

UDC

中华人民共和国行业标准



P

JGJ/T 465-2019
备案号 J 2699-2019

钢纤维混凝土结构设计标准

Standard for design of steel fiber reinforced
concrete structures

2019-06-18 发布

2020-02-01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部 发布

中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

2019 年 第 162 号

住房和城乡建设部关于发布行业标准 《钢纤维混凝土结构设计标准》的公告

现批准《钢纤维混凝土结构设计标准》为行业标准，编号为 JGJ/T 465 - 2019，自 2020 年 2 月 1 日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2019 年 6 月 18 日

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2015 年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》（建标〔2014〕189 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准的主要技术内容是：1. 总则；2. 术语和符号；3. 基本规定；4. 材料；5. 承载能力极限状态计算；6. 正常使用极限状态验算；7. 局部钢纤维混凝土结构构件；8. 构造规定；9. 结构构件抗震设计；10. 工业建筑地面；11. 城镇道路与桥梁桥面；12. 城市隧道、边坡支护、建筑结构修复与加固工程。

本标准由住房和城乡建设部负责管理，由郑州大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送郑州大学（地址：河南省郑州市中原区科学大道 100 号，邮编 450001）。

本标准主编单位：郑州大学

本标准参编单位：华北水利水电大学

大连理工大学

西南交通大学

武汉理工大学

武汉大学

东南大学

河南工程学院

中国建筑科学研究院有限公司

中国建筑第七工程局有限公司

贝卡尔特应用材料科技（上海）有限公司

上海哈瑞克斯钢纤维科技有限公司
天津恒沣栩翔金属新材料股份有限公司

玉田县致泰钢纤维制造有限公司

本标准主要起草人员：高丹盈 朱海堂 赵顺波 丁一宁

李志业 谷 倩 卢亦焱 孙 伟

韦庆东 焦安亮 孙 斌 杨 政

王宏君 朱秀艳 赵 军 李 杉

李晓克 田 水 王志杰 汤寄予

冯 虎

本标准主要审查人员：郑文忠 阎培渝 薛伟辰 卫 军

田稳苓 王恒栋 杜永峰 王 斌

巴松涛

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	6
3.1	一般规定	6
3.2	极限状态设计	6
3.3	耐久性设计	7
4	材料	8
4.1	钢纤维	8
4.2	钢纤维混凝土	8
4.3	钢筋	11
5	承载力极限状态计算	12
5.1	一般规定	12
5.2	正截面承载力计算	12
5.3	斜截面承载力计算	19
5.4	扭曲截面承载力计算	22
5.5	受冲切承载力计算	22
5.6	局部受压承载力计算	23
5.7	疲劳验算	26
6	正常使用极限状态验算	27
6.1	裂缝控制验算	27
6.2	受弯构件挠度验算	29
7	局部钢纤维混凝土结构构件	31
7.1	叠合式受弯构件	31

7.2	局部钢纤维混凝土深梁	33
7.3	牛腿	34
7.4	桩基承台	35
8	构造规定	40
9	结构构件抗震设计	42
9.1	一般规定	42
9.2	框架梁柱节点	42
9.3	剪力墙及连梁	45
9.4	板柱节点	46
10	工业建筑地面	48
10.1	一般规定	48
10.2	板厚设计	48
10.3	构造规定	50
11	城镇道路与桥梁桥面	54
11.1	一般规定	54
11.2	城镇道路路面	54
11.3	层布式钢纤维混凝土复合路面	57
11.4	城镇桥梁桥面	58
12	城市隧道、边坡支护、建筑结构修复与加固工程	60
12.1	一般规定	60
12.2	城市隧道支护	60
12.3	边坡支护工程	63
12.4	修补和加固工程	64
附录 A	钢纤维混凝土工业地面设计计算	68
附录 B	钢纤维混凝土残余弯拉强度测试方法	72
	本标准用词说明	78
	引用标准名录	79
	附：条文说明	81

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	6
3.1	General Requirements	6
3.2	Limit State Design	6
3.3	Durability Requirements	7
4	Materials	8
4.1	Steel Fiber	8
4.2	Steel Fiber Reinforced Concrete	8
4.3	Steel Reinforcement	11
5	Ultimate Limit State Design	12
5.1	General Requirements	12
5.2	Calculation of Flexural and Axial Capacity	12
5.3	Calculation of Shear Capacity	19
5.4	Calculation of Torsional Capacity	22
5.5	Calculation of Punching Shear Capacity	22
5.6	Calculation of Local Compression Capacity	23
5.7	Checking of Fatigue	26
6	Checking of Serviceability Limit States	27
6.1	Checking of Cracks	27
6.2	Checking of Deflection of Flexural Members	29
7	Steel Fiber Reinforced and Partial Reinforced Concrete Structural Members	31

7.1	Composite Flexural Members	31
7.2	Partially Steel Fiber Reinforced Concrete Deep Beams	33
7.3	Brackets	34
7.4	Pile Caps	35
8	Detailing Requirements	40
9	Seismic Design of Steel Fiber Reinforced Concrete	
	Structural Members	42
9.1	General Requirements	42
9.2	Joints of Frame	42
9.3	Shear Walls and Coupling Beams	45
9.4	Slab-Column Joints	46
10	Steel Fiber Reinforced Industrial Building Ground	48
10.1	General Requirements	48
10.2	Design of Ground Slab Thickness	48
10.3	Detailing of Requirements	50
11	Urban Road and Bridge Structures with Steel	
	Fiber Reinforced Concrete	54
11.1	General Requirements	54
11.2	Urban Road Pavement	54
11.3	Composite Pavement	57
11.4	Bridge Deck	58
12	Urban Tunnel, Slope Supporting, Repairing and	
	Strengthening Projects	60
12.1	General Requirements	60
12.2	Urban Tunnel Supporting with Steel Fiber	
	Reinforced Concrete	60
12.3	Slope Supporting Projects with Steel Fiber	
	Reinforced Shotcrete	63
12.4	Repairing and Strengthening Projects	64
Appendix A Design and Calculation of Steel Fiber		

Reinforced Industrial Construction Floor	68
Appendix B Test Method for Residual Flexural Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete	72
Explanation of Wording in This Standard	78
List of Quoted Standards	79
Addition; Explanation of Provisions	81

1 总 则

1.0.1 为规范钢纤维混凝土结构设计，做到安全适用、技术先进、经济合理，保证质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于钢纤维混凝土结构的设计，不适用于钢纤维轻骨料混凝土及特种钢纤维混凝土结构的设计。

1.0.3 钢纤维混凝土结构的设计除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 钢纤维 steel fiber

钢材经加工制成的短纤维。

2.1.2 钢纤维长径比 aspect ratio of steel fiber

钢纤维长度与直径或等效直径的比值。

2.1.3 钢纤维体积率 volume fraction of steel fiber

钢纤维占钢纤维混凝土的体积百分数。

2.1.4 钢纤维混凝土 steel fiber reinforced concrete

掺加适量、均匀分布钢纤维的混凝土。

2.1.5 喷射钢纤维混凝土 steel fiber reinforced shotcrete

借助于空气压力以高速喷射至受喷面上而形成的、散布有不连续钢纤维的混凝土。

2.1.6 钢纤维混凝土结构 steel fiber reinforced concrete structure

以钢纤维混凝土为主制成的结构，包括无筋钢纤维混凝土结构、钢筋钢纤维混凝土结构和预应力钢纤维混凝土结构。

2.1.7 钢筋钢纤维混凝土结构 steel fiber reinforced concrete structure with rebars

配有受力钢筋的钢纤维混凝土结构。

2.1.8 预应力钢纤维混凝土结构 steel fiber reinforced concrete structure with prestressed rebars

配置预应力筋并通过张拉或其他方法施加预应力的钢纤维混凝土结构。

2.1.9 钢纤维混凝土叠合式受弯构件 composite flexural member of steel fiber reinforced concrete

预制构件采用钢筋钢纤维混凝土、现浇叠合层采用钢筋钢纤维混凝土或钢筋混凝土制作的叠合受弯构件。

2.1.10 钢纤维部分增强钢筋混凝土构件 reinforced concrete member partially strengthened with steel fibers

在构件受拉区或剪拉区配置钢纤维混凝土而其他区域为普通混凝土的钢筋混凝土构件。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能

CF30——立方体抗压强度标准值为 30N/mm^2 的钢纤维混凝土强度等级；

$f_{\text{fck}}、f_{\text{fc}}$ ——钢纤维混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

$f_{\text{f tk}}、f_{\text{ft}}$ ——钢纤维混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

$f_{\text{tk}}、f_{\text{t}}$ ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

$f_{\text{f lm}}$ ——钢纤维混凝土弯拉强度标准值；

f_{lmk} ——混凝土弯拉强度标准值；

f_{ftu} ——钢筋钢纤维混凝土构件达到正截面承载力极限状态时，受拉区等效矩形应力图形的钢纤维混凝土抗拉强度；

$f_{\text{y}}、f_{\text{y}}'$ ——纵向普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值；

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值；

$f_{\text{ctk},\text{L}}^I$ ——钢纤维混凝土比例极限弯拉强度标准值；

f_{R} ——钢纤维混凝土残余弯拉强度设计值；

R_{e} ——钢纤维混凝土弯曲韧度比。

2.2.2 作用和作用效应

F_{ftu} ——钢纤维混凝土局部受压承载力；

F_{lu} ——混凝土局部受压承载力；

F_{fpu} ——钢筋钢纤维混凝土板受冲切承载力；

F_{pu} ——钢筋混凝土板受冲切承载力；

M_{lu} ——钢筋钢纤维混凝土构件正截面受弯承载力；

- N_{fu} ——钢筋钢纤维混凝土受压构件正截面轴向受压承载力；
- N_{ftu} ——钢筋钢纤维混凝土受拉构件正截面轴向受拉承载力；
- V_{fcs} ——钢筋钢纤维混凝土构件斜截面上由钢纤维混凝土和箍筋共同承担的剪力设计值；
- V_c ——根据钢纤维混凝土强度等级，不考虑钢纤维对混凝土轴心抗拉强度的影响，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的构件斜截面上混凝土的受剪承载力设计值；
- V_{sv} ——按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的构件斜截面上箍筋的受剪承载力设计值；
- V_{fu} ——钢纤维混凝土抗震框架节点受剪承载力；
- w_{max} ——根据钢纤维混凝土的强度等级，不考虑钢纤维的影响，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的钢筋混凝土或预应力混凝土构件最大裂缝宽度；

2.2.3 几何参数

- A_s 、 A'_s ——纵向受拉钢筋、受压钢筋的截面面积；
- A_{sv} ——箍筋截面积；
- b ——矩形构件截面宽度，T形、I形构件截面的腹板宽度；
- d ——钢筋直径；
- d_f ——钢纤维直径或等效直径；
- e ——轴向力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离；
- h ——构件截面高度或地面板厚度；
- h_0 ——构件截面有效高度；
- l_f ——钢纤维长度；
- l_{lab} 、 l_{la} ——钢筋钢纤维混凝土构件纵向受拉钢筋的基本锚固长度、锚固长度；

l_{laE} —— 钢纤维混凝土抗震节点内梁纵向钢筋锚固长度；

2.2.4 计算系数及其他

α_t —— 钢纤维对钢纤维混凝土轴心抗拉强度的影响系数；

α_{tm} —— 钢纤维对钢纤维混凝土弯拉强度的影响系数；

β_{lt} —— 钢纤维对钢纤维混凝土构件局部受压承载力的影响系数；

β_{tu} —— 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件正截面受拉区钢纤维混凝土抗拉强度的影响系数；

β_v —— 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件斜截面上混凝土受剪承载力的影响系数；

β_p —— 钢纤维对钢筋混凝土构件受冲切承载力的影响系数；

β_{cw} —— 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度的影响系数；

β_s —— 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土受弯构件短期刚度的影响系数；

β_s —— 钢纤维对叠合式构件钢筋应力的影响系数；

λ_f —— 钢纤维含量特征值；

ρ_f —— 钢纤维体积率；

φ_f —— 钢纤维混凝土层相对厚度。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 钢纤维混凝土结构方案设计、结构作用与作用效应分析应依据结构所属工程类别分别符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑地面设计规范》GB 50037 的规定。

3.1.2 钢纤维混凝土结构的设计方法、可靠度和极限状态表达式应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的有关规定。

3.1.3 钢纤维混凝土结构的耐久性设计应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的有关规定。

3.1.4 钢纤维混凝土结构及构件的构造要求应依据结构所属工程类别分别符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定。

3.2 极限状态设计

3.2.1 对持久设计状况、短暂设计状况和地震设计状况，当采用内力形式表达时，钢纤维混凝土结构构件承载能力极限状态设计表达式应符合下式规定：

$$\gamma_0 S \leq R \quad (3.2.1)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定；

S ——承载能力极限状态下作用组合的效应设计值，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定；

R ——结构构件抗力设计值。

3.2.2 钢纤维混凝土结构构件抗力设计值应按下式计算：

$$R = R_l(f_c, f_s, a_k, \beta_l, \lambda_l, \dots) / \gamma_{Rd} \quad (3.2.2)$$

式中: $R_l(\cdot)$ ——结构构件的抗力函数, 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定, 并应考虑钢纤维的影响;

γ_{Rd} ——构件的抗力模型不定性系数, 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定;

f_c ——根据钢纤维混凝土强度等级, 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定的混凝土强度设计值;

f_s ——钢筋强度设计值;

β_l ——钢纤维对构件抗力的影响系数;

λ_l ——钢纤维含量特征值;

a_k ——几何参数的标准值。

3.2.3 对偶然作用下钢纤维混凝土结构构件进行承载能力极限状态设计时, 本标准公式(3.2.1)中的作用效应设计值 S 应按偶然组合计算, 结构重要性系数 γ_0 不应小于 1.0; 本标准公式(3.2.2)中混凝土和钢筋的强度设计值 f_c 、 f_s 应改用强度标准值 f_{ck} 、 f_{sk} 。

3.2.4 钢筋钢纤维混凝土结构构件正常使用极限状态下的裂缝控制、受弯构件挠度和叠合式受弯构件钢筋应力, 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中有关规定, 按钢筋混凝土构件计算, 并应根据钢纤维混凝土强度等级及其受力特点对计算结果予以修正。

3.3 耐久性设计

3.3.1 钢纤维混凝土结构暴露的环境类别及其耐久性设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB 50010 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的有关规定。

3.3.2 钢纤维混凝土用于海水环境和受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境时, 应有成熟的工程经验或技术论证。

4 材 料

4.1 钢 纤 维

4.1.1 钢纤维的技术要求及选用应符合现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 的有关规定。

4.1.2 钢纤维体积率应根据结构设计要求确定，且不应小于 0.35%；当采用 1000MPa 级及以上等级的异形钢纤维且基体混凝土强度不低于 C40 时，钢纤维体积率不应小于 0.25%；具有特殊功能要求的钢纤维混凝土结构，当按计算所需钢纤维体积率小于以上规定时，应具有可靠的工程经验或经试验验证。

4.1.3 用于喷射钢纤维混凝土时，钢纤维抗拉强度等级不应低于 600MPa 级，长度不宜大于输料软管及喷嘴内径的 0.7 倍，且不宜小于最大骨料粒径的 2.5 倍。

4.1.4 喷射钢纤维混凝土中钢纤维类型及掺量的确定应考虑喷射过程中钢纤维的损失，其损失量宜通过现场试喷确定。喷射钢纤维混凝土中钢纤维的实际体积率不宜小于 0.35%。

4.2 钢纤维混凝土

4.2.1 钢纤维混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定，以 CF 表示。立方体抗压强度标准值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

4.2.2 钢纤维混凝土强度等级不应低于 CF25。喷射钢纤维混凝土和承受重复荷载的钢筋钢纤维混凝土结构构件的钢纤维混凝土强度等级不应低于 CF30；预应力钢纤维混凝土结构构件的钢纤维混凝土强度等级不应低于 CF40。钢纤维混凝土应满足结构设计对抗拉强度或弯拉强度、弯曲韧度比的要求。

4.2.3 钢纤维混凝土轴心抗压强度的标准值与设计值可按与钢

纤维混凝土相同强度等级的混凝土确定，且应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

4.2.4 钢纤维混凝土轴心抗拉强度的标准值和设计值可按下列公式确定：

$$f_{tk} = f_{tk}(1 + \alpha_1 \lambda_f) \quad (4.2.4-1)$$

$$f_t = f_t(1 + \alpha_1 \lambda_f) \quad (4.2.4-2)$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (4.2.4-3)$$

式中： f_{tk} 、 f_t ——钢纤维混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值（N/mm²）；

f_{tk} 、 f_t ——根据钢纤维混凝土强度等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定的混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值（N/mm²）；

λ_f ——钢纤维含量特征值；

ρ_f ——钢纤维体积率；

l_f ——钢纤维长度（mm）；

d_f ——钢纤维直径或等效直径（mm）；

α_1 ——钢纤维对钢纤维混凝土轴心抗拉强度的影响系数，可按本标准第 4.2.6 条选用。

4.2.5 钢纤维混凝土弯拉强度标准值可按下列公式确定：

$$f_{tm} = f_{tm}(1 + \alpha_m \lambda_f) \quad (4.2.5)$$

式中： f_{tm} ——钢纤维混凝土弯拉强度标准值（N/mm²）；

f_{tm} ——与钢纤维混凝土相同强度等级的混凝土弯拉强度标准值（N/mm²）；

α_m ——钢纤维对钢纤维混凝土弯拉强度的影响系数，可按本标准第 4.2.6 条的规定选用。

4.2.6 钢纤维对钢纤维混凝土抗拉强度的影响系数 α_1 和对钢纤维混凝土弯拉强度的影响系数 α_m 宜通过试验确定。当缺乏试验

资料时，对于强度等级为 CF25～CF80 的钢纤维混凝土，可按表 4.2.6 选用。

表 4.2.6 钢纤维对抗拉强度、弯拉强度的影响系数

钢纤维品种	纤维外形	强度等级	α_t	α_{lm}
高强钢丝 切断型	端钩形	CF25～CF45	0.76	1.13
		CF50～CF80	1.03	1.25
钢板剪切型	平直形	CF25～CF45	0.42	0.68
		CF50～CF80	0.46	0.75
	异形	CF25～CF45	0.55	0.79
		CF50～CF80	0.63	0.93
钢锭铣削型	异形	CF25～CF45	0.70	0.92
		CF50～CF80	0.84	1.10

4.2.7 钢纤维混凝土性能应符合下列规定：

1 钢纤维混凝土受压和受拉弹性模量以及剪变模量，可按与钢纤维混凝土相同强度等级的混凝土确定，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

2 钢纤维混凝土弯拉弹性模量宜通过试验确定。当无实测资料时，可根据同强度等级混凝土弯拉强度标准值，按现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的规定执行。

3 钢纤维混凝土的泊松比和线膨胀系数，可按与钢纤维混凝土相同强度等级的混凝土确定，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

4.2.8 钢纤维混凝土弯拉疲劳强度设计值应符合现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 的有关规定。

4.2.9 强度等级为 CF30～CF55 的喷射钢纤维混凝土弯拉强度标准值应符合现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 的有关规定。

4.3 钢 筋

4.3.1 钢筋钢纤维混凝土结构中钢筋的选用应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

4.3.2 钢筋的强度标准值、抗拉强度和抗压强度设计值、最大力下的总伸长率以及弹性模量应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于钢筋钢纤维混凝土、预应力钢纤维混凝土基本构件的承载能力极限状态计算。深受弯构件、叠合构件、牛腿、剪力墙和桩基承台的承载力计算应符合本标准第7章的有关规定。

5.1.2 对于二维或三维非杆系钢筋钢纤维混凝土结构构件，结构构件的应力设计值分布可按弹性或弹塑性分析方法确定。配筋量应采用钢纤维混凝土抗拉强度设计值，并应根据主拉应力设计值的合力在配筋方向的投影确定；钢筋布置应按照主拉应力的分布区域确定。配筋量和钢筋布置应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的构造要求规定。

5.2 正截面承载力计算

5.2.1 钢筋钢纤维混凝土和预应力钢纤维混凝土结构构件的正截面承载力计算应符合下列规定：

1 受拉构件、受弯构件和大偏心受压构件正截面承载力计算，除应考虑钢纤维混凝土的抗拉作用外，尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。轴心受压和小偏心受压构件正截面承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

2 构件截面受拉区钢纤维混凝土应力图形可简化为等效矩形应力图。等效矩形应力图的钢纤维混凝土受拉区高度可按下列公式计算：

1) 受弯构件、大偏心受压构件和大偏心受拉构件

$$x_1 = h - \frac{x}{\beta_1} \quad (5.2.1-1)$$

2) 轴心受拉构件和小偏心受拉构件

$$x_1 = h \quad (5.2.1-2)$$

式中: x_1 ——等效矩形应力图的钢纤维混凝土受拉区高度 (mm);

h —— 构件截面高度 (mm);

x ——等效矩形应力图的混凝土受压区高度 (mm), 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定;

β_1 ——系数, 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

3 受拉区等效矩形应力图的钢纤维混凝土抗拉强度可按下列式计算:

$$f_{fu} = f_t \beta_{fu} \lambda_f \quad (5.2.1-3)$$

式中: f_{fu} ——受拉区等效矩形应力图的钢纤维混凝土抗拉强度 (N/mm²);

β_{fu} —— 钢纤维对构件正截面受拉区钢纤维混凝土抗拉强度的影响系数。

4 钢纤维对构件正截面受拉区钢纤维混凝土抗拉作用的影响系数 β_{fu} 宜通过试验确定。当无试验资料, 且钢纤维混凝土强度等级为 CF25~CF80 时, 可按表 5.2.1 选用。

表 5.2.1 钢纤维对构件受拉区钢纤维混凝土抗拉作用的影响系数 β_{fu}

受力类型	受弯构件和大偏心受压构件	轴心受拉构件和小偏心受拉构件	大偏心受拉构件
β_{fu}	1.30	0.40	0.65

5 对于钢纤维混凝土受弯构件和偏心受力构件, 混凝土强度等级对受压区混凝土等效应力值的影响系数 α_1 可取 1.0。

6 预应力钢纤维混凝土结构构件正截面承载力设计应符合

现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，构件制作、运输、吊装等施工阶段应进行应力验算。

5.2.2 矩形截面受弯构件正截面承载力计算（图 5.2.2）应符合下列规定：

1 矩形截面受弯构件正截面承载力应符合下式规定：

$$M_l \leqslant f_{tc}bx(h_0 - x/2) + f'_yA'_s(h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p(h_0 - a'_p) - f_{tu}bx_1(x_1/2 - a) \quad (5.2.2-1)$$

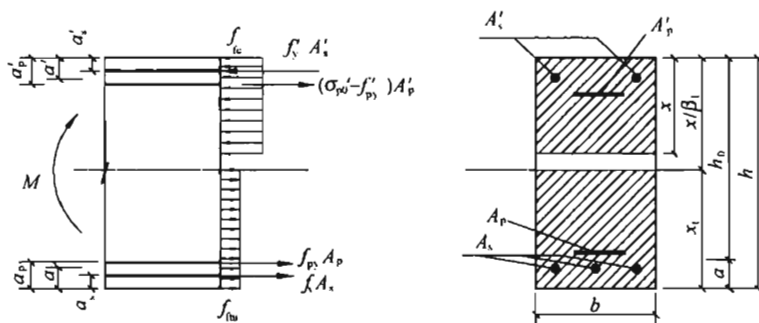


图 5.2.2 正截面承载力计算

2 钢纤维混凝土受压区高度 x 应符合下列规定：

$$f_{tc}bx = f_yA_s - f'_yA'_s + f_{py}A_p + (\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p + f_{tu}bx_1 \quad (5.2.2-2)$$

$$x \leqslant \xi_b h_0 \quad (5.2.2-3)$$

$$x \geqslant 2a' \quad (5.2.2-4)$$

式中： M_l ——弯矩设计值（N/mm²）；

f_{tc} ——钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

f_y 、 f'_y ——纵向普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值（N/mm²）；

A_s 、 A'_s ——纵向受拉钢筋、受压钢筋的截面面积（mm²）；

f_{py} 、 f'_{py} ——纵向预应力钢筋的受拉、受压强度设计值（N/mm²）；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积 (mm^2);

b ——截面宽度 (mm);

h_0 ——构件截面有效高度 (mm);

σ'_{p0} ——受压区纵向预应力钢筋合力点处钢纤维混凝土法向应力为零时的预应力钢筋应力 (N/mm^2)，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定;

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 (mm);

a ——受拉区全部纵向钢筋合力点至截面受拉边缘的距离 (mm);

a' ——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离 (mm)，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的应力 ($\sigma'_{p0} - f'_{py}$) 为拉应力时，公式 (5.2.2-1) 中的 a' 应用 a'_s 代替;

ξ_b ——截面界限相对受压区高度 (mm)，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

5.2.3 T形和I形截面受弯构件正截面受弯承载力计算 (图 5.2.3) 应符合下列规定:

1 当满足公式 (5.2.3-1) 的条件时，应按宽度为 b'_f 的矩形截面并应同时考虑受拉区翼缘和腹板中钢纤维混凝土的抗拉作用，并按公式 (5.2.3-2) 计算，其中钢纤维混凝土受压区高度应按公式 (5.2.3-3) 确定 (图 5.2.3a)。

$$\begin{aligned} f_y A_s + f_{py} A_p + f_{tu} b \left(h - \frac{h'_f}{\beta_1} \right) + f_{tu} (b_f - b) h_f \\ \leq f_{tc} b'_f h'_f + f'_y A'_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p \quad (5.2.3-1) \\ M_l \leq f_{tc} b'_f x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \\ - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \end{aligned}$$

$$-f_{tu}bx_1\left(\frac{x_1}{2}-a\right)-f_{tu}(b_f-b)h_f\left(\frac{h_f}{2}-a\right) \quad (5.2.3-2)$$

$$f_{tc}b'_fx = f_yA_s - f'_yA'_s + f_{py}A_p + (\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p \\ + f_{tu}bx_1 + f_{tu}(b_f-b)h_f \quad (5.2.3-3)$$

2 当不满足公式 (5.2.3-1) 的条件时, 应考虑截面中受压区腹板的抗压作用和受拉区翼缘和腹板中钢纤维混凝土的抗拉作用, 并按公式 (5.2.3-4) 计算, 其中钢纤维混凝土受压区高度应按公式 (5.2.3-5) 确定 (图 5.2.3b)。

$$M_f \leq f_{tc}bx(h_0 - x/2) + f_{tc}(b'_f - b)h'_f(h_0 - h'_f/2) \\ + f'_yA'_s(h_0 - a'_s) \\ - (\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p(h_0 - a'_p) - f_{tu}bx_1(x_1/2 - a) \\ - f_{tu}(b_f - b)h_f(h_f/2 - a) \quad (5.2.3-4)$$

$$f_{tc}[bx + (b'_f - b)h'_f] = f_yA_s - f'_yA'_s + f_{py}A_p \\ + (\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p + f_{tu}bx_1 + f_{tu}(b_f - b)h_f \quad (5.2.3-5)$$

式中: h'_f —— T 形、I 形截面受压区翼缘高度 (mm);

h_f —— I 形截面构件受拉区翼缘高度 (mm);

b_f —— I 形截面受拉区翼缘计算宽度 (mm);

b'_f —— T 形、I 形截面受压区翼缘计算宽度 (mm), 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

3 T 形、I 形截面受弯构件的钢纤维混凝土受压区高度应符合本标准公式 (5.2.2-3)、公式 (5.2.2-4) 的规定。

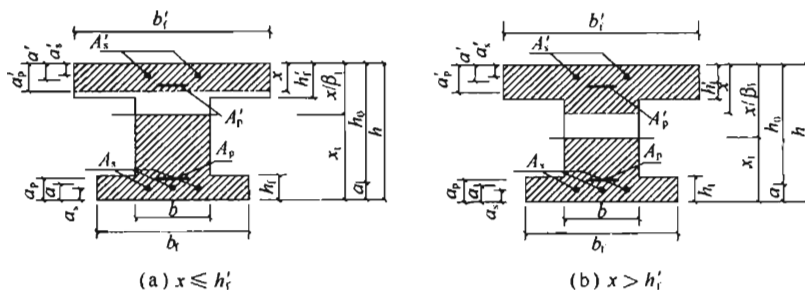


图 5.2.3 钢筋钢纤维混凝土 I 形截面受弯构件正截面承载力计算

5.2.4 受拉区采用钢纤维混凝土，受压区采用普通混凝土的钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件，钢纤维混凝土的配置高度 x_f 不宜小于钢纤维混凝土受弯构件计算的受拉区高度 x_t ，且不应小于 $0.6x_t$ 。当 x_f 小于 x_t 时， x_t 应以 x_f 代替。

5.2.5 当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足本标准公式 (5.2.2-4) 的条件；当不满足该条件时，正截面受弯承载力应符合下列规定：

$$M_f \leqslant f_{py}A_p(h-a_p-a'_s) + f_yA_s(h-a_s-a'_s) + (\sigma'_{pw} - f'_{py})A'_p(a'_p - a'_s) + f_{tw}bx_t(h-x_t/2-a') - f_{tw}(b_f-b)h_f(h-h_f/2-a') \quad (5.2.5)$$

式中： a_s 、 a_p ——受拉区纵向普通钢筋、预应力钢筋至受拉边缘的距离 (mm)。

5.2.6 矩形截面大偏心受压构件正截面承载力 (图 5.2.6) 应符合下列规定：

$$N_f \leqslant f_c b x + f'_y A'_s - f_y A_s - f_{tw} b x_t \quad (5.2.6-1)$$

$$N_f e \leqslant f_c b x (h_0 - x/2) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - f_{tw} b x_t (x_t/2 - a_s) \quad (5.2.6-2)$$

式中： N_f ——轴向受压承载力设计值 (N)；

e ——轴向力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离 (mm)。

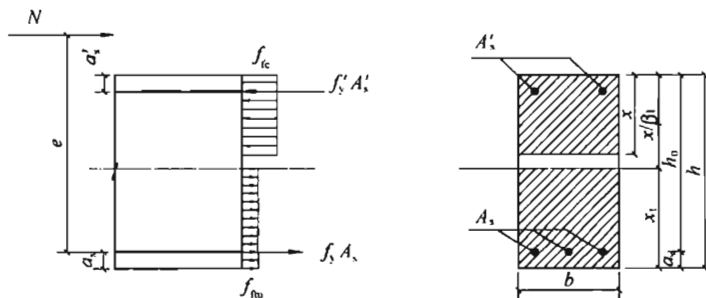


图 5.2.6 矩形截面大偏心受压构件正截面承载力计算

5.2.7 I形截面大偏心受压构件正截面受压承载力应符合下列规定：

1 当受压区高度 x 不大于 h'_f 时，应按宽度为受压翼缘计算宽度 b'_f 的矩形截面计算。

2 当受压区高度 x 大于 h'_f 时，应符合下列规定：

$$N_f \leq f_{tc}[bx + (b'_f - b)h'_f] + f'_y A'_s - f_y A_s - f_{tu}bx - f_{tu}(b'_f - b)h'_f \quad (5.2.7-1)$$

$$N_f e \leq f_{tc}[bx(h_0 - x/2) + (b'_f - b)h'_f(h_0 - h'_f/2)] + f'_y A'_s(h_0 - a'_s) - f_{tu}bx(x/2 - a_s) - f_{tu}(b'_f - b)h'_f(h'_f - a_s) \quad (5.2.7-2)$$

5.2.8 矩形截面轴心受拉构件正截面受拉承载力应符合下列规定：

$$N_{ft} \leq f_y A_s + f_{py} A_p + \beta_{tu} \lambda_f f_t A \quad (5.2.8)$$

式中： N_{ft} ——轴向拉力设计值 (N/mm²)；

A_s 、 A_p ——纵向受拉钢筋、预应力钢筋的截面面积 (mm²)；

A ——构件的截面面积 (mm²)。

5.2.9 矩形截面偏心受拉构件的正截面受拉承载力计算应符合下列规定：

1 轴向拉力作用点位于钢筋 A_s 的合力点和钢筋 A'_s 的合力点之间的小偏心受拉构件 (图 5.2.9a)。

$$N_{tu} e \leq f_y A'_s (h_0 - a'_s) - \beta_{tu} \lambda_f f_t b h \left(\frac{h}{2} - a_s \right) \quad (5.2.9-1)$$

$$N_{tu} e' \leq f_y A_s (h'_0 - a_s) + \beta_{tu} \lambda_f f_t b h \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) \quad (5.2.9-2)$$

2 轴向拉力作用点不在钢筋 A_s 的合力点和钢筋 A'_s 的合力点之间的大偏心受拉构件 (图 5.2.9b)。

$$N_{ft} \leq f_y A_s - f'_y A'_s + \beta_{tu} \lambda_f f_t b x_1 - f_{tc} b x \quad (5.2.9-3)$$

$$N_{\text{ft}} e \leqslant f_{\text{te}} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - \beta_{\text{in}} \lambda_f f_t b x_1 \left(\frac{x_1}{2} - a_s \right) \quad (5.2.9-4)$$

3 钢纤维混凝土受压区的高度 x 应满足本标准公式 (5.2.2-3) 的要求。当计算中计入纵向普通受压钢筋时, 尚应满足本标准公式 (5.2.2-4) 的要求, 当不满足时, 构件受拉承载力可按本标准公式 (5.2.9-2) 计算。

4 对称配筋的矩形截面偏心受拉构件, 可按本标准公式 (5.2.9-2) 计算正截面的受拉承载力。

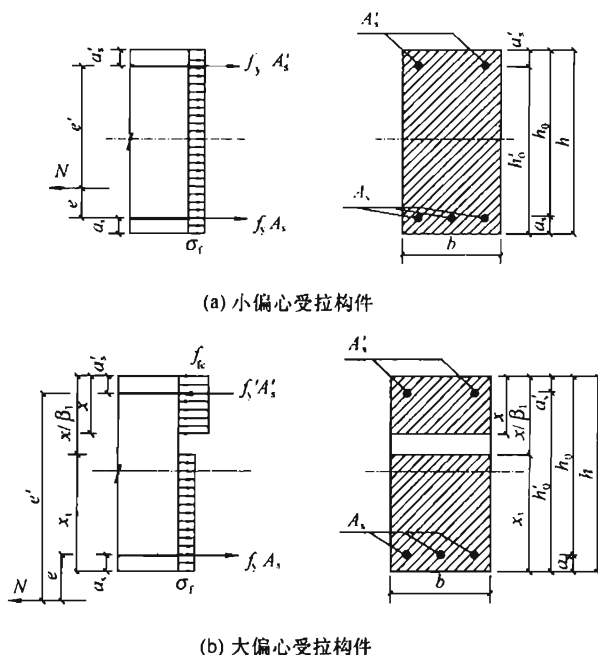


图 5.2.9 矩形截面偏心受拉构件正截面承载力计算

5.3 斜截面承载力计算

5.3.1 钢筋钢纤维混凝土和预应力钢纤维混凝土构件的受剪截面限制条件, 应根据钢纤维混凝土的强度等级按现行国家标准

《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定执行, 其中混凝土轴心抗压强度 f_c 应以 f_{fc} 代替。 f_{fc} 可按下式计算:

$$f_{fc} = f_c (1 + 0.15\lambda_f) \quad (5.3.1)$$

5.3.2 矩形、T形、I形截面受弯构件斜截面承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关规定, 并应符合下列规定:

1 斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V_{cs} 应以钢纤维混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V_{fcs} 代替。 V_{fcs} 可按下列公式计算:

$$V_{fcs} = V_{fc} + V_{sv} \quad (5.3.2-1)$$

$$V_{fc} = V_c (1 + \beta_s \lambda_f) \quad (5.3.2-2)$$

式中: V_c —— 根据钢纤维混凝土强度等级, 不考虑钢纤维对混凝土轴心抗拉强度的影响, 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的构件斜截面混凝土的受剪承载力设计值 (N);

V_{sv} —— 与箍筋有关的受剪承载力设计值 (N), 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的与箍筋有关的受剪承载力设计值;

V_{fc} —— 考虑钢纤维影响的与钢纤维混凝土有关的受剪承载力设计值 (N);

β_s —— 钢纤维对受弯构件斜截面上混凝土受剪承载力的影响系数。

2 钢纤维对受弯构件斜截面上混凝土受剪承载力的影响系数 β_s 宜通过试验确定。当无试验资料时, 对于强度等级为 CF25~CF80 的钢纤维混凝土, 可按表 5.3.2 的规定选用。

表 5.3.2 钢纤维影响系数 β_s 取值

钢纤维品种	剪切平直形	剪切异形	钢丝切断异形	铣削异形
β_s 取值	0.45	0.60	0.60	0.90

5.3.3 偏心受压构件、偏心受拉构件、配有弯起钢筋的受弯构

件以及预应力钢纤维混凝土受弯构件的受剪承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，其中混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V_{cs} 应以钢纤维混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V_{fcs} 代替， V_{fcs} 的计算应符合本标准第 5.3.2 条的规定。

5.3.4 不配箍筋和弯起钢筋的单向板类钢纤维混凝土受弯构件，其斜截面受剪承载力应符合下列公式规定：

$$V_{fc} \leq 0.7\beta_h f_t l h_0 (1 + \beta_s \lambda_f) \quad (5.3.4-1)$$

$$\beta_h = (800/h_0)^{1/4} \quad (5.3.4-2)$$

式中： β_h ——截面高度影响系数。当 $h_0 < 800\text{mm}$ 时， h_0 取 800mm ；当 $h_0 > 2000\text{mm}$ 时， h_0 取 2000mm 。

5.3.5 矩形、T 形和 I 形截面的钢筋钢纤维混凝土受弯构件，构造箍筋的配置条件可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。

5.3.6 受拉区采用钢纤维混凝土、受压区采用普通混凝土的钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件，按本标准第 5.3.1 条～第 5.3.5 条规定进行斜截面设计计算时，各项公式中的 λ_f 应以 λ_{fp} 代替。 λ_{fp} 应符合下列规定：

1 承受集中荷载作用且剪跨比 $\lambda > 2.0$ 时， λ_{fp} 可按下式计算：

$$\lambda_{fp} = \frac{2h_f}{h} \lambda_f \left(\frac{4}{\lambda} - 1 \right) \quad (5.3.6-1)$$

2 承受集中荷载作用且剪跨比 $\lambda \leq 2.0$ 或承受均布荷载作用时， λ_{fp} 可按下式计算：

$$\lambda_{fp} = \frac{2h_f}{h} \lambda_f \quad (5.3.6-2)$$

3 当受拉区钢纤维混凝土高度 h_f 大于截面全高度 h 的 0.5 倍时， h_f 应取 $0.5h$ 。

5.3.7 偏心受压构件构造箍筋的配置条件可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用。

5.4 扭曲截面承载力计算

5.4.1 钢筋钢纤维混凝土结构构件在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的截面控制条件应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

5.4.2 钢筋钢纤维混凝土结构构件在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的受扭承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，其中混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 应以钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值 f_{ft} 代替。

5.4.3 钢筋钢纤维混凝土结构构件在纯扭作用下的承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，其中混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 应以钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值 f_{ft} 代替。

5.4.4 钢筋钢纤维混凝土结构构件在弯矩、剪力、轴力和扭矩共同作用下的承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。受剪承载力计算应符合本标准第 5.3 节的规定。受扭承载力的混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 应以钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值 f_{ft} 代替。

5.5 受冲切承载力计算

5.5.1 在局部荷载或集中反力作用下，不配置箍筋或弯起钢筋的钢筋钢纤维混凝土板的受冲切承载力应按下式计算：

$$F_{lpu} = F_{pu}(1 + \beta_p \lambda_l) \quad (5.5.1)$$

式中： F_{lpu} ——钢筋钢纤维混凝土板受冲切承载力（N）；

F_{pu} ——根据钢纤维混凝土强度等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的钢筋混凝土板受冲切承载力（N）；

β_p ——钢纤维对钢筋混凝土板受冲切承载力的增强系数，宜通过试验确定。当无试验资料时，可取 0.45。

5.5.2 在局部荷载或集中反力作用下,当受冲切承载力不满足本标准第 5.5.1 条规定的要求且板厚受到限制时,可配置箍筋或弯起钢筋,且受冲切截面及受冲切承载力的计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定,其中的混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 应以钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值 f_{ft} 代替。

5.5.3 用钢纤维对钢筋混凝土板进行抗冲切局部增强时,钢纤维在冲切受压面板内的配置范围应向冲切受压面四周外延,且四周外延尺寸均不应小于 2 倍板厚。

5.6 局部受压承载力计算

5.6.1 采用钢纤维增强混凝土构件局部受压时,钢纤维混凝土的配置范围(图 5.6.1)不应小于局部受压计算底面积,并应符合下列规定:

1 钢纤维混凝土局部受压计算底面积的确定应符合现行国

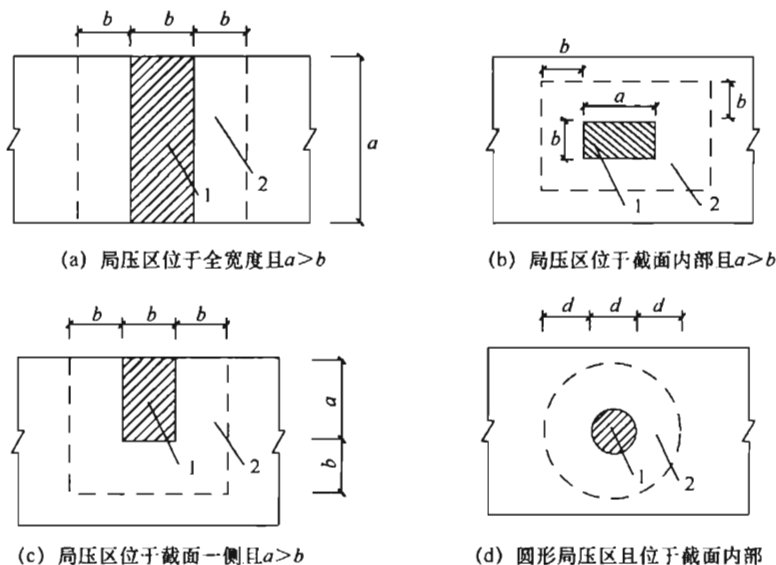


图 5.6.1 局部受压区钢纤维混凝土的平面配置范围

1—局部受压接触面积; 2—钢纤维最小配置范围

家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

2 配置区的平面范围应向局部受压面四周外延,其中矩形受压面每边外延一倍受压面短边边长,圆形受压面周边外延一倍受压圆面直径,且不应超过结构的外边缘。

3 配置区高度不应小于配置区平面的最小边长加 100mm。

4 三边临空和角部的局部受压区采用钢纤维增强时,可按混凝土进行局部受压计算。

5.6.2 不配置间接钢筋的钢纤维混凝土局部受压承载力应符合下列规定:

1 局部受压面上仅有局部荷载作用时:

$$F_l \leq \omega \beta_l f_{cc} (1 + \beta_{ll} \lambda_l) A_l \quad (5.6.2-1)$$

2 局部受压面上尚有非局部荷载作用时:

$$F_l \leq \omega \beta_l (f_{cc} - \sigma) (1 + \beta_{ll} \lambda_l) A_l \quad (5.6.2-2)$$

3 混凝土局部受压时的强度提高系数 β_l 可按下式计算:

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (5.6.2-3)$$

式中: F_l ——局部受压面上作用的局部荷载或局部压力设计值 (N);

A_l ——钢纤维混凝土局部受压面积 (mm^2);

ω ——荷载分布的影响系数:当局部受压面上的荷载为均匀分布时,取 1.0;当局部荷载为非均匀分布时,取 0.75;

σ ——非局部荷载设计值产生的混凝土压应力 (N/mm^2);

β_l ——混凝土局部受压时的强度提高系数;

A_b ——混凝土局部受压时计算底面积 (mm^2),应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定;

f_{cc} ——承受局部受压作用的素混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm^2),按现行国家标准《混凝土结

构设计规范》GB 50010 规定的混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 值乘以 0.85 取用；

β_u —— 钢纤维对钢纤维混凝土构件局部受压承载力的影响系数。

4 钢纤维对钢纤维混凝土构件局部受压承载力的影响系数 β_u 宜通过试验确定。当无试验资料且钢纤维混凝土强度等级为 CF25~CF80 时，可按表 5.6.2 的规定选用。

表 5.6.2 钢纤维影响系数 β_u

钢纤维品种	剪切异形	钢丝切断异形	铣削异形
β_u 取值	0.45	0.65	0.65

5.6.3 配置间接钢筋的钢纤维混凝土构件，其间接钢筋的配置范围和构造要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，其局部受压区的截面尺寸应符合下式规定：

$$F_l \leq 1.35\beta_c\beta_t(1+0.15\lambda_l)f_cA_{ln} \quad (5.6.3)$$

式中： β_c —— 钢纤维混凝土强度影响系数，当钢纤维混凝土强度等级不超过 CF30 时，取 1.0；当钢纤维混凝土强度等级为 CF80 时，取 0.8；其间按线性内插法确定；

f_c —— 与钢纤维混凝土强度等级相同的混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定；

A_{ln} —— 钢纤维混凝土局部受压净面积 (mm^2)，对后张法构件，应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积。

5.6.4 配置方格网式或螺旋式间接钢筋的钢纤维混凝土构件，其局部受压承载力应符合下式规定：

$$F_l \leq 0.9[\beta_c\beta_t f_c(1+\beta_{ul}\lambda_l)+2\alpha\rho_v\beta_{cor}f_{yv}]A_{ln} \quad (5.6.4)$$

式中： ρ_v —— 间接钢筋体积配筋率，按现行国家标准《混凝土结

构设计规范》GB 50010 关于配置间接钢筋混凝土体积配筋率要求执行；

β_{cor} —— 配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 关于配置间接钢筋混凝土局部受压承载力提高系数要求执行；

α —— 间接钢筋对混凝土约束的折减系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 执行；

f_{yv} —— 间接钢筋抗拉强度设计值 (N/mm^2)，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

5.7 疲劳验算

5.7.1 钢筋钢纤维混凝土受弯构件的正截面和斜截面疲劳验算方法应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

5.7.2 钢纤维混凝土轴心抗压疲劳强度设计值 f'_{lc} 、轴心抗拉疲劳强度设计值 f'_{lt} 应按下列公式确定：

$$f'_{lc} = \gamma_p f_c \quad (5.7.2-1)$$

$$f'_{lt} = 0.85\gamma_p f_{lt} \quad (5.7.2-2)$$

式中： γ_p —— 混凝土疲劳强度修正系数，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

5.7.3 钢纤维混凝土疲劳变形模量可按与钢纤维混凝土相同强度等级的混凝土确定，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

6 正常使用极限状态验算

6.1 裂缝控制验算

6.1.1 钢筋钢纤维混凝土和预应力钢纤维混凝土结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

6.1.2 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定裂缝控制等级为一级和二级的构件，在荷载标准组合或准永久组合下的应力控制和受拉边缘法向应力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，其中混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应以钢纤维混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tkc} 代替。

6.1.3 受拉区采用钢纤维混凝土、受压区采用普通混凝土的钢筋混凝土受弯构件，当按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定裂缝控制等级为二级时，正截面抗裂验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，并应考虑钢纤维及钢纤维混凝土层厚度对构件抗裂的影响，以 f_{tkc} 代替混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 。当受拉区钢纤维混凝土层厚度 h_f 大于 $0.5h$ 时， h_f 应取 $0.5h$ 。 f_{tkc} 可按下式计算：

$$f_{tkc} = f_{tk} \left(1 + \frac{2h_f}{h} \alpha_f \lambda_f \right) \quad (6.1.3)$$

6.1.4 预应力钢纤维混凝土受弯构件的斜截面抗裂验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。混凝土的抗拉强度标准值和轴心抗压强度标准值应分别以钢纤维混凝土的抗拉强度标准值和轴心抗压强度标准值代替。

6.1.5 先张法预应力钢纤维混凝土构件的端部斜截面受剪承载力计算以及正截面、斜截面抗裂验算应符合现行国家标准《混凝土

土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，并应计入预应力钢筋在其预应力传递长度范围内实际应力值的变化。当 $\alpha_1 \lambda_l > 0.4$ 时， $\alpha_1 \lambda_l$ 应取 0.4。钢纤维混凝土中预应力钢筋的预应力传递长度 l_{tr} 可按下式计算：

$$l_{tr} = l_{tr} / (1 + \alpha_1 \lambda_l) \quad (6.1.5)$$

式中： l_{tr} ——先张法构件预应力钢筋在普通混凝土中的预应力传递长度（mm），应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。

6.1.6 矩形截面钢筋钢纤维混凝土受弯构件、大偏心受压和受拉构件的最大裂缝宽度，可采用荷载准永久组合并考虑长期作用影响的效应值按下式计算：

$$\omega'_{max} = \omega_{max} (1 - \beta_{cw} \lambda_l) \quad (6.1.6)$$

式中： ω'_{max} ——按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的效应计算的钢筋钢纤维混凝土构件最大裂缝宽度（mm）；

ω_{max} ——根据钢纤维混凝土的强度等级，不考虑钢纤维的影响，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的钢筋混凝土构件最大裂缝宽度（mm）；

β_{cw} ——钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度的影响系数，可按本标准第 6.1.7 条确定。

6.1.7 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度的影响系数 β_{cw} 宜通过试验确定。当无试验资料时，可按下列规定确定：

1 当钢纤维混凝土强度等级不高于 CF45 时， β_{cw} 可按表 6.1.7 选用。

2 当钢纤维混凝土强度等级高于 CF45 时，对于采用抗拉强度不低于 1000N/mm^2 的高强度异形钢纤维的钢纤维混凝土受弯构件， β_{cw} 可取 0.50；

3 对于钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件， β_{cw} 应以 $2\varphi_l \beta_{cw}$ 代替，当 $\varphi_l > 0.5$ 时， φ_l 应取 0.5。

表 6.1.7 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度的影响系数

受力类型	受弯构件和大偏心受压构件	轴心受拉构件	偏心受拉构件
β_{cw}	0.35	0.45	0.42

6.1.8 矩形截面预应力钢纤维混凝土受弯构件，按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度 w_{lmax} 可按本标准第 6.1.6 条计算。

6.2 受弯构件挠度验算

6.2.1 受拉区出现裂缝的钢筋钢纤维混凝土矩形截面受弯构件的短期刚度应按下式计算：

$$B_{fs} = B_s(1 + \beta_B \lambda_f) \quad (6.2.1)$$

式中： B_{fs} ——按荷载准永久组合计算的钢筋钢纤维混凝土受弯构件的短期刚度 ($N \cdot mm^2$)；

B_s ——根据钢纤维混凝土的强度等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的荷载准永久组合下的受弯构件的短期刚度 ($N \cdot mm^2$)；

β_B ——钢纤维对钢筋钢纤维混凝土受弯构件短期刚度的影响系数。

6.2.2 钢纤维对钢筋钢纤维混凝土受弯构件短期刚度的影响系数 β_B 宜通过试验确定。当无试验资料时，可采用下列经验系数：

1 当钢纤维混凝土强度等级为 CF25～CF80 时， β_B 可取 0.35；

2 对于钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件， β_B 可用 $2\varphi_f \beta_B$ 代替，且当 $\varphi_f > 0.5$ 时， φ_f 应取 0.5。

6.2.3 钢筋钢纤维混凝土受弯构件的挠度验算和刚度计算方法应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，并应以本标准第 6.2.1 条计算的 B_{fs} 代替钢筋混凝土构件的短期刚度 B_s 。

6.2.4 不允许出现裂缝的预应力钢纤维混凝土受弯构件的短期

刚度，可根据钢纤维混凝土的强度等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算。

6.2.5 允许出现裂缝的预应力钢纤维混凝土受弯构件的短期刚度，可采用荷载标准组合按本标准第 6.2.1 条的规定计算。其中， B_s 可根据钢纤维混凝土的强度等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的荷载标准组合下的受弯构件短期刚度。

6.2.6 预应力钢纤维混凝土受弯构件的挠度验算和刚度计算方法应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，并应以本标准第 6.2.4 条和第 6.2.5 条规定计算的短期刚度 B_{sk} 代替预应力混凝土受弯构件的短期刚度 B_s 。

7 局部钢纤维混凝土结构构件

7.1 叠合式受弯构件

7.1.1 钢纤维混凝土叠合式受弯构件的钢纤维混凝土截面高度不应小于 0.4 倍构件截面总高度；预制构件和叠合式受弯构件的弯矩设计值和剪力设计值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

7.1.2 预制构件和叠合式受弯构件的正截面承载力应符合下列规定：

1 预制构件正截面承载力应按本标准第 5.2.2 条的规定计算。

2 叠合层采用钢筋钢纤维混凝土的叠合式受弯构件正截面承载力应按本标准第 5.2.2 条的规定计算，其中正弯矩区段的钢纤维混凝土等效拉应力应按预制构件钢纤维混凝土的有关参数计算，负弯矩区段的钢纤维混凝土等效拉应力应按叠合层钢纤维混凝土的有关参数计算。

3 叠合层采用钢筋混凝土的叠合式受弯构件，其正弯矩区段正截面承载力应按下列规定计算：

1) 当受拉区钢纤维混凝土高度 x_1 小于预制构件截面高度 h_1 时，应按本标准第 5.2.2 条的规定计算，其中 f_{te} 应以叠合层混凝土的 f_c 代替。

2) 当受拉区钢纤维混凝土高度 x_1 大于预制构件截面高度 h_1 时，应按本标准第 5.2.2 条的规定计算，其中 x_1 应以 h_1 代替， f_{te} 应以叠合层混凝土的 f_c 代替。

4 叠合层采用钢筋混凝土的叠合式受弯构件，其负弯矩区段正截面承载力可按钢筋混凝土叠合式受弯构件计算。

7.1.3 预制构件和叠合式受弯构件的斜截面承载力计算应符合

本标准第 5.3.1 条和第 5.3.2 条的规定。叠合式受弯构件斜截面上钢纤维混凝土和箍筋的受剪承载力 V_{fs} 应取叠合层和预制构件中较低的混凝土或钢纤维混凝土强度等级进行计算,且不应低于预制构件的受剪承载力。

7.1.4 叠合式受弯构件的叠合面应满足受剪承载力要求。叠合面受剪承载力可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算,计算时 f_t 应以预制构件的 f_{tk} 和叠合层的 f_t 或 f_{tk} 中的较低值采用。对不配箍筋的叠合板,叠合面抗剪强度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

7.1.5 钢筋钢纤维混凝土叠合式受弯构件在荷载准永久组合下,其纵向受拉钢筋的应力应符合下式规定:

$$\frac{\sigma_{st}}{1 + \beta_{st}\lambda_f} \leq 0.9f_y \quad (7.1.5)$$

式中: σ_{st} ——按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算的纵向受拉钢筋应力 (N/mm^2);

β_{st} ——钢纤维对叠合式构件钢筋应力的影响系数,宜通过试验确定;当无试验资料时,可取 0.20。

7.1.6 钢筋钢纤维混凝土叠合式构件,按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度可按本标准第 6.1.6 条的规定计算。其中,钢筋混凝土叠合式受弯构件的最大裂缝宽度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算。

7.1.7 叠合式受弯构件的挠度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定验算。预制构件第二阶段的短期刚度 B_{s1} 应采用钢筋钢纤维混凝土预制构件短期刚度 B_{fs1} ,叠合式受弯构件第二阶段的短期刚度 B_{s2} 应采用 B_{fs2} 代替。 B_{fs1} 、 B_{fs2} 应符合下列规定:

1 正弯矩区段内预制构件和叠合式受弯构件第二阶段的短期刚度应按下列公式计算:

$$B_{fs1} = B_{s1}(1 + \beta_{B1}\lambda_f) \quad (7.1.7-1)$$

$$B_{fs2} = B_{s2}(1 + \beta_{B2}\lambda_f) \quad (7.1.7-2)$$

式中: β_{B1} ——钢纤维对预制构件短期刚度的影响系数, 宜通过试验确定; 当无试验资料时, 可取 0.25;

β_{B2} ——钢纤维对叠合式受弯构件第二阶段短期刚度的影响系数, 宜通过试验确定; 当无试验资料时, 可取 0.35。

2 叠合层采用钢筋混凝土时, 负弯矩区段内叠合式受弯构件第二阶段的短期刚度应按钢筋混凝土叠合式受弯构件计算。

7.1.8 钢筋钢纤维混凝土叠合式受弯构件箍筋、叠合面粗糙度的构造要求以及采用混凝土叠合层的层厚限制, 均应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。钢纤维混凝土叠合梁的叠合层厚度不宜小于 80mm, 叠合板的叠合层厚度不宜小于 40mm。钢纤维混凝土的强度等级不宜低于 CF30。

7.2 局部钢纤维混凝土深梁

7.2.1 受拉区采用钢纤维混凝土且跨高比不大于 2.0 的单跨简支深梁, 可按本节规定设计。

7.2.2 局部钢纤维混凝土矩形截面深梁的斜截面受剪承载力应符合下列规定, 当 $\varphi_l > 0.5$ 时, 应取 0.5。

$$V \leqslant 1.4f_t b h_0 (1 + 0.6\varphi_l \lambda_l) + 0.5f_{yh} \frac{A_{sh}}{s_v} h_0 \quad (7.2.2)$$

式中: V ——局部钢纤维混凝土深梁的剪力设计值 (N);

A_{sh} ——深梁上部 0.8h 范围内一层水平分布钢筋的截面积 (mm^2);

s_v ——水平分布钢筋的竖向间距 (mm)。

7.2.3 局部钢纤维混凝土深梁的受剪截面限制条件, 应根据钢纤维混凝土的强度等级按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中钢筋混凝土深梁设计的有关规定计算, 计算公式中的 f_c 应以 f_{cdk} 代替, 且当 $\varphi_l > 0.5$ 时, 应取 0.5。 f_{cdk} 应按下式计算:

$$f_{cdk} = f_c (1 + 0.3\varphi_l \lambda_l) \quad (7.2.3)$$

7.2.4 一般要求不出现斜裂缝的局部钢纤维混凝土深梁, 当符合下列条件时, 可不进行斜截面受剪承载力计算, 但应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定配置分布钢筋。按下式计算时, 当 $\varphi_l > 0.6$ 时, 应取 0.6。

$$V_k \leq 0.5 f_{tk} b h (1 + 1.15 \varphi_l \lambda_l) \quad (7.2.4)$$

式中: V_k ——按荷载效应的标准组合计算的剪力值 (N)。

7.2.5 局部钢纤维混凝土深梁的正截面抗裂弯矩应按下列公式计算。计算时, 当 $\varphi_l > 0.6$ 时, 应取 0.6; 当 $l_0/h > 1.0$ 时, 应取 1.0。

$$M_{cr}^l = \gamma_l f_{ft} W \quad (7.2.5-1)$$

$$\gamma_l = (1.15 + 0.08 l_0/h)(1 + \varphi_l) \quad (7.2.5-2)$$

式中: M_{cr}^l ——局部钢纤维混凝土深梁正截面抗裂弯矩 (N·mm);

γ_l ——受拉区钢纤维混凝土塑性影响系数;

W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩 (mm³)。

7.3 牛 腿

7.3.1 钢纤维混凝土牛腿, 当竖向力作用点至下柱边缘的水平距离 a 不大于牛腿与下柱交接处的垂直截面有效高度 h_0 时, 其截面尺寸应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定, 裂缝控制应符合下式规定:

$$F_{vk} \leq \beta \left(1 - 0.5 \frac{F_{hk}}{F_{vk}} \right) \frac{f_{tk} b h_0}{0.5 + \frac{a}{h_0}} (1 + \beta_{brv} \lambda_l) \quad (7.3.1)$$

式中: F_{vk} ——作用于牛腿顶部按荷载效应标准组合计算的竖向力值 (N);

F_{hk} ——作用于牛腿顶部按荷载效应标准组合计算的水平拉力值 (N);

β ——裂缝控制系数, 支承吊车梁的牛腿取 0.65, 其他牛腿取 0.80;

f_{tk} ——与钢纤维混凝土相对应强度等级的普通混凝土轴

心抗拉强度标准值 (N/mm^2);

a ——竖向力作用点至下柱边缘的水平距离, 此时应考虑安装偏差 20mm, 当考虑安装偏差后的竖向力作用点仍位于下柱截面以内时取 0;

b ——牛腿宽度 (mm);

β_{brv} ——钢纤维对牛腿抗剪能力的影响系数, 可取 0.47;

h_0 ——牛腿与下柱交接处的垂直截面有效高度 (mm)。

7.3.2 在牛腿中, 由承受竖向力的受拉钢筋和承受水平拉力的锚筋所组成的纵向受力钢筋的总截面面积应符合下列公式规定:

$$A_s \geq \frac{F_v a - 0.43 f_{tw} b h_0^2}{0.85 f_y h_0} + 1.2 \frac{F_h}{f_y} \quad (7.3.2-1)$$

$$a/h_0 \leq 0.3 \quad (7.3.2-2)$$

式中: F_v ——作用在牛腿顶部的竖向力设计值 (N);

F_h ——作用在牛腿顶部的水平拉力设计值 (N)。

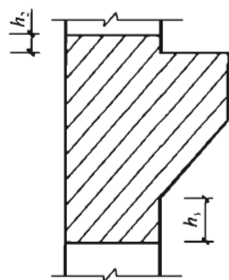


图 7.3.3 钢纤维混凝土配置范围

7.3.3 牛腿中配置的钢纤维混凝土 (图 7.3.3) 进入相邻下柱中的范围 h_1 不应小于 0.5 倍柱截面高度 h_c , 进入上柱中的范围 h_2 不应小于 50mm。

7.4 桩基承台

7.4.1 钢筋钢纤维混凝土桩基承台设计除应符合本节规定外, 尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。

7.4.2 钢筋钢纤维混凝土桩基承台受柱冲切的承载力计算应符合下列规定:

1 承台受柱冲切破坏锥体应采用自柱边或承台变阶处至相应桩顶边缘连线构成的锥体, 锥体与承台底面的夹角不应小于

45°, 当小于 45°时应取 45°。

2 对于桩数不少于 4 根的钢筋钢纤维混凝土矩形承台和三桩三角形钢筋钢纤维混凝土承台, 可按下式计算承台的受柱冲切承载力:

$$F_{\text{ipu}} = F_{\text{pu}}(1 + \beta_p \lambda_l) \quad (7.4.2)$$

式中: F_{ipu} ——未配置箍筋、弯起钢筋时, 钢筋钢纤维混凝土承台冲切破坏锥体上受柱冲切的承载力 (N);

F_{pu} ——按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 计算的钢筋混凝土承台受柱冲切的承载力 (N);

β_p ——钢纤维对钢筋混凝土承台受冲切承载力的影响系数, 宜通过试验确定; 当无试验资料时, 可取 0.45。

7.4.3 当桩位于受柱冲切破坏锥体以外时, 钢筋钢纤维混凝土桩基承台的受桩冲切承载力可按下列规定计算:

1 承台受角桩冲切破坏锥体侧面锥线采用从承台底角桩内边缘引 45°冲切线与承台顶面或承台变阶处相交点; 当柱位于 45°冲切线以内时, 应取从承台底角桩内边缘至柱边相交点。

2 未配置箍筋、弯起钢筋时, 钢筋钢纤维混凝土矩形承台和非矩形承台受角桩冲切承载力可按下式计算:

$$F_{\text{ipu}}'' = F_{\text{pu}}(1 + \beta_p \lambda_l) \quad (7.4.3-1)$$

式中: F_{ipu}'' ——钢筋钢纤维混凝土承台受角桩冲切的承载力 (N);

F_{pu} ——按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 计算的钢筋混凝土承台受角桩冲切的承载力 (N)。

3 钢筋钢纤维混凝土矩形承台, 当符合下式条件时 (图 7.4.3), 其受方形边桩冲切的承载力可按本标准公式 (7.4.3-1) 计算。

$$b_p + 2h_0 \leq b \quad (7.4.3-2)$$

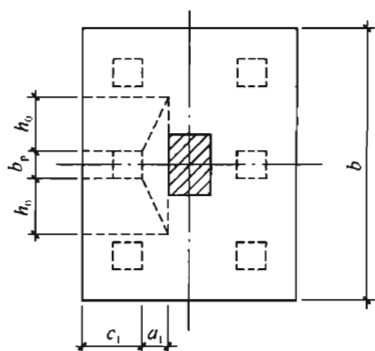


图 7.4.3 矩形承台边桩冲切破坏锥体

7.4.4 钢筋钢纤维混凝土桩基承台斜截面受剪承载力计算应符合下列规定：

1 柱下桩基独立承台应分别对柱边与桩边、变阶处与桩边连线形成的斜截面进行受剪承载力计算；当柱边外有多排桩形成多个剪切斜截面时，尚应对每个斜截面进行承载力计算。

2 未配置抗剪钢筋的钢筋钢纤维混凝土承台的斜截面受剪承载力可按式计算：

$$V_{lu} = V_u(1 + \beta_s \lambda_f) \quad (7.4.4)$$

式中： V_{lu} ——钢筋钢纤维混凝土承台的斜截面受剪承载力 (N)；

V_u ——按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 计算的钢筋混凝土承台斜截面受剪承载力 (N)；

β_s ——钢纤维对斜截面上混凝土受剪承载力的影响系数，宜通过试验确定。当无试验资料时，可按本标准第 5.3.2 条确定。

7.4.5 钢筋钢纤维混凝土桩基承台局部受压承载力计算应符合下列规定：

1 当柱或桩的混凝土强度等级高于承台的钢纤维混凝土强度等级为 5N/mm^2 及以上时, 应验算钢纤维混凝土承台在柱底和桩顶处的局部受压承载力。

2 未配置间接钢筋的钢筋钢纤维混凝土承台的局部受压承载力应按式计算:

$$F_{lu} = F_{lu}(1 + \beta_H \lambda_f) \quad (7.4.5-1)$$

3 配置间接钢筋的钢筋钢纤维混凝土承台的局部受压承载力应按式计算:

$$F_{lu} = 0.9[\beta_c \beta_l (1 + 0.15\lambda_f) f_c + 2\alpha \rho_v \beta_{cor} f_{yv}] A_{ln} \quad (7.4.5-2)$$

式中: F_{lu} ——钢筋钢纤维混凝土承台局部受压承载力 (N);

F_{lu} ——按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007计算的钢筋混凝土承台局部受压承载力 (N);

β_H ——钢纤维对钢筋混凝土承台局部受压承载力的影响系数, 宜通过试验确定; 当无试验资料时, 可按本标准第 5.6.2 条确定;

β_c ——混凝土强度影响系数;

β_l ——混凝土局部受压时的强度提高系数;

α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数;

ρ_v ——间接钢筋的体积配箍率;

β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数;

f_{yv} ——间接钢筋抗拉强度设计值 (N/mm^2);

A_{ln} ——混凝土局部受压净面积 (mm^2)。

4 承台在柱底、边桩或角桩顶部处的局部受压的计算底面积应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

7.4.6 在钢筋钢纤维混凝土桩基承台中应优先采用变形钢筋, 对集中布置在桩截面范围内的带状钢筋, 其伸进桩截面的长度应满足纵向受拉钢筋在钢纤维混凝土中的最小锚固长度 l_{ta} 要求,

且伸过桩顶截面中心线的长度不小于 $5d$ 并向上 90° 弯折。

7.4.7 钢筋钢纤维混凝土桩基承台的构造要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定，并应符合本标准中第 8 章关于钢筋钢纤维混凝土结构构件的构造规定。

8 构造规定

8.0.1 钢纤维混凝土结构构件的一般构造要求和梁、板、柱、预埋件、预制构件接头及吊环等构造要求，除应符合本标准的规定外，尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

8.0.2 钢筋在钢纤维混凝土中锚固长度、延伸长度和绑扎搭接长度应符合下列规定：

1 当计算中充分利用纵向受拉钢筋强度时，受拉钢筋的基本锚固长度应按下列公式计算：

普通钢筋

$$l_{fab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (8.0.2-1)$$

预应力钢筋

$$l_{fab} = \alpha \frac{f_{py}}{f_t} d \quad (8.0.2-2)$$

式中： l_{fab} 、 l_{fab} ——受拉普通钢筋、预应力钢筋在钢纤维混凝土中的基本锚固长度（mm）；

f_t ——钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值（N/mm²），按本标准第 4.2.4 条确定。当钢纤维混凝土强度等级高于 CF40 时，按 CF40 取值；

d ——钢筋直径（mm）；

α ——锚固钢筋外形系数，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

2 受拉钢筋的锚固长度应根据锚固条件按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行修正，且修正

后的受拉钢筋锚固长度 l_{fa} 和 l_{fm} 应取基本锚固长度的 0.7 倍、 $250f_t/f_{ft}$ (mm) 和 200mm 三者中的较大者。 f_t 应为与钢纤维混凝土相对应强度等级的混凝土轴心抗拉强度设计值。

3 纵向受拉钢筋和受压钢筋在跨中或支座边截断时，其延伸长度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，受拉钢筋锚固长度 l_a 应以 l_{fa} 代替。

4 非预应力受拉和受压钢筋允许的绑扎搭接条件和搭接长度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，受拉钢筋锚固长度 l_a 应以 l_{fa} 代替。

9 结构构件抗震设计

9.1 一般规定

9.1.1 钢筋钢纤维混凝土结构的抗震设计应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.1.2 抗震设防的钢筋钢纤维混凝土结构的抗震设防类别与设防标准应符合现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.1.3 考虑地震作用组合的钢纤维混凝土结构的荷载效应设计值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.1.4 考虑地震作用组合验算钢纤维混凝土结构构件的承载力时,应按承载力抗震调整系数 γ_{RE} 进行调整。承载力抗震调整系数 γ_{RE} 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定执行。

9.1.5 钢纤维混凝土结构的抗震变形验算应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。

9.1.6 钢纤维混凝土结构的纵向受力钢筋的抗震锚固与搭接长度及其相关要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定, l_a 受拉钢筋锚固长度应以 l_{aE} 代替。

9.1.7 抗震设防的钢纤维混凝土结构,当钢纤维混凝土强度等级超过 CF60 时,宜采用异形钢纤维,且钢纤维抗拉强度等级不宜低于 1000MPa 级,钢纤维体积率不应低于 0.65%。

9.2 框架梁柱节点

9.2.1 对于一级、二级和三级抗震等级的现浇框架梁柱节点,

按计算需配置较多箍筋造成施工困难时,可采用钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点。

9.2.2 钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点的抗震设计除应符合本节规定外,尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.2.3 钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点剪力设计值 V_j 的计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.2.4 考虑地震作用组合的钢纤维混凝土框架梁和框架柱的受剪截面限制条件应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定,混凝土轴心抗压强度 f_c 应以 f_{ics} 代替。 f_{ics} 应按本标准公式 (5.3.1) 计算。

9.2.5 考虑地震作用组合的钢纤维混凝土框架梁和框架柱的斜截面受剪承载力应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定, V_c 应以 V_{ic} 代替。 V_{ic} 应按本标准公式 (5.3.2-2) 计算。

9.2.6 钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点核心区的受剪水平截面应符合下列规定:

1 框架梁柱节点核心区受剪承载力应符合下式规定:

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} [0.3\eta\beta_c f_{ic} b_j h_j (1 + 0.17\lambda_f)] \quad (9.2.6)$$

式中: V_j ——框架梁柱节点核心区的剪力设计值 (N);

b_j ——框架梁柱节点核心区的截面有效验算宽度 (mm);

h_j ——框架梁柱节点核心区的截面高度 (mm);

η ——正交梁对框架梁柱节点的约束影响系数;

β_c ——钢纤维混凝土强度等级影响系数,按与钢纤维混凝土强度等级相同的混凝土确定;

γ_{RE} ——承载力抗震调节系数。

2 b_j 、 h_j 、 η 、 γ_{RE} 的取值均应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.2.7 钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点的抗震受剪承载力应符合下列规定：

1 9度设防烈度的一级抗震等级框架

$$V_f \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[0.9\eta f_t b_j h_j (1 + \beta_j \lambda_f) + \frac{f_{yv} A_{svj}}{s} (h_{b0} - a'_s) \right] \quad (9.2.7-1)$$

2 其他情况

$$V_f \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left\{ \left[1.1\eta f_t b_j h_j (1 + \beta_j \lambda_f) + 0.05\eta N \frac{b_j}{b_c} \right] + \frac{f_{yv} A_{svj}}{s} (h_{b0} - a'_s) \right\} \quad (9.2.7-2)$$

式中：\$N\$——对应于考虑地震作用组合剪力设计值的节点上柱底部的轴向力设计值（N），且当 \$N > 0.5f_{tc}b_ch_c\$ 时，取 \$N = 0.5f_{tc}b_ch_c\$；当 \$N\$ 为拉力时，取 0；

\$b_c\$、\$h_c\$——分别为上柱底截面的宽度、高度（mm）；

\$A_{svj}\$——配置在核心区有效验算宽度范围内同一截面沿剪力方向箍筋各肢的全部截面面积（mm²）；

\$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（mm）；

\$s\$——节点核心区箍筋间距（mm）；

\$\beta_j\$——钢纤维对框架梁柱节点抗震受剪承载力的影响系数。

3 钢纤维对框架梁柱节点抗震受剪承载力的影响系数 \$\beta_j\$ 应按下列规定取值：

当 \$\eta = 1.0\$ 时，\$\beta_j = 1.05\$；

当 \$\eta = 1.5\$ 时，\$\beta_j = 0.7\$。

9.2.8 钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点的钢纤维含量特征值 \$\lambda_f\$ 不应小于表 9.2.8 的规定。

表 9.2.8 框架梁柱节点最小钢纤维含量特征值

框架抗震等级	一	二	三
\$\lambda_f\$	0.9	0.7	0.5

9.2.9 框架节点中钢纤维混凝土进入相邻梁和柱中的范围不应小于 500mm，且不宜大于 1000mm。

9.2.10 钢筋钢纤维混凝土框架梁柱节点的箍筋的构造要求应符合表 9.2.10 规定。

表 9.2.10 框架梁柱节点配箍构造要求

框架抗震等级	最小配箍特征值	最小体积配箍率	最小箍筋直径 (mm)	箍筋最大间距 (mm)
一	0.09	0.45%	10	150
二	0.07	0.35%	8	150
三	0.05	0.25%	8	200

9.3 剪力墙及连梁

9.3.1 各抗震等级的剪力墙墙肢截面以及剪力墙洞口连梁，考虑地震作用组合的弯矩设计值和剪力设计值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.3.2 考虑地震作用组合的钢纤维混凝土剪力墙及连梁的受剪截面限制条件应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，混凝土轴心抗压强度 f_c 应以 f_{cs} 代替。 f_{cs} 应按本标准公式 (5.3.1) 确定。

9.3.3 考虑地震作用组合的钢纤维混凝土剪力墙及连梁的斜截面抗震受剪承载力应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 应以 f_{ts} 代替。 f_{ts} 应按本标准公式 (4.2.4-2) 确定。

9.3.4 考虑地震作用组合的钢纤维混凝土剪力墙洞口连梁的正截面受弯承载力应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.3.5 考虑地震荷载组合时，剪力墙的墙肢截面厚度与分布钢筋配置构造以及剪力墙与筒体洞口连梁的纵向钢筋、斜筋和箍筋构造应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.4 板柱节点

9.4.1 钢纤维混凝土板柱节点的结构形式及构造措施应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和本标准第 8.0.1 条的有关规定。8 度设防烈度时宜采用有托板或柱帽的板柱节点。

9.4.2 对一级、二级、三级抗震等级的板柱节点应进行抗震受冲切承载力验算。考虑地震作用组合的钢纤维混凝土板柱节点受冲切截面和受冲切承载力应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，其中混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 应以 f_{ft} 代替。 f_{ft} 应按本标准公式 (4.2.4-2) 确定。

9.4.3 在地震作用组合下，当考虑板柱节点临界截面上的剪应力传递不平衡弯矩时，考虑抗震等级的等效集中反力设计值 $F_{ll,eq}$ 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。由地震作用组合的不平衡弯矩在板柱节点处引起的等效集中反力设计值应乘以增大系数，对一级、二级、三级抗震等级板柱结构的节点，该增大系数可分别取 1.7、1.5、1.3。

9.4.4 在地震作用组合下，配置箍筋或栓钉的板柱节点，受冲切截面及受冲切承载力应符合下列规定：

1 受冲切截面的等效集中反力设计值按下式计算：

$$F_{ll,eq} \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} 1.2 f_t \eta u_m h_0 (1 + \beta_p \lambda_f) \quad (9.4.4-1)$$

2 受冲切承载力的等效集中反力设计值按下式计算：

$$F_{ll,eq} \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} [(0.3 f_t + 0.15 \sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0 + 0.8 f_{yv} A_{svu}] (1 + \beta_p \lambda_f) \quad (9.4.4-2)$$

3 对配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外的截面，尚应按下列下式验算受冲切承载力：

$$F_{ll,eq} \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.42 f_t + 0.15 \sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0 (1 + \beta_p \lambda_f) \quad (9.4.4-3)$$

式中： $F_{l,eq}$ ——板柱节点考虑抗震等级的等效集中反力设计值 (N)；

β_p ——钢纤维对钢筋混凝土板受冲切承载力的影响系数，宜通过试验决定；当无试验资料时，可取 0.45；

$\sigma_{pc,m}$ ——计算截面周长上两个方向混凝土有效预压应力按长度的加权平均值 (N/mm^2)，宜控制在 $1.0 N/mm^2 \sim 3.5 N/mm^2$ 范围内；

A_{svu} ——与呈 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋截面面积 (mm^2)；

u_m ——计算截面的周长 (mm)。公式 (9.4.4-1)、公式 (9.4.4-2) 中 u_m 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；公式 (9.4.4-3) 中 u_m 应取最外排抗冲切钢筋周边以外 $0.5h_0$ 处的最不利周长。

9.4.5 沿两个主轴方向贯通节点柱截面的连续预应力钢筋及板底纵向普通钢筋配置方法及配筋量应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

10 工业建筑地面

10.1 一般规定

10.1.1 采用钢纤维混凝土建造工业建筑地面的垫层、面层或垫层兼面层时，其设计方法和构造要求除应符合本章规定，尚应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定。

10.1.2 下列情形下可采用钢纤维混凝土工业建筑地面：

1 受机械磨损或重物冲击严重，对抗裂、抗冲击性和耐磨性要求较高的地面；

2 需要在较大范围内不设接缝的地面；

3 地面堆载较大，采用普通混凝土地面不能满足承载力设计和变形验算要求的地面；

4 其他有特殊设计要求，需要采用钢纤维混凝土建造的地面。

10.1.3 当钢纤维混凝土仅用作地面垫层时，其强度等级不应小于 CF25；当钢纤维混凝土用作地面垫层兼面层及无切缝地面时，钢纤维混凝土强度等级不宜小于 CF30。

10.1.4 地基设计应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的相关规定。当采用压实填土时，地基土的压实系数不宜小于 0.94。

10.2 板厚设计

10.2.1 钢纤维混凝土地面板的承载力安全等级和结构重要性系数应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定。

10.2.2 钢纤维混凝土地面的荷载标准值与荷载分项系数应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑地面设计

规范》GB 50037 的有关规定。车辆起动和刹车的动力系数可取 1.1~1.2；钢纤维混凝土的材料分项系数应取 1.4。正常使用极限状态验算时，荷载和材料分项系数均应取 1.0，且不考虑动力系数。

10.2.3 钢纤维混凝土切缝地面的地面板厚度不宜小于 120mm，无切缝地面的地面板厚度不宜小于 140mm。

10.2.4 仅采用钢纤维混凝土做地面面层时，其厚度不宜小于 60mm，在确保面层与混凝土垫层可靠粘结情况下，面层厚度可减薄，但不应小于 40mm。面层下混凝土垫层的厚度应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定。

10.2.5 钢纤维混凝土地面板的内力分析计算可采用本标准附录 A 规定的方法。

10.2.6 钢纤维混凝土的残余弯拉强度 f_{R1k} 、 f_{R3k} 与比例极限弯拉强度 $f_{ctk.l}^I$ 应按本标准附录 B 的试验方法确定，且其比值应符合下列规定：

1 切缝地面

$$\frac{f_{R1k}}{f_{ctk.l}^I} \geq 0.4 \quad (10.2.6-1)$$

$$\frac{f_{R3k}}{f_{ctk.l}^I} \geq 0.3 \quad (10.2.6-2)$$

2 无切缝地面

$$\frac{f_{R1k}}{f_{ctk.l}^I} \geq 0.6 \quad (10.2.6-3)$$

$$\frac{f_{R3k}}{f_{ctk.l}^I} \geq 0.4 \quad (10.2.6-4)$$

式中： $f_{ctk.l}^I$ ——钢纤维混凝土的比例极限弯拉强度标准值（N/mm²）；

f_{R1k} ——对应于试验梁切口张开水平位移为 0.5mm 时的钢纤维混凝土残余弯拉强度标准值（N/mm²）；

f_{R1k} 不应小于 1.5N/mm²；

f_{R3k} ——对应于试验梁切口张开水平位移为 2.5mm 时的

钢纤维混凝土残余弯拉强度标准值 (N/mm^2);
 f_{R3k} 不应小于 $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 。

10.2.7 钢纤维混凝土地面板的正截面受弯承载力应符合下列公式规定:

$$m_{\text{Ed}} + m'_{\text{Ed}} \leq m_{\text{Rd}} + m'_{\text{Rd}} \quad (10.2.7-1)$$

$$m_{\text{Rd}} = \frac{f_{\text{R3k}}}{\gamma_{\text{fc}}} \times \frac{h^2}{6} \quad (10.2.7-2)$$

$$m'_{\text{Rd}} = \frac{f'_{\text{ctk},\text{I}}}{\gamma_{\text{fc}}} \cdot \frac{h^2}{6} \quad (10.2.7-3)$$

式中: $m_{\text{Ed}} + m'_{\text{Ed}}$ ——最不利荷载组合下相邻板底和板顶正、负弯矩的最大值之和 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

$m_{\text{Rd}} + m'_{\text{Rd}}$ ——板底和板顶正截面承载力设计值的最大值之和 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

m_{Rd} ——板底正截面承载力设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

m'_{Rd} ——板顶正截面承载力设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

$f'_{\text{ctk},\text{I}}$ ——钢纤维混凝土的比例极限弯拉强度标准值 (N/mm^2);

f_{R3k} ——对应于试验梁切口张开水平位移为 2.5mm 的钢纤维混凝土残余弯拉强度标准值 (N/mm^2), 可取 $1.0\text{N}/\text{mm}^2 \sim 5.0\text{N}/\text{mm}^2$;

γ_{fc} ——钢纤维混凝土材料分项系数;

h ——地面板厚度 (mm)。

10.2.8 连续钢纤维混凝土地面板可不验算其受冲切承载力。

10.3 构造规定

10.3.1 钢纤维混凝土地面板的接缝可采用切缝、平头缝、企口缝、传力杆缝。各种接缝的构造要求应符合下列规定:

1 当传力杆用于缩缝时, 缝间可不放置填缝材料; 当传力杆用于伸缝时 (图 10.3.1-1), 缝间应放置填缝材料。传力杆宜采用光圆钢筋, 其尺寸与间距可按表 10.3.1 选用, 最外边传力

杆与接缝或自由边的距离宜为 150mm。传力杆一端应套管或蘸沥青。

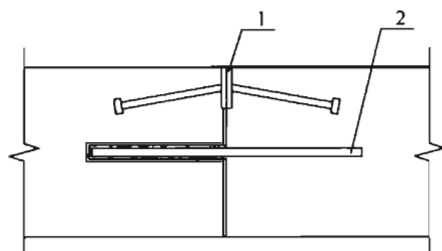


图 10.3.1-1 带护边专用传力杆

1—护边钢板；2—传力杆

表 10.3.1 传力杆尺寸与间距 (mm)

地面板厚度	钢筋直径	最小长度	最大间距
$h \leq 200$	16	400	300
$200 < h \leq 300$	20	500	300
$h > 300$	25	500	300

2 变形缝用作伸缝、沉降缝时，其宽度宜为 20mm，缝内应填充低弹模弹性材料。当变形缝位于经常承受机械磨损、冲击的区段时，其两侧宜加护边角钢保护，并宜设置传力杆 (图 10.3.1-1)。

3 钢纤维混凝土地面板应设置隔离缝 (图 10.3.1-2) 与

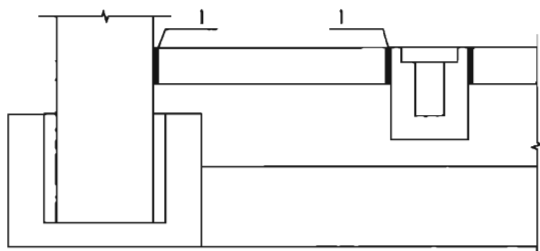


图 10.3.1-2 柱、墙体和沟渠四周的隔离缝设置

1—低弹性材料

柱、墙体等建筑构件及沟渠四周隔开。对于有切缝地面，隔离缝宽宜为 10mm；对于无切缝地面，隔离缝宽宜为 20mm。隔离缝内宜填低弹性材料。

4 其他各类接缝的要求应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定。

10.3.2 钢纤维混凝土地面板的纵向缩缝和横向缩缝设置应符合下列规定：

1 以纵向缩缝与横向缩缝将地面分成板块，板块形状应为正方形或矩形，矩形长宽比不宜大于 1.5。

2 纵向和横向缩缝宜垂直相交，不得互相错位。

3 纵向缩缝可采用假缝、平头缝、企口缝或传力杆缝；横向缩缝宜采用假缝。假缝宽度宜为 3mm~8mm，深度宜为地面板厚度的 1/3（图 10.3.2），缝内可充填弹性填缝料。

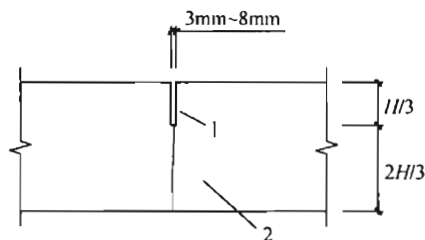


图 10.3.2 假缝尺寸要求

1 假缝；2 钢纤维混凝土地面板

4 当钢纤维混凝土仅做面层时，地面分缝的设置应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定。

10.3.3 钢纤维混凝土地面可分条浇筑或一次浇筑施工。非同时浇筑的钢纤维混凝土地面间应设置施工缝，宜采用传力杆缝、平头缝或企口缝。施工缝的设置宜与缩缝结合，并应符合本标准第 10.3.2 条规定。

10.3.4 钢纤维混凝土无切缝地面的接缝应采用带传力杆的伸缝、隔离缝。无切缝地面浇筑分仓的形状应为正方形或矩形，矩

形长宽比不大于 1.5。分仓区域尺寸不宜大于 $45\text{m} \times 45\text{m}$ 。地面
板应与柱、墙体等结构构件通过隔离缝脱开。

10.3.5 钢纤维混凝土地面的柱角、墙角和设备基础等角部区域
宜布置不少于 5 根 HPB300 级、直径 12mm、间距 100mm、长
1m 的附加“八字形”钢筋（图 10.3.5）。

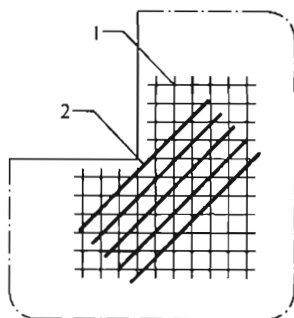


图 10.3.5 角部附加“八字形”钢筋

1—钢网支撑；2—角部附加钢筋

11 城镇道路与桥梁桥面

11.1 一般规定

11.1.1 钢纤维混凝土可用于城镇道路路面、混凝土拱桥、钢筋混凝土与部分预应力混凝土梁桥以及其他类型桥梁。

11.1.2 钢纤维混凝土城镇道路路面与桥梁桥面的设计除应符合本标准的规定外，尚应符合现行行业标准《城市道路工程设计规范》CJJ 37、《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 和《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的有关规定。

11.2 城镇道路路面

11.2.1 城镇道路路面钢纤维混凝土弯拉强度标准值应符合表 11.2.1 的规定。

表 11.2.1 钢纤维混凝土弯拉强度标准值

交通等级	特重、重	中等	轻
钢纤维混凝土弯拉强度标准值 (N/mm^2)	6.0	5.5	5.0

11.2.2 钢纤维混凝土路面在全幅摊铺时可不设纵向伸缩缝。路面板横向伸缩缝间距应根据当地气候条件、路面板厚度、钢纤维掺量和已有资料及工程经验确定，可比同条件混凝土路面横向伸缩缝间距延长，但不宜超过 15m。

11.2.3 各交通等级的钢纤维混凝土路面板厚度，可按下列规定确定并满足计算要求：

1 当钢纤维体积率为 1.0%~1.5% 时，其厚度可按现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 规定的普通混凝土路面板初选厚度的 65%~55% 选用；当钢纤维体积率为 0.6%~1.0% 时，其厚度可按现行行业标准《城镇道路路面设计规范》

CJJ 169 规定的普通混凝土路面板初选厚度的 75%~65% 选用；当钢纤维体积率低于 0.6% 时，其厚度的折减量应通过试验确定并满足计算要求。

2 特重、重交通路面的钢纤维混凝土路面板厚度不宜小于 180mm；中等、轻交通路面的钢纤维混凝土路面板厚度不宜小于 160mm。

11.2.4 钢纤维混凝土路面板结构设计应以行车荷载和温度梯度综合作用产生的疲劳断裂作为设计的极限状态，应符合下式规定：

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_{tm} \quad (11.2.4)$$

式中： γ_r ——可靠度系数，应符合现行国家标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的有关规定；

f_{tm} ——钢纤维混凝土弯拉强度标准值 (N/mm²)；

σ_{pr} ——行车荷载疲劳应力 (N/mm²)；

σ_{tr} ——温度梯度疲劳应力 (N/mm²)。

11.2.5 钢纤维混凝土路面板在标准轴载作用下，在临界荷位处产生的荷载疲劳应力应按下列公式确定：

$$\sigma_{pr} = k_r k_{II} k_c \sigma_{ps} \quad (11.2.5-1)$$

$$k_{II} = (1 - 0.30\lambda_I) N_e^{0.057} \quad (11.2.5-2)$$

式中： σ_{ps} ——标准轴载在四边自由板临界荷位处产生的荷载应力 (N/mm²)；

k_r ——考虑接缝传荷能力的应力折减系数；

k_c ——考虑偏载和动载等因素对路面疲劳损坏影响的综合系数；

k_{II} ——考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数；

N_e ——设计基准期内标准轴载累积作用次数。

σ_{ps} 、 k_r 、 k_c 和 N_e 均应符合现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的有关规定。

11.2.6 钢纤维混凝土路面板在温度梯度作用下，临界荷位处的

温度疲劳应力计算应符合现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的有关规定,其中混凝土的弯拉强度标准值应以钢纤维混凝土的弯拉强度标准值代替。

11.2.7 原混凝土路面上钢纤维混凝土加铺层的设计,除应符合现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的有关规定外,尚应符合下列规定:

1 隔离式或直接式加铺层厚度可按式计算:

$$h_{of} = \frac{h_l}{h_{dc}} \sqrt[n]{h_{df}^n - c \left(\frac{h_{df}}{h_{dc}} \cdot h_c \right)^n} \quad (11.2.7-1)$$

2 结合式钢纤维混凝土加铺层厚度可按式计算:

$$h_{of} = 0.9 \left(h_{df} - \frac{h_{df}}{h_{dc}} \cdot h_c \right) \quad (11.2.7-2)$$

式中: h_{of} ——原混凝土路面上钢纤维混凝土加铺层厚度 (mm);

h_l ——在原路面地基上修筑钢纤维混凝土单层板所需的厚度 (mm);

h_{df} ——根据加铺层钢纤维混凝土弯拉强度标准值计算的,在原路面地基上修筑普通混凝土单层面板所需的厚度 (mm);

h_{dc} ——根据原路面混凝土弯拉强度标准值计算的,在原路面地基上修筑普通混凝土单层面板所需的厚度 (mm);

h_c ——原混凝土路面板厚度 (mm);

c ——原路面的损坏状况系数,当原路面基本完整时取 1.0,有少量损坏时取 0.75,部分破坏时取 0.50,破坏严重时取 0.35;

n ——指数。当采用隔离式时,取 2.0;采用直接式时,取 1.4。

11.2.8 在沥青混凝土等柔性路面上铺筑钢纤维混凝土加铺层时,可将原有柔性路面作为基层,加铺钢纤维混凝土面层,并应符合下列规定:

1 钢纤维混凝土加铺层铺筑前应对较严重的车辙、拥包进行铣刨，对坑槽和网裂较严重的路段应进行结构补强；

2 钢纤维混凝土加铺层厚度不宜小于 140mm；

3 钢纤维混凝土加铺层可按新建钢纤维混凝土路面面层设计。

11.2.9 钢纤维混凝土路面加铺层接缝与原路面接缝间应符合下列规定：

1 直接式和结合式钢纤维混凝土路面加铺层的接缝应与原路面的接缝重合；当原路面横向缩缝间距小于 4.5m 时，加铺层内可间隔取消一条横向缩缝；原路面纵向缩缝可被加铺层覆盖；纵向工作缝应与旧路面的纵向工作缝相对应。

2 隔离式加铺层路面的接缝可不必与原路面接缝相对应。

11.3 层布式钢纤维混凝土复合路面

11.3.1 层布式钢纤维混凝土复合路面的设计除应符合本标准规定外，尚应符合现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的有关规定。

11.3.2 层布式钢纤维混凝土复合路面中所用钢纤维除应符合本标准第 4.1 节的规定外，其上、下各层钢纤维混凝土的钢纤维体积率宜为 0.9%~1.5%，钢纤维长径比宜为 60~100。

11.3.3 层布式复合路面钢纤维混凝土的弯拉强度应符合本标准第 11.2.1 条的规定。

11.3.4 层布式复合路面钢纤维混凝土弯拉强度应通过试验确定。当无试验资料且满足本标准第 11.2.1 条的规定时，层布式钢纤维混凝土弯拉强度可按混凝土弯拉强度的 1.18 倍~1.30 倍采用；钢纤维含量特征值为低值时应取下限，为高值时应取上限，中间可线性内插。

11.3.5 层布式路面钢纤维混凝土弯拉弹性模量可根据同强度等级普通混凝土弯拉强度标准值，按现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 执行。

11.3.6 层布式钢纤维混凝土复合路面的横向缩缝间距可按本标准第 11.2.2 条的规定确定。

11.3.7 各交通等级下的层布式钢纤维混凝土复合路面板的初选厚度，当上、下层钢纤维体积率为 0.9%~1.5% 时，可按现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 规定的水泥混凝土路面板初选厚度的 75%~65% 选用。层布式钢纤维混凝土复合路面板的厚度不应小于 140mm。

11.3.8 层布式钢纤维混凝土复合路面板在标准轴载作用下，在临界荷位处产生的荷载疲劳应力可按本标准公式 (11.2.5-1) 确定，其中层布式钢纤维混凝土复合路面的疲劳应力系数 $k_{ff,1}$ 应按下式计算：

$$k_{ff,1} = (1 - 0.18\rho_{f,1}l_f/d_f)N_c^{0.057} \quad (11.3.8)$$

式中： $k_{ff,1}$ ——层布式钢纤维混凝土复合路面的疲劳应力系数；

$\rho_{f,1}$ ——层布式钢纤维混凝土局部钢纤维体积率 (%)。

11.3.9 层布式钢纤维混凝土复合路面板在温度梯度作用下，临界荷位处产生的温度疲劳应力计算应符合现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 的有关规定。

11.3.10 层布式钢纤维混凝土复合路面板的厚度应按本标准第 11.2.7 条进行强度验算，其中钢纤维混凝土弯拉强度标准值 f_{tm} 应以层布式钢纤维混凝土弯拉强度标准值 $f_{tm,1}$ 替换。

11.3.11 在沥青混凝土等柔性路面上，铺筑层布式钢纤维混凝土加铺层时，宜将原有柔性路面作为基层，加铺层应按新铺层布式钢纤维混凝土复合路面板计算。层布式钢纤维混凝土复合路面也可作为沥青混凝土路面的基层。

11.4 城镇桥梁桥面

11.4.1 对于简支、连续体系结构和轻型拱式结构的城镇桥梁桥面，当采用钢纤维混凝土做铺装层时可按本节规定设计；对于重型拱式桥梁，当钢纤维混凝土桥面铺装填充料上时，宜按本标准第 11.2 节城镇道路路面的有关规定设计。

11.4.2 桥面铺装层的钢纤维混凝土除应满足本标准第 4.1 和 4.2 节的有关规定外,强度等级不应低于 CF40,弯拉强度标准值不应低于 5.5MPa。

11.4.3 桥面钢纤维混凝土铺装层厚度应根据气候条件、使用条件、桥梁结构对桥面的要求和钢纤维混凝土的性能并根据已有工程资料或当地经验确定,宜为 80mm~100mm,有特殊需要时可适当减薄,但不应小于 60mm。

11.4.4 桥面钢纤维混凝土铺装层内宜配置钢筋网或焊接钢筋网片。钢筋直径不应小于 8mm,网格间距不宜大于 200mm,保护层厚度宜取 35mm。跨径较小、刚度较大的桥梁桥面或当地确有工程经验时,可取消钢纤维混凝土桥面铺装层内的钢筋网。

11.4.5 桥面铺装层分缝应符合下列规定:

1 应采用垂直相交的矩形分块纵缝和横缝,纵缝两侧的横缝不得互相错位。

2 纵缝的间距应根据桥面宽度、行车道宽度及施工铺筑宽度确定,但不应大于 15m,单向坡三车道或小于三车道的桥面可不设纵缝。纵缝构造可按现行行业标准《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40 的有关规定设计。

3 横缝分为缩缝或伸缝,横向缩缝间距应依据气候条件、钢纤维性能和体积率、桥面长度等因素确定,宜为 10m~15m。伸缝间距可取为缩缝间距的 2 倍,伸缝宽度宜取 5mm~8mm。横缝构造可按现行行业标准《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40 的有关规定设计。

4 桥面铺装层在桥梁结构伸缩缝处应设变形缝或施工缝,缝边宜采用型钢加强,缝两侧桥面铺装层的钢纤维混凝土宜提高强度等级和纤维掺量。

12 城市隧道、边坡支护、建筑结构修复与加固工程

12.1 一般规定

12.1.1 本章适用于矿山法施工隧道采用喷射钢纤维混凝土支护、钢纤维混凝土模筑衬砌、喷射钢纤维混凝土基坑边坡支护以及喷射钢纤维混凝土修复与加固建筑工程的设计。

12.1.2 隧道洞室支护中，软弱围岩的初期支护、裂损隧道衬砌修补、既有衬砌结构加固以及用作高地应力的硬岩地层岩爆保护时，可采用喷射钢纤维混凝土。

12.1.3 隧道洞室支护中的二次衬砌，对抗拉、抗剪、抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆等性能要求较高的地下结构，对存在高水压、高地应力、挤压性围岩和有抗震设防和国防要求的地下结构以及寒冷地区隧道可采用钢纤维混凝土模筑衬砌。

12.1.4 用于边坡或基坑支护时，可根据边坡稳定情况将喷射钢纤维混凝土与锚杆或钢筋网结合使用。

12.1.5 喷射钢纤维混凝土支护结构的设计除应符合本标准外，尚应符合国家现行标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 和《铁路隧道设计规范》TB 10003 的有关规定。

12.2 城市隧道支护

12.2.1 喷射钢纤维混凝土支护和衬砌参数应根据下列地质条件进行设计：

- 1 岩体完整性，节理裂隙发育程度；
- 2 岩石矿物成分，岩块强度和变形特征，物理膨胀性；
- 3 初始地应力情况；
- 4 地下水情况；

5 地温、水温等特殊地质条件。

12.2.2 用于围岩初期支护的喷射钢纤维混凝土应符合下列规定：

1 喷射钢纤维混凝土抗压强度等级不应低于 C30，并应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的有关规定。

2 喷射钢纤维混凝土的钢纤维掺量应根据弯曲韧性指标要求确定。弯曲韧性指标宜符合表 12.2.2 的规定，其中弯曲韧性比 $R_{e,150}$ 应按现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 中规定的对应于跨中挠度 δ_k 为 $L/150$ 时的弯曲韧度比确定，能量吸收值 G 可通过方板法弯曲韧性试验确定。

3 喷层厚度应根据围岩地质条件确定，当喷层厚度大于 200mm 时，应分次喷射施工。

4 喷射钢纤维混凝土符合表 12.2.2 规定的弯曲韧性指标时，初期支护可不再设置钢筋网，其中围岩分级应符合《工程岩体分级标准》GB/T 50218 的规定。

表 12.2.2 初期支护的喷射钢纤维混凝土的弯曲韧性指标

围岩级别	能量吸收值 G (J)	弯曲韧性比 $R_{e,150}$ (%)
IV	700	50
V	1000	60
V 以下及挤压型，膨胀性	>1000	>60

5 喷射钢纤维混凝土原材料和配合比设计应符合现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的有关规定。

12.2.3 采用喷射钢纤维混凝土单层衬砌的围岩应符合下列规定：

1 围岩无显著变形或采取先期支护措施围岩变形已基本稳定；

2 岩块具有足够的强度，岩面和喷射混凝土层之间的粘结

强度能得到保证；

3 地下水不发育。

12.2.4 用于隧道单层衬砌的喷射钢纤维混凝土应符合下列规定：

1 能量吸收值宜为 800J～1050J，弯曲韧性比不应小于 55%。

2 喷射钢纤维混凝土与岩面间的粘结强度不应小于表 12.2.4-1 的规定。

表 12.2.4-1 喷射钢纤维混凝土与岩面间的粘结强度

项目	与围岩面间的粘结强度 (MPa)
非结构性的防护	0.1
支护结构	0.5

3 喷层厚度不应小于 60mm，不宜大于 250mm。单层衬砌设计参数可按照表 12.2.4-2 选用，围岩分级应符合《工程岩体分级标准》GB/T 50218 的规定。对于不同跨度单双线隧道的隧道横断面尺度对设计参数的影响可采用锚杆参数调节。

表 12.2.4-2 单层衬砌设计参数

围岩级别		Ⅱ	Ⅲ
岩块强度 R_c (MPa)		≥ 30	≥ 30
喷层厚度 (mm)	单线隧道	80	120
	双线隧道	100～120	160
锚杆		局部设置或系统设置	局部设置或系统设置

4 喷射钢纤维混凝土的抗冻性、抗渗透性及耐久性指标应满足设计要求。

12.2.5 地下结构模筑钢纤维混凝土衬砌应符合下列规定：

1 钢纤维混凝土衬砌可按现行行业标准《铁路隧道设计规范》TB 10003 中有关规定设计，且应符合下列规定：

- 1) 钢纤维混凝土结构构件承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算的要求, 裂缝控制等级, 变形和裂缝宽度的规定限值以及耐久性要求等均应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的规定;
 - 2) 钢筋钢纤维混凝土结构构件正常使用极限状态下的裂缝宽度、钢筋应力以及受弯构件挠度可按本标准第 6 章的规定计算;
 - 3) 钢纤维混凝土构件承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算, 应按实际采用的钢纤维长径比或等效长径比和体积率计算钢纤维含量特征值 λ_l , 当 $\lambda_l > 1.2$ 时, 宜取 1.2。
- 2 钢纤维混凝土衬砌材料应符合下列规定:
- 1) 钢纤维混凝土轴心抗压强度、抗拉强度、受压和受拉弹性模量, 剪切模量、泊松比、线膨胀系数应符合本标准第 4.2 节的规定;
 - 2) 钢纤维的体积率宜根据设计要求的抗拉强度、弯拉强度、韧性要求中至少一项通过试验确定或根据已有资料经过计算确定。

12.2.6 钢筋钢纤维混凝土衬砌结构的承载能力极限状态和正常使用极限状态的设计计算及构造措施应符合本标准第 5 章、第 6 章和第 8 章的规定。

12.3 边坡支护工程

12.3.1 边坡喷射钢纤维混凝土支护设计应根据岩土性状、地下水、边坡高度、坡度、周边环境、坡顶建筑物荷载、地震力及气候等因素确定。可采用防护型喷射钢纤维混凝土或与锚杆、预应力锚杆等配合使用。

12.3.2 永久性边坡宜采用预应力锚杆或预应力锚杆与非预应力锚杆相结合的支护类型。坡面宜采用厚度不小于 8cm 的配筋喷

射钢纤维混凝土支护。

12.3.3 边坡喷射钢纤维混凝土支护设计应包括防排水设计。边坡的喷射钢纤维混凝土护层内应设泄水孔。

12.3.4 下列边坡工程的锚喷支护设计应通过试验验证或专家论证：

- 1 高度大于 30m 的岩石边坡和高度大于 20m 的土质边坡工程；
- 2 地质及环境条件复杂、稳定性极差的边坡工程；
- 3 滑坡内的边坡工程；
- 4 失稳破坏后边坡工程。

12.4 修补和加固工程

12.4.1 用于修补和加固既有裂损结构的喷射钢纤维混凝土加固设计应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的有关规定，且应符合下列规定：

1 喷射钢纤维混凝土的加固设计与施工应优先采用卸荷加固方法，结构计算简图应根据结构的实际受力状况确定；

2 结构构件的承载力计算，应综合考虑结构构件截面在加固前已有的应力、加固截面的应变滞后和加固部分与原结构共同工作的程度；还应综合考虑实际的荷载偏心、结构变形和温度作用引起的附加内力；

3 应根据加固后结构自重增大与构件刚度变化等，对加固结构及其相关结构和建筑物的地基基础进行验算。

12.4.2 加固和修复采用的喷射钢纤维混凝土强度等级不应低于 CF30，且应比被加固结构的混凝土强度等级高（1~2）级。

12.4.3 喷射钢纤维混凝土层的最小厚度应符合下列规定：

- 1 用于结构构件承载力加固时，其厚度不应小于 60mm；
- 2 用于结构耐久性修复时，其厚度不应小于 40mm。

12.4.4 加固结构表面宜涂刷界面剂或植插锚固筋，且应符合下列规定：

1 用于非结构加固的喷射钢纤维混凝土与既有混凝土间的粘结力应大于 0.5MPa;

2 用于结构加固的喷射钢纤维混凝土与既有混凝土间的粘结力应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的规定。

12.4.5 采用喷射钢纤维混凝土加固的钢筋混凝土构件应符合下列规定:

1 加固钢筋混凝土轴心受压构件时,其正截面承载力应按下列式计算:

$$N \leqslant \phi [f_{co} A_{co} + f'_{yo} A'_{yo} + \alpha (f_{fc} A_{fc} + f'_y A'_s)] \quad (12.4.5)$$

式中: N ——构件的轴向力设计值 (N);

ϕ ——构件的稳定性系数,以加固后截面为准,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定;

f_{co} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm²);

A_{co} ——原构件的截面面积 (mm²);

f'_{yo} ——原构件纵向钢筋抗压强度设计值 (N/mm²);

A'_{yo} ——原构件纵向钢筋截面面积 (mm²);

A_{fc} ——喷射钢纤维混凝土截面面积 (mm²);

f_{fc} ——喷射钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm²),按相同强度等级喷射混凝土强度设计值选用;

f'_y ——构件加固用纵向钢筋抗压强度设计值 (N/mm²);

A'_s ——构件加固用纵向受压钢筋截面面积 (mm²);

α ——考虑后加固部分应变滞后和新旧混凝土协同工作差异时,加固用喷射钢纤维混凝土和纵向钢筋的强度利用系数,可取 0.8。

2 当采用卸荷加固时,加固用喷射钢纤维混凝土和纵向钢筋的强度利用系数可根据卸荷后原构件的实际应力水平或相关试验数据予以提高。

3 加固钢筋混凝土偏心受压构件时，其承载力计算应按整体截面根据现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 以及本标准第 5 章中的有关规定执行，其中新增喷射钢纤维混凝土和纵向钢筋的强度设计值应按下列规定予以折减：

- 1) 加固后为大偏心受压构件时，受压区新增喷射钢纤维混凝土和纵向钢筋的抗压强度设计值、受拉区新增加的纵向钢筋抗拉强度设计值和喷射钢纤维混凝土的抗拉强度设计值均应乘以折减系数 0.9；
- 2) 加固后为小偏心受压构件时，受压区新增喷射钢纤维混凝土和纵向钢筋的抗压强度设计值均应乘以折减系数 0.8，受拉区新增加的纵向钢筋抗拉强度设计值和喷射钢纤维混凝土的抗拉强度设计值均应乘以折减系数 0.9。

4 加固梁板为受弯构件时，应根据结构的实际情况，分别在受压区和受拉区采用不同的加固形式。对在受压区加固的受弯构件，其承载力、抗裂度、裂缝宽度及变形计算和验算可按本标准第 7.1 节的规定确定；对在受拉区加固的受弯构件，计算其承载力时，新增纵向钢筋抗拉强度设计值和喷射钢纤维混凝土的抗拉强度设计值应乘以折减系数 0.9。

5 喷射钢纤维混凝土的抗压强度应按现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 规定的相同强度等级喷射混凝土强度设计值选用。

6 受拉区喷射钢纤维混凝土的抗拉强度应按现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 规定的相同强度等级喷射混凝土抗拉强度值和本标准 4.2 节规定确定。

7 当允许受拉区喷射钢纤维混凝土开裂，则应考虑受拉区钢纤维混凝土的残余抗拉强度，其裂缝宽度应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的正常使用极限状态允许的裂缝宽度限值。新增喷射钢纤维混凝土的抗拉强度设计值应乘以折减系数 0.9。

12.4.6 当采用喷射钢纤维混凝土夹板墙对墙砌体进行抗震加固时应符合下列规定：

1 楼层抗震能力的增强系数可按下式计算：

$$\eta_{pi} = 1 + \frac{\sum_{j=1}^n (\eta_{pj} - 1) A_{ij0}}{A_{i0}} \quad (12.4.6)$$

式中： η_{pi} ——面层加固的第 i 楼层抗震能力的增强系数；

η_{pj} ——第 i 层中第 j 加固墙段的增强系数；

n ——第 i 楼层中在验算方向上面层加固的抗震墙道数；

A_{ij0} ——第 i 楼层第 j 墙段在 1/2 层高处的净截面面积 (mm^2)；

A_{i0} ——第 i 楼层中在验算方向上原有抗震墙在 1/2 层高处的净截面总面积 (mm^2)。

2 第 i 层中第 j 加固墙段的增强系数 η_{pj} 可按表 12.4.6 采用。

表 12.4.6 墙体加固后的增强系数

原墙体砌筑砂浆的强度等级	加固墙段的增强系数
M2.5、M5	2.5
M7.5	2.0
M10	1.8

附录 A 钢纤维混凝土工业地面设计计算

A.1 接缝荷载折减系数

对于由不同类型接缝组成的地面，用于地面缝边弯矩计算的荷载应进行折减。地面接缝荷载折减系数可按表 A.1 选用。

表 A.1 地面接缝的荷载折减系数

接缝类型		荷载折减系数 χ
隔离缝	缝张开宽度 (mm)	1.0
切缝	≤ 1	0.65
	≤ 2	0.75
	≤ 3	0.85
切缝相交处	—	$1 - \sqrt{2}(1 - \chi_1)$
带传力杆缝	—	0.60

注： χ_1 ——切缝的荷载折减系数。

A.2 内力分析

A.2.1 钢纤维混凝土地面垫层或垫层兼面层厚度应按承载能力极限状态设计。当集中荷载作用在板中心时，相邻板底和板顶正负弯矩值之和可按下式计算：

$$m + m' = \frac{\gamma_0 S_0}{6(1 + 2r/L)} \quad (\text{A.2.1})$$

式中： m ——单位宽度地面板底正弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)；

m' ——单位宽度地面板顶负弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)；

γ_0 ——结构重要性系数，应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的有关规定；

S_0 ——考虑多点荷载对主荷载影响的作用在地面板上的荷

载设计值 (N);

r — 圆形荷载支承面的计算半径或者当量圆计算半径 (mm);

L — 地面板相对刚度半径 (mm)。

A. 2. 2 当集中荷载作用在板角时, 荷载内力计算值可按下式计算:

$$m + m' = \frac{\gamma_0 S_0}{2(1 + 4r/L)} \quad (\text{A. 2. 2})$$

A. 2. 3 当荷载作用在板边时, 荷载内力计算值可按下列情况计算:

1 单独集中荷载作用下

$$m + m' = \frac{\gamma_0 S_0}{3.5(1 + 3r/L)} \quad (\text{A. 2. 3-1})$$

2 车轮荷载作用下

1) 当轮轴平行于板边时:

$$m + m' = \frac{zP}{3} \quad (\text{A. 2. 3-2})$$

式中: P —— 车辆和运输机械单个轮轴处作用在地面板上的荷载设计值 (N);

z —— 当量力臂 (图 A. 2. 3a), 取 X 为圆形荷载支承面的计算半径或者当量圆计算半径 r , 计算 X/Y 和 X/L 。

2) 当轮轴垂直于板边时:

$$m + m' = \frac{zP}{2} \quad (\text{A. 2. 3-3})$$

式中: P —— 车辆和运输机械单个轮轴处作用在地面板上的荷载设计值 (N);

z —— 当量力臂 (图 A. 2. 3b), 取 Y 为圆形荷载支承面的计算半径或者当量圆计算半径 r , 计算 Y/X 和 X/L 。

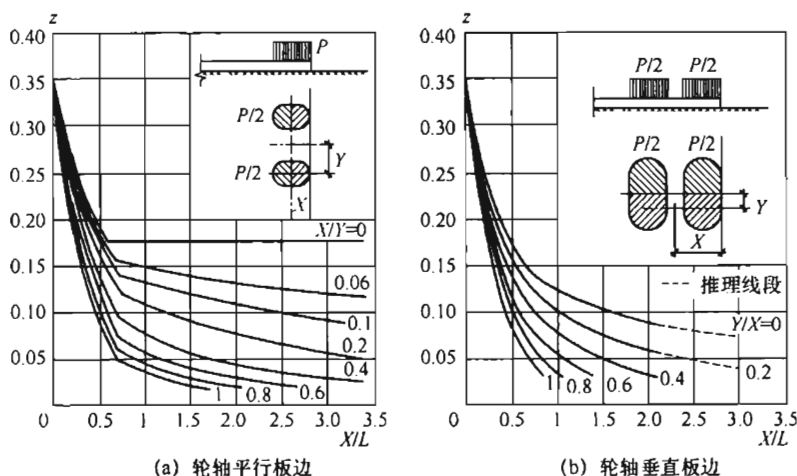


图 A.2.3 当量力臂值 z

A.3 相对刚度半径计算

A.3.1 当基层是回弹地基时，地面板的相对刚度半径 L 按下式计算：

$$L = 0.54 \times \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{K}} \quad (\text{A.3.1})$$

式中： L ——地面板相对刚度半径 (mm)；
 E ——钢纤维混凝土弹性模量 (N/mm^2)；
 h ——地面板厚度 (mm)；
 K ——回弹地基的反力系数 (N/mm^3)。

A.3.2 当基层是弹性地基时，地面板的相对刚度半径 L 按下式计算：

$$L = 0.5h \sqrt[3]{\frac{E}{E_0}} \quad (\text{A.3.2})$$

式中： E_0 ——弹性地基的变形模量 (N/mm^2)。当缺乏试验资料时，可按现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 选取。

A.4 板 厚 计 算

A.4.1 板厚计算应符合下列规定：

1 应根据荷载条件、地基情况和拟采用地面结构的特性，结合工程经验选取板厚初始值 h_0 ，确定各有关设计参数和板的相对刚度半径；

2 应根据各种荷载作用下板的内力确定最不利荷载组合下板的内力设计值，并应根据本标准第 10.2.7 条规定计算钢纤维混凝土面板厚度。

A.4.2 板厚应符合本标准第 10.2.3 条最小限值的规定。

附录 B 钢纤维混凝土残余弯拉强度测试方法

B.1 试验设备

B.1.1 液压伺服试验机的量程不应小于 200kN，相对误差不应大于 1.0%，试验机必须具有足够的刚度，并应能实现位移控制加载。

B.1.2 荷载传感器量程应根据试验要求确定，精度不应低于 1%。

B.1.3 位移传感器和夹式应变仪的量程不应小于 5mm，精度不应低于 0.01mm。

B.1.4 动态数据采集系统应能实时采集荷载、应变与位移的数值，采样频率不宜低于 5Hz。

B.1.5 挠度测量架应包括水平安装的铝板、固定钮、位移传感器触头顶板等。

B.1.6 试件加载位置（图 B.1.6）中，辊轴直径为 30mm $\pm$ 1mm，长度为 160mm；三个辊轴可自由滚动，两个支承辊轴中心线之间的间距 l 为 500mm $\pm$ 2.0mm。

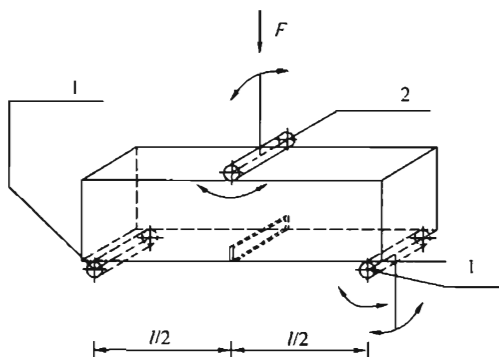


图 B.1.6 试件加载位置
1—支承辊轴；2—加载辊轴

B.2 试件制作和养护

B.2.1 试件制作养护应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 规定。

B.2.2 试件尺寸宜采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 550\text{mm}$ 。

B.2.3 试件的填料步骤（图 B.2.3），先填充区域 1，再填充区域 2，区域 1 的面积应达到区域 2 的 2 倍。当模具中的混凝土达到试件高度 90% 时应进行振捣，振捣过程中应加满并整平混凝土。振捣应采用外部振动法。

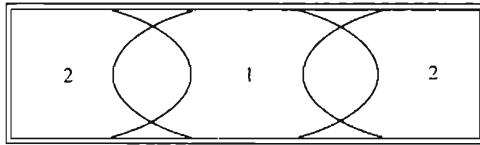


图 B.2.3 试件制作填料分区

B.2.4 应将试件成型时的侧面作为支承面，支承面跨中预开口，开口宽度不大于 5mm ，深度宜为 $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 。开口应位于梁的跨中且垂直于梁轴线，宜采用自动切割机，在开口处喷水的湿切作业切割。

B.3 试验步骤

B.3.1 应进行试件尺寸测量，并应作出安装位置和测试仪表位置的标记。

B.3.2 应将试件无偏心地放置于支座上，并应以试件预开口面作为支承面。预开口处水平张开位移和挠度测量的位移传感器应安装在跨中（图 B.3.2-1 和图 B.3.2-2）。

B.3.3 挠度测量装置应采用型钢或铝材制作的刚架，固定刚架与试件侧面的螺栓，要求刚架的一端可滑动，另一端可转动（图 B.3.2-2）。当采用挠度测试时，可按公式（B.3.3）将跨中挠度值换算为跨中切口水平位移值：

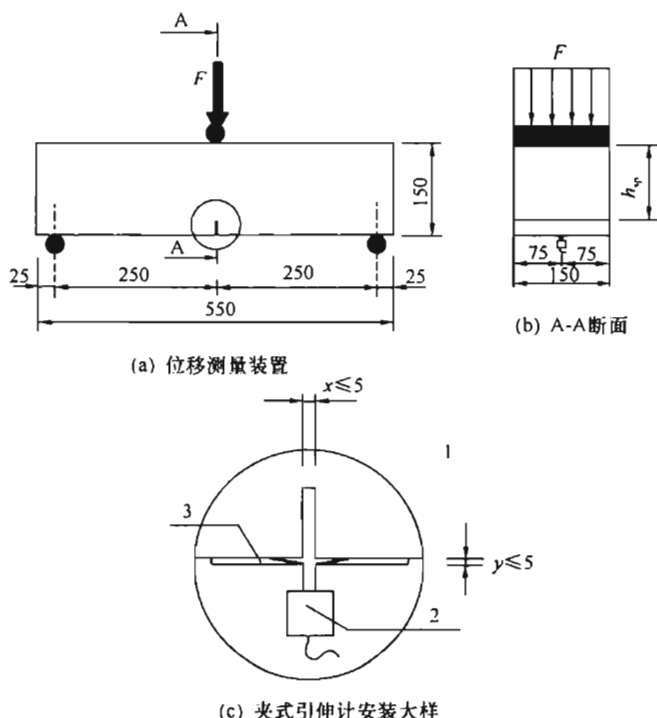


图 B.3.2-1 预开口处的水平张开位移测量装置

1—预开口详图；2—夹式应变仪；3—刀口

$$\delta = 0.85CMOD + 0.04 \quad (B.3.3)$$

式中： δ ——试件跨中挠度值（mm）；

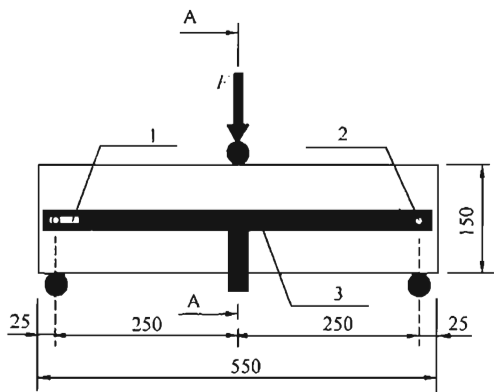
$CMOD$ ——跨中切口水平位移值（mm）。

B.3.4 加载前应预加载，确保试件、加载装置以及铰支座充分接触，仪器设备工作正常。

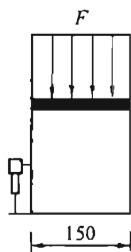
B.3.5 启动实验机，采用跨中切口水平张开位移控制加载，水平张开位移应控制为 0.05 mm/min。当跨中切口水平张开位移达到 0.1mm 时，应调整加载速度为 0.2mm/min。

B.3.6 当跨中切口水平张开位移达到 4mm 时终止试验。

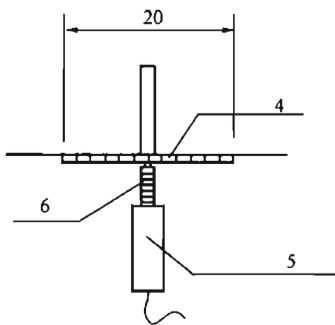
B.3.7 当测得在比例极限荷载对应的切口水平张开位移与



(a) 预开口处挠度测量装置



(b) A-A断面



(c) 位移传感器布置大样

图 B. 3. 2-2 预开口处挠度测量装置

1—滑动固定端；2—转动固定端；3—刚架；
4—1mm 厚铝板；5—位移传感器；6—弹簧杆

0.5mm 切口水平张开位移范围内的最小荷载值小于对应于跨中切口水平位移值为 0.5mm 时荷载值的 30% 时，应重新检查试验装置并舍弃该试验结果。

B. 3. 8 若裂缝未出现在试件的预开口处，应舍弃该试验结果。

B.4 试验结果计算

B.4.1 比例极限弯拉强度的确定应符合下列规定：

1 比例极限弯拉强度 $f_{ct,L}^f$ 应按下式计算：

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (\text{B.4.1})$$

式中： $f_{ct,L}^f$ ——钢纤维混凝土比例极限弯拉强度 (N/mm^2)；

F_L ——对应于比例极限弯拉强度 $f_{ct,L}^f$ 的荷载 (N)；

l ——试件跨度 (mm)；

b ——试件宽度 (mm)；

h_{sp} ——试件从切口顶端到试件顶部的距离 (mm)。

2 对应于 $f_{ct,L}^f$ 的荷载 F_L 应取为对应于荷载-切口水平张开位移曲线上、切口水平张开位移 $CMOD$ 在 $0\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$ 范围内的最大荷载值 (图 B.4.1)。

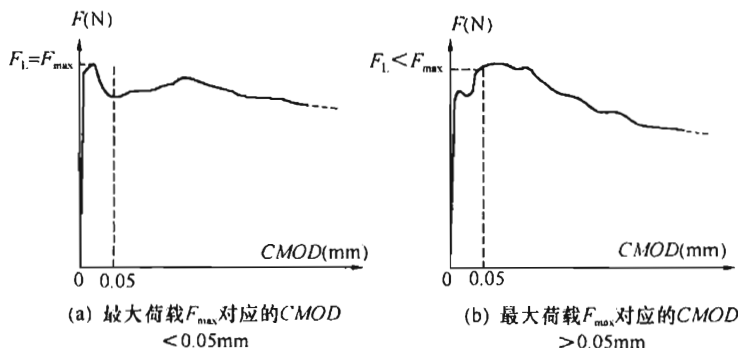


图 B.4.1 荷载 F 与切口张开水平位移 $CMOD$ 关系曲线

B.4.2 残余弯拉强度 $f_{R,j}$ 的确定应符合下列规定：

1 残余弯拉强度 $f_{R,j}$ 应按下式计算：

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (\text{B.4.2})$$

式中： $f_{R,j}$ ——对应切口水平张开位移为 $CMOD_j$ 时的残余弯拉

强度(N/mm^2);

F_j ——对应切口水平张开位移为 $CMOD_j$ 时的荷载值 (N);

l ——试件跨度 (mm);

b ——试件宽度 (mm);

h_{sp} ——试件从切口顶端到试件顶部的距离 (mm)。

2 对应于不同切口水平张开位移为 $CMOD_j$ 时的荷载值 F_j 应取为荷载-切口水平张开位移曲线上、不同切口水平张开位移所对应的荷载值 (图 B. 4. 2)。

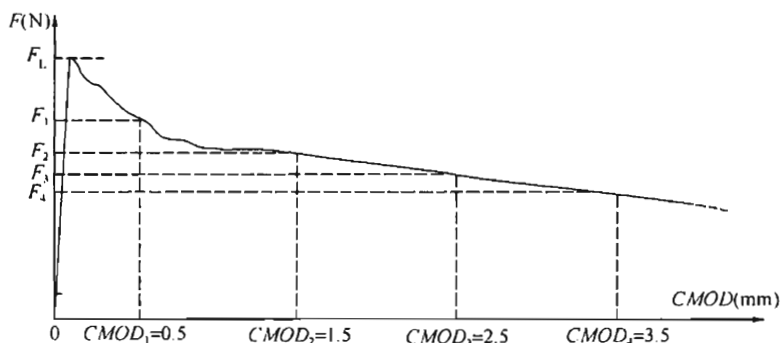


图 B. 4. 2 荷载 F_j 与切口水平张开位移值 $CMOD_j$ ($j=1, 2, 3, 4$)

B. 5 试验报告与评估

B. 5. 1 试验报告主要应包括试件混凝土配合比、试件制作与养护情况、试件尺寸、试验方法、荷载-切口水平张开位移曲线、比例极限弯拉强度和残余弯拉强度试验结果等。

B. 5. 2 进行钢纤维混凝土弯拉强度评定时，宜根据 12 根钢纤维混凝土标准梁试件的弯拉强度测定结果进行比例极限弯拉强度标准值 $f_{\text{clk},L}^d$ 和各残余弯拉强度标准值 $f_{R,j,k}$ 的评定。评定时应排除异常结果，应取置信区间为 $\pm 10\%$ 偏差时，置信水平不小于 90% 的平均值为弯拉强度标准值。

本标准用词说明

1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示严格，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 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 2 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 3 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 4 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 5 《建筑地面设计规范》GB 50037
- 6 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 7 《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086
- 8 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
- 9 《工程岩体分级标准》GB/T 50218
- 10 《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223
- 11 《混凝土结构加固设计规范》GB 50367
- 12 《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476
- 13 《城市桥梁设计规范》CJJ 11
- 14 《城市道路工程设计规范》CJJ 37
- 15 《城镇道路路面设计规范》CJJ 169
- 16 《钢纤维混凝土》JG/T 472
- 17 《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40
- 18 《铁路隧道设计规范》TB 10003

中华人民共和国行业标准

钢纤维混凝土结构设计标准

JGJ/T 465 - 2019

条文说明

编制说明

《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ/T 465 - 2019, 经住房和城乡建设部 2019 年 6 月 18 日以第 162 号公告批准、发布。

本标准编制过程中, 编制组进行了广泛和深入的调查研究, 总结了我国钢纤维混凝土结构设计的实践经验, 同时参考了国外先进技术法规与设计标准, 通过静力与疲劳荷载作用下钢筋钢纤维高强混凝土梁受力性能、低周反复荷载作用下钢筋钢纤维高强混凝土梁柱节点抗震性能等系列试验研究工作, 取得了适合钢纤维混凝土结构设计的重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定, 《钢纤维混凝土结构设计标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明, 对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是, 本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	85
3	基本规定	87
3.1	一般规定	87
3.2	极限状态设计	87
3.3	耐久性设计	88
4	材料	89
4.1	钢纤维	89
4.2	钢纤维混凝土	90
4.3	钢筋	94
5	承载力极限状态计算	95
5.1	一般规定	95
5.2	正截面承载力计算	95
5.3	斜截面承载力计算	99
5.4	扭曲截面承载力计算	101
5.5	受冲切承载力计算	102
5.6	局部受压承载力计算	103
5.7	疲劳验算	104
6	正常使用极限状态验算	106
6.1	裂缝控制验算	106
6.2	受弯构件挠度验算	107
7	局部钢纤维混凝土结构构件	109
7.1	叠合式受弯构件	109
7.2	局部钢纤维混凝土深梁	110
7.3	牛腿	111
7.4	桩基承台	112

8	构造规定	116
9	结构构件抗震设计	117
9.1	一般规定	117
9.2	框架梁柱节点	118
9.3	剪力墙及连梁	119
9.4	板柱节点	121
10	工业建筑地面	122
10.1	一般规定	122
10.2	板厚设计	122
10.3	构造规定	124
11	城镇道路与桥梁桥面	125
11.1	一般规定	125
11.2	城镇道路路面	125
11.3	层布式钢纤维混凝土复合路面	128
11.4	城镇桥梁桥面	130
12	城市隧道、边坡支护、建筑结构修复与加固工程	132
12.1	一般规定	132
12.2	城市隧道支护	134
12.3	边坡支护工程	140
12.4	修补和加固工程	140
附录 A	钢纤维混凝土工业地面设计计算	143
附录 B	钢纤维混凝土残余弯拉强度测试方法	148

1 总 则

1.0.1 为了规范钢纤维混凝土结构设计，使其具有科学性、先进性及合理性，根据多年来钢纤维混凝土结构的研究成果与工程经验，编制本标准。

1.0.2 本标准仅对钢纤维混凝土结构设计中不同于普通混凝土结构设计的要求作出规定，适用于钢纤维混凝土结构尤其是对抗拉、抗剪、弯拉强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆等性能要求较高的工程或其局部部位工程的设计。钢纤维能显著提高混凝土的抗拉、抗剪、弯拉强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆及弯曲韧性等性能，因此，钢纤维混凝土在能够发挥其特点的结构及其局部部位的使用中，做到技术先进，经济合理。目前国内钢纤维的主要品种有：用钢丝切断生产的异形钢纤维；用薄钢板剪切生产的平直形和异形钢纤维；用钢锭铣削生产的异形钢纤维；用钢丝刮削法生产的刮削形钢纤维。本标准中所给参数主要是根据上述种类钢纤维配置的混凝土及其构件的试验得出的。由于目前国内市场上的钢纤维没有统一的规格，不同厂家生产的钢纤维品种、规格及质量差别较大，在工程应用时，如采用标准中给定的参数，应注意钢纤维混凝土所采用的钢纤维品种与规格。如条件允许，设计所采用的参数宜通过试验确定。

本标准不适用于采用钢纤维轻骨料混凝土及特种钢纤维混凝土结构的设计。

1.0.3 本标准依据现行工程结构和建筑结构的可靠性设计统一标准编制。本标准内容是基于现阶段钢纤维混凝土结构设计的成熟理论和对钢纤维混凝土结构承载力与正常使用的最低要求。由于钢纤维混凝土的应用范围较广，涉及工业与民用建筑、水利、港口、交通及地下工程等不同工程类别，本标准以现行国家标准

《混凝土结构设计规范》GB 50010 为基础，仅对建筑工业行业钢纤维混凝土结构的一些特殊要求作出规定，在执行时尚应符合现行相关标准的规定。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1、3.1.2 钢纤维混凝土结构应用的范围较广，涉及不同的工程类别。因此，在设计时，钢纤维混凝土结构的设计内容、安全等级和设计使用年限，各类结构构件的方案设计和结构作用与作用效应分析以及结构设计方法等应根据结构所属工程类别分别符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《混凝土结构设计规范》GB 50010 以及相关行业混凝土结构设计相关标准的基本设计规定。本标准仅对钢纤维混凝土结构设计中不同于普通混凝土结构设计的特定要求作出规定。

3.1.3 研究与工程应用表明，钢纤维混凝土结构的耐久性较普通混凝土结构有一定的改善。鉴于现有钢纤维混凝土结构的研究与工程应用成果尚没有形成系统的耐久性设计方法和规定，本标准规定，钢纤维混凝土结构的耐久性设计仍按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 进行。

3.2 极限状态设计

3.2.1~3.2.3 本标准对承载能力极限状态计算，只给出抗力即承载力设计值的计算表达式。为了便于与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 配套使用，所给出的表达式尽可能依附于该规范的表达式。各种受力条件下构件承载力设计值的表达式大致可分两类：一类采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相应表达式，将式中混凝土强度设计值用钢纤维混凝土强度设计值代替；另一类是在现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 表达式中引入钢纤维影响修正项，原表达式中的混凝土强度设计值可根据钢纤维混凝土的强度等级按该

规范的规定确定。修正项中钢纤维的影响系数，通过试验确定。本标准根据国内外大量试验研究，给出了常用的钢纤维混凝土构件计算中的有关系数。重要工程尚应进行专门试验校验。

3.2.4 钢纤维的掺入可以提高构件的抗裂度，阻滞裂缝开展，减小正常使用状态下的裂缝宽度，提高构件刚度。国内外研究者曾提出过不同的计算模型。为使计算与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相协调，本标准采用了简化的计算方法，即按现行有关标准计算，并引入考虑钢纤维影响的修正项。按现行有关标准计算时，公式中的混凝土轴心抗压强度设计值、抗拉强度设计值均按钢纤维混凝土的强度等级并根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 关于混凝土的规定确定。

3.3 耐久性设计

3.3.1 为与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相协调，钢纤维混凝土结构的耐久性设计应分别符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的规定。

3.3.2 对钢材可产生不利影响的恶劣环境：如含有侵蚀气体的环境、海水潮差区、浪溅区、海洋和临海大气区以及接触含有侵蚀性介质的工业污水的区域等，会加速钢纤维腐蚀，影响结构耐久性。但试验表明，根据我国、日本和美国有关研究资料，当水灰比满足一定限值时，钢筋钢纤维混凝土耐腐蚀性能要优于钢筋混凝土，因而采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的钢筋混凝土构件裂缝宽度限值时，不会带来适用性能的不良影响。不过有研究资料表明，无筋钢纤维混凝土带裂缝工作，当裂缝宽度超过一定限度时，钢纤维腐蚀随时间推移而加重，构件承载力逐渐有所下降。鉴于上述原因，本标准规定，拟将钢纤维混凝土用于海水环境和受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境时，应具有成熟的工程经验或技术论证。

4 材 料

4.1 钢 纤 维

4.1.1 为确保钢纤维混凝土具有较好的延性，钢纤维混凝土破坏时，应使钢纤维由基体中拔出而不是拉断。因此钢纤维的增强增韧作用及效果主要取决于钢纤维与基体的粘结性能，而其粘结性能又主要取决于钢纤维的种类、表面形状、长度、直径（或等效直径）、长径比以及体积掺量等。同时，钢纤维的抗拉强度与基体混凝土的强度存在一定的适配性，当混凝土强度较高而钢纤维抗拉强度较低时，多发生钢纤维的拉断，混凝土的破坏仍存在较大的脆性，当基体混凝土强度较高而且需要结构构件具有较好的延性特征时，钢纤维就必须具有较大的抗拉强度，尽可能发生钢纤维拔出破坏。为此，本标准规定了钢纤维的技术要求与选用原则。

4.1.2 对于钢纤维混凝土而言，当钢纤维掺量过低时，钢纤维难以承担混凝土开裂后原由混凝土承受的那部分拉力，难以形成有效的限裂阻裂作用，难以达到增强增韧的目标及设计要求。根据国内外关于钢纤维含量对混凝土增强增韧机理及效果的比较分析及工程应用情况，针对不同的钢纤维类型规定了钢纤维的最小掺量。若计算的钢纤维体积率较小时，为确保结构的安全，必须具有可靠的工程应用经验；如无据实的工程应用数据，则需进行试验验证其确实可行后方可采用。

4.1.3 用于喷射钢纤维混凝土时，长度过长的钢纤维在喷射过程中容易堵管，因而应根据输料软管及喷嘴内径来确定钢纤维长度。但钢纤维长度过短时难以达到对混凝土增强增韧的理想效果，故本标准对用于喷射钢纤维混凝土的钢纤维最小长度作出了建议性规定。同时，由于喷射钢纤维混凝土施工时，在喷射压力

的作用下钢纤维有可能被折断，因此要求钢纤维具有一定的强度和刚度。

4.1.4 喷射钢纤维混凝土由于受到喷射过程中胶凝材料的散失以及喷射工艺对喷射混凝土质量的影响，喷射到岩面上的混凝土强度和密实度有所损失，因此配合比设计时需考虑这一因素。钢纤维实际掺量主要取决于韧性要求，可参考既有经验，并通过韧性指标试验确定。对于不同的钢纤维、不同的配合比和喷射手的施工技能，钢纤维损失率有很大差别，最大可达到40%~50%。适宜的配合比和喷射工艺，钢纤维损失率可控制在10%~20%。因此，喷射钢纤维混凝土配合比设计和喷射工艺对减少钢纤维损失率有很大影响。

4.2 钢纤维混凝土

4.2.1 混凝土的强度等级系根据立方体抗压强度标准值而定。为使钢纤维混凝土结构设计与建筑工业各标准相协调，本标准规定钢纤维混凝土强度等级的定义应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的相应规定。

4.2.2 钢纤维混凝土一般只使用在结构工程的重要部位，因此规定其强度等级不应低于CF25和不同混凝土结构类别的结构设计对强度等级的要求。

钢纤维混凝土的抗压强度、耐久性和抗渗性等都与水灰比密切相关，所以对钢纤维混凝土来说，其强度等级仍是设计要求和控制混凝土质量的重要指标。钢纤维的增强效果主要在于较同条件素混凝土的抗拉强度或弯拉强度、弯曲韧度比的提高上。在路面、桥面等工程中以弯拉强度为设计指标，在工业建筑地面和喷射钢纤维混凝土支护、衬砌还要用到残余弯拉强度、弯曲韧度比指标；在其他结构中则以抗拉强度为设计指标。因此，钢纤维混凝土依据工程应用条件不同分为三类：一类应满足抗压强度与抗拉强度的要求，另一类则应满足抗压强度与弯拉强度的要求，还有一类应满足抗压强度与弯拉强度及弯曲韧度比的要求。

4.2.3~4.2.6 本部分条文中有关钢纤维影响系数适用于钢纤维体积率不大于3%的钢纤维混凝土。

大量试验研究表明,钢纤维掺入的体积率 $\rho_f < 2\%$ 时,对混凝土抗压强度有一定影响,一般在20%以下,但当 $\rho_f = 2\%$ 时,可以达到25%。根据试验资料分析,平均增长为9%。经统计分析,各种钢纤维对混凝土的抗压强度的影响系数平均为 $\alpha_c = 0.15$ 。试验研究还表明:钢纤维混凝土轴压强度和立方体抗压强度间的换算关系,与普通混凝土的相应换算关系相近。如果设计中采用相同的强度保证率和材料分项系数,就可以按有关混凝土结构规范的相应规定,根据钢纤维混凝土的强度等级确定轴心抗压强度标准值与设计值。

关于抗拉强度,根据大量的试验资料统计得出:

$$\mu_{f_t} = \mu_i (1 + \alpha_i l_f / d_f \rho_f) \quad (1)$$

式中,钢纤维对钢纤维混凝土轴心抗拉强度的影响系数 α_i 的统计结果如表1所示。

表1 钢纤维对钢纤维混凝土轴心抗拉强度的影响系数统计结果

钢纤维品种	纤维外形	强度等级	α_i	组数	变异系数
高强钢丝切断型	端钩形	CF20~CF45	0.7934	28	0.095
		CF50~CF80	1.1351	67	0.061
钢板剪切型	平直形	CF20~CF45	0.350	29	0.116
		CF50~CF80	0.505	45	0.126
	异形	CF20~CF45	0.5726	96	0.074
		CF50~CF80	0.6917	52	0.151
钢锭铣削型	端钩形	CF20~CF45	0.7298	12	0.064
		CF50~CF80	0.9229	44	0.077
低合金钢熔抽异型	大头形	CF50~CF80	0.7331	8	0.019

设计中采用的影响系数 α_i 应低于统计平均值,主要基于以下理由:①统计的试验数据有限,在降低时应考虑这一因素;

② 设计中一般应以轴心抗拉强度为准，但目前所获得的抗拉强度均为劈裂法测得的抗拉强度，可近似取劈拉初裂强度进行增强效果的分析。对钢纤维混凝土抗拉初裂强度和极限强度的差异随纤维体积率增加而增大，变化范围大约为极限强度的 0%~15%，上列统计值是根据试验测得的极限强度统计的。基于上述分析得出了标准中的建议值。

关于弯拉强度，根据试验资料统计分析得出公式 (2) 的表达式，其中钢纤维对钢纤维混凝土弯拉强度的影响系数 α_m 的统计结果如表 2 所示。

$$\mu_{f_{lm}} = \mu_{f_l} (1 + \alpha_m l_f / d_f \rho_f) \quad (2)$$

由于钢纤维混凝土中的钢纤维能够阻止混凝土中裂缝的发生和发展，能够克服基体中的微观裂缝和缺陷产生的应力集中而造成的过早开裂，这就使钢纤维混凝土弯拉强度的变异系数较普通混凝土低，试验规律证明了这一点。另一方面，钢纤维混凝土的弯拉韧性较普通混凝土大大提高，从而其弯拉承载力的可靠度也相应提高。但是，目前在弯拉试验时采用的试验机弯曲试验台的支座有些不是理想辊轴，水平阻力较大，由此引起较大误差。基于上述分析，弯拉强度影响系数的统计平均值作了适当降低后可用于设计。

由于钢纤维的特性和混凝土材料的变化，钢纤维的增强效果与公式得出的计算结果常有出入，所以条文规定影响系数一般宜根据试验确定。此外，当采用新型钢纤维时，钢纤维混凝土的强度应通过试验确定。

表 2 钢纤维对钢纤维混凝土弯拉强度的影响系数统计结果

钢纤维品种	纤维外形	强度等级	α_m	组数	变异系数
高强钢丝切断型	端钩形	C20~C45	1.3041	26	0.153
		C50~C80	1.4964	59	0.066
钢板剪切型	平直形	C20~C45	0.75	27	0.116
		C50~C80	0.8843	40	0.148

续表 2

钢纤维品种	纤维外形	强度等级	α_m	组数	变异系数
钢板剪切型	异形	C20~C45	0.91	96	0.134
		C50~C80	1.111	54	0.118
钢锭铣削型	端钩形	C20~C45	1.05	12	0.087
		C50~C80	1.3159	74	0.051
低合金钢熔抽 异型	大头形	C50~C80	1.0883	8	0.016

应当指出,钢纤维增强效果很大程度上取决于钢纤维与基体的粘结性能。上述统计参数所采用的钢纤维品种具体为:低合金钢熔抽型长度为 30mm~35mm,两端带大头的熔抽型钢纤维;剪切平直形长度为 32mm~35mm,长径比为 50~60;高强钢丝切断型,形状端钩形,长度为 30mm~35mm,长径比为 50 左右;剪切异形,长度 32mm,长径比为 50 左右的钢纤维;铣削型的截面为月牙形,两端带钩,长度为 32mm,长径比为 30 左右的高强钢锭铣削型钢纤维。在套用这些参数时应注意钢纤维品种和有关参数的差异。

近期的试验结果表明,钢纤维对混凝土的增强效应与试件成型方式存在相关性。对于强度等级 CF25~CF50 的钢纤维混凝土,当采用 0.2%~1.15% 的钢锭铣削型钢纤维增强面板类构件时,18 组钻芯圆柱体试件的劈裂抗拉强度增强系数为 1.07~1.42,平均值为 1.27,方差为 0.182;18 组切割梁式构件的弯曲抗拉强度增强系数为 1.12~1.74,平均值为 1.69,方差为 0.156。据此,对于水平向浇筑成型的 CF25~CF50 钢纤维混凝土板类构件,钢纤维对抗拉强度和弯拉强度的影响系数 α_t 和 α_{tm} 可参考该试验结果,在条文 4.2.6 给出的影响系数建议值的基础上适当提高。

4.2.7 钢纤维混凝土受压和受拉弹性模量与抗压强度间的关系
与普通混凝土的相近,可按现行《混凝土结构设计规范》GB

50010 的规定采用。

试验表明,钢纤维混凝土弯拉弹性模量受钢纤维体积率变化的影响较小。故设计中可按现行水泥混凝土路面或道面的有关标准,根据同强度等级素混凝土弯拉强度确定。当无试验资料时,同强度等级素混凝土弯拉强度可根据钢纤维混凝土弯拉强度按公式(4.2.5)换算。

4.2.8、4.2.9 现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 对钢纤维混凝土的弯拉疲劳强度设计值以及强度等级为 CF30~CF55 的喷射钢纤维混凝土弯拉强度标准值作了规定。本标准为与现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 相协调,规定按照现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 的规定确定。

4.3 钢 筋

4.3.1、4.3.2 钢纤维混凝土可用于钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构,对这些结构中钢筋的使用,与现行有关标准的要求一致。

试验研究表明,变形钢筋在钢纤维混凝土中的粘结锚固性能优于在普通混凝土中的粘结锚固性能;光圆钢筋的粘结锚固性能则无明显变化。

日本的研究表明,钢纤维混凝土中钢筋的锈蚀较普通混凝土中钢筋的锈蚀减轻,其原因除了钢纤维阻裂作用的影响外,还在于细小的钢纤维在混凝土中乱向均匀分布,从而改变了钢筋电化学锈蚀的离子分布状态,减缓了钢筋的锈蚀。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 钢纤维对混凝土具有较好的增强增韧性能, 钢筋钢纤维混凝土结构可在一定程度上提高结构构件的承载能力与变形性能。本章设计方法适用于钢筋钢纤维混凝土、预应力钢纤维混凝土基本构件的承载能力极限状态计算。

钢纤维混凝土偏心受压构件的受压承载力以素混凝土的计算公式为模型, 不考虑受拉区钢纤维混凝土参与工作时, 按素混凝土构件的规定计算是偏于保守的。

5.1.2 对于二维或三维非杆系钢筋钢纤维混凝土结构构件, 可按弹性或弹塑性分析方法计算结构构件的主应力设计值分布。可根据主拉应力设计值的合力在配筋方向的投影确定配筋量, 按照主拉应力的分布区域确定钢筋布置, 并应满足相应的构造要求。应力设计值计算和确定配筋量及钢筋布置时, 应考虑钢纤维的影响, 采用钢纤维混凝土的应力应变关系和钢纤维混凝土的抗拉强度设计值。

5.2 正截面承载力计算

5.2.1 给出了钢筋钢纤维混凝土和预应力钢纤维混凝土构件正截面承载力计算的一般规定:

根据钢筋钢纤维混凝土小偏心受压构件的试验结果, 其承载力试验值与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的小偏心受压构件承载力计算值基本接近, 两者之比平均值为 1.019, 变异系数为 0.081。所以, 小偏心受压构件承载力计算可以按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。

由于钢纤维对混凝土轴心抗压强度的提高作用较小,所以钢筋纤维混凝土轴心受压构件的承载力可以偏安全地按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。

考虑截面受拉区对承载力作用的影响是钢筋纤维混凝土构件与钢筋混凝土受弯构件、大偏心受压构件和大偏心受拉构件正截面承载力计算的主要区别。如何考虑钢纤维混凝土的抗拉作用曾提出过多种计算模式。根据试验结果,曾对以下四种模式进行过统计分析:

$$f_{lm} = \beta_{lw} (l_f/d_f) \rho_{fw} f_y \quad (3)$$

$$f_{lm} = \beta_{lw} (l_f/d_f) \rho_f f_t \quad (4)$$

$$f_{lm} = \beta_{lw} (l_f/d_f) \rho_f \rho_w f_t \quad (5)$$

$$f_{lm} = [\beta_{lw} (l_f/d_f) \rho_f + C] f_t \quad (6)$$

式中: β_{lw} ——钢纤维对构件受拉区钢纤维混凝土抗拉作用的影响系数;

ρ_w ——纵向受拉钢筋配筋率;

C ——待定系数。

根据试验结果的综合分析表明,以上各种计算模型精度相近,而公式(4)受力机理明确,应用方便,故选作本标准的计算模型。

正截面应力图形的简化如图1所示。钢纤维混凝土产生的拉应力可简化成等效矩形应力图形,等效拉应力用 f_{lw} 表示。根据单筋矩

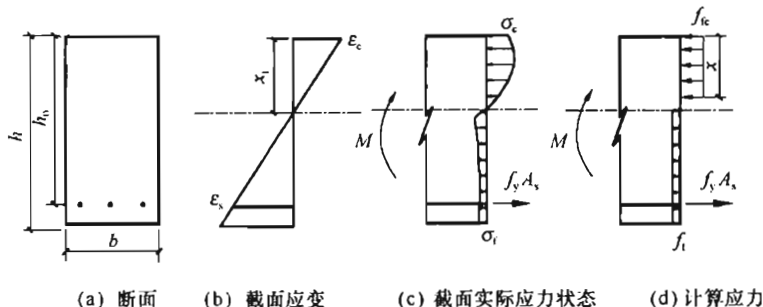


图1 受弯构件正截面计算简图

形受弯构件试验资料的统计分析, 可得 $f_{lm} = f_t \beta_u \lambda_t$, $\beta_u = 1.30$ 。中性轴距受压边缘距离为 x/β_t , 可根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定确定。

由于钢纤维的掺入改善了混凝土的韧性, 混凝土强度等级对矩形应力图形的应力值的影响不再明显, 因而对于钢纤维混凝土, 可以取现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中规定的系数, 混凝土强度等级对受压区混凝土等效应力值的影响系数 $\alpha_1 = 1.0$ 。

根据试验研究, 当钢筋达到屈服强度时, 轴心受拉构件和小偏心受拉构件正截面的钢纤维仍起到部分承载作用。为简化计算, 仍规定钢纤维混凝土受拉应力图形可简化为等效矩形应力图形, 这时, 受拉区高度 x_t 等于截面高度。

5.2.2、5.2.5 钢筋钢纤维混凝土和预应力钢纤维混凝土受弯构件的正截面承载力采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件的正截面承载力计算模型, 并考虑钢纤维混凝土受拉区对承载力的有利影响。

试验研究表明, 钢纤维的掺入使构件正截面受压区极限应变有所提高, 因而对受拉钢筋和受压区混凝土同时达到其强度设计值时的界限相对受压区高度 ξ_b 的值有一定影响, 但影响不显著。为了与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相协调, 本标准规定 ξ_b 值仍按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。

5.2.3 考虑受拉区钢纤维混凝土的抗拉作用, 给出了 T 形、I 字形截面受弯承载力计算公式。对于倒 T 截面, 可按实际情况将公式中的翼缘项去掉, 进行计算。

5.2.4 根据钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件的试验研究结果, 规定了钢纤维部分增强受弯构件的设计计算方法。

钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件与钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算的主要区别在于钢纤维混凝土层厚范围内钢纤

维混凝土的承拉作用对承载力计算的影响。此时,可将钢纤维混凝土产生的拉应力分布简化成等效矩形应力图形,等效拉应力用 f_{fu} 表示。根据单筋矩形受弯构件试验资料的统计分析可得:当 $h_f \geq 0.3h$ 时, $f_{fu} = \beta_w f_t \lambda_f$, $\beta_w = 1.70$ 。试验值与公式计算值比值的平均值为 1.014,变异系数为 0.051。为了与钢筋钢纤维混凝土受弯构件的计算相衔接,进行钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算时,可取 $\beta_w = 1.30$ 。

根据对配筋率为 1.58% 且钢纤维体积率为 1.0% 的钢纤维部分增强钢筋混凝土梁试验结果的分析,当钢纤维混凝土层厚达到 $0.3h$ 时,即可达到全截面加入钢纤维对正截面承载力的增强效果。且经大量计算表明,该界限钢纤维混凝土层厚值与配筋率和钢纤维体积率有关。

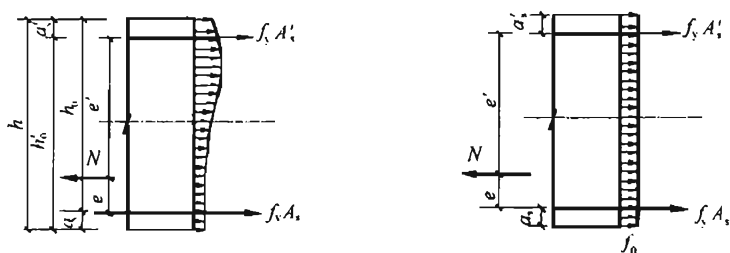
为了与受弯构件斜截面受剪的界限钢纤维混凝土层厚协调,建议偏安全地取受弯构件的界限钢纤维混凝土层厚为 $0.5h$ 。在进行正截面受弯承载力计算时,当 $h_f > 0.5h$ 时,取 $h_f = 0.5h$ 。

5.2.6、5.2.7 钢筋钢纤维混凝土偏心受压构件正截面承载力采用钢筋混凝土偏心受压构件正截面承载力的计算方法。界限相对受压区高度 ξ_b 值按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。大偏心受压构件正截面承载力计算考虑钢纤维混凝土抗拉作用对承载力的有利影响。

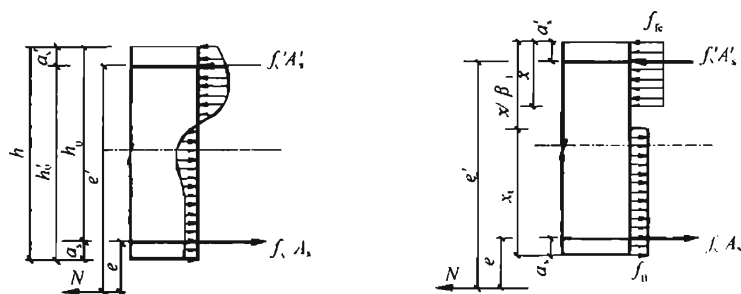
5.2.8、5.2.9 对钢筋钢纤维混凝土构件受拉承载力的计算作出了规定:

对于受拉构件,当钢筋屈服后,钢筋的塑性变形不断发展,破坏断面裂缝逐渐增宽,钢纤维混凝土的抗拉作用逐渐发展到其抗拉应力应变曲线的下降段,因此,钢纤维对钢筋混凝土构件正截面受拉承载力提高的幅度不大, β_w 数值较小。

根据本标准第 5.2.1 条的分析,对于钢纤维混凝土受拉构件,受拉钢筋屈服时,破坏截面的钢纤维混凝土仍保持一定的残余应力,可简化为等效矩形应力,如图 2 所示。本条给出了钢筋钢纤维混凝土受拉构件正截面承载力计算公式。本条同样适用于



(a) 小偏心受拉构件



(b) 大偏心受拉构件

图 2 矩形截面偏心受拉构件钢纤维混凝土残余应力等效矩形应力图形

预应力钢纤维混凝土受拉构件的正截面承载力计算。

根据小偏心受拉试件和大偏心受拉试件（采用剪切型钢纤维）的试验结果统计，对于小偏心受拉构件，取 $\beta_{w0} = 0.40$ ，对于大偏心构件取 $\beta_{w0} = 0.65$ ，试验值与公式计算值比值的平均值为 1.025，变异系数为 0.069。

5.3 斜截面承载力计算

5.3.1 钢纤维的掺入可使斜裂缝宽度减小，斜裂缝区及受压区钢纤维混凝土所承担的剪力较素混凝土明显提高。为了充分利用斜截面上钢纤维混凝土的抗剪能力，钢筋钢纤维混凝土梁斜截面受剪限制条件应较钢筋混凝土构件适当放宽。根据本条规定，由斜截面受剪限制条件所确定的梁截面面积可比不配钢纤维时最多

减少约 18%。

5.3.2 我国现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010, 对于矩形、T 形、I 形截面构件的斜截面上的受剪承载力表示为二项之和, 即

$$V_{cs} = V_c + V_{sv} \quad (7)$$

式中第一项为主要与混凝土有关的受剪承载力; 第二项为主要与箍筋有关的受剪承载力。钢筋钢纤维混凝土和预应力钢纤维混凝土受弯构件的试验结果表明: 钢纤维对斜裂缝水平投影长度和斜裂缝形状影响不显著, 穿越斜裂缝的箍筋应力均能够达到屈服强度, 因此可以认为钢纤维对箍筋的抗剪承载力没有影响, 仍可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V_{cs} 计算公式的第二项计算。钢纤维对与混凝土有关的抗剪承载力的提高来源于对斜裂缝宽度开展的约束作用、对纵向受拉钢筋销栓作用的提高以及穿越斜裂缝的钢纤维的拉应力, 作用机理较为复杂。为与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的计算方法相衔接, 本条规定在公式 (7) 中第一项中考虑钢纤维对混凝土受剪承载力的增强作用, 得到公式 (5.3.2-1)。

现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的斜截面受剪承载力计算中, 主要与混凝土有关的受剪承载力设计值 V_c 采用基体混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 计算, $V_c = 0.7f_t b h_0$ 。经过比较, 采用下式计算钢纤维混凝土和箍筋所承担的受剪承载力设计值比较简便:

$$V_{cs} = V_c(1 + \beta_v \lambda_f) + V_{sv} \quad (8)$$

根据钢筋钢纤维混凝土梁 (130 根无腹筋梁、27 根有腹筋梁, 采用钢丝切断型、铣削型钢纤维、普通剪切型、剪切波纹形钢纤维)、预应力钢纤维混凝土梁 (29 根无腹筋梁、38 根有腹筋梁, 采用剪切平直形钢纤维) 的试验资料统计, 得出了 β_v 的经验值。并且上述计算所得钢筋钢纤维混凝土梁和预应力钢纤维混凝土梁的斜截面承载力可靠度将不低于现行国家标准《混凝土结

构设计规范》GB 50010 规定的钢筋混凝土和预应力混凝土梁的斜截面承载力的可靠度。

5.3.5、5.3.7 由于钢纤维对斜裂缝开展的约束和桥架连接作用，从实质上改变了混凝土受剪破坏的脆性性质，为充分利用斜截面上钢纤维混凝土的抗剪能力，按构造要求配置箍筋的限制条件也可相应放宽。这样，可节约箍筋，使设计经济合理。

5.3.6 规定了部分钢纤维增强的钢筋混凝土受弯构件斜截面受剪承载力及有关的计算。

钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件的试验结果表明：钢纤维混凝土层厚内的钢纤维跨越裂缝保持一定的拉应力并限制斜裂缝的延伸和开展，对截面抗剪有利，但作用机理较为复杂。可采用公式（9）计算钢纤维混凝土和剪压区混凝土承担的受剪承载力设计值：

$$V_c^h = V_c(1 + \beta_v^h \lambda_f) \quad (9)$$

试验资料表明，当剪跨比 $\lambda=2$ 时，可取 $\beta_v^h = 2\varphi_f \beta_c$ 。当 h_f 达到 $0.5h$ 时，钢纤维部分增强钢筋混凝土受弯构件可达到钢筋钢纤维混凝土受弯构件的受剪承载力。试验结果还表明，在集中荷载作用下且剪跨比 $\lambda>2$ 时，随剪跨比的增大，钢纤维的增强效果逐渐降低，因此应考虑剪跨比的影响，此时， β_v^h 的计算公式修正为 $\beta_v^h = 2\varphi_f \beta_c \left(\frac{4}{\lambda} - 1 \right)$ 。

钢纤维的掺入可使斜裂缝宽度减小，钢纤维混凝土层厚范围内的钢纤维混凝土和剪压区混凝土所承担的剪力均有明显提高。因此，可将钢纤维部分增强钢筋混凝土梁斜截面受剪限制条件相应放宽。为充分利用斜截面上钢纤维混凝土的抗剪能力，按构造要求配置箍筋的剪力限制条件也应相应提高。

5.4 扭曲截面承载力计算

5.4.1 根据已有的试验研究资料，由于钢纤维混凝土的轴心抗压强度等同于相同强度等级的混凝土，因此，以抗压强度控制的

扭曲截面尺寸限值,可以采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

5.4.2 根据已有的试验资料统计,钢筋钢纤维混凝土结构构件在弯曲、剪力和扭矩共同作用下的承载力,可采用 f_{tk} 代替 f_t ,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的钢筋混凝土构件计算方法进行计算。

5.4.3 根据已有的试验资料统计,钢筋钢纤维混凝土结构构件在扭矩作用下的承载力,可采用 f_{tk} 代替 f_t ,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的钢筋混凝土构件计算方法进行计算。

5.4.4 根据已有的试验资料统计,钢筋钢纤维混凝土结构构件在扭矩、剪力、弯矩和轴力共同作用下的承载力,可采用 f_{tk} 代替 f_t ,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的钢筋混凝土构件计算方法进行计算。

5.5 受冲切承载力计算

5.5.1 钢筋钢纤维混凝土板受冲切破坏机理较为复杂,考虑到与钢筋混凝土板抗冲切计算相衔接,本条采用了公式 (5.5.1),即在钢筋混凝土抗冲切公式中引入增强项 $(1+\beta_p\lambda_f)$ 。根据以往试验资料的统计分析,得出对于熔抽型钢纤维, $\beta_p=0.50$; 对于剪切型钢纤维 $\beta_p=0.52$ 。近年来,编制组应用铣削型钢纤维,选择了 5 种钢纤维体积率 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%,钢纤维高强混凝土强度设计等级为 CF50、CF60、CF80 共 13 块尺寸为 1800mm×1800mm×150mm 的无腹筋简支整浇钢筋高强混凝土板(包括 1 块普通钢筋高强混凝土板、9 块钢筋局部钢纤维高强混凝土板和 3 块钢筋全截面钢纤维高强混凝土板)冲切试验,并利用其他类型钢纤维的试验结果,经综合分析,取 $\beta_p=0.50$ 。

尽管钢纤维的掺入对板的冲切脆性破坏有一定的改善,但板的冲切破坏的突发性却仍然存在,故建议对于熔抽型钢纤维、剪

切型钢纤维和铣削型钢纤维，统一取用 $\beta_p = 0.45$ ，以具备一定的安全度。

本条规定不适用于既配置箍筋和弯起钢筋又配置钢纤维的板的抗冲切计算，如有这种情形可通过专门的试验研究确定其设计方法。

5.5.2 当配置箍筋或弯起钢筋时，箍筋或弯起钢筋对受冲切承载力的贡献仍按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算。

5.5.3 在受冲切的板内，其冲切作用仅限于局部范围，对全板均采用钢纤维增强是不经济的。根据编制组的研究结果，钢筋局部钢纤维高强混凝土板冲切性能随着钢纤维掺加范围的增大而提高，但钢纤维掺加范围达到 2 倍板厚以上时，试验板冲切性能基本不再提高。因此，钢纤维掺加范围取 2 倍板厚。

5.6 局部受压承载力计算

5.6.1 分析表明，局部受压的作用范围是有限的，因此，可用钢纤维对混凝土构件的局部受压影响区域进行局部增强，这样做比较经济合理。本条对钢纤维的配置范围规定为不小于局部受压计算底面积的范围。对于三面临空和角部承受局压的情况，因为钢纤维通常在受压面下配置，并不能提供对局部受压区的约束作用，因此对这种情况需要做专门试验来确定增强效果和配置范围。对于局部受压区一边临空的情况，钢纤维配置区应大于计算底面积，即在临空边的对称边，钢纤维配置区应伸入构件内部，伸入长度由受压内边算起不小于一倍局部受压区的短边边长。

本条还规定，钢纤维配置高度不应小于钢纤维配置区短边边长加 100mm。由于构件厚度限制使配置高度不能满足这一要求时，本条计算公式不再适用，应通过专门的试验确定其局部受压承载力。

5.6.2 不配置间接钢筋的钢纤维混凝土局部受压承载力设计参照国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2010（2015 年

版)附录D中D.5局部受压关于素混凝土构件局部受压承载力设计方法编制。

国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010(2015年版)中混凝土构件局部受压承载力计算公式来源于“套箍理论”,由于“套箍”的侧压力作用使中心混凝土处于三轴受压状态,局部受压强度得以提高。由于钢纤维混凝土抗拉强度较高,其局部抗压强度也会随之提高。本条考虑钢纤维的增强作用,给出了不配置间接钢筋的钢纤维混凝土局部受压承载力计算方法。

考虑到剪切平直形钢纤维应用较少,将其替换为钢丝切断型钢纤维。通过试验对钢丝切断型钢纤维的影响系数进行测定。根据试验的实测数据得出,钢丝切断-端部弯钩型钢纤维($\frac{l_f}{d_f}=65$, $l_f=35\text{mm}$)的 $\beta_u=0.65$ 。

5.6.3 为了充分利用钢纤维对局部受压构件的增强作用,配置间接钢筋的钢纤维混凝土结构构件的局部受压截面尺寸限制条件应适当放宽。参照国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010(2015年版)第6.6节第6.6.1条配置间接钢筋混凝土结构构件局部受压区截面尺寸要求,考虑钢纤维对局部受压的增强作用,给出了相应的计算公式。采用本条规定设计时,可使钢筋钢纤维混凝土局部受压净面积最多比钢筋混凝土局部受压净面积减少约18%。

5.6.4 配置方格网式或螺旋式间接钢筋的局部受压承载力计算公式系参照国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010(2015年版)第6.6节第6.6.3条配置间接钢筋混凝土结构构件局部受压承载力公式,考虑钢纤维对局部受压的增强作用给出的。

5.7 疲劳验算

5.7.1 为与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010相协调,钢纤维混凝土结构的疲劳验算应符合现行国家标准《混凝

土结构设计规范》GB 50010 的规定。

5.7.2 钢纤维混凝土疲劳强度以等幅疲劳且疲劳循环次数为 2×10^6 为基础, 钢纤维混凝土轴心抗压疲劳强度设计值和轴心抗拉疲劳强度设计值与相应的钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值和轴心抗拉强度设计值的关系仍采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的表达形式。由于钢纤维掺入对混凝土轴心抗压强度的影响较小, 在进行钢纤维混凝土结构疲劳验算时, 钢纤维混凝土轴心抗压疲劳强度设计值的疲劳强度修正系数 γ_p 仍按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用。根据对有关研究资料的分析, 钢纤维混凝土轴心抗拉疲劳强度修正系数 γ_p 有所降低, 钢纤维混凝土轴心抗拉疲劳强度修正系数 γ_p 在现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定值的基础上, 乘以 0.85 的系数, 但本标准应取用钢纤维混凝土轴心抗拉强度设计值。

5.7.3 现有资料表明, 钢纤维对混凝土疲劳变形模量的影响不大, 设计时可取用同强度等级普通混凝土的疲劳变形模量值。

6 正常使用极限状态验算

本章各计算方法及相关规定不适用于钢纤维混凝土城市隧道、边坡支护及加固工程的正常使用极限状态的验算。

6.1 裂缝控制验算

6.1.1 国内外的实验研究和工程实践证明,在一、二类环境中,钢纤维混凝土中钢筋的防腐能力优于普通混凝土,因此可以采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限制要求。

6.1.2 根据 92 根钢筋钢纤维混凝土梁试验资料统计,梁的抗裂弯矩试验值与采用钢纤维混凝土抗拉实测值 $f_{tk,0}$ 计算的抗裂弯矩的比值平均值为 1.06,而预应力钢纤维混凝土梁试验值与计算值的比值为 1.07。故在设计中,可采用 f_{tk} 代替 $f_{tk,0}$ 按普通混凝土验算方法验算钢纤维混凝土梁的抗裂性能。

6.1.3 通过钢纤维部分增强钢筋混凝土梁抗裂度试验统计分析,当钢纤维混凝土层厚达到梁高的 0.3 倍时,即可达到全截面加入钢纤维的抗裂效果。故采用钢纤维对受弯构件抗裂的综合影响系数 $2\varphi_1\alpha_1$ 来反映其对构件抗裂性能的提高。同时为了与正截面受弯承载力和斜截面受剪承载力的计算相协调,取界限钢纤维混凝土层厚为 $0.5h$ 。

6.1.4 考虑到钢纤维对混凝土抗拉强度的增强效应,进行预应力钢纤维混凝土受弯构件的斜截面抗裂验算时,可直接采用钢纤维混凝土的抗拉强度标准值。

6.1.5 刻痕钢丝和钢绞线与钢纤维混凝土之间的粘结强度将高于它们与同强度等级普通混凝土之间的粘结强度,但目前尚缺乏系统的试验研究。本条比较了刻痕钢丝、钢绞线和变形钢筋与钢

纤维混凝土和普通混凝土之间粘结性能上的异同,给出了钢纤维混凝土中预应力钢筋的预应力传递长度 l_{tr} 的计算方法。

6.1.6、6.1.7 钢纤维混凝土的抗拉作用降低了钢筋的应力,提高了混凝土受拉区的平均应变,使裂缝宽度减小。为避免计算复杂,本条仍采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关计算模型。钢纤维混凝土的影响采用综合影响系数修正,得到公式(6.1.6)。根据矩形截面梁的试验资料,经过统计分析,给出了钢纤维对钢筋纤维混凝土构件裂缝宽度的影响系数 β_{cw} 值。本条规定的 β_{cw} 值为统计分析中的偏小值,以保证设计安全。

根据对试验数据的统计分析,当钢纤维混凝土层厚达到梁高的0.3倍时,钢纤维部分增强钢筋混凝土梁可达到全截面加入钢纤维对裂缝宽度影响的效果。因此,当 $h_f \geq 0.3h$ 时,可取修正系数 $\beta_{cw} = 0.35$ 。同时为了与正截面受弯承载力和斜截面受剪承载力的计算相协调,取界限钢纤维混凝土层厚为0.5h。

6.1.8 考虑正常使用阶段允许出现裂缝的预应力钢纤维混凝土结构构件的裂缝宽度计算方法,与预应力混凝土结构构件和钢筋纤维混凝土构件的裂缝宽度计算方法相衔接,得到本条规定。

6.2 受弯构件挠度验算

6.2.1、6.2.2 钢纤维混凝土的抗拉作用减小了梁的裂缝宽度,增加了受拉区混凝土承担的拉力,从而提高了梁的刚度。公式(6.2.1)是一种简化计算方法,钢纤维对钢筋纤维混凝土受弯构件短期刚度的影响系数 β_B 是根据矩形截面梁的试验资料统计分析得到,且为统计中的偏小值,以保证设计安全,因此,第6.2.1条、第6.2.2条仅适用于钢纤维混凝土矩形截面受弯构件。

对于仅在受拉区采用钢纤维混凝土的钢纤维部分增强混凝土梁,钢纤维混凝土层厚内钢纤维混凝土的抗拉作用减小了梁的裂缝宽度,增加了拉区混凝土承担的拉力,从而提高了梁的刚度,

钢纤维混凝土层厚对刚度的影响也可反映在系数 β_{fs} 中。根据试验数据的回归分析, 得到钢纤维部分增强混凝土梁的系数 β_{fs} 的计算公式。

6.2.3、6.2.6 构件在荷载效应标准组合作用下并考虑荷载长期作用影响的刚度应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用, 计算中以 B_{fs} 代替 B_s 。挠度验算中的其他规定, 如各种情况下挠度的限制值, 荷载长期作用对挠度增大的影响系数等, 亦按该规范的规定采用。

6.2.4 正常使用阶段不允许出现裂缝的预应力钢纤维混凝土受弯构件的短期刚度, 不受钢纤维掺入的影响, 应根据钢纤维混凝土的强度等级, 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用。

6.2.5 正常使用阶段允许出现裂缝的预应力钢纤维混凝土受弯构件的短期刚度, 同钢筋钢纤维混凝土受弯构件一样, 因受到钢纤维混凝土抗拉作用的影响而提高。考虑这一因素并与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的预应力混凝土构件的短期刚度相衔接, 作出了本条规定。

7 局部钢纤维混凝土结构构件

7.1 叠合式受弯构件

7.1.1 钢筋钢纤维混凝土叠合式受弯构件依钢纤维掺入部位不同可分为三类：第一类为预制构件掺有钢纤维，叠合层不含钢纤维；第二类为预制构件和叠合层均掺钢纤维；第三类为预制构件不含钢纤维，仅在叠合层内掺钢纤维。本节规定适用于第一、二类叠合式受弯构件，并且其预制构件高度不应小于 0.4 倍叠合受弯构件的总高度。

在与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 配套使用进行设计时，有两点需要特别说明：

1 由于钢纤维混凝土的抗拉强度和抗剪强度比普通混凝土有明显提高，在极限荷载下钢纤维混凝土叠合构件的相对滑移比钢筋混凝土叠合构件小。因此，钢纤维混凝土叠合面受剪承载力按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的公式计算是安全的。

2 本节规定只涉及非预应力钢纤维混凝土预制构件所构成的叠合式受弯构件，不涉及抗裂验算问题。

7.1.2 预制构件和叠合构件的正截面受弯承载力计算中，应分清预制构件和叠合构件的正弯矩区段和负弯矩区段应采用的强度指标：若钢纤维混凝土处于受拉区，应采用 f_{tm} 。若受压区为混凝土，应采用 f_c ；若受压区为钢纤维混凝土，应采用 f_{tc} 。

7.1.3 对二阶段受力叠合式受弯构件斜截面承载力尚未进行过系统试验研究。本节的规定是根据二阶段受力简支叠合钢筋混凝土构件受剪承载力不低于相应整浇梁受剪承载力，以及钢筋钢纤维混凝土整浇梁受剪承载力的试验结果确定的。但是，对于叠合层采用普通混凝土时，规定叠合构件受剪承载力按普通混凝土计

算。这可能偏于安全，有待进一步研究证实。

7.1.4 叠合构件的叠合面有可能先于斜截面达到其受剪承载力极限状态。钢纤维混凝土叠合构件叠合面受剪承载力计算参照了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

7.1.5 二次受力叠合构件受拉钢筋应力超前量的分析比较复杂，且与 h_1/h 、 $M_1/[M]$ 、 l_f/d_f 、 ρ_f 等因素有关。尽管掺入钢纤维后改善了构件截面的受力性能，减缓了受拉钢筋的应力超前，但仍然存在应力超前的现象。为此，基本参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相应的控制条件，提出了一个便于设计应用的控制条件，但由于钢纤维的增强效果而放宽了控制值，得出公式 (7.1.5)。

7.1.6 钢纤维混凝土叠合式受弯构件的最大裂缝宽度的计算：先按钢筋混凝土叠合构件的计算方法计算；计算中预制构件的抗拉强度标准值根据钢纤维混凝土强度等级按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用；然后将计算值乘以修正项 $(1 - \beta_{w\lambda_f})$ 。

7.1.7 钢纤维混凝土二次受力叠合构件在第二阶段荷载作用下的短期刚度，应考虑钢纤维增强的有利影响，可用普通钢筋混凝土二次叠合构件类似的原则确定。依现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相应公式乘上钢纤维增强影响系数，得到公式 (7.1.7-1) 和公式 (7.1.7-2)。

7.2 局部钢纤维混凝土深梁

7.2.1 本条给出了界定了局部钢纤维混凝土的含义，界定了本节设计方法和相关规定的适用范围。

7.2.2 钢纤维加入钢筋混凝土深梁中能够起到限制斜裂缝开展并增强桁架拱的作用；能够提高深梁的受剪承载力，并随钢纤维混凝土层厚的加大而增大，但达不到全截面加入钢纤维的增强效果。结合钢筋混凝土梁的计算公式，回归得到钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁斜截面受剪承载力的计算公式。

所依据深梁试验资料均为无腹筋深梁试验得出, 钢纤维对深梁的增强效果仅适用于钢纤维部分增强钢筋混凝土无腹筋深梁。因此, 仅对现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算公式中的无腹筋项考虑钢纤维的增强作用, 而水平分布筋项的抗剪承载力仍按钢筋混凝土深梁进行计算。

7.2.3 深梁中加入钢纤维可明显提高斜截面受剪承载力, 为了充分利用钢纤维的抗剪性能, 与钢筋混凝土深梁相比, 受剪截面限制条件应有所放宽。此处, 可采用与浅梁相同的方法。

7.2.4 钢纤维加入钢筋混凝土深梁中, 具有明显的阻止斜裂缝出现的作用, 显著提高了深梁的斜截面开裂荷载。因此, 对一般要求不出现斜裂缝的钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁的限制条件应予以放宽。

7.2.5 在钢筋混凝土深梁的受拉区加入钢纤维, 对深梁的正截面抗裂度提高比较明显。为方便计算, 结合钢筋混凝土深梁的计算公式, 根据试验数据, 经统计分析, 得到钢纤维部分增强钢筋混凝土深梁正截面抗裂计算公式。根据试验结果, 当钢纤维混凝土层厚达到 0.6 倍梁高时, 可达到全截面加入钢纤维的抗裂效果。试验值与公式计算值之比平均为 1.032, 变异系数为 0.089。

7.3 牛 腿

7.3.1 试验结果表明: 在钢筋混凝土牛腿中加入钢纤维可提高牛腿的斜截面开裂荷载。钢筋钢纤维混凝土牛腿的斜截面开裂荷载随钢纤维混凝土的抗拉强度的增加而增大; 随剪跨比的增加而减小。经对有关资料共 23 个牛腿的试验数据的回归统计, 得出满足斜截面抗裂要求的钢筋钢纤维混凝土牛腿的截面尺寸限制条件。公式计算值与试验值之比的平均值为 1.05, 变异系数为 0.031。

对于在牛腿顶部有水平拉力作用的牛腿, 考虑与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的协调, 本标准采用在国标基础上考虑钢纤维影响的表达式。

7.3.2 钢纤维加入到钢筋混凝土牛腿中，通过钢纤维与混凝土之间的粘结，使受拉区的钢纤维混凝土承担了一部分弯矩，从而提高了牛腿的正截面受弯承载力。受拉区钢纤维混凝土承担的拉力可简化为等效矩形分布，该等效矩形应力图的抗拉强度 f_{tu} 等于 $\beta_u f_t \lambda_f$ 。此时可由建立的正截面受弯模型得到下列计算公式：

$$M_{lu} = F_v a = A_s f_y \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{tu} b x_1 \left(h - \frac{x}{2} - \frac{x_1}{2} \right) \quad (10)$$

$$A_s f_y + f_{tu} b x_1 = f_c b x \quad (11)$$

$$x_1 = h - \frac{x}{\beta_1} \quad (12)$$

取 $h = 1.1h_0$ ，公式 (10) 右端最后一项可转化为 $\alpha f_{tu} b h_0^2$ 的形式。根据对本项目以及国内外共 22 个钢筋钢纤维混凝土牛腿试验数据的统计分析，得到 $\alpha = 0.47$ 。公式进一步简化为：

$$M_{lu} = 0.85 A_s f_y h_0 + 0.47 f_{tu} b h_0^2 \quad (13)$$

按简化公式对 22 个牛腿试件进行计算，并与试验结果进行对比。试验值与理论计算值之比的平均值为 0.995，均方差为 0.08，变异系数为 0.084。条文中将系数 0.47 进一步折减为 0.43。

对于在牛腿顶部有水平拉力作用的牛腿，考虑与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的协调，本标准采用在国标基础上考虑钢纤维影响的表达式。

7.3.3 钢纤维混凝土的配置范围应进入上、下柱内，以防止普通混凝土侵入核心区。试验研究表明，钢纤维混凝土牛腿破坏之前，裂缝可能发展到下柱范围内，因此，钢纤维混凝土应进入下柱内一定的长度。

7.4 桩基承台

7.4.1 钢筋钢纤维混凝土承台属于一般浇筑成型的结构，其常用钢纤维体积率范围是 0.5%~2%，选择时依据钢纤维的性能和承台结构对增强效果的要求而定，纤维性能好或承台结构对增

强要求低时可选低值，纤维性能差或承台结构对增强要求较高时可选高值。

随着承台厚度的增加，承台的破坏形式由弯曲型破坏向冲切型破坏过渡，承台的极限承载能力将逐渐由它的抗冲切能力所确定。但考虑弯-剪或弯-冲过渡型破坏的存在，承台的受弯承载力仍有必要加以考虑。

试验结果表明，当较薄承台（ $W/h_0 \geq 1.0$ ）发生弯曲破坏时，现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的受弯承载力计算公式是适用的。参照目前工程设计中对基础的计算方法，近似地取力臂系数为 0.9。承台实际的弯曲破坏形态较复杂，为了便于设计，一般采用简化的弯曲破坏面进行计算。

试验结果表明，钢纤维改善了混凝土的性能，增强了混凝土抗拉能力。而对以弯曲破坏为主的承台，其极限荷载主要与底部配置的纵向钢筋的强度和数量有关，钢纤维的掺入则对极限荷载的提高贡献不大。因此，可不考虑钢纤维对承台抗弯承载力的影响。

与普通强度混凝土相比，钢纤维更能有效抑制高强混凝土裂缝的出现和扩展，提高承台的承载力和延性，随混凝土强度尤其是劈拉强度的增加，承台承载力有一定的提高。编制组完成的混凝土设计强度等级为 C40~C80（其中强度等级为 C40、C80 承台试件各一个，其他均为 C60）10 个三桩承台试件的试验结果表明，钢纤维高强混凝土三桩承台的主要破坏形式为柱冲切破坏和角桩冲切破坏，以角桩冲切破坏为主；三桩承台的承载力主要随钢纤维体积率、承台厚度的增加而显著提高，随着混凝土抗拉强度和配筋率的增加略有提高。

7.4.2、7.4.3 对钢筋钢纤维混凝土承台受冲切承载力计算作出了规定。

试验结果表明，承台的冲切破坏形态很大程度上受到柱、桩尺寸和位置的影响，冲切破坏锥体并非简单的几何形状。从实用角度出发，并与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB

50010、《建筑地基基础设计规范》GB 50007 相衔接，仍采用四棱截锥体计算模型，其侧面通过柱边和桩边内侧连线，且侧面坡度不小于 45° ，这样能反映实际冲切破坏特点，且实用性较广。

二桩、三桩、四桩、五桩钢筋钢纤维混凝土承台的试验结果表明：钢纤维的掺入有效地限制了冲切裂缝的出现和开展，因而提高了承台的抗冲切承载力。掺入钢纤维可有效降低钢筋混凝土承台的设计厚度。

在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 给出的桩基承台受柱、角桩及边桩冲切承载力计算公式的基础上，考虑钢纤维对混凝土承台受冲切承载力的影响系数，本条给出了钢纤维混凝土承台受冲切承载力计算公式，该公式反映了各因素对冲切承载力的影响。根据钢筋高强和普通强度的钢纤维混凝土三桩承台试验结果的统计分析，对角桩冲切破坏，影响系数 β_p 可取 0.50；对柱冲切破坏， β_p 可取 0.47。因此，综合考虑，取 β_p 为 0.45。

两桩承台或条形承台的承台宽度与柱或桩的尺寸相比一般并不太大，通常为两倍桩径左右。试验研究表明，两桩承台或条形承台不会出现冲切破坏，故此类承台设计时只需计算斜截面受剪承载力；当承台相对较宽时有可能发生冲切破坏，故应视具体情况计算承台受柱、桩冲切的承载力。

7.4.4 对钢筋钢纤维混凝土承台斜截面受剪承载力计算作出了规定。

试验结果表明：承台也会发生斜截面剪切破坏。其剪切破坏面并不是一个简单的贯穿整个承台的斜平面，而是一个空间曲面，承台厚度越大，曲面的空间性也愈加明显。现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中对承台受剪承载力计算采用的是能反映承台受剪切破坏主要特征的假想破坏面。

剪跨比对承台的受剪承载力有明显影响，剪跨比越小，承载力越高，钢筋钢纤维混凝土承台的试验结果也证明这一点。试验结果表明，钢纤维的掺入能有效地限制剪切斜裂缝的开展，提高

承台的抗剪承载力,故在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 给出的柱下桩基承台受剪承载力计算公式的基础上,考虑钢纤维对斜截面上混凝土承台受剪承载力的影响,给出了未配箍筋的钢纤维混凝土承台受剪承载力计算公式。该公式适用于一般的未配箍筋的钢纤维混凝土承台的受剪承载力计算。

7.4.5 对钢筋钢纤维混凝土承台局部受压承载力计算作了规定。

在柱底、边桩或角桩处承台的局部受压计算底面积按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的“同心、对称”原则确定。

公式是在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 给出的承台未配置间接钢筋的局部受压承载力公式的基础上,考虑钢纤维对局部受压承载力的影响系数 β_{lf} 给出的。

7.4.6 承台纵筋的布置形式与 W/h_0 的大小有关。厚承台($W/h_0 < 1.0$)宜按空间桁架模型计算,纵筋往往集中布置在通过桩顶的板带内;薄承台($W/h_0 \geq 1.0$)宜按塑性铰线方法计算,纵筋一般采用均匀的正交布筋。

承台底部纵筋在桩顶位置处应向上弯折,这样可以控制厚承台各角隅及承台侧面水平裂缝的扩展。

8 构造规定

8.0.1、8.0.2 根据试验研究,变形钢筋在钢纤维混凝土中的粘结锚固强度较在同强度等级普通混凝土中有较大提高。变形钢筋在钢纤维混凝土中的粘结锚固强度,仍可采用变形钢筋在普通混凝土中的粘结锚固强度计算公式,但须将原公式中的混凝土抗拉强度以钢纤维混凝土抗拉强度代替。比照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定,结合钢纤维混凝土与钢筋的粘结性能试验结果,根据锚固长度与粘结强度和钢筋屈服强度的关系,并经可靠度分析,提出了变形钢筋在钢纤维混凝土中锚固长度的计算公式。

纵向受拉钢筋和受压钢筋在跨中和支座边截断时所需的延伸长度,以及允许用绑扎搭接时的搭接长度,可根据锚固长度规定相应缩短。

9 结构构件抗震设计

9.1 一般规定

9.1.1~9.1.5 大量研究成果表明,钢纤维对混凝土具有较好的增强增韧性能。加入混凝土的钢纤维能显著提高混凝土的抗拉强度、抗裂强度、抗剪强度、抗折强度以及混凝土的抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆和弯曲韧性等,钢筋钢纤维混凝土结构的抗震性能较普通钢筋混凝土结构显著提高。

为与我国现行标准设计方法相协调,本标准规定,钢筋钢纤维混凝土结构构件抗震设计的设计原则、抗震设防标准、荷载效应设计值计算以及抗震承载力计算和抗震变形验算应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的有关规定。

9.1.6 研究表明,钢纤维的掺入可减小钢筋与混凝土的有效粘结长度,钢筋的抗震锚固与搭接长度可相应减小;在低周反复荷载作用下,变形钢筋与钢纤维混凝土的粘结强度退化率与普通混凝土相当。本条规定了钢纤维混凝土结构纵向受力钢筋的抗震锚固与搭接长度及其相关要求。

9.1.7 研究表明,钢纤维混凝土结构构件的抗震性能与钢纤维的种类及其掺量密切相关。当钢纤维混凝土强度较高而钢纤维强度较低时,钢纤维易被拉断,此时的结构延性提高幅度相对较小;当钢纤维混凝土强度以及所掺入钢纤维种类一定时,过小的钢纤维掺量对混凝土结构构件抗震性能的提高作用可能不足。为此,本标准根据现有研究资料给出了钢纤维混凝土抗震结构构件的最小钢纤维掺量的规定。

9.2 框架梁柱节点

9.2.1、9.2.2 本标准关于钢筋钢纤维混凝土框架节点抗震设计的规定，是依据现浇的、以普通混凝土为基体的钢纤维混凝土框架节点的试验资料编制成的，故标准的适用范围暂限于此类节点。由于规定只涉及钢纤维混凝土框架节点抗震设计得到特殊要求。其余各项设计要求应按条文中指出的其他两个标准的规定执行。

9.2.3~9.2.5 钢纤维的掺入可使斜裂缝宽度减小，斜裂缝区及受压区钢纤维混凝土所承担的剪力较素混凝土明显提高。为了充分利用斜截面上钢纤维混凝土的抗剪能力，钢筋钢纤维混凝土梁斜截面受剪限制条件可较钢筋混凝土构件适当放宽，抗剪承载力可考虑钢纤维的影响。

9.2.6 试验表明，钢筋钢纤维混凝土框架节点剪压比的上限值高于钢筋混凝土框架节点。当钢纤维体积率为 1.2%~1.5%时，钢纤维混凝土框架节点剪压比上限值较之钢筋混凝土框架节点可提高 28%~78%。考虑到钢纤维混凝土框架节点剪压比上限值的试验资料还不多，建议钢纤维混凝土框架节点的截面限制条件偏安全地取为：

$$V_j = \frac{1}{\gamma_{RE}} [0.30\eta\beta_c f_{tc} b_j h_j (1 + 0.17\lambda_t)] \quad (14)$$

式中： β_c ——混凝土强度影响系数，按现行混凝土结构设计规范有关规定取用。

9.2.7 钢筋钢纤维混凝土框架节点受剪承载力的提高，主要取决于钢纤维对混凝土抗剪能力的改善。通过对国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010（2015年版）中公式（11.6.4-2）中的 $1.1\eta f_t b_j h_j$ 项进行修正，可得钢纤维混凝土所承担的受剪承载力为：

$$1.1\eta f_t b_j h_j (1 + \beta_t l_t / d_t \rho_t) \quad (15)$$

本标准编制组进行了 2 个普通高强混凝土梁柱节点、1 个钢

钢筋纤维混凝土梁柱节点和 10 个钢筋钢纤维高强混凝土梁柱节点试验,混凝土设计强度分别取 CF40、CF60、CF80,以 C60 混凝土为基础,钢纤维体积率分别取 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%;以 1% 钢纤维体积率和 1.2% 配箍率的 C60 高强混凝土梁柱节点为基础,钢纤维掺入梁端长度分别取 50mm、125mm 和 250mm。在此基础上,收集了国内外混凝土强度在 18MPa~82MPa 的共 49 个钢筋钢纤维混凝土梁柱节点受剪承载力试验结果,根据钢纤维混凝土平面节点试验数据的回归分析,得 $\beta_1 = 1.08$ 。

关于中间节点四周梁对钢纤维受剪承载力的有利影响,由于缺乏试验资料,暂不计入。对 β_1 取值作以下调整:

当 $\eta = 1.0$ 时,取 $\beta_1 = 1.05$;当 $\eta = 1.5$ 时,取 $\beta_1 = 0.7$ 。

9.2.8 据推算,钢纤维含量特征系数 λ_f 为 1.0 的钢纤维,其作用相当于体积配箍率为 1.1% 的箍筋。按照钢筋钢纤维混凝土框架节点中箍筋的体积配箍率与钢纤维的折算体积配箍率之和,不应小于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 关于钢筋混凝土框架节点最小体积配箍率的要求,可得钢筋钢纤维混凝土框架节点钢纤维的最小纤维含量特征值如表 9.2.8 所示。

9.2.9 钢筋钢纤维混凝土框架节点的钢纤维配置范围应宽于节点核心区,但又要限制钢纤维进入框架梁中的长度,以免使梁的正截面强度提高,破坏原框架设计“强柱弱梁”的条件。

9.2.10 不配箍筋的钢纤维框架节点的试验表明,钢纤维不但能代替箍筋满足抗震框架节点对强度、延性、耗能等方面的要求,而且钢纤维还能提供类似于箍筋约束混凝土的作用。考虑到钢筋钢纤维混凝土框架节点还缺乏实践经验,为稳妥起见,仍规定应配置体积配箍率不小于 0.25%~0.45% 的箍筋。

9.3 剪力墙及连梁

9.3.2、9.3.3 钢筋钢纤维混凝土剪力墙及连梁受剪承载力的提高,主要取决于钢纤维对混凝土抗剪能力的改善,钢纤维的掺入

可使斜裂缝宽度减小,斜裂缝区及受压区钢纤维混凝土所承担的剪力较素混凝土明显提高。

本标准编制组进行了 5 个钢管混凝土边框钢纤维混凝土剪力墙和 1 个钢管混凝土边框混凝土剪力墙的低周反复加载试验,混凝土设计强度分别取 CF40、CF60、CF80,以 C60 混凝土为基础,钢纤维体积率分别取 0.5%、1.0% 和 1.5%;剪跨比为 1.0,钢纤维为两端带端勾的冷拉切断型钢纤维。结果表明:钢纤维可有效限制墙体混凝土的裂缝宽度,改善裂缝形态;随着钢纤维体积率的增大,剪力墙墙体裂缝明显变细、变密,裂缝分布域显著增加;随着钢纤维体积率和混凝土强度的增大,剪力墙受剪承载力明显增加。在本文试验结果分析的基础上,收集了近年来有关文献中钢管混凝土边框剪力墙及钢筋钢纤维混凝土剪力墙抗震试验中与本文加载方式相同、破坏模式为墙体剪切破坏并且数据较为详细的 18 个剪力墙试件数据,提出了考虑钢纤维体积率和混凝土强度等影响的钢管混凝土边框钢纤维混凝土剪力墙受剪承载力计算方法。

通过对现有研究资料的分析,本标准规定了剪力墙及连梁的抗震设计仍采用现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的方法,但为了充分利用斜截面上钢纤维混凝土的抗剪能力,钢筋钢纤维混凝土剪力墙及连梁的斜截面受剪限制条件可较钢筋混凝土剪力墙及连梁适当放宽,抗震受剪承载能力也考虑了钢纤维的有利影响。

9.3.4 研究表明,钢纤维对混凝土的限裂增强作用在一定程度上提高了结构的正截面受弯承载力,但提高幅度不大。同时,对于考虑地震作用组合作用下对称配筋的剪力墙洞口连梁,其正截面受弯承载力主要取决于纵向钢筋及对角斜筋的作用。鉴于此,本标准规定,对称配筋的连梁正截面受弯承载力计算时,不考虑钢纤维的影响而按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定进行。

9.4 板柱节点

9.4.1、9.4.2 研究表明,钢纤维的加入提高了混凝土的抗拉、抗剪强度和韧性,改善了混凝土板柱节点的受力延性,有效提高了板柱节点的抗震性能。本标准在保持现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 关于混凝土板柱节点结构形式和构造措施的基础上,考虑钢纤维的作用,进行钢纤维混凝土板柱节点的抗震设计。

9.4.3、9.4.4 根据分析研究及工程实践经验,对一级、二级和三级抗震等级板柱节点,分别给出了由地震作用组合所产生不平衡弯矩的增大系数,以及钢纤维混凝土板柱节点配置抗冲切钢筋(如箍筋、抗剪栓钉等)的受冲切承载力计算方法。对板柱-剪力墙结构,除在钢纤维混凝土板柱节点处的板中配置抗冲切钢筋外,也可采用增加板厚、增加结构侧向刚度来减小层间位移角等措施,以避免板柱节点发生冲切破坏。

9.4.5 为了防止在极限状态下楼板塑性变形充分发育时从柱上脱落,要求两个方向贯通柱截面的后张预应力钢筋及板底普通钢筋受拉承载力之和不小于该层柱承担的楼板重力荷载代表值作用下的柱轴压力设计值。对于边柱和角柱,贯通钢筋在柱截面对边弯折锚固时,在计算中只取其截面面积的一半。

10 工业建筑地面

10.1 一般规定

10.1.1、10.1.2 钢纤维混凝土地面的构造与普通混凝土地面构造大致相同。结合层、隔离层等其他构造层可根据设计和使用要求,按现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的规定设置。地面垫层兼面层表示钢纤维混凝土垫层表面不再铺设其他材料的面层。本章进行承载力设计和构造规定的钢纤维混凝土地面板即钢纤维混凝土垫层或钢纤维混凝土垫层兼面层。

钢纤维混凝土垫层或垫层兼作面层适用于对抗裂、抗冲击、耐磨要求较高,地面堆载较大的工业建筑地面、堆场地面,以及特殊荷载和环境作用对地面设计要求较高的情况。

10.1.3 根据现有工程经验,规定了用于工业建筑地面的钢纤维混凝土最低强度等级。

10.1.4 钢纤维混凝土地面的地基按现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的规定设计,压实系数不应小于 0.94。当地基反力系数 $k < 0.03\text{N/mm}^3$ 或变形模量 $E_0 < 20\text{N/mm}^2$ 时,应对地基分层碾压夯实或采用石灰桩、水泥搅拌桩等措施固化土壤,在钢纤维混凝土地面垫层(或垫层兼面层)以下增设一个密实的、有足够厚度的中粗砂、道渣、碎石或素混凝土垫层,以扩散应力等方法加固钢纤维混凝土地面垫层(或垫层兼面层)的地基。

10.2 板厚设计

10.2.1、10.2.2 进行钢纤维混凝土垫层(或垫层兼面层)设计时,地面的安全等级、重要性系数和地面荷载应符合现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 和《建筑结构荷载规范》GB

50009 的规定。有些工业厂房的荷载比较特殊, 现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 不能涵盖, 需要按工业厂房的特殊规定确定。根据现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068、《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定, 以及钢纤维混凝土工业建筑地面的安全性要求, 本标准中将钢纤维混凝土材料分项系数取为 1.4, 以与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010 (2015 年版) 第 4.1.4 条的规定相协调。

10.2.3、10.2.4 钢纤维混凝土仅用作面层时应确保面层和垫层的可靠粘结, 不空鼓是保证质量的关键。

10.2.5 钢纤维混凝土地面板的内力应按弹性地基上的屈服线理论进行分析, 取最不利荷载组合的内力分析结果作为设计依据。

10.2.6 钢纤维混凝土用于工业建筑地面应满足最小残余弯拉强度的要求, 即裂后韧性要求, 而且只有采用具备足够裂后韧性的建筑地面材料才能采用塑性屈服线理论进行承载力设计。本标准公式 (10.2.6-1) ~ 公式 (10.2.6-4) 是基于欧洲标准并考虑建筑地面的安全等级进行适当调整而提出的。用于工业建筑地面的钢纤维混凝土应满足弯拉强度及残余弯拉强度的要求。研究与工程应用表明, 当钢纤维混凝土的残余弯拉强度标准值 $f_{R1k} < 1.5\text{N/mm}^2$ 和 $f_{R3k} < 1.0\text{N/mm}^2$ 时, 难以满足工业建筑地面的承载力及耐久性要求。

10.2.7 本条规定钢纤维混凝土面板 (垫层、垫层兼面层) 厚度的设计方法, 其设计计算依据 Losberg 设计理论。采用塑性屈服线理论设计时, 面板板面不允许开裂 (或裂缝宽度不大于 0.05mm), 按钢纤维混凝土的比例极限弯拉强度设计; 面板板底允许出现裂缝, 按钢纤维混凝土的残余弯拉强度设计。

10.2.8 连续钢纤维混凝土面板在荷载作用下呈弯曲破坏形态, 一般不会发生冲切破坏, 所以面板可不作冲切承载力验算。

10.3 构造规定

10.3.1 混凝土收缩摩阻应力的准确计算十分困难，通常可不做此项计算，而是通过采用降低混凝土收缩摩阻应力的工程措施解决。

10.3.2 地面接缝的种类很多，本条对用于钢纤维混凝土地面的几种接缝给予规定，现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 中关于变形缝的规定适用于钢纤维混凝土地面。工业建筑地面与室外路面具有不同的使用环境和条件，各种接缝也有其不同的特点。目前，实际工程应用中的工业地坪假缝主要采用锯切成型，锯片直径约为 500mm、厚度 3mm~5mm，因而其假缝宽度一般为 3mm~5mm。因此考虑与现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 等我国现行规范的协调与衔接，本标准建议假缝宽度宜为 3mm~8mm。

10.3.3 钢纤维混凝土地面采用激光整平机具进行一仓大面积快速施工，地面主要存在纵向和横向假缝（切缝）、施工缝和隔离缝。

10.3.4 钢纤维混凝土地面由切缝、施工缝（分仓缝）分隔的每块矩形的长宽比不应大于 1.5。施工缝处应设传力杆。

10.3.5 钢纤维混凝土地面的柱角、墙角、设备基础角应采用局部加筋措施，目的是避免地面阴角出现裂缝。

11 城镇道路与桥梁桥面

11.1 一般规定

11.1.1 根据国内工程应用经验和研究资料,在拱桥、梁桥或其他桥型的上部结构使用的钢纤维混凝土结构可分为四类:无筋钢纤维混凝土结构,钢筋钢纤维混凝土结构,钢筋钢丝网钢纤维混凝土结构和预应力钢筋钢丝网钢纤维混凝土结构。设计时,应考虑钢纤维混凝土的抗拉作用。

11.1.2 钢纤维混凝土城镇道路与桥梁桥面设计除应满足本标准的有关规定外,尚应满足现行行业标准《城市道路工程设计规范》CJJ 37 和《城市道路路面设计规范》CJJ 169 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的有关规定。本标准中采用了现行国家标准《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 规定的符号,与上述两个标准的符号不同,使用时请注意对应关系。

11.2 城镇道路路面

11.2.1 因路面的面层开裂破坏主要是由弯拉应力导致的,因此在设计钢纤维混凝土路面板厚度时,应以钢纤维混凝土弯拉强度为设计标准。混凝土的弯拉强度以 28d 龄期的强度控制。

钢纤维混凝土路面设计时,由于采用的钢纤维的品种、掺量、长径比及混凝土基体的不同,从而使钢纤维混凝土的弯拉强度及钢纤维对弯拉强度的影响系数有所区别。因此,钢纤维混凝土弯拉强度宜通过试验确定。如无条件,可按本标准公式(4.2.5)确定,其中钢纤维混凝土弯拉强度影响系数可按本标准表 4.2.6 采用。

根据钢纤维混凝土的力学特性,在混凝土中掺入一定量的钢

纤维后，其弯拉强度有较大的提高。试验表明，在混凝土中掺入一定量的钢纤维后，其弹性模量提高不大，与普通混凝土相近。因而，在无条件测试时，钢纤维混凝土弯拉弹性模量可根据同强度等级素混凝土弯拉强度设计值，按现行有关水泥混凝土路面设计规范的规定采用。

11.2.2 由于钢纤维混凝土比水泥混凝土具有较高的抗裂、抗冲击及抗胀缩性能，其路面面层不易开裂，即使有微小的裂缝，也能保持在较长的时间内裂缝不继续扩展，因而提高了路面面层的耐久性和使用寿命。因而其接缝间距可比水泥混凝土路面面层的接缝间距加大。接缝间距可根据钢纤维特性和体积率、面层的厚度、温度应力等并结合当地的工程经验确定。

11.2.3 为了减少反复计算次数，在设计路面板的厚度时，先假定路面板厚度，即初选厚度。考虑到钢纤维混凝土弯拉强度和弯拉疲劳强度比普通水泥混凝土弯拉强度和弯拉疲劳强度有较大提高，因而可使路面面层的厚度减薄，根据国内外资料建议：钢纤维体积率为 1.0%~1.5% 钢纤维混凝土路面板的初选厚度，可取水泥混凝土路面板初选厚度的 65%~55%；当钢纤维体积率为 0.6%~1.0% 时，可按水泥混凝土路面板初选厚度的 75%~65% 选用，减薄的程度随钢纤维体积率的降低而减少。

为了保证钢纤维混凝土路面面层的使用质量和寿命，不因面层过薄而发生翘曲变形，参考现行标准中关于水泥混凝土路面面层最小厚度的规定及使用经验，规定了不同等级的钢纤维混凝土路面面层的厚度。

11.2.4 规定了钢纤维混凝土路面结构设计的极限状态方程，同时该方程也是面层厚度计算取值的依据，面层厚度的计算采用试算法进行，因一时难以得到准确的面层厚度值，通常采用一定容许范围。只要符合在此范围内，面层厚度设计即满足要求。即荷载疲劳应力和温度疲劳应力之和与可靠度系数的乘积小于或等于钢纤维混凝土弯拉强度标准值，即满足本标准公式 (11.2.4) 的要求时，则初选面层厚度可作为钢纤维混凝土面层的计算厚度。

否则,应改选面层厚度,重新计算,直至满足本标准公式(11.2.4)要求为止。设计厚度按计算厚度向上取整以10mm为间隔取用。

11.2.5 为了与现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169相协调,现以普通混凝土的荷载疲劳应力系数为基准,并根据钢纤维混凝土试验数据的分析结果,得到钢纤维混凝土路面的疲劳应力系数计算公式。

11.2.6 虽然钢纤维混凝土路面面层比水泥混凝土路面面层的厚度要薄,但其路面面层仍然受温度变化的影响,承受着疲劳温度应力的作用,因此,钢纤维混凝土路面面层的厚度计算时,同样要考虑疲劳温度应力的作用。

11.2.7 关于在原有水泥混凝土路面上铺筑钢纤维混凝土加铺层的设计,国内外还没有建立完善的设计理论和方法。目前,钢纤维混凝土路面加铺层的设计按水泥混凝土路面设计规范规定,钢纤维混凝土路面加铺层的厚度,是先以等刚度原理计算出水泥混凝土路面加铺层的厚度,然后按钢纤维体积率不同,大致取水泥混凝土路面加铺层厚度的0.55倍~0.65倍。如果直接按等刚度原理计算钢纤维混凝土路面加铺层的厚度,则不能反映钢纤维混凝土的增强效果,因为钢纤维混凝土和水泥混凝土的弹性模量取值基本相同。

本方法是参考美国工程兵部队进行一系列试验所得的半经验性公式并经对比论证而采用的,较符合路面的实际情况。

在原有水泥混凝土路面上铺筑钢纤维混凝土加铺层有隔离式和直接式两种。隔离式是在旧混凝土路面与钢纤维混凝土加铺层之间设有隔离层,隔离层可选用沥青混凝土、沥青砂或油毡等;直接式是先对旧混凝土路面表面清洗,清除表面油污、剥落碎块后再铺筑钢纤维混凝土加铺层。

11.2.8 当沥青混凝土路面已出现较严重的结构性破坏,路线承载能力较差时,选用钢纤维混凝土路面加铺层可提高路面结构承载能力、延长路面使用寿命,是一种可行的技术方案。对沥青混

凝土路面因整体强度不足而需铺筑钢纤维混凝土加铺层时,原有沥青混凝土路面面层除回收再生利用外,一般可不铲除,但应对局部松散及坑槽进行修补。对于旧沥青混凝土路面,在铺筑钢纤维混凝土加铺层前,应对较严重的车辙、拥包等病害进行铣刨,对坑槽和网裂较严重的路段进行结构补强,并设置调平层,再按新建钢纤维混凝土路面进行加铺层设计。为确保钢纤维混凝土加铺层具有足够的刚度和变形能力,规定了钢纤维混凝土加铺层厚度不宜小于140mm。

11.2.9 直接式钢纤维混凝土路面加厚层的接缝应与旧路面的接缝重合。主要考虑到直接式加厚板与原路面板的共同作用,有可能因原路面板的接缝反射,使加厚层板产生裂缝或与旧路面面层之间出现层间分离,故要求上下层板的接缝相重合。但若原路面板的横向缩缝间距较小,这时接缝的反射作用影响不大,可间隔取消一条接缝。

11.3 层布式钢纤维混凝土复合路面

11.3.1 层布式钢纤维混凝土复合路面是采用特殊的施工方法修筑的路面,路面上、下层的钢纤维通过撒布、振捣工艺与顶层、底层混凝土混合,形成复合路面。本节的内容,除考虑层布式钢纤维混凝土复合路面的特点外,还应考虑与现行《城镇道路路面设计规范》CJJ 169的协调。因此有关层布式钢纤维混凝土复合路面的设计,除应遵守本节规定外,尚应符合现行行业标准《城镇道路路面设计规范》CJJ 169的有关规定。

11.3.2 根据室内试验和试点工程的经验,层布式钢纤维混凝土复合路面上、下层层内的钢纤维体积率为0.9%~1.5%(相当于上、下各层撒布 $1.4\text{kg}/\text{m}^2 \sim 2.4\text{kg}/\text{m}^2$)比较合适,钢纤维既能在层内混合均匀,又能达到一定的增强增韧效果。钢纤维的长度可比拌合浇筑的钢纤维混凝土用的纤维长些,因为不存在结团的问题,同时纤维长有利于增强、增韧。

11.3.3 层布式钢纤维混凝土复合路面的面层开裂破坏也是主要

由弯拉应力导致的。因此,在设计层布式钢纤维混凝土复合路面厚度时,也应应以层布式钢纤维混凝土弯拉强度为依据。混凝土的弯拉强度按 28d 龄期的强度为标准。如果路面开放交通承受荷载的时间大于 90d,则可采用 90d 龄期的强度(按 28d 强度的 1.1 倍计算)。

11.3.4 由于层布式钢纤维混凝土弯拉强度受素混凝土强度、钢纤维的类型、体积率、长径比等因素影响变化较大,因此宜通过试验确定。试验表明,当钢纤维体积率为 0.9%~1.5%(相当于上、下各层撒布 $1.4\text{kg}/\text{m}^2 \sim 2.4\text{kg}/\text{m}^2$)、长径比为 50~100 时,层布式钢纤维混凝土弯拉强度比素混凝土提高 18%~30%。

11.3.5 试验表明,在上下层混凝土中含有一定量的钢纤维,其弹性模量提高不大,与普通混凝土相近,因而,层布式路面面层钢纤维混凝土弯拉弹性模量可不考虑钢纤维的影响,按同强度等级素混凝土弯拉强度设计值根据现行行业标准《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40 的规定采用。

11.3.6 由于层布式钢纤维混凝土比水泥混凝土具有较高的抗裂、抗冲击及抗胀缩性能,路面不易开裂,即使有微小的裂缝,也能保持在较长的时间内裂缝不继续扩展,因而提高了路面的耐久性和使用寿命,接缝间距可比水泥混凝土路面的接缝间距适当加大。接缝间距可根据钢纤维特性和掺量、面层的厚度、温度应力等并结合当地的工程经验确定。

11.3.7 为了减少反复计算次数,在设计层布式钢纤维混凝土复合路面面层的厚度时,其面层的初选面层厚度,当钢纤维体积率为 0.9%~1.5%时,按现行有关标准水泥混凝土路面板初选面层厚度的 75%~65%选用。考虑到层布式钢纤维混凝土弯拉强度和弯拉疲劳强度比普通水泥混凝土弯拉强度和弯拉疲劳强度有较大的提高,因而可使路面面层的厚度减薄。试验表明,上下层钢纤维掺量为 0.9%~1.5%时,其面层厚度可比普通水泥混凝土路面面层厚度减薄 25%~35%。

为了保证层布式钢纤维混凝土复合路面的使用质量和寿命,避

免因路面板过薄而使板发生翘曲变形,参考现行标准中关于水泥混凝土路面面层最小厚度的规定及使用经验,特重或重交通时,层布式钢纤维混凝土复合路面板最小厚度为 160mm,中等或轻交通时,最小厚度为 140mm。

11.3.8 为与现行公路水泥混凝土路面设计标准相协调,以普通混凝土的荷载疲劳应力系数为基准,并根据层布式钢纤维混凝土试验数据分析结果,可得层布式钢纤维混凝土复合路面的疲劳应力系数计算公式(11.3.8)。

11.3.9 虽然层布式钢纤维混凝土复合路面面层比水泥混凝土路面面层的厚度薄,但其路面面层仍然受温度变化的影响,承受着疲劳温度应力的作用。因此,层布式钢纤维混凝土复合路面面层的厚度计算时,同样要考虑疲劳温度应力的作用。

11.3.11 当沥青混凝土路面因整体强度不足而需铺筑层布式钢纤维混凝土加铺层时,原有沥青混凝土路面面层除回收再生利用外,一般可不铲除。但应对局部松散、坑槽进行修补。裂缝严重的路段应采取措施,防止原有路面破损致使加铺层产生反射裂缝。

11.4 城镇桥梁桥面

11.4.1 城市桥梁的混凝土桥面破损情况严重,不但影响正常交通,而且不利安全。

20 世纪 70 年代以来,美国、日本等国采用钢纤维混凝土铺修桥面,取得了不少经验,认为对于提高桥面层的抗裂性、耐磨性和减少维修工作量都有很大好处。1987 年和 1988 年在维修北京南郊马草河桥及北郊安慧桥时,采用了钢纤维混凝土桥面技术,取得了钢纤维混凝土桥面设计和施工的初步经验。在四川省和其他省市的公路和城市道路桥面应用钢纤维混凝土的经验证明,钢纤维混凝土是一种性能优良的桥面铺装材料。

钢纤维混凝土桥面在国内刚开始应用,国外试用时间也不长。为了稳妥,先规定在受力较明确的简支、连续体系结构和拱

形结构的公路与城市道路桥梁上应用，对于其他结构的桥梁应通过试验后使用。

近年来，在长江上修建的一些大型桥梁的桥面也都采用钢纤维混凝土，钢纤维混凝土桥面的应用日益广泛。

11.4.2 路面和桥面设计一般以弯拉强度为控制指标，本条规定了桥面铺装层的最小强度等级和弯拉强度标准值。同时，钢纤维混凝土的配合比与普通混凝土有所不同，为了充分发挥钢纤维的增强效果，粗骨料粒径较普通混凝土要小，砂率 and 水泥用量也要适当增加。

11.4.3 由于桥面厚度相对较薄，采用钢纤维混凝土后，桥面厚度不可能大幅度减小。因此，钢纤维混凝土桥面铺装层厚度可按普通混凝土桥面厚度考虑，桥面防水层也按普通混凝土桥面考虑。

11.4.4 为了防裂，目前桥面钢筋网多用 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的网格。钢纤维混凝土桥面钢筋网加大了钢筋间距，可节约钢筋。对于跨径较小或桥面变形较小的梁桥和拱桥桥面，可取消钢筋网。

11.4.5 分缝间距较大是钢纤维混凝土桥面的主要优点，它不但有利于减轻破损，而且能增加行车舒适感。但分缝过大，仍会造成混凝土开裂。根据经验，横缝间距以 $10\text{m} \sim 15\text{m}$ 为宜，不应大于 20m ，单向坡 3 车道宽（ 12m 左右）或小于 3 车道宽的桥面可以不设纵缝，4 车道或大于 4 车道宽的路面需要设置纵缝。

12 城市隧道、边坡支护、建筑结构修复与加固工程

12.1 一般规定

12.1.2 纤维喷射混凝土在隧道工程中可用于下列情形：

用作隧道围岩的初期支护。喷射混凝土（经常同锚杆结合使用）是隧道工程中普遍采用初期支护形式，不仅可以及时防止岩块的掉落而且可以在同围岩的共同变形过程中发挥围岩的自承作用。可是，由于脆性的混凝土喷层承受变形的能力很差，会因开裂，破坏而失效。掺入纤维材料的喷射混凝土特别是喷射钢纤维混凝土不仅强度有所提高而且具有较好的韧性，不仅能可靠地防止岩块的坍塌而且对围岩的变形有很强的适应能力，在开裂后产生塑性变形时可以保持承载力不明显降低。这就可以有效地控制围岩的变形。特别是在挤压性地层或膨胀性地层中修建隧道，支护系统的韧性具有特别重要的意义。

高地应力的硬岩地层中作为岩爆的防护措施。在喷射混凝土中掺入钢纤维可以提高其抗剪强度，增强抗冲击性能，同时具有较好的韧性。在开挖后立即喷射钢纤维混凝土可有效地防范岩爆落石，有利于后续工序的施工安全。

用作隧道单层衬砌。对于地下水不发育地层中的硬岩隧道，将纤维喷射混凝土与锚杆等组合而成的支护体系作为隧道的永久结构（称为“单层衬砌”），可以取代常用的由初期支护和模筑混凝土衬砌组成的复合式衬砌，在经济上和技术上都十分合理。纤维材料掺入喷射混凝土中除了可以提高其力学性能外还具有阻裂作用，特别是合成纤维一类非金属纤维在混凝土中高度分散，其弹性模量又相对较低，对早期潜在裂缝反应十分灵敏，能有效地阻止裂缝的扩散，控制水泥硬化过程中产生的塑性收缩裂缝。有

利于提高混凝土的密实性和耐久性。

用于修补裂损衬砌，加固衬砌结构。纤维喷射混凝土修补和加固既有隧道的裂损衬砌时，当衬砌裂损严重并伴有围岩坍塌、变形时，宜选用钢纤维；对围岩基本稳定，衬砌裂损不严重，无衬砌碎块掉落可能的隧道可采用非金属纤维。亦可两种纤维兼用。应根据围岩条件和衬砌的裂损程度确定纤维掺量。掺入非金属纤维还可以提高物料的黏稠性，降低喷射混凝土中钢纤维回弹损失，并有利于喷层与既有混凝土的紧密结合。

12.1.3 日前随着地下铁道、高速铁路隧道的大量修建，对结构的耐久性和抗空气动力学效应影响要求越来越高。根据已有的试验研究结果表明，在模筑混凝土衬砌中掺入钢纤维，可以有效起到防止衬砌非结构性开裂，提高耐久性的作用。特别是高速铁路隧道对于衬砌表面的缺陷和瑕疵有严格限制，适合采用钢纤维混凝土作二次衬砌。

钢纤维混凝土是一种韧性材料，具有吸收变形的能力和较好的抗冲击性能。在混凝土中掺入一定量的钢纤维，可以显著提高混凝土的抗拉、抗剪、弯拉强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆以及弯曲韧性等性能，提高构件的承载力。

研究表明，掺入混凝土中的聚丙烯纤维在火灾高温情况下，受热熔化，形成蒸汽通道；纤维素纤维在达到燃点温度过程中，逐步脱水焦化，此时纤维的体积变小，内部空腔也存在塌陷现象。随着温度的进一步升高，纤维分散分解，形成蒸汽通道，使得混凝土中因水分蒸发产生的蒸汽压力得以释放，避免衬砌结构因混凝土爆裂而丧失承载能力。在模筑混凝土衬砌中掺入 $1\text{kg/m}^3 \sim 2\text{kg/m}^3$ 的聚丙烯或纤维素纤维即可起到防爆裂的效果。

试验表明纤维混凝土能有效地提高混凝土的抗冻性能，减少混凝土的强度损失和冻害损伤。

12.1.4 由于边坡地质情况的复杂性，可视边坡稳定情况采用钢纤维或复合纤维混凝土并与锚杆或钢筋网结合使用。钢纤维混

土的抗裂阻裂和增强增韧与锚杆或钢丝网的复合作用可有效提高边坡支护效果。

12.2 城市隧道支护

12.2.2~12.2.4 按照新奥法（NATM）原理，初期支护是控制围岩变形，保证围岩稳定性的主要措施。为了使喷射混凝土对围岩的支护作用不因喷层开裂而失效，通常要在喷层中配置钢筋网。而在喷射作业时，由于钢筋网的阻挡，会形成“阴影区”，影响喷射混凝土的施工质量以及喷层和围岩间的密贴性，对结构体系的稳定性产生不利影响。钢纤维的掺入改变了喷射混凝土材料的脆性，使其具有明显的韧性。由于喷射钢纤维混凝土能适应围岩的变形，因此，一般可取代设置在喷层中的钢筋网。

韧性是喷射钢纤维混凝土一个重要特性，是指材料吸收变形的能力亦即保持裂后强度的特性。钢纤维喷射混凝土的韧性使之与围岩共同变形过程中持续有效地提供支护抗力。因此规定了喷射钢纤维混凝土的最小水泥用量、骨料要求以及掺合料与外加剂的使用要求。

喷射钢纤维混凝土的韧性参数可以通过试验确定，所采用的试验方法及相应的韧性参数大致可分为两类：等效弯拉强度和弯曲韧度比 R_c 以及能量吸收值 G 。

挪威标准指出，衬砌的厚度是决定其耐久性的最主要参数之一，其余指标为抗冻、氯化物含量、透水性和毛细管吸收性。从耐久性出发，喷层最小厚度应为 60mm。

用能量吸收值 G 和弯曲韧性比或残余抗弯拉强度，均可表征钢纤维喷射混凝土的韧性。通过《钢纤维混凝土》JG/T 472 - 2015 规定的试验方法可以得到的弯曲韧度比和弯拉强度，用以表征钢纤维混凝土的韧性为工程设计中的结构计算提供了条件。但是，由于隧道工程中的初期支护和单层衬砌难以像地面结构物那样通过“荷载-结构”模型计算来进行设计，因此，对于广泛地运用于隧道初期支护的喷射钢纤维混凝土，特别是用于围岩变

形控制，宏观的“能量吸收值”更为适用。“能量吸收值”可通过平板弯曲韧性试验测定挠度为 25mm 时的能量 J 来度量喷射钢纤维混凝土的韧性。试件板的形状应为正方形，边长 600mm，厚度 100mm。支撑在钢框上。加载方式如图 3。将支承钢框平放在实验台上，并调整其水平度，然后将方板试件置于钢框支座上，使其水平形成简支；试件中心放置 100mm×100mm 加载垫块。试验机或液压千斤顶的出力通过加载垫块传递到试件上。采用等速位移控制，控制速率为 1.5mm/min，试验进行至方板中心点处挠度为 25mm 为止。

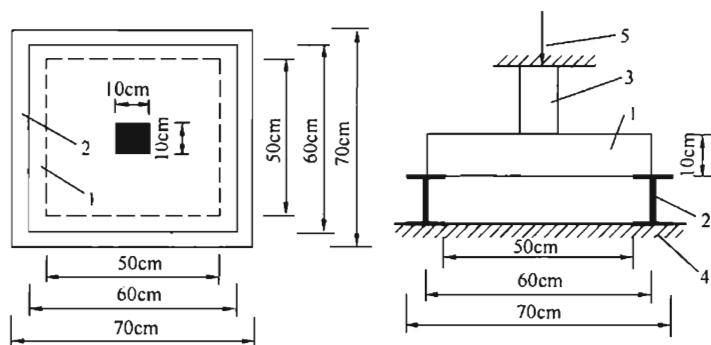


图 3 四边简支板的加载方式

1—试件；2—正方形方框支座；3—100mm×100mm 加载块；

4—支撑平台；5—压力机或者液压千斤顶

将试验结果作出板的荷载-挠度曲线(图 4)；根据荷载-挠度曲线用数值积分法或用求积仪求出板所吸收的能量-挠度曲线(图 5)；求出方板中心点处挠度为 25mm 时，板所吸收的能量，为大板韧性试验得到的

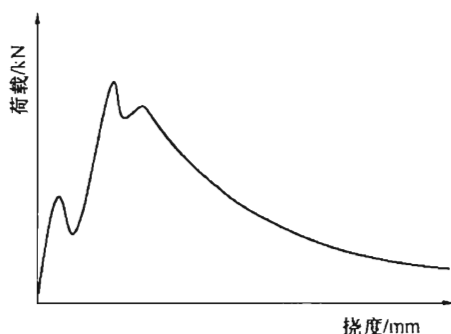


图 4 荷载-挠度曲线

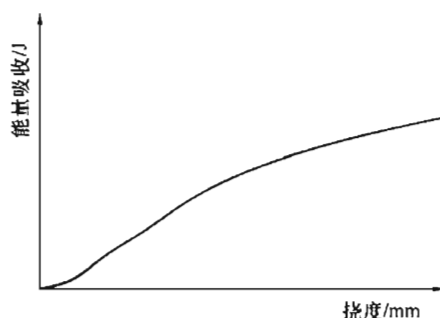


图5 能量-挠度曲线

能量吸收指标。

对于广泛地运用于隧道初期支护的喷射钢纤维混凝土，特别是用于围岩变形控制，“能量吸收值”更为适用。

根据国外的工程经验，以高强钢丝型钢纤维为例（长径比65，长度为35mm和长径比55，长度为30mm），给出相应于不同韧性指标的喷射钢纤维混凝土钢纤维实际掺量，如表3所示，仅供参考。具体应用时应根据我国具体情况，结合钢纤维品种和喷射施工的技术通过试验确定。

表3 高强钢丝型钢纤维实际掺量与韧性指标间的关系

钢纤维实际 掺量 (kg/m ³)	长径比 65，长度 35mm		长径比 55，长度 30mm	
	能量吸收值 G (J)	弯曲韧性比 $R_{e,150}$ (%)	能量吸收值 G (J)	弯曲韧性比 $R_{e,150}$ (%)
20	800	50	650	41
25	910	56	762	49
30	1015	62	880	56
35	1130	67	965	64
40	1245	72	1050	72
45	—	75	—	74
50	—	77	—	76

钢纤维最小掺量同钢纤维的长径比有关，由散布在混凝土中的钢纤维“最小重叠值”（minimum fiber overlap）要求计算的“最大平均间距”（maximum average spacing value） s 确定的。旨在保证钢纤维在混凝土中分布的连续性。

欧洲标准 EN14487-1 要求 $s < 0.45l_f$ 。根据比利时环境和基础部有关文件推荐，取 $s = 0.4l_f$ 即可保证钢纤维有足够的“重叠”。

据此可计算钢纤维的最小掺量：

$$w_{\min} = \frac{6165d_f^2 l_f}{s^3} \quad (16)$$

式中： $w_{\min}$ ——钢纤维最小掺量（kg/m³）；

s ——钢纤维平均间距（mm）。

新加坡地铁工程考虑到喷混凝土的工艺特点，参照按 $s = 0.4l_f$ 计算结果，并规定最小掺量不应小于 20kg/m³，见表 4。

表 4 新加坡地铁钢纤维的最小实际掺量要求

长径比	40	45	50	55	60	65	70	75	80
最小实际掺量 (kg/m ³)	65	50	40	35	30	25	20	20	20
最小实际体积率 (%)	0.83	0.64	0.51	0.45	0.38	0.32	0.25	0.25	0.25

注：该表的实际掺量以高强钢丝型钢纤维为例。

依据围岩级别而定的能量吸收值如本标准条文中表 12.2.2 所示，其值是参照挪威基于“围岩质量指标”制定的支护参数（图 6）提出的。

图中横坐标代表岩体质量 Q ，可认为是 3 个参数的综合反映，即块体尺寸（ RQD/J_b ）、块体间的抗剪强度（ J_r/J_a ）；岩体的作用应力（ J_w/SRF ）。其变化范围从 0.001~1000，相当于从严重破碎的糜棱化岩体到完整坚硬的岩体。

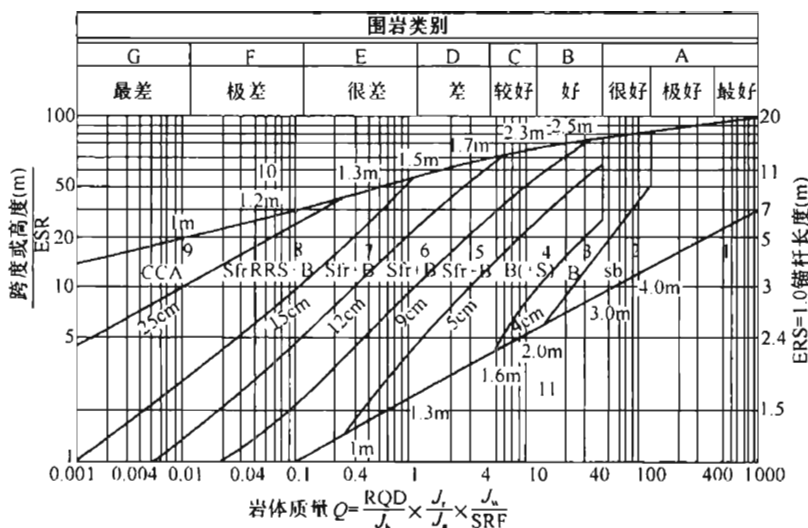


图6 支护参数与围岩质量的关系

- 1 不支护; 2 Sb. 局部锚杆; 3 B. 系统锚杆; 4-B(S). 系统锚杆 (及喷混凝土, 厚度 4cm~10cm); 5-Sfr+B. 钢纤维喷射混凝土及锚杆, 喷层厚度 5cm~9cm; 6-Sfr+B. 钢纤维喷射混凝土及锚杆, 喷层厚度 9cm~12cm; 7-Sfr+B. 钢纤维喷射混凝土及系统锚杆, 喷层厚度 12cm~15cm; 8-Sfr, RRS+B. 钢纤维喷射混凝土厚度 >15cm, 钢纤维喷射混凝土拱肋及锚杆; 9-CCA. 模筑混凝土衬砌; 10-湿喷混凝土区的锚杆间距; 11-不喷混凝土区的锚杆间距

图6中RQD代表岩石质量指标,是指在某一岩层中,用钻孔连续钻取的岩芯中,长度大于10cm的芯段长度 Σl_i 与该岩层中钻探总进尺L的比值,以百分数表示,或称岩芯采取率。岩石的质量指标RQD由 $RQD(\%) = \Sigma l_i / L \times 100\%$ 确定; J_h 反映岩体中节理组数的系数; J_r 反映节理面粗糙程度的系数; J_w 为节理的退化系数; J_s 为裂隙水折减系数;SRF为应力折减系数。

试验表明,对于增强韧性,使用钢纤维比非金属纤维有效。聚丙烯纤维一类非金属纤维由于其弹性模量相对较低($E=3\text{GPa} \sim 5\text{GPa}$),难以起到增强和增韧的作用,用于降低表面裂

缝效果较好。

对于变形量级较大的挤压型围岩或膨胀型围岩，往往需要多次施作喷射混凝土才能控制围岩变形。在这种情况下，喷层总厚度可能超过 20cm。

现行国家标准《工程岩体分级标准》GB/T 50218 将岩体完整性和岩石坚硬程度（用岩块单轴抗压强度来表示）作为评定围岩稳定性的两个主要因素。单层衬砌主要适用于其中的硬岩，即岩块单轴饱和抗压强度大于 30MPa，这主要是从围岩劣化风险以及保证喷层与岩面间的粘结强度不低于 0.5MPa 等耐久性因素考虑的。

当围岩岩体较为破碎时，应采用喷射钢纤维混凝土。单层衬砌中一般要设置锚杆或采用其他支护（如钢格栅、预加固锚杆等）措施使其基本稳定。为适应围岩的变形能力，要求能量吸收值 $G=800\text{J}\sim 1050\text{J}$ ，弯曲韧性比 $R_{c,150}\geq 55\%$ ；考虑回弹，以长径比为 65 的高强钢丝切断型钢纤维为例，设计掺量应为 $35\text{kg}/\text{m}^3\sim 40\text{kg}/\text{m}^3$ 。在这种情况下，从增强衬砌耐久性出发，可再增加一层掺入非金属纤维的喷射混凝土层。

12.2.5 目前无筋隧道及明洞的钢纤维混凝土衬砌等结构承载力计算方法符合现行行业标准《铁路隧道设计规范》TB 10003 的相关规定。裂缝及耐久性按正常使用极限状态验算，与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定一致。根据日本和美国的有关研究资料，钢筋钢纤维混凝土当水灰比满足一定限值时，其耐腐蚀性能优于钢筋混凝土，因而采用现行有关规范规定的钢筋混凝土构件裂缝宽度限值时，不会带来对适应性的不良影响。不过有的资料表明，无筋钢纤维混凝土带裂缝工作，当裂缝超过一定限度时，钢纤维腐蚀随时间推移而加重，构件承载能力逐渐有所下降。所以沿用有关规范关于构件裂缝宽度限值的规定，仅适用于钢筋钢纤维混凝土构件。无筋钢纤维混凝土结构在什么条件下可以带裂缝工作以及裂缝宽度的限值问题，还有待于进一步研究。

掺入钢纤维可提高钢筋混凝土构件的抗裂性、阻滞裂缝的开展,减小正常使用状态下的裂缝宽度,提高构件刚度。国内外学者曾提出不同的计算公式。为谨慎起见,应通过试验方法确定钢纤维对裂缝宽度的影响。

钢纤维混凝土构件性能试验表明,钢纤维对构件性能的影响在 λ_f ($\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$) 的一定范围内呈线性关系增长;当钢纤维含量特征值 λ_f 超过一定范围(例如, $\rho_f = 1.5\%$, $l_f / d_f = 80$, $\lambda_f = 1.2$)时,对构件性能的影响降低,故当 $\lambda_f > 1.2$ 时,宜取 $\lambda_f = 1.2$ 。当有可靠试验依据时,可不受这一条规定限制。

12.3 边坡支护工程

本节根据现有工程经验,对喷射钢纤维混凝土边坡支护工程的适用范围、支护类型方法、设计内容及要求进行了规定。

12.4 修补和加固工程

12.4.1、12.4.2 本条规定了结构加固的有关要求及常用的喷射钢纤维混凝土强度等级。

12.4.3 本条从提高加固结构的耐久性考虑,对加固修复面的最小厚度作出了规定。

12.4.4 本条从提高加固构件新老部分共同工作性能的角度,对新老材料结合面上应采取的措施作出了规定。

12.4.5 本条给出了轴心受压、偏心受压、受弯构件采用喷射混凝土加固的基本设计方法,并指出了在设计时应充分考虑卸荷加固的影响。

公式中考虑了加固截面二次应变滞后和新旧混凝土协同工作时加固用喷射混凝土和纵向钢筋的利用系数 α 。这一系数与加固时原构件的应力水平、受力特征(受压或受拉)等因素有关。因此,在结构构件加固时应尽量卸荷,以充分发挥加固材料的作用。在本条中,针对受力特征不同分别给出了不同的 α 系数值。

1 对轴心受压混凝土构件,本标准只规定利用系数 α 值为

0.8, 但当采用卸荷加固时, 可根据卸荷后的实际应力水平和可靠的试验数据适当提高取值。

按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的基本假定, 加固构件混凝土的应力应变关系见图 7。

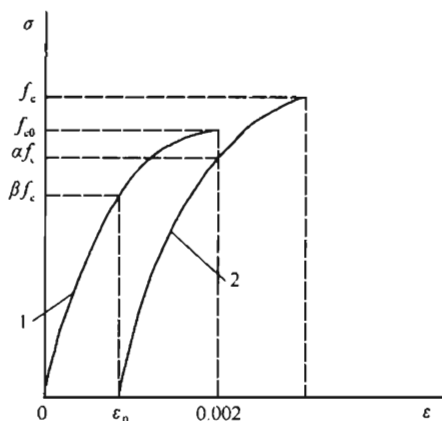


图 7 轴心受压构件混凝土的应力应变关系

1 原构件混凝土; 2—新增混凝土

图中 βf_c 值为原构件混凝土的应力水平值, 而 α 值为加固后旧混凝土达到极限应变 $\epsilon = 0.002$ 时, 新混凝土中的应力与其强度设计值 f_c 的比值, 称为利用系数。本标准中轴心受压构件的 α 是以 β 值为 0.75 (轴压比) 确定的。

从图 7 中可以看出, 利用系数 α 值 (受力钢筋与混凝土的利用系数相同) 随 β 值的增大而降低, 因此, 对二次受力的加固构件, 采用卸荷加固方法对新增混凝土 (与钢筋) 的有效利用有实际意义。

2 对于偏心受压构件, 受压区的新增混凝土和钢筋的强度利用系数 α 仍取 0.8, 而受拉钢筋的强度利用系数 α 可取 0.9。

3 受弯构件加固时一般都卸掉了活荷载, 故增大截面位于受压区时, 可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中叠合构件的有关规定进行计算。当在受拉区进行加固

时，考虑到了应力应变滞后，故新增受拉钢筋的抗拉强度设计值乘以折减系数 0.9。

4 本款规定了喷射钢纤维混凝土抗压强度和抗拉强度的取值。若允许受拉区钢纤维混凝土开裂，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 规定的正常使用极限状态允许的裂缝宽度限值。

12.4.6 本条给出的用喷射钢纤维混凝土夹板墙对砌体房屋进行抗震加固的计算方法引自现行行业标准《建筑抗震加固技术规程》JGJ 116。考虑到混凝土与砌体的弹性模量相差比较大，且板墙厚度不小于 $2\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，因此，喷射钢纤维混凝土强度等级选用不低于 FC30。试验表明，加固后墙体的增强系数与原墙体砌筑砂浆的强度等级有关，砂浆强度等级为 M2.5、M5.0 时，增强系数取 2.5；M7.5 时，取 2.0；M10 时，取 1.8。

附录 A 钢纤维混凝土工业地面设计计算

本附录所述计算方法是参照国外学者所建立的地坪塑性设计理论编制。在编制过程中，编制组根据本附录计算参数和设计方法进行了算例分析，并与现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 进行了对比。实例验证中采用的相同参数取值为：重要性系数取 1，荷载区域系数取 2，当量圆计算半径 85mm，地面板相对刚度半径 680mm，荷载内力计算值为 $22.55\text{kN} \cdot \text{m}$ 。板厚 h 为按照现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 计算得到，采用本标准计算方法进行钢纤维混凝土地面复核。对比结果如表 5 所示。

表 5 实例验算对比结果表

变形 模量 (kN/m^2)	混凝土 强度 等级	综合刚 度系数	f_i (N/mm^2)	S (N)	h (mm)	地面板 弯拉 应力 (N/mm^2)	f_{ik} (N/mm^2)	$f_{cik,1}$ (N/mm^2)	f_{k3k} (N/mm^2)
8	15	0.00119	0.91	60000	142	6.7	1.27	1.87	4.72
8	20	0.00103	1.10	60000	131	7.9	1.54	2.27	5.53
8	25	0.00094	1.27	60000	123	9.0	1.78	2.63	6.28
8	30	0.00089	1.43	60000	116	10.0	2.01	2.96	7.00
20	15	0.00209	0.91	60000	131	7.9	1.27	1.87	5.50
20	20	0.0018	1.1	60000	122	9.1	1.54	2.27	6.34
20	25	0.00164	1.27	60000	115	10.2	1.78	2.63	7.13
20	30	0.00156	1.43	60000	109	11.3	2.01	2.96	7.92
40	15	0.00334	0.91	60000	120	9.4	1.27	1.87	6.59
40	20	0.00289	1.1	60000	112	10.7	1.54	2.27	7.49
40	25	0.00263	1.27	60000	107	11.9	1.78	2.63	8.33
40	30	0.00249	1.43	60000	102	13.1	2.01	2.96	9.19

对比结果表明:

(1) 表中除板厚 142mm 以外, 其他算例中 f_{R3k} 均大于 5N/mm^2 。本标准第 10.2.7 条规定, f_{R3k} 应取 $1.0\text{N/mm}^2 \sim 5.0\text{N/mm}^2$, 按照本标准设计方法应增加板厚度 h , 即原设计板厚 h 不满足要求, 即在同样的设计条件下, 本标准的计算结果偏于安全。

(2) 地基条件越好, 混凝土强度等级越高, 差别越大。主要应是由于国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037-2013 公式 (C.3.1) 中 14.24 和 0.36 这两个系数的取值。

A.1 接缝荷载折减系数

地面接缝处受弯承载力计算需按照不同类型接缝考虑折减系数。

A.2 内力分析

A.2.1~A.2.3 钢纤维混凝土地面板的内力计算方法是依据屈服线理论提出的。由于该理论的计算公式复杂不易于人工计算, 本节选用的是经简化后的屈服线理论计算公式。

地面板在一条直线上 n 个点荷载作用下的 S_0 的取值方法可参照现行国家标准《建筑地面设计规范》GB 50037 的相关规定。当荷载作用于板边时, 情况较为复杂。当荷载数不小于 3 个并作用于同一直线上时, 可以分为几种组合相位来计算。以 3 个荷载作用为例, 其组合相位如图 8 所示。

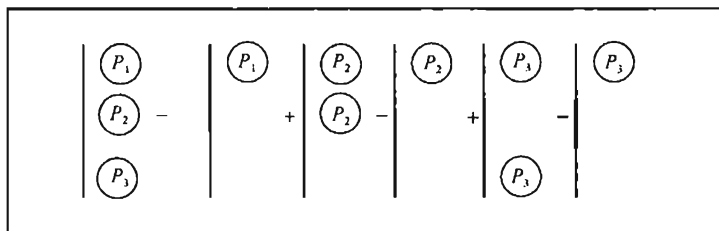


图 8 3 个荷载作用的组合相位

A.3 相对刚度半径计算

A.3.1、A.3.2 钢纤维混凝土垫层（或垫层兼面层）相对刚度半径的计算公式是依据屈服线设计理论给出的。按照屈服线设计理论和简化后的屈服线理论给出的刚度半径计算公式 $L = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k} \right]^{1/4}$ 和 $L = \left[\frac{Eh^3(1-\mu_s^2)}{6(1-\mu^2)E_s} \right]^{1/3}$ ，取钢纤维混凝土的泊松比为 0.15、地基的泊松比为 0.5，可以得到公式（A.3.1）的系数为 0.54，公式（A.3.2）的系数为 0.5。

对于回弹地基，地基土被认为是一种弹性支座，在某一点上的压力与同一点的沉降变形成正比，而邻近非受荷面积不受影响，可采用平板加载试验测定地基的反力系数 K 值用于设计。对弹性地基，地基土被认为是半无限延伸的各向同性均质弹性体，可采用地基土的变形模量 E_0 设计。具体分类采用的方法，应参照建筑地面设计、公路水泥混凝土路面设计及地基处理等相关规范执行。

A.4 板厚计算

A.4.1、A.4.2 本标准建议的钢纤维混凝土地面设计方法系依据地面设计屈服线理论提出的。在荷载不大的情况下，板底部开始出现辐射形径向裂缝，随着荷载不断增大，这些辐射形裂缝逐渐向外延伸，同时板底部中央逐渐形成环形裂缝；当荷载进一步增大，靠近板边缘的板面处逐渐形成环形裂缝，进而板底辐射形径向裂缝继续向外发展、板面环形裂缝向下发展，直至板底径向裂缝发展到板面环形裂缝处，此时，板中央产生较大沉降以致板底部环形裂缝已近裂通，板中央沉降大幅度增加，板已不能继续承载。这里，地面板的极限状态是指地面板的板面出现环向塑性铰。地面板中心受集中荷载作用时弯矩分布示意如图 9 所示。图中， M_r 为径向弯矩， M_t 为切向弯矩， M_{lu} 为塑性阶段钢纤维混凝土板所承受的弯矩。当荷载 $F < F_R$ 时，地面板处于开裂前的

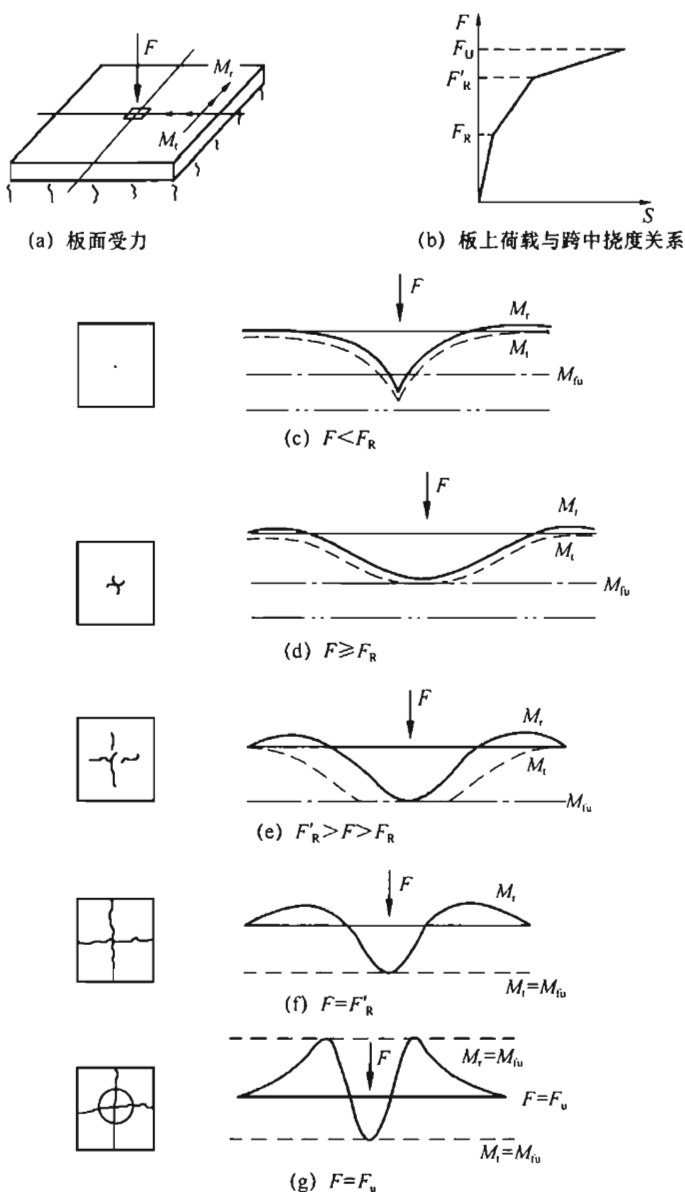


图9 钢纤维混凝土地面板中心受集中荷载作用时弯矩分布示意

弹性阶段，当荷载 $F_R < F < F'_R$ 大于 F_R 而小于 F'_R 时，地面板处于开裂阶段，此时钢纤维的作用突显，钢纤维增强的地坪在荷载作用形成塑性铰，其剩余强度与韧性相关，当 F 从 F'_R 达到极限强度 F_u 时，地面板处于屈服阶段。

国内外钢纤维混凝土地面板的试验研究表明：钢纤维混凝土地面的承载力较普通混凝土地面可提高 40%~80%。

附录 B 钢纤维混凝土残余弯拉强度测试方法

B.1~B.4 本附录的钢纤维混凝土残余弯拉强度测试方法参照欧洲标准 EN14651 - 2005 “Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)” 提出。

B.5 试验报告与评估

B.5.2 本条参照欧洲标准 EN14845 - 2 - 2006 “Test methods for fibres in concrete-Part 2: Effect on concrete” 提出。欧洲标准中，将考虑置信水平的统计平均值称为材料强度的特征值，我国标准中取概率分布的 0.05 分位值为材料强度的公称值，在本标准中，对按这两种方式规定的代表值统称为材料强度标准值。在钢纤维混凝土工业建筑地面的承载力极限状态设计中，钢纤维混凝土弯拉强度的标准值指的是按本附录试验方法和评估方法得到的材料强度的特征值。