

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.002

# 小剪跨比作用下 CFRP 抗剪加固梁的尺寸效应

黄泽峰<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>

(1. 深圳大学 土木工程学院, 广东 深圳 518000; 2. 深圳市国腾建筑设计咨询有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**研究了几何比例相同的大、小两种不同尺寸的外贴 U 形碳纤维增强复合条带材料(CFRP)抗剪加固钢筋混凝土梁在小剪跨比作用下的尺寸效应规律。研究表明, U 形加固梁最终抗剪承载力的提高率与试验梁的尺寸有关, 小尺寸梁优于大尺寸梁。同时, 外贴 U 形 CFRP 条带的理论剪贡献值与实际剪贡献值存在差异, 小尺寸梁的理论剪贡献值要小于实际剪贡献值, 大尺寸梁则是相反的。另外, CFRP 条带的剪力值随加载水平的提高而增加, 大尺寸的增长速度要快于小尺寸的, 且在任一相同加载水平下, 大尺寸加固梁的 CFRP 条带剪力值高于小尺寸梁的。

**关键词:**FRP; 抗剪加固; 尺寸效应; 剪跨比

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0006-07

## Effect of beam size on behavior of RC deep beams strengthened in shear with U-wrapping CFRP strips

Huang Zefeng<sup>1</sup>, Li Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, P. R. China;

2. Shenzhen Guoteng Architectural Design Co. Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** Size effect of reinforced concrete(RC) beams strengthened in shear with U-wrapping carbon fiber-reinforced polymer was investigated by designing two types of similar geometry beams, named large and small beam. The results indicated that the shear contribution of CFRP strips is associated with beam size. CFRP shear contribution of small beam is superior to large beam. Besides, in small beam, calculative CFRP shear contribution is smaller than actual CFRP shear contribution, while in larger beam is opposite. The shear value of CFRP strips increase with the loading level increasing, and the increasing speed in large beam is faster than small beam. At the same loading level, CFRP shear value of large beam is higher than small beam.

**Key words:** FRP; shear strengthening; size effect; shear span-to-depth ratio

纤维增强复合材料(FRP)以其优异的力学性能和简单的施工操作被广泛用于加固和增强劣化混凝土结构<sup>[1]</sup>。外贴 FRP 抗剪加固的粘贴形式主要有 3 种, 包括侧面粘贴、U 形粘贴和全包裹粘贴。不同的粘贴方式 CFRP 的破坏模式和加固效果也不尽相同, 侧面粘贴和 U 形粘贴多发生剥离破坏而全包裹粘贴多为拉断破坏<sup>[2, 3]</sup>且以全包裹加固效果最佳, U

形粘贴次之。然而受施工现场条件的限制, 外贴 CFRP 抗剪加固多采用 U 形粘贴形式, 这也是本文选用 U 形加固方式的一个原因。抗剪加固钢筋混凝土试验梁是目前的一个研究热点和难点, 抗剪加固机理受众多因素影响会变得很复杂。尽管如此, 外贴 CFRP 抗剪加固钢筋混凝土梁的相关研究仍取得许多成果, 其中也包括关于不同因素影响作用的

试验研究成果, 比如剪跨比<sup>[4-7]</sup>、配布率<sup>[8, 9]</sup>、加固方式<sup>[10, 11]</sup>、布与箍筋的相互作用<sup>[12-14]</sup>、布的宽度和间距<sup>[15, 16]</sup>等等。

钢筋混凝土梁尺寸效应的存在已被证实<sup>[17-21]</sup>, 同样地, 尺寸效应对 FRP 加固钢筋混凝土梁的效果也备受关注<sup>[22-26]</sup>。然而现有 85% 试验研究数据都集中于高度小于 450 mm 的中、小尺寸梁上<sup>[26]</sup>。而实际加固工程中, 钢筋混凝土梁往往是高度大于 450 mm 的大尺寸试件。另外, FRP 加固钢筋混凝土梁的尺寸效应研究大多数基于较大剪跨比, 主要为剪压和斜拉破坏模式, 对于由小剪跨比主导下的斜压破坏模式的尺寸效应的研究比较匮乏, 然而, 小剪跨比作用下的构件大量存在于高层建筑、海洋结构和基础结构<sup>[27]</sup>。因此, 在小剪跨比作用下, 开展外贴 CFRP 抗剪加固钢筋混凝土梁的尺寸效应的试验研究就显得尤为必要。

通过设计 4 根几何相似的钢筋混凝土梁, 包括 2 根带锚固压条的 U 形 CFRP 条带加固梁, 和 2 根不加固的参照梁, 探究由小剪跨比主导下斜压破坏模式, 外贴 CFRP 抗剪加固钢筋混凝土梁的尺寸效应对 FRP 抗剪贡献的影响。

## 1 实验设计

### 1.1 试件设计

为了研究小剪跨比作用下尺寸效应对 CFRP 条带加固钢筋混凝土的抗剪机理和效果的影响规律,

本文按照几何相似原理设计了两种不同截面尺寸的试件: 100 mm×240 mm、200 mm×480 mm, 高宽比均为 2.4, 如图 1 所示。为在三点弯曲试验中实现斜压破坏, 加载时的设计剪跨比为 1.0 (由于加载点和支座加有刚度很大的垫块使得实际剪跨比分别为 0.71)。为了论述方便, 在下面的试验分析中, 仍然采用设计剪跨比进行论述。所有的试验梁分为两组, 每组 2 根, 其中一组为带锚固压条的 U 形 CFRP 加固梁 (简称 U 形加固梁), 另一组为不做加固的普通梁 (简称参照梁)。各试件命名方式如下: 参照梁用 C 表示, 加固梁用 U 表示; 两种尺寸分别 MB、SB 对应表示大、小尺寸试验梁; 采用数字 1 表示加载时的设计剪跨比为 1.0, 试件的各项参数详见表 1。

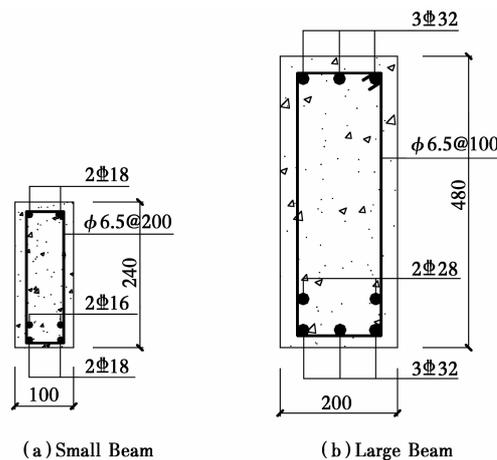


图 1 试验梁截面信息

表 1 试件基本信息

编号	剪跨比	有效高度/mm	剪跨段/mm	加固区/mm	非加固区/mm	钢筋		CFRP 条带		
						加固区箍筋配置	非加固区箍筋配置	厚度/mm	宽度/mm	间距/mm
SB1C	1.0	210	210	150	390	A6.5@200	C10@80			
SB1U	1.0	210	210	150	390	A6.5@200	C10@80	0.167	30	60
MB1C	1.0	420	420	300	580	A6.5@100	C12@75			
MB1U	1.0	420	420	300	580	A6.5@100	C12@75	0.334	60	120

### 1.2 材料属性

所有试验梁均是由当地混凝土供应商提供的商品混凝土浇筑而成, 同时制备了足够数量的标准立方体试块, 并与试验梁同条件养护。试验梁按截面尺寸不同分两批浇筑而成, 实测大、小尺寸梁的混凝土立方体强度平均值分别为 29.5 MPa 和 23.5 MPa。纵向受力钢筋采用 HRB400 级钢筋。试验梁

沿轴线方向分为加固区和非加固区两大部分, 如图 2 所示。加固区为试验研究区, 采用 FRP 条带加固, 配置较弱的箍筋 (表 1)。非加固区非试验研究区, 不进行 FRP 加固处理, 配置较强的箍筋 (表 1), 目的是为了保证剪切破坏发生在加固区 (即使采用 FRP 抗剪加固)。

加固试验梁所用 CFRP 条带是由一整卷的单向

碳纤维复合布料裁剪而成,由拉伸试验实测 CFRP 条带抗拉强度平均值为 3 500 MPa,弹性模量 270 GPa,断裂伸长率 1.4%。所用结构胶为南京海拓复合材料有限责任公司生产的 Lical100 型粘结剂。为了消除其它因素的影响,试件除了满足梁截面尺寸变化符合几何相似原理外,同时还保证所有梁加固段的配箍率、CFRP 条带的配置率以及受拉纵筋的配筋率均一致。

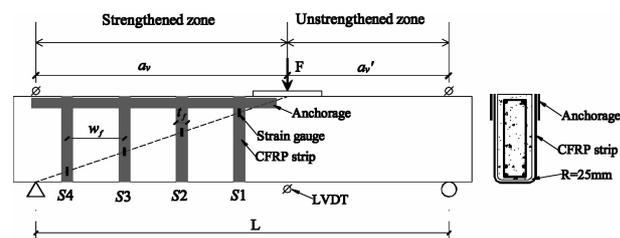


图 2 加固形式、加载方式及应变片分布

### 1.3 试验加载及加载设备

所有试验梁均采用三点加载方式(图 2)。试验加载时,加固段的剪跨比根据破坏模式设计为 1.0,为了减少试验梁的长度,对非加固段进行缩减(表 1)。三个线性差动位移计(LVDT)分别放置在加载点下方和支座上方,用于测量试验梁在加载过程中的挠度变化。箍筋和 CFRP 布上均粘贴应变片以便采集所在位置的应变。整个试验过程中通过东华采集仪采集并储存试验每一加载步的实验数据,采样频率为 1 Hz。所有试验梁的加载方式均采用荷载控制,加载速度大致为 0.6 kN/s。

## 2 实验结果及分析

试验结果显示,所有试验梁均发生斜压破坏。所有 U 形加固实验梁上的 CFRP 条带均发生完全剥离或者部分剥离破坏。加固梁的抗剪承载力均比参照梁有不同程度的提高。

基于试验梁的破坏试验、试验中观察到的现象以及得到的试验数据,下面几个小节分别从破坏模式、加载点挠度以及 CFRP 条带的剪贡献等方面来研究斜压破坏模式下,CFRP 抗剪加固钢筋混凝土梁的尺寸效应规律。

### 2.1 破坏模式

所有试验梁的最终破坏形态如图 3 所示。由于受拉纵筋采用了超筋布置,所有试验梁,裂缝均以剪跨区腹剪裂缝最先出现,然后向加载点、支撑点两端发展。所有试验梁,在梁剪跨段内出现腹剪斜裂缝后,随之形成一个或几个斜柱体,最终以斜柱体混

土被压碎而达到极限承载力;裂缝角度平均值大约为 45°。这说明试验梁的破坏形态不因梁高度的尺寸变化而有实质性的变化,这与 Godat 等<sup>[23]</sup>得到的结论是一致的。所有 CFRP 条带均以发生部分剥离或完全剥离的形式出现,这也是 U 形粘贴加固方式常见的破坏形态。

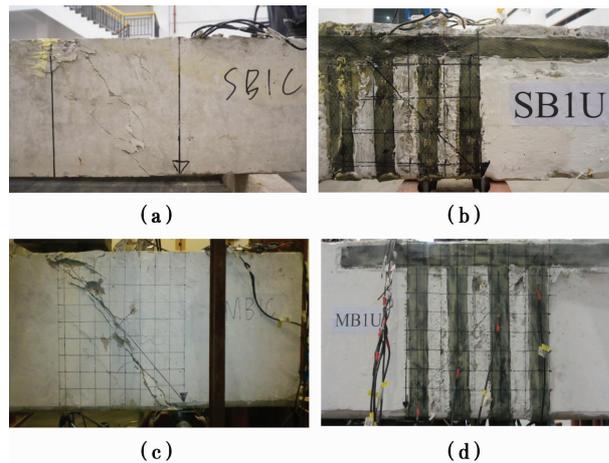


图 3 试验梁破坏形态

### 2.2 加载点挠度

试验梁的荷载-加载点挠度曲线如图 4 所示,可见外贴 CFRP 抗剪加固实验梁的荷载-加载点挠度曲线在加载的前期与其相应的参照梁的发展情况是基本相同的,在混凝土未开裂之前,CFRP 布条并没有完全开始发挥作用。同参照梁相比,不管加固梁的尺寸如何,极限承载力其在加载点处的挠度值几乎没有变化。在破坏荷载作用下,加固梁的加载点挠度与相应的参照梁相比,SB1U、MB1U 的加载点挠度仅相差 0.4 mm、0.1 mm。详见表 2,这与 Leung 等<sup>[24]</sup>中不同尺寸的 U 形 CFRP 条带加固梁的试验结果一致。与之不同的是本文采用的是带锚固压条的 U 形加固形式,由此可见,外贴 CFRP 抗剪加固钢筋混凝土梁并不会影响其极限荷载下的加载点挠度。

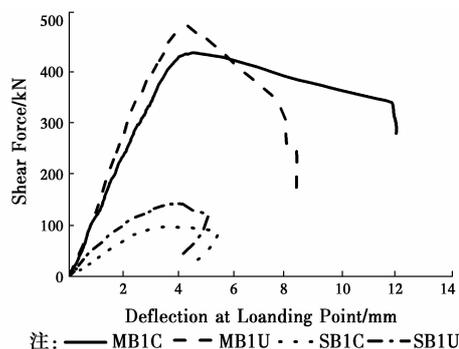


图 4 剪力-加载点挠度曲线

### 2.3 FRP 抗剪贡献 $V_f$

表 2 列出了试验梁的极限荷载、抗剪承载力以及 FRP 条带的抗剪贡献等。在目前的加固设计理论中, FRP 加固梁抗剪计算模型是基于简单的叠加方法, 将 FRP 条带视作外包的箍筋<sup>[12]</sup>, 整个 FRP 加固梁的抗剪承载力等于混凝土抗剪力(包含纵筋的销栓作用、粗骨料的咬合作用) $V_c$ 、箍筋抗剪力  $V_s$  以及 FRP 抗剪贡献  $V_f$  三者之和, 即

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

而在实验研究中, FRP 条带的剪贡献则可以通过用加固梁的抗剪承载力减去对照梁的抗剪承载力而求得

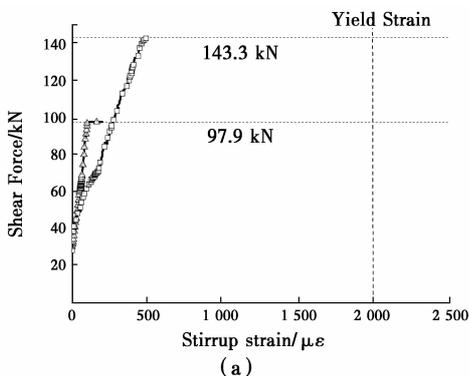
$$V_f = V_{\text{strengthened}} - V_{\text{control}} \quad (2)$$

实验结果表明, 斜压破坏模式下 FRP 加固梁受尺寸效应影响, 抗剪承载力的提高幅度各异。加固梁 SB1U、MB1U 的抗剪承载力分别提高 46.4%、12.0%, 加固效果随尺寸的增加而下降。主要原因

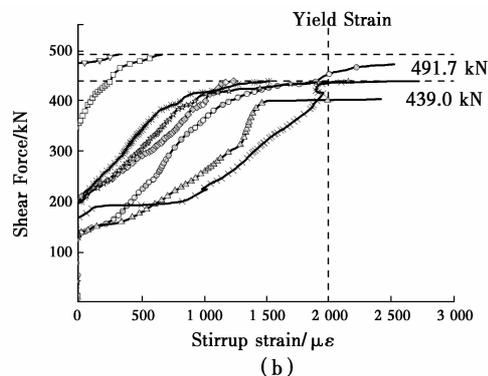
可以从以下四个方面考虑, 一是混凝土中的骨料咬合力, 二是混凝土的断裂能, 这两者与试验梁裂缝宽度相关, 裂缝宽度又直接受到试验梁尺寸的影响, 随着梁尺寸不断增大, 裂缝宽度会不断变大, 试验梁的骨料咬合力会减小以致消失, 所消耗的断裂能会增大, 整个试验梁的抗剪承载力会随之下降。三是箍筋的约束作用, 混凝土里的箍筋既约束裂缝的发展, 同时还起到抗剪的作用, 可以提高混凝土梁的抗剪承载力。但由于尺寸越大, 裂缝宽度越大, 导致较大尺寸试验梁的箍筋更早进入屈服状态, 同时失去对裂缝的有效约束, 因此箍筋在极限状态时对试件抗剪承载力的贡献也就随之减少, 详见图 5。四是 FRP 加固中存在有效粘结长度, 在有效粘结长度范围内, FRP 发挥的作用随粘贴长度的增加而增加, 但超过有效粘结长度后, 粘结强度将不再发生变化, 试验梁高度的增加并不能无限制地提高 FRP 条带在抗剪承载力中发挥的作用。

表 2 试验结果汇总

编号	极限荷载/kN	剪力/kN	实际抗剪贡献/kN	理论抗剪贡献/kN	差值/kN	提高率/%	挠度/mm
SB1C	150.6	97.9					3.69
SB1U	220.5	143.3	45.4	22.4	-23.0	46.4	4.04
MB1C	756.9	439.0					4.69
MB1U	847.8	491.7	52.7	57.8	+5.1	12.0	4.75



注: — SB1U, ST1 — SB1C, ST1



注: — MB1U, ST1 — MB1U, ST2 — MB1U, ST3  
— MB1U, ST4 — MB1C, ST1 — MB1C, ST2  
— MB1C, ST3 — MB1C, ST4

图 5 箍筋应变图

### 3 FRP 抗剪贡献的进一步讨论

公式(2)所得到的 FRP 抗剪贡献实际上是基于一个简单的假定: 混凝土和箍筋的抗剪承载力在加固梁和对照梁中均保持不变。而实际上, 并不能真实的反映 FRP 在整个过程中实际分担的剪力。现

有研究表明, 由于 FRP 布条与箍筋之间存在着相互作用, 在整个加载过程中彼此会相互影响各自对抗剪承载力的贡献。Chen 等<sup>[12]</sup>的研究认为, 这一假设只有在混凝土抗剪力  $V_c$ 、箍筋抗剪力  $V_s$  以及 FRP 抗剪贡献  $V_f$  三者达到期望的峰值时才成立, 实

实际上,FRP 条带剥离时箍筋可能并没有达到屈服强度或者小于计算模型的预测值,同时,其研究还指出箍筋和 FRP 布条的相互作用会受到主裂缝的形状、梁高、FRP 轴向刚度和钢筋的类型、屈服强度、直径影响。理论上,现有的 FRP 抗剪贡献力学模型可以采用简化桁架模型推出 FRP 抗剪承载力  $V_f$  的计算表达式

$$V_f = A_{fi} E_f \epsilon_{fi} \quad (3)$$

式中: $E_f$ 、 $A_{fi}$ 、 $\epsilon_{fi}$  分别为 FRP 条带的弹性模量、与主裂缝相交的第  $i$  条 FRP 的截面积及其应变值。

为了更好分析试验公式(2)得到的 FRP 抗剪贡献与计算模型(3)得到的计算结果的差异问题,本文按照公式(2)计算得到 CFRP 的实际试验抗剪贡献值,记作  $V_{f-act}$ ,再根据试验采集到的与剪切裂缝相交的 FRP 条带应变值以及实验梁破坏后观察到的主斜裂缝平均角度,按式(3)计算出加固梁上 FRP 条带分担剪力的理论贡献值,记作  $V_{f-cal}$ 。并将比较结果绘制成图 6。通过对所得到的数据进行处理和比较,可以得到极限荷载下 CFRP 条带理论剪贡献相比于实际剪贡献的差值。可以发现,不同梁尺寸下,外贴 U 形 CFRP 条带的理论剪贡献值与实际剪贡献值相差情况各异,小尺寸梁的理论剪贡献值小于实际剪贡献值 23.0 kN,而大尺寸梁则相反,理论剪贡献值大于实际剪贡献值 5.1 kN。斜压破坏模式下均是以混凝土最终被压碎导致试验梁破坏,所以加固梁和参照梁中混凝土的承载能力认为近似相等,而导致上述出现的差异主要原因可以从下面两个方面考虑,一是箍筋的影响,试验结果表明(图 5),小尺寸梁达到极限荷载时,加固梁和参照梁中箍筋的应变值分别为  $491.4 \mu\epsilon$  和  $200.8 \mu\epsilon$ ,而大尺寸梁达到极限荷载时,加固梁和参照梁中未屈服的箍筋的应变值分别为  $672.1 \mu\epsilon$ 、 $327.9 \mu\epsilon$  和  $1245.2 \mu\epsilon$ 、 $1526.9 \mu\epsilon$ ,可见除却 FRP 提供的抗剪承载力之外,小尺寸梁加固后箍筋承担的剪力增加了,而大尺寸则正好相反,箍筋承担的剪力明显下降了。再者是 FRP 条带的影响,桁架计算模型假设仅存在一条裂缝,实际上,斜压破坏模式存在一定数量的平行裂缝,FRP 条带的粘结长度没有达到假设要求,得到的 FRP 条带理论剪贡献值要高于实际剪贡献值。

为了进一步探究 CFRP 布带在整个加载过程中对加固梁分担抗剪承载力的能力,根据式(3)推算得到的 CFRP 条带理论剪力值  $V_{f-cal}$ 、加固梁破坏时的

极限抗剪承载力  $V_{max}$  以及加载过程的剪力值  $V$ ,得到不同加载水平下 CFRP 条带剪力理论贡献率的曲线,如图 7。所有 U 形加固梁的 CFRP 条带开始发挥作用的时机十分接近,均是在极限承载力的 30%~40%之间,也正是实验梁开裂的时候,说明外贴的 CFRP 在混凝土开裂前并没有过多参与提供抗剪承载力。图 7(a)说明斜压破坏模式下,CFRP 条带提供的剪力值都会随荷载的增加而增加,且任一加载水平下,加固梁的 CFRP 条带剪力值随尺寸增大而增大,再者,CFRP 剪力的增长速度随梁尺寸的增加而变快;图 7(b)看出,尽管 FRP 理论抗剪贡献值均会随梁尺寸变化,但 FRP 理论抗剪贡献率(FRP 理论抗剪承载力占加固梁抗剪承载力的比例)均较小且差别不大,加固梁 SB1U、MB1U 理论抗剪贡献率分别为 15.6%、11.8%,随梁尺寸呈现略微的下降趋势。加固梁 SB1U、MB1U 的 FRP 实际抗剪贡献率(FRP 实际抗剪承载力占加固梁抗剪承载力的比例)分别为 31.7%、10.7%。大尺寸试验梁的 FRP 实际抗剪贡献率高于小尺寸梁。总而言之,无论是 FRP 实际剪贡献率还是理论剪贡献率均有一致趋势,即随着梁尺寸的增大而下降。

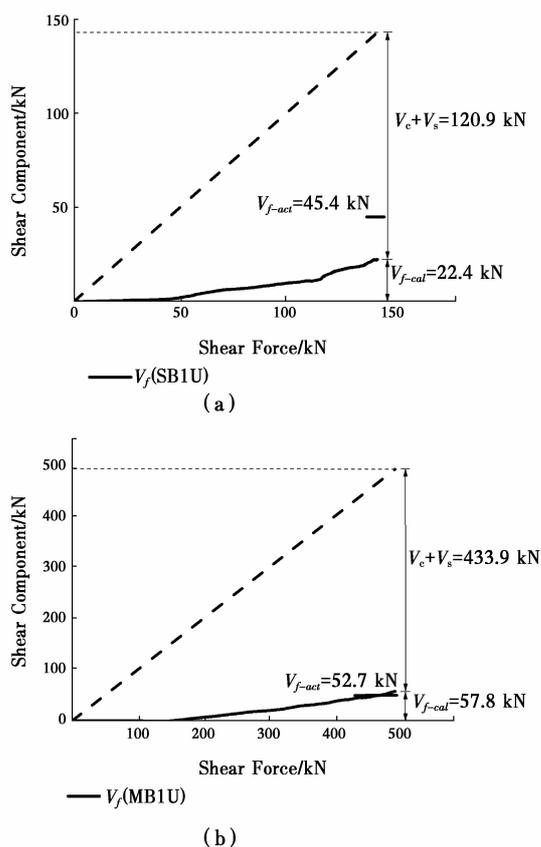


图 6 剪力组分图

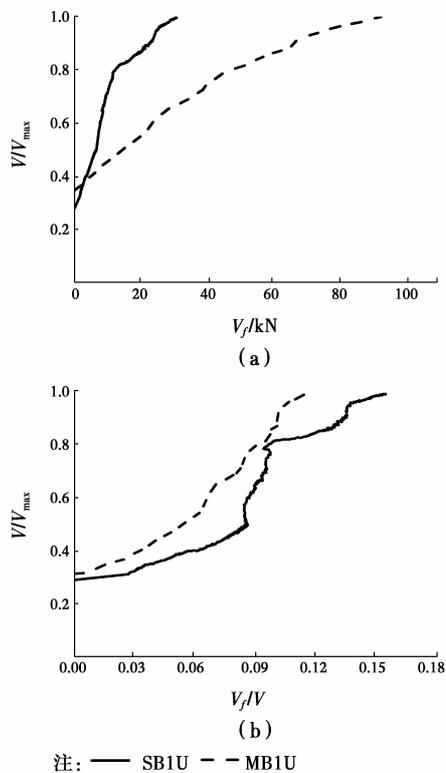


图 7  $V_f-V/V_{max}$ 、 $V_f/V-V/V_{max}$

## 4 结论

本文通过 4 根截面几何相似的钢筋混凝土梁三点弯曲试验,针对由小剪跨比主导下的斜压破坏模式,研究外贴 CFRP 抗剪加固钢筋混凝土梁的尺寸效应对 FRP 抗剪性能的影响。得到以下的试验研究结果。

1)U 形加固梁的抗剪承载力均高于相应的参照梁,FRP 条带抗剪加固形式对试验梁的破坏模式和加载点挠度几乎没有影响。U 形加固梁最终抗剪承载力的提高率与试验梁尺寸相关,加固效果随尺寸的增加而下降。

2)小剪跨比主导下的斜压破坏模式,外贴 U 形 CFRP 条带的理论剪贡献值与实际剪贡献值相差各异,小尺寸梁的理论剪贡献值要小于实际剪贡献值,大尺寸梁则相反。

3)CFRP 条带提供的剪力值会随加载水平的增加而增加,大尺寸的增长速度要快于小尺寸,且在任一相同加载水平下,大尺寸加固梁的 CFRP 条带剪力值高于小尺寸梁。

4)所有加固梁,无论是 FRP 实际剪贡献率,还是理论剪贡献率均有一致趋势,即随着梁尺寸的增加而下降。

## 参考文献:

- [1] HOLLAWAY L C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (12): 2419-2445.
- [2] CHEN J F, TENG J G. Shear capacity of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams: Fiber reinforced polymer rupture[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 615-625.
- [3] CHEN J F, TENG J G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17 (1): 27-41.
- [4] CAO S Y, CHEN J F, TENG J G, et al. Debonding in RC beams shear strengthened with complete FRP wraps [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9 (9): 417-428.
- [5] BOUSSELHAM A, CHALLAL O. Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP [J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(1): 37-46.
- [6] JAYAPRAKASH J, ABDUL SAMAD A A, Anvar ABBASOVICH A, et al. Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (6): 1148-1165.
- [7] LI W, LEUNG C. Shear span-depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with Full-wrapping FRP strip [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 20(3): 1-14.
- [8] 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.
- [9] 李伟文,管天成,董必钦,等. CFRP 外贴加固混凝土梁斜截面力学性能及影响因素的试验研究[J]. 混凝土, 2009(4): 26-29.
- [10] TENG J G. FRP-strengthened RC structures [J]. Frontiers in Physics, 2002: 266.
- [11] TENG J G, CHEN G M, CHEN J F, et al. Behavior of RC beams shear strengthened with bonded or unbonded FRP wraps [J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(5): 394-404.
- [12] CHEN G M, TENG J G, CHEN J F, et al. Interaction between steel stirrups and shear-strengthening FRP

- strips in RC beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(5): 498-509.
- [13] CHEN G M, TENG J G, CHEN J F. Shear strength model for FRP-strengthened RC beams with adverse FRP-steel interaction [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(1): 50-66.
- [14] COLOTTI V. Shear interaction effect between transverse reinforcements in FRP-strengthened RC beams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 1222-1233.
- [15] MOFIDI A, CHAALLAL O. Shear strengthening of RC beams with EB FRP: Influencing factors and conceptual debonding model [J]. 2011, 15(1): 62-74.
- [16] MOFIDI A, CHAALLAL O. Shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites: Effect of strip-width-to-strip-spacing ratio [J]. 2011, 15(5): 732-742.
- [17] TAN K H, CHENG G H. Size effect on shear strength of deep beams; Investigating with strut-and-tie model [J]. 2006, 132(5): 673-685.
- [18] ZHANG N, TAN K. Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(12): 3241-3254.
- [19] YU Q, BAŽANT Z P, ASCE H M. Can stirrups suppress size effect on shear strength of RC beams? [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(5): 607-617.
- [20] EL-SAYED A K, SHURAIM A B. Size effect on shear resistance of high strength concrete deep beams [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(5): 1871-1882.
- [21] BAŽANT Z P, YU Q. Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups; I. Formulation [J]. 2005, 131(12): 1877-1885.
- [22] BOUSSELHAM A, CHAALLAL O. Experimental investigations on the influence of size on the performance of RC T-beams retrofitted in shear with CFRP fabrics [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(6): 1070-1079.
- [23] GODAT A, QU Z, LU X Z, et al. Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(3): 260-271.
- [24] LEUNG C, CHEN Z, LEE S, et al. Effect of size on the failure of geometrically similar concrete beams strengthened in shear with FRP strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(5): 487-496.
- [25] QU Z, LU X Z, YE L P, et al. Size effect of shear contribution of externally bonded FRP U-jackets for RC beams [J]. *Chen Jf*, 2005.
- [26] BAE S W, TANN B D, BELARBI A. Size effect of reinforced concrete beams strengthened in shear with externally bonded CFRP sheets [J]. *International Institute For FRP In Construction*, 2012.
- [27] ISLAM M R, MANSUR M A, MAALEJ M. Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005, 27(3): 413-420.

(编辑 吕建斌)