固体原料在工厂预拌为固态混合物。活性粉末混凝土的组分多，用量相差大，采用预拌方式可保证一些微量组分和纤维均匀混合，避免纤维结团；同时简化了生产现场的生产过程控制难度。预拌好的活性粉末混凝土固体组分采用密闭罐车或大袋包装运输到施工现场或预拌混凝土生产场所，加入水与减水剂等液体组分，拌制成拌合物。活性粉末混凝土的各种固体组分的密度与形状差异很大，受到外力作用时易离析。在活性粉末混凝土的预拌与运输过程中应采取必要措施，保证混合物不离析。

8.1.5 在低温环境中，胶凝材料的水化反应速率降低，影响其性能发展速率。所以活性粉末混凝土的搅拌、浇筑及构件静停都应在 10℃ 以上的环境中完成。

8.1.6 活性粉末混凝土的水胶比低，其性能受用水量的变化极其敏感。因此，在运输及浇筑过程中往活性粉末混凝土拌合物中加水会明显影响其强度，同时会对其耐久性和其他力学性能产生影响，对工程质量具有很大危害。

8.2 配合比

8.2.1 一般规定

有关活性粉末混凝土配合比的设计参照《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的相关规定给出。

为了获得所需要的性能，活性粉末混凝土的组成材料应该形成连续的颗粒级配。如何获得这样的颗粒级配，并且具有很好的胶凝性能，尚没有一个成熟的配合比设计方法。所以在 7.1 一般规定中，只是定性地提出了三条要求。

8.2.1.1 这是一个原则性的规定。

8.2.1.2 活性粉末混凝土的各种原材料的密度相差很大，所以应用体积法进行计算。基于现在常用的胶凝材料的胶凝活性，使用 0.22 的水胶比，可以配制出 100MPa 的混凝土，继续增大水胶比，混凝土强度将低于 100MPa。所以规定活性粉末混凝土的水胶比不得大于 0.22。胶凝材料用量超出 1000kg/m³ 后，活性粉末混凝土的强度并不随之增加，胶凝材料的效率下降，所制备的混凝土的收缩会增大，成本也增加，使得混凝土的价性比下降。

8.2.1.3 为了增加混凝土的密实性所增加的粉体量，不一定全部是胶凝材料，可以使用石英粉等惰性粉体来填充空隙。在根据混凝土的强度要求确定了水胶比和胶凝材料用量以后，如需调整拌合物的粘聚性和流动性，只能调整减水剂的种类和掺量来改变其减水率。

8.2.2 配合比设计

该条参照《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的相关规定给出了活性粉末混凝土的配制强度要求。

为了保证配制的混凝土的性能满足使用要求，在确定活性粉末混凝土的配制强度时，需要高于设计所选定的混凝土等级对应的强度值。因活性粉末混凝土的强度在 100-200MPa 之间，两个相邻等级间相差 20MPa。规定的强度富裕系数不应使配制强度超出到上一等级。所以强度富裕系数取 1.1。这样，即使是最高等级，其配制强度也只提高 20MPa。

8.2.2.2 活性粉末混凝土的水胶比、胶凝材料用量和钢纤维掺量的要求。

1. 该条强调了活性粉末混凝土的水胶比、胶凝材料用量和钢纤维掺量应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的相关规定。

2. 在实际使用时，应根据所使用的胶凝材料的活性和颗粒粒度分布，确定胶凝材料中水泥与各种辅助性胶凝材料的比例，以及胶凝材料总量。

钢纤维的用量对于抗拉强度的影响大于抗压强度。应根据抗拉强度的要求来确定钢纤维的掺量。

8.2.2.3 硅灰和水泥用量

1. 该条参照《活性粉末混凝土》GB/T 31387 规定了活性粉末混凝土中硅灰、水泥用量的限值。

2. 硅灰是最细的粉体材料，且活性很高，在填充微细空隙和增加水化产物，提高浆体致密度方面有重要作用。所以规定硅灰用量不宜小于胶凝材料用量的 10%。虽然有研究成果显示，使用 300kg/m^3 的水泥，加上大量辅助性胶凝材料，也可以配制出合格的活性粉末混凝土。但是为了保证适宜的凝结时间和足够的早期强度发展速率，本标准建议水泥用量不宜小于胶凝材料用量的 50%。

8.2.2.4 本条给出了活性粉末混凝土中骨料体积及骨料的总用量的计算方法。

8.2.2.5 骨料各个粒级的相对比例应根据最密实堆积理论，按照各粒级骨料的颗粒粒度分布，经计算得到。理论计算得到的结果应经过实际的混凝土试配检验，然后确定最终的理论配合比。如果单纯使用胶凝材料，其粉体量尚不足以填充所有空隙时，需要使用石英粉等惰性粉体材料，用于填充空隙，增加密实度。

8.2.2.6 混凝土配合比设计完成后需要经过试配，验证混凝土的性能；根据所配制的混凝土性能与设计预期性能之间的差异进行混凝土配合比调整，并最终确定生产所用混凝土配合比。混凝土配合比调整的原则与过程如下：

（1）原材料品质的变化对于活性粉末混凝土的性能影响很大。所以混凝土试配时应采用工程实际使用的原材料。为了保证搅拌的均匀性，规定了每盘混凝土的最小搅拌量不宜小于 15L。

(2) 试配时，首先应进行试拌，检查拌合物工作性指标。活性粉末混凝土没有粗骨料，水胶比低，其拌合物黏性高，因此流动慢，流动时间长，流动度大，与普通混凝土的工作性表现不一样。使用坍落扩展法测定活性粉末混凝土的工作性时，应等待拌合物流动完全停止后才测量。活性粉末混凝土的工作性调整方法与普通混凝土类似。当试拌所得拌合物的工作性不能满足要求时，应在水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下，调整胶凝材料用量、外加剂用量或不同粒级砂的体积分数等，直到符合要求为止。由于活性粉末混凝土的组成材料复杂，工作性的影响因素多，所以本标准没有提出很具体的调整方法，只给出了一个调整原则。根据活性粉末混凝土的试拌结果提出混凝土强度试验用的基准配合比。

(3) 混凝土强度试验时应至少采用三个不同的配合比。其中一个应为 8.2.2.6 中

(4) 确定的基准配合比，另外两个配合比的水胶比宜较基准配合比分别增加和减少 0.01。活性粉末混凝土的水胶比变动幅度小，因为活性粉末混凝土的水胶比很低，微小变化对于力学性能就有明显影响。活性粉末混凝土的水胶比变化 0.02，就可能相差一个等级。在使用不同的配合比时，其用水量与基准配合比相同，仅变化胶凝材料用量。为了保持工作性和单位体积基本不变，可使砂的体积分数分别增加或减少 1%。

(5) 制作混凝土强度试验试件时，应验证拌合物工作性能是否达到设计要求，并以该结果代表相应配合比的混凝土拌合物性能指标；

(6) 混凝土强度试验时每种配合比应至少制作一组（三块）试件，按规定的条件养护到要求的龄期试压。所得试验结果按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 规定的方法进行处理。如有耐久性要求时，还应制作相应的试件并检测相应的指标。有关活性粉末混凝土的耐久性能要求应依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387 有关规定确定。

(7) 活性粉末混凝土的基准配合比是由经验决定的，原材料情况对于混凝土的性能影响很大，所以需要根据采用实际生产使用的原材料试配的结果对基准配合比进行调整，由此确定的配合比为实际生产所用的设计配合比。

(8) 对于应用条件特殊的工程，宜对确定的活性粉末混凝土的设计配合比进行模拟试验，以验证混凝土的性能满足工程要求。

8.3 原材料贮存

8.3.1 活性粉末混凝土所用的原材料品种多，一些原材料的外观较为相似，为了避免混乱，各种原材料应分仓储存，并应有明显的标识。

8.3.2 一般混凝土搅拌站都备有两种水泥，所以水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别标识和储存。现在水泥的存储期短，散热条件差，运输到混凝土搅拌站的水泥的温度很高，甚至达到 100℃ 以上。水泥温度高，对于胶凝材料与外加剂的相容性有很大的不利影响，还影响水泥的水化特性。所以需要尽量降低使用时的水泥温度。因此规定贮存的水泥用于生产时的温度不宜高于 60℃。受潮、结块及污染的水泥的性能会降低，不得使用。在储存过程中，水泥会吸收大气中的水分缓慢水化，使性能下降。活性粉末混凝土对水泥活性要求更高，储存期超过 3 个月的水泥已不能保证其性能，不应使用。

矿物掺合料的外观与水泥类似，曾发生过矿物掺合料与水泥混杂的工程事故。因此矿物掺合料应按品种、质量等级和产地分别标识和储存，不应与水泥等其他粉状料混杂，矿物掺合料受潮后将结块，影响使用。

纤维一般为袋装，钢纤维受潮后可能锈蚀，应按品种、规格和生产厂家分别标识和储存，并应防潮、防锈。

8.4 计量

8.4.1 活性粉末混凝土生产对原材料计量要求较高，尤其是对水和外加剂的计量要求高。采用电子计量设备有利于保证计量精度，保证活性粉末混凝土生产质量。计量设备的精度应符合现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 的规定，同时参照《活性粉末混凝土》GB/T 31387 有关规定明确混凝土生产单位每月应对电子计量设备至少自检一次。

8.4.2 为保证活性粉末混凝土的质量原材料的计量允许偏差应严格控制。参照《活性粉末混凝土》GB/T 31387 有关规定给出了原材料的计量允许偏差。

8.4.3 活性粉末混凝土性能受水胶比影响非常敏感，如果骨料的含水率改变而称量不变，对水胶比和用水量均会产生影响，从而影响活性粉末混凝土的性能。

8.5 搅拌

8.5.1 活性粉末混凝土的原材料种类多，用量相差大，用水量小，不易搅拌均匀，应使用强制式搅拌机。

8.5.2 现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 对主要参数系列、搅拌设备、供料设备、供料系统、贮料仓、配料装置、混凝土贮斗、安全环保和其他方面做了全面细致的规定，对保证活性粉末混凝土生产质量十分重要。

8.5.3 现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 关于同一盘混凝土的搅拌匀质性的规定有两点：①、混凝土中砂浆密度两次测值的相对误差不应大于 0.8%；②、混凝土稠度两次测值的差值不应大于混凝土拌合物稠度允许偏差的绝对值。

8.5.4 依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387 有关规定，活性粉末混凝土搅拌时正确的投料顺序宜为先投入骨料和钢纤维，稍微搅拌使纤维分散；然后投入水泥、矿物掺合料和石英粉等粉状物料，所有固体物料加入后，搅拌 4min，使固体物料分散均匀。然后加水 and 外加剂，再搅拌 4min 以上，使拌合物充分均匀。或投入在工厂预先拌合均匀的活性粉末混凝土固态混合物，加水 and 外加剂，搅拌 4min 以上。在混凝土搅拌楼上掺加钢纤维时，混凝土搅拌机的下料装置上应有防止钢纤维结团的装置。

8.5.5 活性粉末混凝土拌合物的出机工作度应根据施工方式与运输距离而定。如果在工厂生产制品，因运输距离短，可采用强力振捣，拌合物的流动性可低一些；如果在商品混凝土搅拌站生产，运输到施工现场浇筑，则应使拌合物的流动性较大。

8.6 运输

8.6.1 活性粉末混凝土拌合物可采用混凝土罐车或翻斗车运输。但翻斗车运输时没有搅拌措施，拌合物易离析。依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387 有关规定，翻斗车应仅限于短时运送坍落度小于 80mm 的混凝土拌合物。

8.6.2 搅拌罐内积水或者装料后向搅拌罐内的活性粉末混凝土加水，会使活性粉末混凝土的配合比欠准确。

8.6.3 混凝土拌合物从搅拌机卸入搅拌运输车至卸料时的时间不宜长于 90min。

运输时间过长，混凝土拌合物的流动性降低过多，难于浇筑密实。同一构件或同一工程部位的混凝土应连续浇筑，避免产生冷缝。

8.7 浇筑

8.7.1 活性粉末混凝土浇筑时对模板的压力大，浇筑时易漏浆及涨模，因此，支模是活性粉末混凝土施工的关键环节之一。天气炎热会金属模板温度升高，进而影响活性粉末混凝土的性能。

8.7.2 活性粉末混凝土分层浇筑时，分层厚度不宜过大和层间浇筑间隔时间不宜过长，有利于保证每层混凝土浇筑质量和整体结构的匀质性。依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387 有关规定，活性粉末混凝土分层浇筑时每层的厚度不应大于 300mm。

8.7.3 机械振捣易使活性粉末混凝土均匀和密实，但振动时间过长易使混凝土产生离析和分层。钢纤维露出混凝土表面不利于安全，也不利于质量，应该避免。对于竖向结构，可将模板修成圆角，采用模板附着式振动器进行振动；对于上表面积较大的平面结构，可采用平板式振动器进行振动，再用表面带凸棱的金属圆辊将竖起的钢纤维压下，然后用金属圆辊将表面滚压平整，待活性粉末混凝土表面无泌水时，可用金属抹刀抹平。

8.7.4 由于钢纤维材质密度大，所以钢纤维混凝土拌合物浇筑倾落时自由高度过高易导致离析，应予以注意。依据《钢纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 相关规定，活性粉末混凝土拌合物浇筑倾落的自由高度不应超过 1.5m。

8.7.5 活性粉末混凝土的胶凝材料用量高，水化速率快。即使结构体积不大，其水化热也较大。浇筑后温升较高，温控尤为重要。浇筑大体积活性粉末混凝土时，应采取温控措施，温控应符合现行国家标准《大体积混凝土施工规程》GB 50496 的规定。

8.8 养护

活性粉末混凝土的养护与普通混凝土不同。养护方式是否合理对于活性粉末混凝土的性能发展有明显影响。活性粉末混凝土的胶凝材料用量高，水化速率快。即使结构体积不大，其水化热也较大。结构中的活性粉末混凝土表现与实验室内

成型的试件很不一样。大量的活性粉末混凝土用于工厂化生产的预制制品。因活性粉末混凝土的水胶比低，对流动性要求高，在工厂生产易于控制质量。在工厂中可以采用蒸养工艺生产，较高的蒸养温度可以促进胶凝材料的水化硬化过程，获得较高的强度发展速率，使最终强度较高。对于一些非标准的结构，也可使用现场浇筑的活性粉末混凝土。此时养护条件较差，其性能低于预制的活性粉末混凝土制品。

8.8.1 对于工厂预制活性粉末混凝土，成型后应进行蒸汽养护，以加快生产进度。蒸汽养护过程有两种，一种养护过程分为静停、初养、终养及自然养护四个阶段。另一种养护过程分为静停、升温养护及自然养护三个过程。蒸汽养护温度宜采用自动控制系统来精确控制。蒸汽养护的相关规定依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的养护规定，并参照国外规范活性粉末混凝土的养护方式确定。

8.8.2 现场浇筑的活性粉末混凝土可依据对其性能的要求高低，采用常温保湿养护及现场蒸汽养护。

8.8.3 现场浇筑的活性粉末混凝土浇筑完成后，应尽早覆盖，保湿养护 7d 以上，以尽量提高其中的胶凝材料的水化程度。现场养护时需采取必要的措施防止活性粉末混凝土构件出现收缩裂缝。覆盖养生薄膜进行养护时，不宜损坏活性粉末混凝土。保湿养护过程中应加强巡查力度，发现有缺水部位时，应及时补水养护。

8.8.4 该条对现场蒸汽养护进行了规定。现场蒸汽养护对蒸汽锅炉、蒸汽管道和蒸汽养护棚等设施要求较高，且应通过传感器调整蒸汽量的大小以实现养护温度及湿度变化的控制。

8.9 预制构件施工

8.9.1 ~8.9.4 依据《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规范》CJJ-T111、《预制装配整体式钢筋混凝土结构技术规范》SJG18、《装配式混凝土结构技术规范》JGJ1 给出了预制构件施工的一般性规定。

8.9.5 本条依据《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规范》CJJ-T111 给出了节段预制拼接构件的模板要求。主要用于短线预制的节段预制构件。

9 施工质量验收

9.1 一般规定

9.1.1 规定了活性粉末混凝土质量验收的总体原则。

9.1.2 活性粉末混凝土质量检验分为出厂检验和交货检验。混凝土是一种特殊的商品，出厂时仅为半成品；只有浇筑成结构或制品，凝结硬化后才成为成品。一些检验项目耗时很长，不能及时获得结果。混凝土的质量检验有别于一般商品。出厂检验的取样和试验工作应执行见证取样送检制度，评价生产过程的平稳性。考察最终产品是否合格。对于一些小用户，不具备试验条件与人员的技术资质时，供需双方可协商确定和委托有检验资质的单位承担，并应在合同中予以明确。

9.1.3 交货检验仅检测活性粉末混凝土的立方体抗压强度。这个试验比较简单，一般的质检站都可以进行。活性粉末混凝土其他性能应在配合比设计阶段进行检测。立方体抗压强度作为交货检验的必检项目，也是活性粉末混凝土质量验收的依据。

9.2 原材料质量验收

9.2.1 原材料质量文件齐全方可进场。

9.2.1 原材料进场后和施工过程中，由监理进行抽检，可有效控制工程使用的原材料的质量。

9.2.3 本条规定了活性粉末混凝土原材料的抽检项目，对于钢纤维抽检项目中抗拉强度、弯折性能、尺寸偏差和杂质含量的检测方法可依据《活性粉末混凝土》GB/T 31387 确定。

9.2.4 本条规定了活性粉末混凝土原材料的检验批量，由于活性粉末混凝土的骨料为石英砂和石英粉，粒径较小，本规程按矿物拌合物的同样要求规定骨料的检验批量。

9.2.5 本条规定了活性粉末混凝土原材料的质量评定依据。

9.3 拌合物质量验收

9.3.1 精确计量是活性粉末混凝土质量控制的重要保证。本条规定了计量仪器的标定及检查频率，以确保计量的精准性。

9.3.2 活性粉末混凝土拌合物质量控制使施工质量控制的关键环节之一。本条综合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 及《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 规定了活性粉末混凝土的检验项目及其检验地点。

9.3.3 本条规定了活性粉末混凝土拌合物有关性能检验的频率。

9.3.4 本条规定了活性粉末混凝土拌合物性能的评定方法。表征活性粉末混凝土拌合物性能的参数与普通混凝土相同，都应符合《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定。活性粉末混凝土中钢纤维的体积掺量有关水洗法的详细规定可依据《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 中相关要求确定。

9.4 硬化活性粉末混凝土性能检验

9.4.1 精确计量是活性粉末混凝土质量控制的重要保证。本条规定了计量仪器

9.4.2 目前活性粉末混凝土的生产量不大，为了减小产品质量的波动，检验批划分得较小。每 50m^3 活性粉末混凝土检验一次抗压强度与抗折强度。当批量不到 50m^3 时，按 50m^3 计算。如果每天少量生产，则每班次（8 小时）应至少取样一次。每次取样应至少留置两组试件，分别用于确定拆模强度和最终质量评定。活性粉末混凝土试件应在浇筑地点随机抽样制作。

9.4.3 工厂预制的活性粉末混凝土采用蒸养工艺养护，在蒸养结束后，胶凝材料的水化程度已经很高，后期性能变化较小。蒸养条件对于混凝土的性能影响很大。所以对于工厂预制的活性粉末混凝土，应采用同条件养护的试件，在成型后 7d 时进行试验。现场浇筑的活性粉末混凝土是现场浇筑，不可能采用蒸汽养护。对于常温条件养护的混凝土，其性能发展较为缓慢，需要经过较长时间，结构与性能才达到稳定。实体结构的尺寸肯定大于试件，内部温升高于标准养护条件。在实体结构中的活性粉末混凝土的水化程度高于标准条件养护的试件，相应强度也较高。采用标准条件（环境温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于 95%）养护的试件，在成型后 28d 时进行试验，所得性能一般低于实体结构混凝土的性能。这样的规定是偏于安全的。

9.4.4 活性粉末混凝土的性能检验方法大多与普通混凝土类似。由于活性粉末

混凝土的强度高，如果使用 150mm×150mm×150mm 立方体试件，现在一般质检站所使用的 3000kN 试验机的能力不够，不能测得其破坏荷载。所以规定活性粉末混凝土的立方体抗压强度采用 100mm×100mm×100mm 立方体试件。即使混凝土强度达到 250MPa，现有质检站所使用的 3000kN 试验机的能力也是足够的。由于破坏荷载大，为了节省试验时间，规定采用较高加载速率。

9.4.5 表征活性粉末混凝土的长期性能和耐久性能的参数，如抗冻性、抗碳化性、抗渗性、抗硫酸盐侵蚀性等的试验方法与普通混凝土相同，都应符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082 的规定。活性粉末混凝土中含有钢纤维，采用电测法评价其渗透性时，钢纤维可能造成短路，影响测试结果。所以采用电量法测试活性粉末混凝土的抗氯离子渗透性时，须使用同样的配合比，但不应掺加钢纤维等导电介质。

9.5 活性粉末混凝土工程验收

9.5.1 活性粉末混凝土可用于建筑、公路桥梁及其他建筑行业，工程验收应执行相关国家和行业标准。

活性粉末混凝土工程质量应满足现行国家及行业标准和施工项目设计文件提出的各项要求。混凝土结构施工的验收综合性强、牵涉面广，不仅有原材料方面的内容（如水泥、钢筋等），尚有半成品、成品方面的内容。也与其他施工技术和质量评定方面的标准密切相关，因此，凡本规程有规定者，应遵照执行，凡本规程无规定者，尚应按照有关现行标准的规定执行。

9.5.2 由于活性粉末混凝土尚未大规模推广应用，经验尚待积累，本规程未涉及检验项目的对其质量验收时可依据设计文件或合同规定执行。

当有不合格的项目出现时，应组织专家进行专项评审并提出处理意见，专家意见作为验收文件的一部分备案。