第五章　钢筋钢纤维混凝土构件抗剪承载力计算

5-1　概　述

剪切破坏一般是指构件在剪力和弯矩（有时还包括轴力或扭矩）共同作用下沿斜裂缝发生的破坏，故又称斜截面破坏。

剪切破坏是以斜裂缝的发生和开展为特征的。斜裂缝的发展将构件割裂成为只有局部联系（压区混凝土和钢筋）的几个部分，从而使构件成为内部超静定体系，其各部分均在复杂受力状态下工作。

由于斜裂缝出现后平截面假定已不适用，难于建立内部变形协调关系，混凝土在复杂应力状态下的强度理论也不成熟。因此，尽管自50～60年代起，国内外学者对钢筋混凝土构件进行了大量的专题研究，但迄今，甚至普通钢筋混凝土构件也未能从定量上建立剪切破坏的力学关系，由解析法建立抗剪承载力的计算公式还相当困难。目前，斜截面抗剪计算的研究还处于定性的与宏观的阶段，解决抗剪承载力计算的主要途径是通过对大量实验进行分析，以探讨开裂特性、传力机构和破坏机理的规律，并采用数理统计方法建立剪切承载力的计算公式。

钢纤维混凝土与普通混凝土相比具有较高的抗拉强度、良好的韧性和抗裂性能，其中乱向分布的钢纤维可以起到类似腹筋的抗剪作用。试验表明，当钢纤维体积率为2.0%时，钢纤维混凝土的直接抗剪强度约可提高一倍。

钢筋钢纤维混凝土构件抗剪性能的研究始于70年代，从1972年Batson首次发表钢纤维混凝土梁抗剪强度的研究报告以来，钢纤维混凝土的优良抗剪性能引起了人们的广泛关注。近年来，我国学者对钢筋钢纤维混凝土构件的抗剪性能进行了全面、深入、系统的研究，取得了不少有深度的研究成果，成为编制我国《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》(CECS38：92)的理论基础。

本章在详细介绍上述研究成果的基础上，对我国《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》采用的钢筋钢纤维混凝构件斜截面抗剪承载能力的计算方法进行讨论。

5-2　无腹筋钢纤维混凝土简支梁抗剪承载能力

5-2-1　剪切破坏的类型与特点

一、钢纤维混凝土梁斜截面破坏特征

为探讨钢筋钢纤维混凝土构件剪切破坏的类型和机理，首先对集中荷载作用下无腹筋矩形截面简支梁，在不同剪跨比（$\lambda=a/h_0$）和不同钢纤维体积率（ρ_f）条件下的试验现象进行讨论。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

试验表明，由于钢纤维的阻裂增强作用，钢纤维混凝土具有较高的抗拉强度和良好的粘结锚固性能，从而提高了梁中混凝土的承拉和纵向钢筋的销栓作用，加之跨越斜裂缝钢纤维的直接承拉作用，钢纤维对斜裂缝发生、开展的控制作用十分明显、有效，与普通钢筋混凝土无腹筋梁相比，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的斜裂缝具有“晚、细、密”的特点，即裂缝出现时间晚、宽度小、间距密。斜裂缝宽度的减小，对于发挥斜裂缝处骨料咬合作用也是有利的。

试验表明，集中荷载作用下的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的斜截面破坏形态也与普通钢筋混凝土无腹筋梁一样，随着剪跨比的变化，表现出三种不同的形态：

1. 斜压破坏（$\lambda<1$）

当剪跨比较小时，钢筋钢纤维混凝土梁的破坏形态与普通钢筋混凝土梁的斜压破坏基本相同（图 5-1，a）。此时，由于梁上作用的正应力（σ_x）较小而剪应力（τ）很高，斜裂缝一般在梁腹中部首先出现，随着荷载增大，向下延伸至支座，向上扩展至加载板处。一组大致互相平行的斜裂缝将梁腹部分割成若干个倾斜的受压短柱，最后因短柱被压碎而破坏，实测的压碎区高度约为 $0.4h_0$ 左右。

2. 剪压破坏（$1\leqslant\lambda\leqslant3$）

这种破坏是钢筋钢纤维混凝土梁斜截面破坏的主要形态。在荷载作用下，当主拉应力超过钢纤维混凝土的抗拉强度时，在剪跨段的梁腹中出现垂直于主拉应力方向的斜裂缝。这种斜裂缝可能由垂直裂缝斜向延伸而成，也可能直接在梁腹中部产生并向支座和加载点两个方向延伸而成，根数不止一条。当荷载增加到某一数值时，在几根斜裂缝中会形成一根主要的斜裂缝，称为“临界斜裂缝”（图 5-1，b）。由于加载垫板下垂直压应力（σ_y）的阻止，临界斜裂缝上端稳定在加载垫板的下方，形成“拱的作用”。因此，临界斜裂缝形成之后，梁还能继续承受荷载。最后，剪压区的钢纤维混凝土在剪应力与压应力共同作用下达到复合应力时的极限强度而破坏，梁即失去承载能力。实测压碎区的高度约为 $0.3h_0$ 左右。

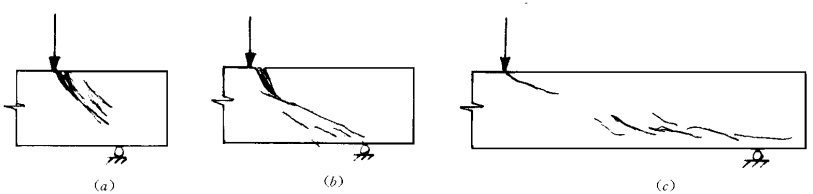


图 5-1　剪跨比对破坏形态的影响

(a) $\lambda=0.8$；(b) $\lambda=1.0$；(c) $\lambda=4.0$

3. 斜拉破坏（$\lambda>3$）

在剪跨比较大的钢筋钢纤维混凝土梁中，斜裂缝一旦出现，很快即形成临界斜裂缝，并迅速延伸到集中荷载作用点处，使梁斜向被拉断成两部分而破坏。破坏与临界斜裂缝的出现几乎同时发生，并在纵筋处产生沿纵筋的撕裂破坏或因纵筋锚固失效而发生纵筋滑移（图 5-1，c）。钢筋钢纤维混凝土梁的斜拉破坏同样具有明显的突然性，试验中甚至可以听到钢纤维被拔出所发生的声音。但与普通混筋混凝土梁相比要缓和得多，因为破坏过程中必须克服斜裂缝处钢纤维的阻裂与承拉作用的缘故。试验中还发现，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁发生斜拉破坏时也可产生一定深度的剪压压碎区，其高度约为 $0.2h_0$。

总的看来，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面的破坏形态与普通钢筋混凝土无腹筋梁相类似，都是在纵筋尚未屈服的条件下发生的，均属脆性破坏。从抗剪承载能力角度，斜拉破坏最低，斜压破坏最高。

二、影响抗剪承载能力的主要因素

影响梁抗剪承载能力的因素很多，彼此间还互有影响，有些因素还无法得出确切的定量关系，问题比较复杂。钢纤维的加入更增加了问题的复杂性，除通常的剪跨比、混凝土强度、纵筋配筋率等外，钢纤维体积率或钢纤维含量特征值，无疑是一个重要的影响因素。

下面分别讨论几个主要的影响因素。

1．钢纤维混凝土强度

梁的斜截面剪切破坏在很大程度上决定于斜裂缝出现的迟早和发展，这与混凝土的抗拉强度密切相关。钢纤维的加入可使普通混凝土的抗拉强度明显提高，必然对梁的抗剪承载力产生重要影响，因此，用抗拉强度而不用抗压强度来反映钢纤维混凝土强度的影响，应该是合适的。多数研究认为，加入钢纤维对普通混凝土的抗压强度不会产生明显影响，但因钢纤维的阻裂、承拉作用，能使斜截面的剪压区高度增大，因此，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪承载力也会随钢纤维混凝土抗压强度的提高而增大（图 5-2）。

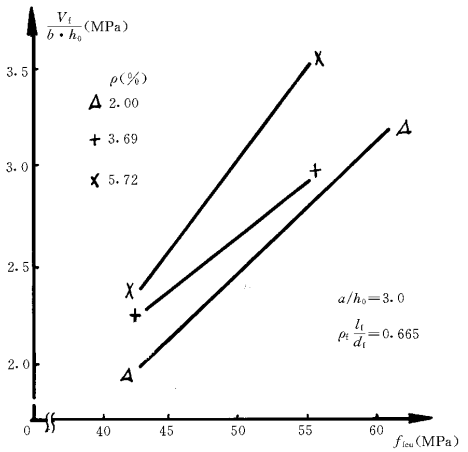


图 5-2　混凝土抗压强度的影响

2．剪跨比

剪跨比代表梁截面所承受的弯矩和剪力的相对大小，它反映了截面上正应力 σ_x 与剪应力 τ 之间的相对比值，是一个无量纲的计算参数，按下式确定

$$\lambda = \frac{M}{V \cdot h_0} \tag{5-1}$$

式中　λ——剪跨比；

M——梁中计算截面的弯矩；

V——梁中计算截面的剪力。

大量试验研究表明，剪跨比对斜裂缝的发生和发展状况、剪切破坏形态和破坏强度影响极大（图 5-3）。图中可见，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪承载能力随剪跨比的增大而减小，当 $\lambda=4$ 时，梁的抗剪承载力仅为 $\lambda=1$ 时的 20%左右，而且在 $\lambda=3$ 以后，剪跨比影响变小。

3．纵筋配筋率

与普通钢筋混凝土无腹筋梁一样，纵筋配筋率对钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪强度的影响体现在两个方面：①纵筋的销栓作用。钢纤维混凝土抗拉强度提高能使纵筋的销栓

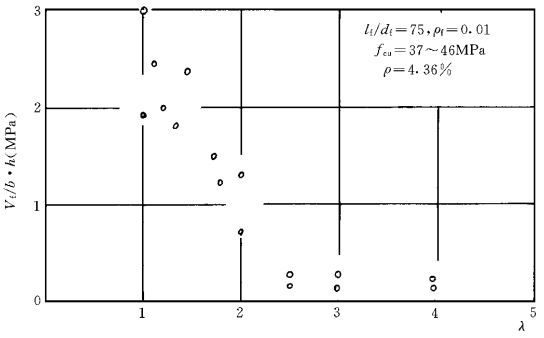


图 5-3　**剪跨比的影响**

作用发挥得更充分；②纵筋限制剪跨内的斜裂缝向受压区延伸并减小其宽度，可使剪压区面积增加，并使骨料咬合力提高。

4．**梁截面的有效高度**

国内外的研究均证明，梁截面的有效高度对普通钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪强度有一定影响，其抗剪承载能力随截面的有效高度的增加而减小。其原因是，截面高度较大时斜裂缝宽度较大，削弱了骨料的咬合作用，同时，撕裂破坏比较明显，销栓作用有所降低。为了消除这种尺寸效应的影响，在编制我国《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)时，曾采用折算系数 $(h_0/300)^{\frac{1}{4}}$ **将梁高小于** 300mm **试验梁的实测剪力值统一折算成标准梁高** ($h_0=$ 300mm) **的剪力值，再进行统计回归。**

如前所述，钢纤维对梁的斜裂缝有较好的控制作用，并能使纵筋的销栓作用得到加强，因而，可减轻尺寸效应对钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的影响。试验表明，钢纤维对尺寸效应的缓解作用随着钢纤维含量特征值 ($\lambda_f=\rho_f\cdot l_f/d_f$) **的增大而更加明显（图** 5-4)。**为了反映尺寸效应对梁高小于** 300mm **的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面抗剪承载**

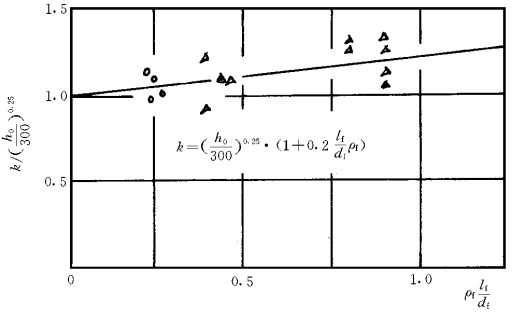


图 5-4　**钢纤维混凝土梁截面高度的折算系数**

力的这种影响作用，根据对试验资料的统计分析，建议采用如下的折算系数进行换算

$$k=\left(\frac{h_0}{300}\right)^{\frac{1}{4}}(1+0.2\lambda_f) \tag{5-2}$$

式中 k——折算系数，用以将梁高小于 300mm 的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪承载力实测值换算成标准梁高（$h=300\text{mm}$）的抗剪承载力

很明显，上式的适用范围应该是：

$$h \leqslant 300\text{mm}, k \leqslant 1.0$$

引入梁高的折算系数后，可以将不同梁高的抗剪强度试验数据进行统一的回归分析，纠正了截面尺寸较小的钢筋钢纤维混凝土梁抗剪承载力实测值提高程度不明显的错觉。

5. 钢纤维体积率或钢纤维含量特征值

试验表明，当钢纤维体积率不超过某一限值时（例如 $\rho_f \leqslant 0.025$），钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面抗剪承载能力随着钢纤维体积率或钢纤维含量特征值的增加而提高（图 5-5），两者关系接近于线性。

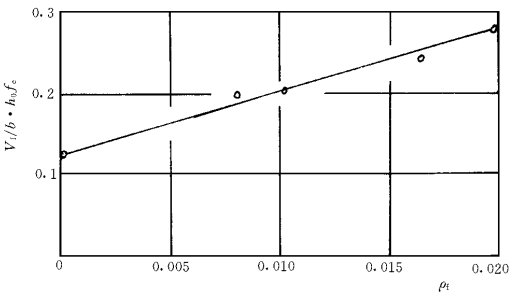


图 5-5 钢纤维体积率的影响

5-2-2 钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载能力

实际工程中，无腹筋梁是很少见的，因为斜截面剪切破坏具有明显的脆性，缺乏足够的安全保障，特别是斜拉破坏，往往当斜裂缝一出现就立即或很快发生破坏。尽管钢纤维的存在能够有效地控制斜裂缝的发生和开展，可靠和显著地提高无腹筋梁斜截面抗剪承载能力，但因施工（绑扎钢筋骨架）和提高可靠性（防止纵筋外鼓）等要求，钢筋钢纤维混凝土无腹梁也仅用于截面尺寸较小的梁。但是，为阐述钢筋钢纤维混凝土梁抗剪承载能力计算方法的建立过程，还得从无腹筋梁说起。

一、集中荷载下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁

在国内外文献中，目前提出的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面抗剪强度计算的回归公式可分为两类：

一是将钢纤维混凝土看作一种复合材料，以钢纤维混凝土的某种抗拉强度作为指标建立计算式。例如，按照钢纤维混凝土圆柱体劈拉强度（f'_{ft}）建立的公式

$$V/(bh_0) = k \cdot f'_{ft}/\lambda^{0.25} \quad (\text{磅/平方英吋}) \tag{5-3}$$

或者，按照钢纤维混凝土抗折强度（f_{ftm}）建立计算公式

$$V/(bh_0) = 0.517 + 0.283 f_{ftm} \quad (\text{MPa}) \tag{5-4}$$

二是将钢纤维作为混凝土的一种配筋，按迭加原理建立计算公式。即在普通钢筋混凝土无腹筋梁抗剪承载能力（V_c）基础上，叠加钢纤维的抗剪能力（V_f），例如

$$\frac{V}{b \cdot h_0} = \frac{0.4(2+100\rho)}{\lambda + 0.3} f_t + \frac{0.6 f_{ft}}{\lambda + 0.3} \tag{5-5}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

后者的物理概念明确，便于工程应用，为多数研究者所采用。本章通过对在编制我国《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》时提出过的一种钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载能力计算公式建立过程的讨论，予以说明。

1. 抗剪承载能力回归公式的建立

按叠加原理建立抗剪承载能力计算公式，就是将钢筋钢纤维混凝土无腹筋斜截面抗剪承载能力看成是普通钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪承载能力与钢纤维所能承担剪力之和，即

$$V_{fc} = V_c + V_f \tag{5-6}$$

式中 V_{fc}——钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪承载力；

V_c——普通钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪承载力；

V_f——钢纤维承担的剪力。

为使建立的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载能力计算公式与我国现行的《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)相应计算公式相衔接，即当钢纤维体积率 $\rho_f=0$ 时，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪承载能力计算公式能退化为普通钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪承载能力计算公式，式(5-6)中的 V_c 项应采用《混凝土结构设计规范》所采用的二项叠加形式：

$$V_c/(b \cdot h_0) = k_1 f_c + k_2 \rho \tag{5-7}$$

$$k_1 = 0.08/(\lambda - 0.3) \qquad 0.03 \leqslant k_1 \leqslant 0.1$$

$$k_2 = 98.1/\lambda$$

如果假设钢纤维承担的剪力与钢纤维含量特征值 $(\lambda_f=\rho_f \cdot l_f/d_f)$ 成正比，并且写成

$$V_f/(bh_0) = k_1 \beta \lambda_f \tag{5-8}$$

式中 β——与钢纤维和混凝土基体界面粘结强度等有关的参数；

V_f——钢纤维承担的剪力；

k_1——系数，为便于叠加，取值同式(5-7)。

根据钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的试验资料，经尺寸效应折算后，用公式(5-6)进行反算，可以得出 $\beta=22$MPa，由此可以写出

$$\frac{V_f}{b \cdot h_0} = \frac{1.76\lambda_f}{\lambda - 0.3} \tag{5-9}$$

公式(5-9)中，$V_f/(bh_0)$ 与剪跨比 λ 之间的关系如图(5-6)所示。

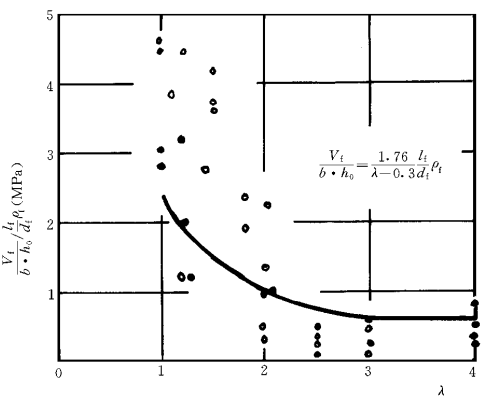


图 5-6 集中荷载作用下 $V_f/b \cdot h_0 \sim \lambda$ 关系

综上，可以写出集中荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面抗剪承载力的回归公式为

$$\frac{V_{fc}}{bh_0} = \frac{0.08 f_c}{\lambda - 0.3} + \frac{1.76\lambda_f}{\lambda - 0.3} + \frac{98.1\rho}{\lambda} \tag{5-10}$$

集中荷载下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力试验资料　　表 5-1

序号	作　者	钢　纤　维			λ	公式（5-10）的准确度			
		品　种	l_f/d_f	ρ_f		n	μ	σ	δ
1	本文作者	圆　直	75	0.005～0.020	1～4	35	1.022	0.012	0.118
2	Batson	圆　直	100	0.0044	4～4.2	4	1.135	0.039	0.034
3	Batson	剪切（波纹）	46	0.0044～0.0088	3.2～4.2	9	1.177	0.096	0.082
4	高丹盈	熔　抽	50	0.005～0.020	1～3	10	0.863	0.073	0.085
5	Ranjan·k·Weeraratue	刻痕（圆）	60	0.0075～0.015	1～5	19	1.042	0.121	0.116
6	Ranjan·k·Weeraratue	剪　切	53	0.0075～0.015	1.5～5	14	0.947	0.115	0.121
7	Swamy	波纹（圆）	100	0.008	4.5	1	1.096	—	—
按 92 根试验梁统计						92	1.019	0.136	0.133

表 5-1 列出了国内外文献中 92 根集中荷载下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁斜截面抗剪承载力试验资料的统计数据，并给出了不同试验得出的抗剪承载力试验值（V_f^0）（经尺寸效应折算后）与由公式（5-10）得到的计算值 V_{fc}^0 比值的平均值及其离散系数。从中可以看出，不同的钢纤维品种对梁承载力的增强效果是有区别的。但按现有的试验资料，建立考虑不同钢纤维品种的抗剪承载力计算公式还有困难。在不区别钢纤维品种条件下，对表 5-1 中 92 根试验梁的抗剪承载力进行统计分析，可以得出公式（5-10）的准确程度为 $n=92$，$\mu=1.09$，$\sigma=0.136$，$\delta=0.133$（图 5-7）。可见，在目前条件尚不具备情况下，不区分钢纤维品种，采用统一的抗剪承载力计算公式是可行的。

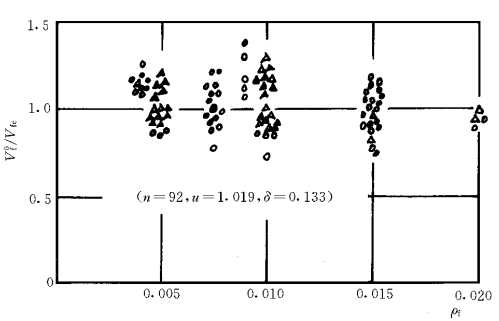


图 5-7　公式（5-10）的准确程度

2. 抗剪承载力偏下限

如前所述，剪切破坏的机理复杂，影响因素众多，目前采用的建立在大量试验基础上的回归公式，因受试验条件、材料性能、加载方法种种局限，离散程度相当大，而且，表达形式复杂，不便于工程应用。加之剪切破坏的过程具有明显的脆性性质，设计的可靠度水准要求较高，通常采用试验数据的偏下值作为建立设计公式的依据，以提高设计公式的可靠度水平，满足安全度的要求。

《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）正是根据抗剪承载力控制区的偏下限，建立抗剪承载力设计计算公式的。为使钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力设计计算公式具有相同的可靠度水准，也应根据钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力控制区的偏下限建立设计公式。

理论与试验均表明，剪切破坏仅在一定条件下才能发生。图 5-8 绘出了在某一特定剪跨

比条件下按回归公式计算的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁剪切破坏强度线，并同时绘出了以剪力形式表示的适筋梁和超筋梁的弯曲破坏强度线。剪切破坏强度线和弯曲破坏强度线的交点就是剪切承载能力控制区的两个端点，其纵座标分别是剪切承载力上下限的理论值。

既然剪切承载力的理论下限值可以由剪切破坏线和适筋梁弯曲破坏线的交点确定，故可用抗剪承载力计算公式和适筋梁抗弯承载力计算公式相等的条件求得。

为方便起见，将钢筋钢纤维混凝土梁抗弯承载力计算公式表示为

$$M_f = \alpha_f M \qquad (5\text{-}11)$$

式中 α_f——钢纤维对梁抗弯承载力的增大系数；

M——普通钢筋混凝土适筋梁的抗弯承载力。

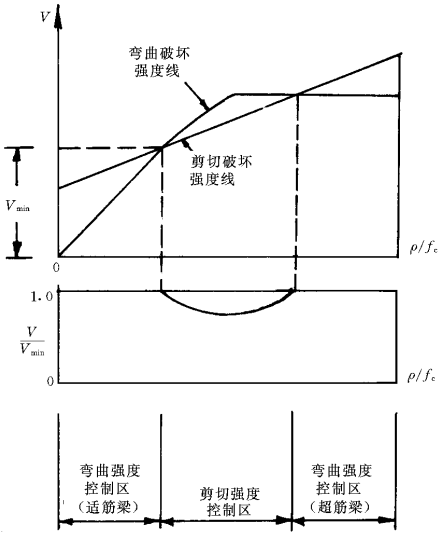


图 5-8 剪切承载能力控制区

考虑到剪切破坏一般只在纵筋配筋率较高的情况下发生，如发生弯曲破坏，弯矩最大截面的受压区高度应较大，为简化计算，可近似取内力臂 $z=\frac{7}{8}h_0$，则普通钢筋混凝土适筋梁的抗弯承载力为：

$$M = 0.875 A_s f_y h_0 \qquad (5\text{-}12)$$

将公式（5-12）代入式（5-11）中，并改用剪力形式表达，以工程中常用钢材强度设计值（$f_y=310\sim380\text{MPa}$）代入，经整理可得：

$$\frac{V_{fm}}{bh_0} = \frac{\alpha_f M}{a} \approx \frac{\alpha_f 300\rho}{\lambda} \qquad (5\text{-}13)$$

式中 V_{fm}——以剪力形式表达的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗弯强度；

ρ——纵筋配筋率；

为求出剪切强度理论下限值，令

$$\frac{V_{fc}}{f_c \cdot b \cdot h_0} = \frac{V_{fm}}{f_c \cdot b \cdot h_0}$$

由公式（5-10）、（5-13）得，

$$\frac{0.08}{\lambda - 0.3} + \frac{1.76}{\lambda - 0.3} \cdot \frac{l_f \rho_f}{d_f f_c} + \frac{98.1\rho}{\lambda f_c} = \frac{300\rho}{\lambda f_c}\alpha_f$$

整理得，

$$\frac{98.1\rho}{\lambda} = \left(\frac{1}{3.06\alpha_f - 1}\right)\left\{\frac{0.08}{\lambda - 0.3} f_c + \frac{1.76\,\frac{l_f}{d_f}\rho_f}{\lambda - 0.3}\right\} \qquad (5\text{-}14)$$

代回公式（5-10）得出：

$$\frac{V_{fc}}{bh_0}=\left(1+\frac{1}{3.06\alpha_f-1}\right)\left\{\frac{0.08}{\lambda-0.3}f_c+\frac{1.76}{\lambda-0.3}\cdot\frac{l_f\cdot\rho_f}{d_f}\right\}$$

近似取 $\alpha_f=1.2$，最后可写出集中荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载能力的偏下限公式为

$$\frac{V_{fc}}{bh_0}=\frac{0.11f_c}{\lambda-0.3}+\frac{2.41}{\lambda-0.3}\cdot\frac{l_f\rho_f}{d_f} \tag{5-15}$$

应该指出，由于梁的抗剪承载能力回归公式本身就有较大的离散性，抗弯承载力计算公式也有类似的性质，因此，上述通过强度相等条件求得的抗剪强度理论下限值公式，尽管形式上是一个定值，但实际上是代表一条基本上可以满足目标可靠指标要求的偏下的曲线，而不是全部剪切破坏试验结果的下包络线，故称之为抗剪承载力偏下限公式。

3. 抗剪承载能力设计公式

注意到连续梁支座截面作用有负弯矩，在剪跨段内有一个反弯点，随着斜裂缝的发展，剪跨段内应力分布与斜截面破坏形态和简支梁有较大的差别，抗剪承载力偏下限也比简支梁要低。我国的《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)，在统一取用计算剪跨比作为计算参数的前提下，集中荷载作用下简支梁和连续梁抗剪承载力设计计算公式，统一偏安全地采用如下的表达式：

$$V_c=\frac{0.2}{\lambda+1.5}f_cbh_0 \tag{5-16}$$

式中 λ——计算截面的计算剪跨比$\left(\lambda=\frac{a}{h_0}\right)$；当 $\lambda>3$ 时，取等于 3；当 $\lambda<1.4$ 时，取等于 1.4。

为使钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力设计公式与普通钢筋混凝土无腹筋梁相应公式的可靠度水准一致，其偏下限公式中的 V_c 项也应采用公式（5-16）的形式，同时，将 V_f 项予以相应地降低。

最后，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的设计公式，建议采用如下形式：

$$V_{fc}=\frac{0.2}{\lambda+1.5}f_cbh_0+\frac{1.7}{\lambda-0.3}\cdot\frac{l_f\cdot\rho_f}{d_f}bh_0 \tag{5-17}$$

当然，式（5-17）中计算截面的计算剪跨比$\left(\lambda=\frac{a}{h_0}\right)$也应符合

当 $\lambda>3$ 时，取 $\lambda=3$；

当 $\lambda<1.4$ 时，取 $\lambda=1.4$。

图 5-9 给出了表 5-1 中 92 根集中荷载作用下的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力实测值与按式（5-17）得出的抗剪承载力计算值之比值。可见，公式（5-17）的可靠度水准是恰当的。

二、均布荷载作用下的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁

均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪试验目前在国内外还很少见，我国空军工程学院采用八点集中荷载作为等代均布荷载进行的五根足尺钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁的抗剪试验（图 5-10），填补了这方面的空白。尽管试验数据较少，但可参照前述的集中荷载下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力设计公式的建立过程和原则，建立均布荷

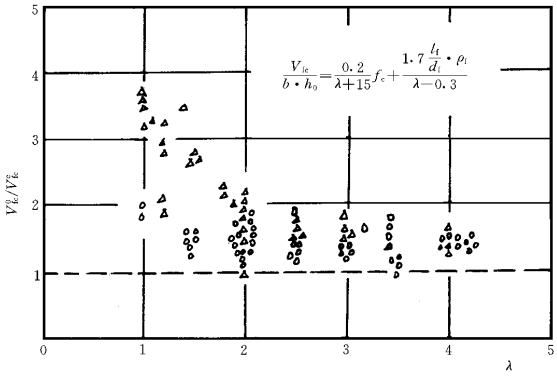


图 5-9　公式（5-17）的可靠程度

载作用下的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力设计公式。

与集中荷载作用相比，均布荷载作用下的简支梁具有不同的受力特点。集中荷载作用下的简支梁，在荷载作用处的截面，弯矩和剪力都达到最大值，该截面压区混凝土所受的正应力和剪应力也大，剪切破坏就发生在此截面。但在均布荷载作用时，支座截面的剪力最大而跨中截面的弯矩最大，不存在最大弯矩和最大剪力发生在同一截面的情况。因支座附近的弯矩很小，混凝土所受的正应力很小，在该处一般不会出现垂直裂缝，剪力由整个截面承担，混凝土微元体上的剪应力并不大，不会发生剪切破坏。因此，剪切破坏的位置不在剪力最大的支座截面处，往往出现在剪力和弯矩都较大的截面上，一般在离支座$l/4$跨度附近。当梁的跨高比（l/h）较小时，破坏位置更接近跨中，反之，则靠近支座。要准确确定剪切破坏位置比较困难。但因结构计算的目的主要是要避免发生剪切破坏，所以，可通过支座截面处最大剪力值在发生剪切破坏时的变化规律进行研究。

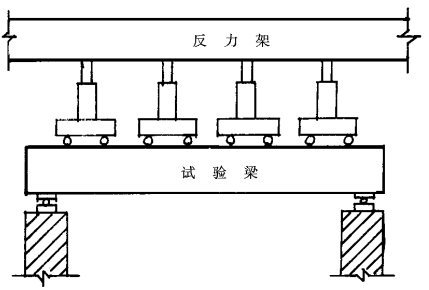


图 5-10　等代均布荷载试验装置示意图

分析表明，均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的影响因素与集中荷载作用时基本相同，仅需将剪跨比这个参数改为跨高比即可。试验与理论分析均可证明，跨高比和剪跨比之间存在着确定的内在联系。

1. 抗剪承载力回归公式

同样可按迭加原理建立均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的回归公式，即梁的抗剪承载力由混凝土承担项（V_c）和钢纤维承担项（V_f）组成。其中V_c项也采用普通钢筋混凝土无腹筋梁相应的回归公式：

$$\frac{V_c}{bh_0}=k_1 f_c+k_2\rho \tag{5-18}$$

式中

$$k_1 = \frac{1}{\frac{2l}{h_0} - 5}, \qquad \frac{7}{150} \leqslant k_1 \leqslant 0.2$$

$$k_2 = \frac{400}{\frac{l}{h_0}}, \qquad \frac{l}{h_0}$$ —— 跨高比

仿前，V_f 项的表达式可写成：

$$\frac{V_f}{b \cdot h_0} = k_1 \cdot \gamma \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \rho_f \tag{5-19}$$

式中 γ——与钢纤维和混凝土基体界面的粘结强度等因素有关的系数，据试验资料反算，得出 $\gamma = 27.3\text{MPa}$（图 5-11）

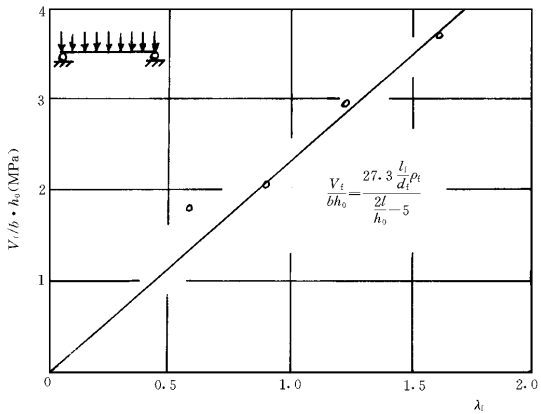


图 5-11　均布荷载作用下 $\frac{V_f}{b \cdot h_0} \sim \lambda_f$ 关系

最后，均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的回归公式为

$$\frac{V_{fc}}{b \cdot h_0} = k_1 \cdot \left(f_c + 27.3 \frac{l_f}{d_f} \cdot \rho_f \right) + \frac{400\rho}{\frac{l}{h_0}} \tag{5-20}$$

2. 抗剪承载力的偏下限

与前述相同，将均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋简支梁跨中正截面弯曲破坏和剪跨内剪切破坏同时发生时的支座剪力，作为它的抗剪承载力理论下限值。

均布荷载作用下简支梁的支座剪力与跨中弯矩之间有以下关系

$$V = q \cdot l/2 = \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot \frac{4}{l} = \frac{4M}{l}$$

式（5-13）曾经给出以荷载作用处剪力表达的，钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁在集中荷载作用下发生弯曲破坏时的极限强度值：

$$\frac{V_{fm}}{f_c b h_0} = \frac{300\rho}{\lambda f_c} \alpha_f$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

现改以支座剪力表达，并将上式中的剪跨比（λ）换成跨高比（l/h_0），则有

$$\frac{V_{fm}}{f_c \cdot b \cdot h_0} = \frac{1200}{\frac{l}{h_0}} \cdot \frac{\rho}{f_c} \cdot \alpha_f \tag{5-21}$$

命

$$\frac{V_{fm}}{f_c \cdot b \cdot h_0} = \frac{V_{fc}}{f_c \cdot b \cdot h_0}$$

由公式（5-20）、（5-21）可得：

$$\frac{1200}{\frac{l}{h_0}} \cdot \frac{\rho}{f_c} \cdot \alpha_f = k_1\left(1 + 2.73\,\frac{l_f \cdot \rho_f}{d_f \cdot f_c}\right) + \frac{400\rho}{\frac{l}{h_0} \cdot f_c}$$

整理后，得：

$$\frac{400\rho}{\frac{l}{h_0}} = \left(\frac{1}{3d_f - 1}\right)\left\{k_1\left(f_c + 27.3\,\frac{l_f}{d_f} \cdot \rho_f\right)\right\} \tag{5-22}$$

将上式代回公式（5-20），将 k_1 值代入，并近似取 $d_f = 1.2$，最后得均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的偏下限公式为

$$\frac{V_{fc}}{bh_0} = \frac{1.38}{\frac{2l}{h_0} - 5} f_c + \frac{37.7}{\frac{2l}{h_0} - 5}\,\frac{l_f}{d_f} \cdot \rho_f \tag{5-23}$$

3. 抗剪承载力的设计公式

我国现行的《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）采用的普通钢筋混凝土无腹筋梁均布荷载作用下的抗剪承载力设计公式也是一个具有一定保证率的偏下限公式，即在大剪跨（$l/h_0 \geqslant 12$）条件下的偏下限公式，表达式为

$$V_c = 0.07 f_c b h_0 \tag{5-24}$$

为使钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力设计公式与上述设计公式相衔接，将其偏下限公式中的 V_c 项改用公式（5-24）的形式，而 V_f 项也予相应地降低。

最后，均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力设计公式建议采用如下形式：

$$V_{fc} = 0.07 f_c b h_0 + 1.5\,\frac{l_f}{d_f} \rho_f b h_0 \tag{5-25}$$

4.《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》（CECS38：92）采用的设计公式

以上给出的集中荷载作用下和均布荷载作用下钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的设计公式，都是按照仅适用于工业与民用建筑范畴的《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）的有关原则建立的，并与该规范的相应公式相衔接。尽管该规范采用的设计理论是先进的，研究水平是深入的，但在工程应用上仍然有很大的局限性。为使所采用的钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的设计公式具有更广泛的适应性，《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》规定：矩形、T 形、工形截面钢筋钢纤维混凝土无腹筋受弯构件斜截面抗剪承载力设计值统一采用下式进行计算：

$$V_{fc} = V_{cu}(1 + \beta_v \lambda_f) \tag{5-26}$$

式中 V_{fc}——钢筋钢纤维混凝土无腹筋受弯构件斜截面抗剪承载能力设计值；

V_{cu}——根据钢纤维混凝土轴心抗压设计强度，按有关的现行混凝土结构设计规范规定计算的斜截面上混凝土承担的抗剪承载能力设计值；

β_v——钢纤维对斜截面上混凝土抗剪承载能力的影响系数，宜通过试验确定。当钢纤维混凝土的强度等级为 CF20～CF40 时，可取 $\beta_v = 0.9$；

λ_f——钢纤维含量特征值。

公式（5-26）的表达形式简单，物理概念清楚，适用性广泛，便于工程应用。式中的钢纤维对斜截面上混凝土抗剪承载能力的影响系数（β_v），经前述的偏下限设计公式（5-17）、（5-25）校准后，取值为 $\beta_v = 0.9$，故该式的可靠度整体水准，基本上可以满足脆性破坏的目标可靠度要求，是一个很好的设计公式简化表达形式。

公式（5-26）是在假定钢纤维对钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载能力（V_{fc}）的增加程度与钢纤维对混凝土抗拉强度的增加程度成正比，并近似认为钢纤维混凝土的抗拉强度仅与钢纤维含量特征值（λ_f）成正比的基础上建立的。即认为

$$f_{ft} = f_t(1 + \alpha_t \lambda_f) \tag{5-27}$$

由此，可以写出

$$V_{fc} = V_c K f_{ft}/f_t = KV_c(1 + \alpha_t \lambda_f) \tag{5-28}$$

式中 K——待定系数。

试验表明，K 为一个略小于 1 的常数，因此，当钢纤维体积率 $V_f = 0$ 时，式（5-28）不能彻底退化为普通钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪承载能力设计值（V_c）。为方便计，将上式调整为公式（5-26）的形式。

5-3 钢筋钢纤维混凝土有腹筋梁的抗剪承载能力

5-3-1 腹筋的作用

众所周知，在普通钢筋混凝土受弯构件中，腹筋（特别是箍筋）的作用是不可缺少的。它们可以将被斜裂缝分割的拱形混凝土块体牢固地连接在一起，并与纵向受拉钢筋共同组成拉杆拱体系，将剪力传递到支座上。

配置箍筋后，其受拉腹杆作用减轻了斜裂缝顶端混凝土负担的剪力值，限制了斜裂缝的开展，扩大了剪压区的面积，抑滞了沿纵筋方向粘结撕裂裂缝的发生，从而使骨料咬合力和纵筋销栓力有所增加，有效地提高了构件的抗剪承载能力。同时，箍筋、纵筋和架立筋形成一个刚性的空间骨架，除满足施工需要外，还可以将混凝土围箍住，有利于发挥混凝土的强度。总之，箍筋对受弯构件抗剪承载能力的影响是多方面的。

弯筋的作用与箍筋基本相似，它可以比拟为拉杆拱的受拉斜腹杆。

如前所述，钢纤维限制斜裂缝开展、提高构件的抗剪承载能力是有效的、可靠的。但作为一种分散配筋形式，还无法完全取代腹筋的上述作用，因此，除个别情况外，工程上通常采用有腹筋的配筋钢纤维混凝土构件。但是，钢纤维的存在，可以大量减少腹筋的配

置数量，或在腹筋数量不变条件下，提高构件的抗剪承载能力。这对于抗剪承载能力要求高而截面尺寸又受到限制的构件以及大量配置腹筋施工上有困难的构件其意义是明显的。

5-3-2　有腹筋梁抗剪承载力设计公式

容易理解，钢筋钢纤维混凝土有腹筋梁的抗剪承载力应由三部分组成，即

$$V = V_c + V_f + V_s$$

式中　V_c——混凝土所承受的剪力；

V_f——钢纤维所承受的剪力；

V_s——腹筋所承受的剪力。

由钢筋钢纤维混凝土构件受力破坏过程和剪力传递机制可知，上述三个组成部分之间应该具有某种相关关系，应在大量有腹筋梁抗剪试验数据回归分析的基础上，建立钢筋钢纤维混凝土有腹筋梁抗剪承载能力计算公式。但目前钢筋钢纤维混凝土有腹筋梁的抗剪试验资料还很少，直接建立回归公式还有困难。

为使钢筋钢纤维混凝土有腹筋梁抗剪承载能力设计公式与我国现行的有关混凝土结构设计规范中相应公式相衔接，在假定钢纤维与腹筋之间不存在组合效应的前提下，根据钢筋钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力的设计公式，可直接写出有腹筋钢筋钢纤维混凝土构件斜截面抗剪承载能力设计值的计算公式：

$$\begin{aligned} V_{fu} &= V_{fc} + V_s \\ &= V_{cu}(1 + \beta_v \lambda_f) + V_{su} \end{aligned} \tag{5-29}$$

式中　V_{su}——按现行有关混凝土结构设计规范计算的斜截面上腹筋（箍筋和弯筋）的抗剪承载能力设计值。例如，一般的工业与民用建筑构件其值可采用：

当仅配箍筋时，

$$V_{su} = V_{sv} = \alpha_{sv} f_y \frac{A_{sv}}{s \cdot h_0} \tag{5-30}$$

当同时配置箍筋和弯起钢筋时，

$$\begin{aligned} V_{su} &= V_{sv} + V_{sb} \\ &= \alpha_{sv} f_y \frac{A_{sv}}{s h_0} + 0.8 f_y A_{sb} \sin\alpha \end{aligned} \tag{5-31}$$

式中　V_{sv}、V_{sb}——分别为箍筋和弯筋的抗剪承载能力设计值；

α_{sv}——箍筋对抗剪强度的影响系数：对一般情况的配箍梁，$\alpha_{sv}=1.5$；对集中荷载下矩形截面独立梁，$\alpha_{sv}=1.25$；

f_y——箍筋和弯筋的抗拉强度设计值，当二者采用不同钢种时应查取不同的数值；

A_{sv}——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积，$A_{sv}=n \cdot A_{sv1}$；

n——在同一截面内箍筋的肢数；

s——箍筋的间距；

A_{sv1}——单肢箍筋的截面面积；

A_{sb}——配置在同一弯起平面内的弯起钢筋的截面面积；

α——弯起钢筋与梁纵轴的夹角，通常取 $\alpha=45°$；当梁截面高度较高时，可取 $\alpha=60°$；

0.8——应力分布不均匀系数，考虑到靠近剪压区的弯起钢筋在梁破坏时可能达不到屈服强度。

5-3-3 截面尺寸的限制条件及配箍构造要求

和普通钢筋混凝土梁一样，钢筋钢纤维混凝土梁斜截面抗剪承载能力计算公式，也是根据发生斜截面剪压破坏形态的受力情况建立的，所以也只能在一定的条件下才能适用。下面讨论的计算公式适用范围，即所谓计算公式的上下限值。

一、截面尺寸的限制条件（上限值）

当梁的截面尺寸较小或相对而言梁所承受的设计剪力值过大时，将有可能在梁的腹部产生过大的主压应力，导致发生沿斜截面的斜压破坏。在这种情况下，梁的抗剪承载能力基本上取决于混凝土的抗压强度和梁的截面尺寸，多配的腹筋将不能充分发挥作用，已不能依靠增加腹筋用量来提高斜截面抗剪强度。因此，应该规定有梁的截面尺寸限制条件。试验表明，这种限制除可避免产生斜压破坏外，同时也可作为防止在荷载使用阶段梁的斜裂缝开展过宽的条件。

毫无凝问，由于钢纤维提高抗剪承载能力和控制裂缝开展的作用，钢筋钢纤维混凝土构件的截面限制条件应该较普通钢筋混凝土构件有所放宽，但因目前已有的试验数据不多，《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》建议，钢筋钢纤维混凝土构件的截面限制条件仍按普通钢筋混凝土构件的相应限制条件采用。

二、箍筋的构造要求（下限值）

理论和实验均已证明，在出现斜裂缝之前，梁内主拉应力主要由混凝土承担，但当斜裂缝出现后，混凝土退出抗拉工作，斜裂缝处的主拉应力全部转移给箍筋承担，使箍筋应力突然增大。如果梁内箍筋配置过少，一旦斜裂缝出现，箍筋的应力会立即达到屈服，甚至被拉断，无法阻止斜裂缝的进一步发展，而导致发生斜拉破坏。只有在梁内配置的箍筋达到一定数量，且其间距又不过大时，方可保证斜裂缝一定能够与之相交，并可避免发生斜拉破坏。因此，应该规定配箍率的下限值，即所谓的最小配箍率。

根据钢筋钢纤维混凝土梁抗剪承载能力的设计公式（5-29）、（5-30）推算，钢纤维体积率 $\rho_f=0.01$ 的抗剪作用大致相当于配筋率 ρ_{sv} 约为 0.12%～0.24%的箍筋，参照《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）的有关规定，配筋钢纤维混凝土梁抗剪强度设计公式的下限值，建议采用

$$\rho_{sv}+0.12\rho_f \geqslant 0.02\frac{f_{fc}}{f_{yv}} \tag{5-32}$$

式中 $\rho_{sv}=\dfrac{n\cdot A_{sv1}}{b\cdot s}$ ——配箍率；

ρ_f——钢纤维体积率；

f_{fc}——钢纤维混凝土的抗压设计强度；

f_{yv}——箍筋的抗拉设计强度。

式（5-32）给出了按构造配箍时所需的最小箍筋用量。

参 考 文 献

[1] 国家标准.《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89），北京：中国建筑工业出版社，1989

[2] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土结构设计与构造（设计规范背景资料汇编），北京：中国建筑科学研究院，1985

[3] 章文纲，程铁生. 钢纤维钢筋混凝土梁抗剪性能的研究. 全国第三届纤维水泥与纤维混凝土学术会

议论文集（三）武汉，1990

[4] 高丹盈. 钢纤维混凝土及其配筋构件的研究（博士论文）. 大连：大连理工大学，1989

[5] Ranjan K Weeraratne. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams With Fibre Reinforcement，1986

[6] R. N. Swamy. The Effectiveness of Steel Fibres as Shear Reinforcement，ACI. Concrete International. Vol. 7，No. 3，1985

[7] 中国工程建设标准化协会标准.《钢纤维混凝土设计与施工规程》(CECS38：92). 北京：中国建筑工业出版社，1992

第六章　复杂应力下钢纤维混凝土的性能和计算方法

钢纤维混凝土中的钢纤维在基体中一般呈三维乱向分布，沿每个方向都有增强和增韧效果。这样采用钢纤维对混凝土结构复杂应力区增强是非常有利的。所谓复杂应力，一般有三个特点：一是应力的多向性，在复杂应力区各点的应力一般呈二维或三维状态，并且各点的主应力方向差异较大；二是应力的不均匀性，沿各个方向上应力变化梯度较大；三是应力的不确定性，在不同荷载组合作用下，各点的应力方向、大小也不相同。在这样的复杂应力区，采用钢筋增强有时比较困难，很难在各个方向按应力的变化来配置钢筋。而采用钢纤维混凝土却具有很大的优越性，不仅是因为它具有三维的增强效果，而且容易浇筑成型，比钢筋更能适应于各种复杂的结构形式。此外钢纤维限制混凝土裂缝的作用也是钢筋不能相比的。因此，钢纤维混凝土目前越来越多地被用于钢筋混凝土和预应力混凝土结构的复杂应力区。

目前关于复杂应力下采用钢纤维混凝土增强的有：1）受弯构件的抗剪；2）抗震框架节点；3）混凝土结构局部受压区；4）板的抗冲切；5）预应力混凝土轨枕。这些已列入《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》中。还有一些可能具有应用价值的复杂应力区采用钢纤维增强的问题正吸引着不少研究者的兴趣，例如：梁托和牛腿采用钢纤维进行抗剪增强，受扭和弯剪扭联合作用下钢纤维的增强作用，各种建筑物和构筑物孔口应力集中区采用钢纤维进行抗拉或抗剪增强等等，这些研究仍在进行，以求形成人们认可的设计计算方法。

实际工程中还有一种采用钢纤维增强的设计方法，即当采用钢筋混凝土和预应力混凝土结构时，在某些情况下由于作用效应的复杂性或计算理论的不完善，设计者无法准确地进行结构设计，而将钢纤维混凝土作为改善结构抗力的一种措施，用以保证所设计的结构的安全度。这种方法是容易被工程界所接受的，特别是有了工程实践经验以后，采用的会越来越多。我国业已修建的南京五台山体育场看台和沈阳新世纪购物中心大楼的悬挑结构就采用了钢纤维混凝土增强，经过一定时间的使用，证明具有良好的工程效果。

现在，对于核反应堆压力容器和安全壳、水工大体积混凝土等的设计已开始采用混凝土多轴强度理论，而在其他各种复杂应力条件下的设计仍采用各种构件试验得出的半经验半理论公式。钢纤维混凝土多轴强度理论在国内已开始研究，尽管目前的研究成果还未用于设计，但这种研究对揭示钢纤维的二维、三维增强规律和强度准则是很宝贵的，随着理论研究的深入进展，也必将对钢纤维混凝土的应用和设计理论起促进作用。

6-1　钢纤维混凝土三轴应力-应变关系和强度理论的研究

钢纤维混凝土三轴应力-应变关系和强度理论的研究还未见国际上文献报导，国内铁道

需要全本请访问 www.ertongbook.com