

文章编号:1673-2049(2011)02-0001-07

# FRP 抗剪加固钢筋混凝土梁研究综述

周朝阳, 谭磊, 程小念

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**对纤维增强复合材料(FRP)片材抗剪加固钢筋混凝土梁的研究现状进行了回顾和总结,归纳了 FRP 的抗剪加固方式,包括粘贴形式和锚固方法;将影响加固效果的主要因素概括为原梁条件和加固参数两大项,并讨论了若干分项因素的影响;探讨了加固梁的抗剪机理和破坏模式,列举了各国技术标准提供的和相关文献建议的多种抗剪承载力计算方法;指出了加强 FRP 片材端部锚固的重要性以及有待拓广和深入的应用基础研究方向,可为后续研究提供有益的参考。

**关键词:**FRP;抗剪加固;钢筋混凝土梁;加固方式;破坏模式;计算方法;综述

**中图分类号:**TU375.1

**文献标志码:**A

## Review of Research on Reinforced Concrete Beams Shear-strengthened with FRP

ZHOU Chao-yang, TAN Lei, CHENG Xiao-nian

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** The state-of-the-art research on reinforced concrete (RC) beams shear-strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) laminates was summarized and reviewed. The shear-strengthening way, including bonding configuration and anchorage method, was summed up. The main factors of affecting the shear behavior were generalized and classified respectively as beam parameters and strengthening ones. The shear mechanism and the failure modes of the strengthened beams were discussed. Meanwhile, several kinds of calculation methods to predict shear capacities from the technical specifications and relevant references at home and abroad were listed. Moreover, the importance of improving the anchorage of FRP laminates at ends and some key issues of research either widened and deepened as foundation of application were pointed out. It will provide a beneficial reference for future investigation.

**Key words:** fiber reinforced polymer; shear strengthening; reinforced concrete beam; strengthening way; failure mode; calculation method; review

## 0 引言

由于种种原因,大量房屋、桥梁等土木工程结构急需加固和修复。采用简便高效的加固方法显然具有巨大的经济价值和社会效益,因此,有关探索长期

为国际土木工程界所重视,其中,纤维增强复合材料(FRP)片材加固结构技术的发展最有代表性。1981年,瑞士工程师 Meier 采用 6.2 kg 的碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)板代替 175 kg 钢板,将其粘贴在一连续箱梁桥上进

收稿日期:2011-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50778176);湖南省自然科学基金重点项目(08JJ3105);湖南省自然科学基金重点项目(09JJ3098);湖南省科技计划重点项目(2010FJ2001)

作者简介:周朝阳(1963-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:joezycn@163.com。

行加固并获得成功,此后,FRP 加固法的技术优势逐渐为人们所认识。过去的十多年间,有关的研究开发和工程应用迅速在世界范围内“红火”起来。就混凝土结构加固来说,各国学者已对 FRP 片材加固梁、板、柱的方法及性能开展了研究,其中对梁而言,与抗弯加固相比,抗剪加固无论技术手段还是理论基础都较为薄弱,有待加大研究投入。为此,笔者对 FRP 抗剪加固混凝土梁的研究现状进行了回顾和总结。

## 1 抗剪加固方式

### 1.1 粘贴形式

FRP 中的纤维具有方向性,应用片材对钢筋混凝土梁进行抗剪加固时,通常使其纤维方向垂直于梁的纵轴,称为正贴。具体的粘贴形式不尽相同,见图 1。为了叙述方便,现予以归类,将有关提法约定如下:根据片材在梁横截面上的投影形状,抗剪加固形式可归纳为侧面粘贴[I 形箍,图 1(a)]、U 形粘贴[图 1(b)]和封闭粘贴[口形箍,图 1(c)]3 种,其中 U 形箍可用纤维布连续绕贴,也可采用成对的 L 形板材粘贴而成。从梁侧面看,上述各种形式的片材既可全面连续粘贴[满贴,图 1(c)],又可以条带形式间隔粘贴[图 1(a)、(b)]。为提高材料利用率, I 形条带可以斜贴,使之大致垂直于剪切裂缝。抗震加固时,考虑剪力的上下反复作用,可交叉斜贴 I 形条带成为 X 形,称为叉贴[图 1(d)]。

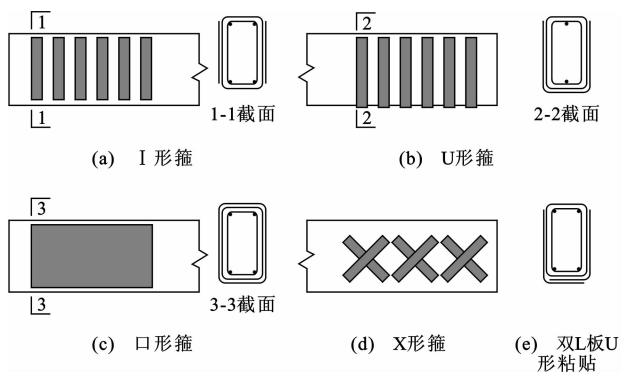


图 1 FRP 片材抗剪加固形式

Fig. 1 Configurations of FRP Laminates for Shear Strengthening

### 1.2 锚固方法

封闭粘贴虽能取得良好的抗剪加固效果,在工程中应用却很不方便。侧面粘贴和 U 形粘贴加固梁最常见的破坏模式是纤维布剥离破坏,其中纤维的强度利用率很低,加固效果不佳,如何增强 FRP 的端部锚固是 FRP 抗剪加固中亟待解决的问题。

在结构侧面粘贴纵向纤维压条是改善 U 形箍锚固效果最简单的措施,但这对提高结构的抗剪承载力几乎没有贡献<sup>[1-4]</sup>。《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)中给出了另外 3 种加强 FRP 片材端部锚固的构造方式,其中加锚封闭粘贴效果相对较好,但不够简便,且施工对上层楼面的正常使用有干扰;胶锚和钢板锚 U 形箍效果差些。姑且不论这些措施在常温状态下的锚固效果还不尽理想,由于不同程度地依赖粘胶锚固,当遭遇高温或火灾时,其中胶锚 U 形箍可能完全失效,另外 2 种措施还能发挥多大作用尚是疑问。笔者近年为柔性片状材料开发出一种轻巧紧凑的新型锚具——绕杆锚及其成套的高效锚固工具,可以解除结构加固用 FRP 片材对粘结的依赖性,有关研究正在积极推进之中,成果将陆续报道。

## 2 抗剪加固效果主要影响因素

影响 FRP 抗剪加固梁力学性能的因素很多,除了纤维种类、用量、角度、分布和构造方式等加固参数,还有原梁的各种条件,包括配箍率、混凝土强度、剪跨比、截面尺寸和形状、预加荷载水平以及支座条件等,故分两大类阐述如下。

### 2.1 原梁条件

梁本身的配箍率对 FRP 抗剪加固效果影响显著。FRP 能够较大幅度改善配箍率低的钢筋混凝土梁尤其是无腹筋梁的力学性能,但对配箍率较高的梁则承载力提高较少。当梁未配腹筋或配箍率很低时,混凝土很早就开裂并且裂缝发展速度较快,FRP 需较早投入工作,有助于发挥其强度,因而承载力提高幅度较大;若配箍率较高,箍筋还没有完全屈服时,梁可能由于混凝土剪压破坏等原因而发生破坏,FRP 的增强作用就不明显了<sup>[5-6]</sup>。

剪跨比对 FRP 抗剪加固效果也有较大的影响。当被加固梁剪跨比较小时,纤维应变发展缓慢,在试件达到极限承载力时,FRP 的应变仍然较小,加固效果不明显;当被加固梁剪跨比较大时,裂缝出现较早,纤维能更早地投入工作,极限状态时具有更大的应变,对抗剪承载力的贡献也就更加明显。另外,随着预加荷载的增大,被加固梁极限承载力提高的幅度降低。

混凝土强度对粘贴加固效果会有一定影响。当加固方案完全相同时,混凝土强度越高,FRP 粘着的混凝土表面越不易受剪剥落,FRP 的强度越能得以发挥,加固效果也就越好。

影响粘结能力的另一个因素是锚固长度,因而加固梁的截面尺寸将在一定范围内影响粘贴加固效果。当梁高较大时,FRP 具有较长的锚固长度,可以达到更高的应力,但当其粘结长度超过有效锚固长度后,继续增加梁高,加固效果不一定更好,反而可能有所降低<sup>[7]</sup>。

梁的支座条件和截面形状的影响也是不可忽视的,但既有研究关注不够。简支梁在剪力和正弯矩作用下,临界斜裂缝在梁下部开展较早、最宽,梁上部开展最晚、最窄,开口向上的正置 U 形箍端部位于上部的剪压区,兜住下部的剪拉区,对抑制斜裂缝可以更早、更好地发挥作用。而连续梁(包括框架梁、外伸梁、悬臂梁等)由于剪力和负弯矩作用,临界斜裂缝在梁上部开展较早、最宽,梁下部开展最晚、最窄,实际工程中正置 U 形箍端部在上,却锚在剪拉区,因为粘结长度不足,剥离破坏更容易发生。盛光复等<sup>[8-9]</sup>所做试验中的 13 根外伸加固梁(其中矩形梁 5 根,T 形梁 8 根)全部出现了失粘剥离破坏,其中 T 形梁比矩形梁更为不利。由于翼板的存在,U 形箍不能粘贴到梁顶面,在这种情况下,不但与斜裂缝相交的 U 形箍数量减少,其裂缝处纤维的平均应变(应力)也减小了。因此,纤维对斜截面抗剪承载力的贡献相对降低,用 U 形箍对连续梁(特别是 T 形梁)进行抗剪加固时必须考虑这一影响<sup>[10]</sup>。

## 2.2 加固参数

前已述及,加固方式是影响 FRP 抗剪加固效果的主要因素,按优劣排序依次为口形箍、U 形箍、I 形箍;当梁截面较高(如深梁)时侧面粘贴才可能取得较好效果,需要或条件许可时按优劣排序依次为叉贴、斜贴、正贴。

为了避免在条带之间形成斜向主裂缝,条带间距应设上限加以控制<sup>[11]</sup>。减小条带间距,增加条带宽度、厚度(或粘贴层数),可以增大 FRP 片材用量,从而更有效地限制斜裂缝的发展,延迟甚至阻止主裂缝的形成,提高剪切面骨料的咬合力,这对梁的抗剪加固当然有益无害。但在保持 FRP 片材用量相同的情况下,减小条带间距和增加宽度必须通过减小条带厚度才能实现。当条带厚度较小时,FRP 片材所需的锚固长度较短,极限状态下其有效应变较大,强度能得到较为充分的发挥。简言之,FRP 片材沿梁侧面分布均匀较为有利。

概括来说,以上各影响因素发生变化时,越有利于纤维发挥出高应力,加固效果越好。

值得注意的是:在无端部锚固的情况下,粘贴 U

形箍抗剪加固后的简支 T 形梁(翼缘位于受压区,U 形箍兜住剪拉区)破坏较突然,有可能使梁的加固效果出现负效应;对翼缘位于受拉区的 T 形梁,端部缺乏锚固的 U 形箍(兜住剪压区)对提高受剪承载力和变形能力几乎没有作用,延性甚至更差。因此,要用 U 形箍对 T 形梁(特别是常见的连续 T 形梁)进行抗剪加固,解决 U 形箍的端部锚固问题就显得异常重要。

## 3 抗剪机理与破坏模式

### 3.1 抗剪机理

钢筋混凝土梁的剪切破坏机理及抗力计算模式历来是一个复杂的问题,还需要进一步完善,用纤维布加固以后解决的难度自然更大。各国许多研究者在这方面进行了有益的探索,如 Triantafillou<sup>[12]</sup>、Khalifa 等<sup>[13]</sup>、Chaallal 等<sup>[14]</sup>、Bousselham 等<sup>[15]</sup>、吴刚等<sup>[16]</sup>、赵彤等、欧阳煜等、谭壮等<sup>[17]</sup>、任海东等<sup>[18]</sup>、李松辉等<sup>[19]</sup>、周英武等<sup>[20]</sup>。

要弄清剪切破坏机理,不能仅仅局限于宏观地了解抗剪加固效果,还必须准确把握纤维和钢箍的应变分布及其发展规律以及它们各自对抗剪的直接贡献等,但由于影响因素众多,使问题变得十分复杂,因此,现在对破坏机理的认识还不统一,解释还不透彻,表达还不完善,如 Pellegrino 等<sup>[21]</sup>发现:纤维配置相同时,钢箍配置越多,则破坏时纤维应变即抗力越小;钢箍配置相同时,纤维配置越多,则破坏时纤维应变越小,可推测破坏时钢箍应变即抗力越小(只有当临界斜裂缝所交钢箍全部屈服时才会持平)。这说明纤维和钢箍的用量对它们的抗剪贡献存在相互作用,并且对抗剪加固效率有很大影响,而各国规范尚未对此加以考虑。这方面的研究还远远不够,Pellegrino 等自认为他们在理论方面的简单尝试只是迈向更为合理和可靠的设计理论的第一步,试验研究的参数还很少。事实上,材料的性质决定了纤维剥离前应力持续上升,钢箍应力先升后平(剪切破坏时一般难到强化阶段),而混凝土裂损到一定程度后抗力下降,剪切破坏时各自的抗剪贡献取决于它们当时的变形状态,而这种变形又是相互制约、相互协调的,因此,上述相互作用的变化规律可能还与混凝土强度有关(特别是当剪压破坏起控制作用时)。关于竖向纤维布应变沿斜裂缝的分布规律是否均匀,也有不同的试验研究结论:多数观点认为是不均匀的(如曹双寅等<sup>[22]</sup>、谭壮等、滕锦光等),这也更容易被人接受;但 Deniaud 等<sup>[23]</sup>发表的试验结果

不仅与他人的相左,与他们自己先前的结论也不一致,对纤维应变均布的现象,他们在论文中并未予以解释,笔者估计可能与试验梁高度较大(达到 600 mm)有关。

### 3.2 破坏模式

FRP 加固钢筋混凝土梁受剪破坏模式大致可分为 FRP 剥离破坏、FRP 拉断的剪切破坏和 FRP 未拉断的剪切破坏 3 种类型。

#### 3.2.1 FRP 剥离破坏

几乎所有的侧面粘贴加固梁和绝大多数 U 形粘贴加固梁都发生 FRP 剥离破坏,其主要特征是纤维布完好,梁斜裂缝宽度小,而裂缝处的纤维布在锚固长度较短的地方发生剥离。其破坏过程表现为:随着荷载的增加,逐渐形成一条主斜裂缝,裂缝处的 FRP 应力最大,需要通过 FRP-混凝土界面裂缝附近的混凝土传递,当界面剪应力达到临界值时,毗邻粘结界面的混凝土中会出现一条平行侧面的裂缝,从主斜裂缝处迅速向纤维布端发展,锚固长度不足端的 FRP 就会被剥离。

#### 3.2.2 FRP 拉断的剪切破坏

绝大部分封闭粘贴加固梁和一些 U 形粘贴加固梁出现 FRP 拉断的剪切破坏,当梁的配纤率和配箍率都较低时,也容易发生 FRP 拉断的剪切破坏,该破坏通常由一条剪拉斜裂缝引发。在荷载作用下,首先从梁受拉面开始形成垂直的弯曲裂缝,随着荷载的增加,剪跨区的裂缝逐渐向加载点斜向延伸,荷载继续增加,斜裂缝不断加宽,其中一条将形成主斜裂缝并不断向加载点延伸,与主斜裂缝相交的 FRP 应变不断增加,最终达到极限拉应变而断裂,导致梁脆性破坏。大多数情况下,破坏前先发生部分 FRP 的剥离,但最终的破坏还是由 FRP 的断裂引起的。

#### 3.2.3 FRP 未拉断的剪切破坏

FRP 未拉断的剪切破坏表现为梁破坏时裂缝已经很宽,但纤维布还完好,既无断裂也无剥离。除了 FRP 没有拉断以外,此破坏模式的过程与上述 FRP 拉断的剪切破坏基本相同。

3 种破坏模式中,发生 FRP 拉断的剪切破坏时梁的极限承载力最大,该破坏模式为脆性破坏,FRP 拉断前会有部分 FRP 的剥离,但 FRP 的剥离并不影响梁的极限承载力;FRP 剥离破坏时梁的延性较差,一旦 FRP 开始剥落,梁很快就破坏;FRP 未拉断的剪切破坏以混凝土破坏为标志,此后 FRP 仍能承受较大荷载。

## 4 抗剪承载力计算方法

FRP 抗剪加固混凝土梁呈现出较为复杂的受力性能,抗剪承载力和破坏模式都受到众多因素的影响。与抗弯加固相比,关于 FRP 抗剪加固的研究还比较少,由于问题的复杂性及研究成果相对有限,提出一个实用可靠的设计模型还比较困难。尽管如此,已有一些强度模型初步形成。目前,已有的模型普遍认为,FRP 的作用机理与箍筋相似,加固后的抗剪承载力可以取混凝土、箍筋、FRP 三者提供的抗剪承载力之和<sup>[24-30]</sup>,即

$$V_u = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

式中: $V_u$  为加固后梁的抗剪承载力; $V_c$  为混凝土的抗剪承载力,包括受压混凝土对抗剪的贡献、骨料咬合作用以及纵筋的销栓作用; $V_s$  为箍筋和弯起钢筋的贡献; $V_f$  为 FRP 的贡献。

$V_c$  和  $V_s$  通常按照现行设计规范来计算。关于  $V_f$  的计算,很多研究文献和技术标准提供的公式虽然在表达形式上不尽相同,但从本质上看是一样的,可统一表示为

$$V_f = \phi_f A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f / s_f \quad (2)$$

式中: $\phi_f$  为相关折减系数; $A_f$  为双肢 FRP 条带的截面总面积, $A_f = 2nt_f w_f$ ,  $n$  为粘贴层数,  $t_f$  为单层 FRP 的厚度,  $w_f$  为 FRP 条带的宽度;  $\beta$  为 FRP 的粘贴角度;  $d_f$  为 FRP 的有效高度;  $s_f$  为 FRP 条带的间距;  $f_{fe}$  为 FRP 的有效应力,  $f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$ ,  $E_f$  为 FRP 的弹性模量,  $\epsilon_{fe}$  为 FRP 的有效应变。

计算  $V_f$  的关键在于确定 FRP 的有效应变  $\epsilon_{fe}$ , 不同出处的各种公式的主要差别也在于此。

### 4.1 技术标准提供的方法

#### 4.1.1 ACI-440 建议公式

对于包裹粘贴

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu}, \phi_f = 0.95 \quad (3)$$

对于 U 形粘贴和侧面粘贴

$$\epsilon_{fe} = k_v \epsilon_{fu} \leq 0.004, \phi_f = 0.85 \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{fu}$  为 FRP 极限拉应变;  $k_v = k_1 k_2 L_e / (11\ 900 \epsilon_{fu}) \leq 0.75$ ,  $L_e = 23\ 300 / (nt_f E_f)^{0.58}$ ,  $k_1 = (f'_c / 27)^{2/3}$ , 对于 U 形粘贴,  $k_2 = (d_f - L_e) / d_f$ ; 对于侧面粘贴,  $k_2 = (d_f - 2L_e) / d_f$ ,  $f'_c$  为混凝土圆柱体轴心抗压强度,  $L_e$  为有效粘结长度。各参数物理意义见图 2。

#### 4.1.2 欧洲设计规范建议公式

对于 CFRP 包裹粘贴

$$\epsilon_{fe} = 0.17 [f'_c / (E_f \rho_f)] \epsilon_{fu} \quad (5)$$

对于 CFRP 侧面粘贴或 U 形粘贴

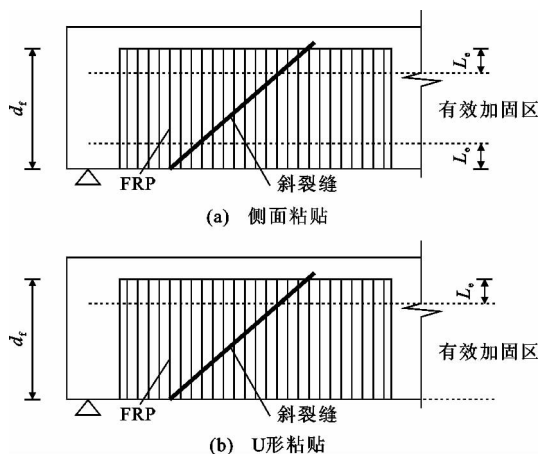


图2 FRP抗剪加固参数的物理意义

Fig. 2 Physical Meaning of FRP Parameters for Shear Strengthening

$$\epsilon_{fe} = \min\{0.65 [f_c^{2/3}/(1\,000E_f\rho_f)]^{0.56} \times 10^{-3}, 0.17 [f_c^{2/3}/(1\,000E_f\rho_f)]^{0.30} \epsilon_{fu}\} \quad (6)$$

对于 AFRP 包裹粘贴

$$\epsilon_{fe} = 0.048 [f_c^{2/3}/(1\,000E_f\rho_f)]^{0.47} \epsilon_{fu}, \psi_f = 0.9 \quad (7)$$

式中:  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度;  $\rho_f$  为 FRP 配纤率,  $\rho_f = 2t_f w_f / (b s_f)$ ,  $b$  为梁截面宽度。

#### 4.1.3 英国设计规范建议公式

对于 FRP 拉断破坏

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{fu} [0.5622 (\rho_f E_f)^2 - 1.2188 (\rho_f E_f) + 0.778] \quad (8)$$

对于 FRP 剥离破坏

$$\epsilon_{fe} = 0.0042 [(0.835 f_{cu})^{2/3} w_{fe}] / [(E_f t_f)^{0.58} d_f] \leq 0.004 \quad (9)$$

式中:  $f_{cu}$  为混凝土的立方体标准强度;  $w_{fe}$  为 FRP 的有效宽度, 对于侧面粘贴,  $w_{fe} = d_f - 2L_e$ , 对于 U 形粘贴,  $w_{fe} = d_f - L_e$ ,  $L_e = 461.3 / (E_f t_f)^{0.58}$ ;  $\psi_f = 1/r_{mf}$ , 对于 CFRP,  $r_{mf}$  取 1.4; 对于玻璃纤维布 (GFRP),  $r_{mf}$  取 3.5; 对于 AFRP,  $r_{mf}$  取 1.5。

#### 4.1.4 加拿大设计规范建议公式

对于 FRP 拉断破坏

$$\epsilon_{fe} = R \epsilon_{fu}, R = 0.8 \lambda_1 [f_c^{2/3} / (E_f \rho_f)]^{\lambda_2} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为参数;  $R$  为 FRP 的有效应力 (或应变) 与抗拉强度 (或极限应变) 之比; 对于 CFRP,  $\lambda_1 = 1.35$ ,  $\lambda_2 = 0.30$ ,  $\psi_f$  取 0.7~0.8; 对于 GFRP 和 AFRP,  $\lambda_1 = 1.23$ ,  $\lambda_2 = 0.47$ ,  $\psi_f$  取值未明确规定, 但不应大于 0.6。

对于 FRP 剥离破坏

$$\epsilon_{fe} = 0.8 \varphi_f k_1 k_2 L_e / 9525 \quad (11)$$

式中:  $\varphi_f$  为 FRP 材料分项系数, 对于 CFRP,  $\varphi_f$  可取

为 0.7~0.78, 对于 GFRP,  $\varphi_f$  应不大于 0.6;  $L_e = 25\,350 / (t_f E_f)^{0.58}$ ,  $k_1 = (f_c' / 27.65)^{2/3}$ ,  $k_2$  的定义同 ACI-440 公式。

#### 4.1.5 日本设计规范建议公式

日本设计规范建议公式

$$f_{fe} = K f_{fu}, \psi_f = 1/1.25 \quad (12)$$

式中:  $f_{fu}$  为 FRP 的极限拉应力;  $K$  为系数,  $K = 1.68 - 0.67R$ ,  $R = (\rho_f E_f)^{1/4} (f_{fu} / E_f)^{2/3} (1/f_c')^{1/3}$ ,  $0.5 \leq R \leq 2.0$ 。

#### 4.1.6 意大利设计规范建议公式

对于 U 形粘贴和包裹粘贴

$$V_f = 0.9(1/\gamma_{Rd}) A_f f_{fe} (\cot \theta + \cot \beta) d / s_f \quad (13)$$

对于侧面粘贴

$$V_f = (1/\gamma_{Rd}) A_f f_{fe} (\sin \beta / \sin \theta) \cdot \min\{0.9d, h_w\} / s_f \quad (14)$$

式中:  $\gamma_{Rd}$  为安全系数, 取 1.20;  $\theta$  为斜裂缝角度;  $h_w$  为 T 形梁腹板高度; 其他参数取值见文献[29]。

#### 4.1.7 中国规程建议公式

《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003) 建议的公式如下

$$V_f = \psi_f A_f E_f \epsilon_{fe} d_f / s_f \quad (15)$$

$$\epsilon_{fe} = 2(0.2 + 0.12\lambda) \epsilon_{fu} / 3 \quad (16)$$

式中: 对于满贴,  $\psi_f$  取 1.0, 对于 U 形粘贴,  $\psi_f$  取 0.85, 对于侧面粘贴,  $\psi_f$  取 0.7;  $\lambda$  为剪跨比,  $\lambda > 3$  时, 取  $\lambda = 3$ ,  $\lambda < 1.5$  时, 取  $\lambda = 1.5$ 。

#### 4.2 文献建议的方法

各国不少学者给出了 FRP 的抗剪贡献  $V_f$  的计算公式, 各举 1 例如下。

(1) 文献[2]中的公式

$$V_f = 2 f_{fe} t_f w_f h_{fe} (\cot \theta + \cot \beta) \sin \beta / s_f \quad (17)$$

$$f_{fe} = D_f \sigma_{fmax} \quad (18)$$

式中:  $\sigma_{fmax}$  为与剪切裂缝相交的 FRP 可达到的最大应力;  $D_f$  为应力分布系数;  $h_{fe}$  为 FRP 的有效高度。

对于由 FRP 拉断控制的剪切破坏,  $\sigma_{fmax} = f_{fu}$ ,  $D_f = (1 + \zeta) / 2$ ,  $\zeta = z_t / z_b$ ,  $z_t$  为 FRP 有效高度的上端坐标,  $z_b$  为有效高度的下端坐标。

对于由 FRP 剥离控制的剪切破坏,  $\sigma_{fmax} = \min\{f_{fu}, 0.427 \beta_w \beta_L (E_f \sqrt{f_c'} / t_f)^{1/2}\}$ , 其中,  $\beta_w$  为 FRP 条带宽度系数,  $\beta_L$  为粘结长度系数。

令  $\xi = L_{max} / L_e$ ,  $L_{max}$  为最大粘结长度,  $L_e = (E_f t_f / \sqrt{f_c'})^{1/2}$ , 对于 U 形粘贴,  $L_{max} = h_{fe} / \sin \beta$ , 对于侧面粘贴,  $L_{max} = h_{fe} / (2 \sin \beta)$ , 按文献[2]中计算公式取值。当  $\xi \leq 1$  时,  $D_f = \frac{2}{\pi \xi} \frac{1 - \cos(\pi \xi / 2)}{\sin(\pi \xi / 2)}$ ,  $\beta_L =$

$\sin(\pi\xi/2)$ , 当  $\xi > 1$  时,  $D_f = 1 - \frac{\pi-2}{\pi\xi}$ ,  $\beta_L = 1$ ; 当间隔

粘贴时,  $\beta_w = \sqrt{\frac{2-w_f/(s_f \sin \beta)}{1+w_f/(s_f \sin \beta)}}$ , 当连续满贴时,

$\beta_w = \sqrt{2}/2$ 。

(2) 文献[30]中的公式

$$V_f = K_f \tau w_f h_{fe}^2 (\sin \beta + \cos \beta) / s_f \quad (19)$$

式中:  $K_f$  为系数,  $K_f = \varphi \sin \beta / (\sin \beta + 0.3 h_{fe} f_t / \sqrt{E_f t_f})$ ,  $\varphi$  为受剪加固形式系数, 对于侧面粘贴,  $\varphi$  取 1.0, 对于 U 形粘贴,  $\varphi$  取 1.3;  $\tau$  为界面剪应力,  $\tau = 1.2 \beta_w f_t$ ,  $\beta_w = [(2.25 - w_f/s_f) / (1.25 + w_f/s_f)]^{1/2}$ 。

## 5 结 语

从各国目前的研究情况来看, FRP 抗剪加固方法还有许多地方需要改进, 如何实现 FRP 的有效锚固、解决剥离和不耐火的难题、提高纤维强度利用率, 应该作为 FRP 抗剪加固研究的当务之急。另外, 现阶段对 FRP 抗剪加固混凝土梁的受力性能研究还不够深入, 对破坏机理的认识还不统一, 解释还不透彻, 表达还不完善, 且现有的试验研究绝大多数是关于简支梁的, 而实际中量大面广的连续梁与简支梁在受力特点和剪切破坏形式上有显著区别, 现有计算公式对连续梁是否适宜, 还需要进一步探讨。此外, FRP 抗剪加固混凝土梁的疲劳性能及二次受力等问题也值得深入研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 贺拴海, 任伟, 赵小星. 碳纤维布对具有初应力的钢筋混凝土梁抗剪加固试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 34-39.  
HE Shuan-hai, REN Wei, ZHAO Xiao-xing. Experiments of Shear Capacity of RC Beam Bridges Rehabilitated with CFRP Under Loading Case [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 34-39.
- [2] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [3] 邓宗才, 张建军, 杜修力. 纤维布抗剪加固混凝土梁的研究与发展[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 31-34, 41.  
DENG Zong-cai, ZHANG Jian-jun, DU Xiu-li. Research and Development of Shear in Concrete Beams

Strengthened with Fiber Reinforced Plastic[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 31-34, 41.

- [4] ISLAM M R, MANSUR M A, MAALEJ M. Shear Strengthening of RC Deep Beams Using Externally Bonded FRP Systems[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3): 413-420.
- [5] 赵彤, 谢剑, 戴自强. 碳纤维布提高钢筋混凝土梁受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 21-25.  
ZHAO Tong, XIE Jian, DAI Zi-qiang. Experimental Study on Shear Strength of RC Beams Strengthened with Continuous CFS [J]. Building Structure, 2000, 30(7): 21-25.
- [6] 欧阳煜, 黄奕辉, 钱在兹. 玻璃纤维片材加固混凝土梁的抗剪试验研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 46-49.  
OUYANG Yu, HUANG Yi-hui, QIAN Zai-zi. Experimental Investigation and Analysis of Shear Behavior of RC Beam Strengthened with GFRP Sheet [J]. Building Structure, 2002, 32(10): 46-49.
- [7] 孙海霞, 任海东, 黄承逵, 等. 纤维材料抗剪加固钢筋混凝土梁的影响因素与试验结果分析[J]. 混凝土, 2004(6): 40-43.  
SUN Hai-xia, REN Hai-dong, HUANG Cheng-kui, et al. Analysis of the Influence Factors and Experiment Results on RC Beams Strengthened with FRP in Shear[J]. Concrete, 2004(6): 40-43.
- [8] 盛光复, 赵艳红, 张佳超, 等. GFRP 与 CFRP 加固 T 形截面 RC 外伸梁抗剪强度之比较[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(6): 65-68.  
SHENG Guang-fu, ZHAO Yan-hong, ZHANG Jia-chao, et al. Comparison of Shear Strength of Cantilever T Beams Strengthened with GFRP and CFRP [J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(6): 65-68.
- [9] 任迎春, 盛光复. 碳纤维加固混凝土外伸梁斜截面破坏形态浅析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2004, 19(1): 17-20.  
REN Ying-chun, SHENG Guang-fu. Analysis on Failure Characteristics of Cantilever Beams Strengthened with CFRP in Negative Moment Area[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2004, 19(1): 17-20.
- [10] SCHUMAN P M, KARBHARI V M. Issues Related to Shear Strengthening HSAMPE [C]//SAMPE. Proceedings of the 48th International SAMPE Symposium and Exhibition. Long Beach: SAMPE, 2003: 2464-2478.
- [11] 孙哲, 任海东, 黄承逵. 玻璃纤维片材用于加固钢筋混凝土梁抗剪试验研究[J]. 混凝土, 2006(2): 45-46, 56.

- SUN Zhe, REN Hai-dong, HUANG Cheng-kui. Experimental Study on Shear Strengthening of RC Beams with GFRP Sheets[J]. Concrete, 2006(2): 45-46, 56.
- [12] TRIANTAFILLOU T C. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-bonded FRP Composites[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(2): 107-115.
- [13] KHALIFA A, NANNI A. Improving Shear Capacity of Existing RC T-section Beams Using CFRP Composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(3): 165-174.
- [14] CHAALLAL O, SHAHAWY M, HASSAN M. Performance of Reinforced Concrete T-girders Strengthened in Shear with Carbon Fiber-reinforced Polymer Fabric[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(3): 335-343.
- [15] BOUSSELHAM A, CHAALLAL O. Behavior of Reinforced Concrete T-beams Strengthened in Shear with Carbon Fiber-reinforced Polymer—an Experimental Study[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(3): 339-347.
- [16] 吴刚, 安琳, 吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗剪加固的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 16-20, 51.
- WU Gang, AN Lin, LU Zhi-tao. Experimental Investigation and Analysis on the Shear Strengthening for RC Beams Bonded with CFS[J]. Building Structure, 2000, 30(7): 16-20, 51.
- [17] 谭壮, 叶列平. 纤维复合材料布加固混凝土梁受剪性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 12-18.
- TAN Zhuang, YE Lie-ping. Experimental Research on Shear Capacity of RC Beam Strengthened with Externally Bonded FRP Sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 12-18.
- [18] 任海东, 黄承逵, 赵国藩, 等. 玻璃纤维布加固二次受力钢筋混凝土梁抗剪试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(3): 425-430.
- REN Hai-dong, HUANG Cheng-kui, ZHAO Guo-fan, et al. Experimental Research on Shear Strengthening of Preloaded RC Beams with Externally Bonded GFRP Sheets[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(3): 425-430.
- [19] 李松辉, 赵国藩, 王松根. CFRP加固钢筋混凝土梁受剪承载能力实用计算方法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 75-80.
- LI Song-hui, ZHAO Guo-fan, WANG Song-gen. Shear Design Methodology for RC Beams Strengthened in Shear with CFRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 75-80.
- [20] 周英武, 王苏岩. FRP加固钢筋混凝土梁抗剪计算公式的对比分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(3): 22-28.
- ZHOU Ying-wu, WANG Su-yan. Analysis of Calculations of Shear Strengthening of RC Beams with Externally Bonded FRP[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(3): 22-28.
- [21] PELLEGRINO C, MODENA C. Fiber-reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study and Analytical Modeling[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(5): 720-728.
- [22] 曹双寅, 滕锦光, 陈建飞, 等. 外贴纤维加固梁斜截面纤维应变分布的试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 6-11.
- CAO Shuang-yin, TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, et al. Experimental Study on Strain Distribution in Externally Bonded FRP for Shear Strengthening of RC Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 6-11.
- [23] DENIAUD C, CHENG J J R. Reinforced Concrete T-beams Strengthened in Shear with Fiber Reinforced Polymer Sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(4): 302-310.
- [24] ACI 440. 2R-02, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures[S].
- [25] Fib Bulletin 2001, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures[S].
- [26] TR 55, Design Guidance for Strengthening Concrete Structure Using Fiber Composite Materials[S].
- [27] Design Manual No. 4, Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-bonded Fiber Reinforced Polymers[S].
- [28] JSCE No. 41, Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets[S].
- [29] CNR-DT 200/2004, Instruction for Design, Execution and Control of Strengthening Intervention by Means of Fiber-reinforced Composites[S].
- [30] 陆新征, 叶列平, 陈建飞, 等. 混凝土梁外贴FRP抗剪加固承载力计算[J]. 建筑结构, 2006, 36(9): 31-36.
- LU Xin-zheng, YE Lie-ping, CHEN Jian-fei, et al. Debonding Failure Strength in RC Beams Strengthened with FRP for Shear[J]. Building Structure, 2006, 36(9): 31-36.