

内嵌 FRP 筋加固混凝土梁的抗剪性能研究

张海霞, 孙 闯, 李程翔

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究内嵌 FRP 筋加固混凝土梁的抗剪性能和剪切延性性能, 建立加固梁的抗剪承载力计算公式, 为加固梁抗剪加固的应用提供理论依据. 方法 对 7 根内嵌 FRP 筋加固混凝土梁和 2 根对比梁进行抗剪性能试验, 分析其破坏模式; 研究其荷载-挠度关系曲线、荷载-FRP 筋、箍筋应变关系曲线, 分析斜截面应力重分布现象以及剪切延性性能; 基于拱形桁架模型, 引入关键系数, 建立加固梁的受剪承载力计算公式. 结果 加固梁的抗剪承载力提高了近 30%; 发生剪切破坏各加固梁的剪切延性系数与对比梁 BS2 剪切延性系数相比的平均比值为 1.167, 剪切延性有所改善; 加固梁斜截面出现了 2 次应力重分布, 分别是斜裂缝出现时和箍筋屈服时; 将已有文献剪切破坏加固梁的抗剪承载力试验值与笔者建立的加固梁抗剪计算公式的计算值进行对比, 吻合较好. 结论 内嵌 FRP 筋加固技术能够提高梁的整体刚度和抗剪承载力, 有效地延缓斜裂缝的开展, 减小斜裂缝的宽度, 提高混凝土骨料间的咬合作用, 从而改善加固构件的受力情况及变形能力.

关键词 内嵌 FRP 筋; 混凝土梁; 抗剪性能; 剪切延性; 抗剪计算模型

中图分类号 TU398.9 文献标志码 A

Study on Shear Behavior of RC Beams Strengthened with NSM FRP Bars

ZHANG Haixia, SUN Chuang, LI Chengxiang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The aim of this paper is to investigate the shear behavior and shear ductility, and to establish the shear bearing capacity formula of RC beam strengthened with NSM FRP bars, which provides theory basis for the engineering application of RC beam in shear strengthening. The total of 7 RC beams strengthened with NSM FRP bars and 2 control beams in shear were conducted out. The failure mode, load-displacement relationship, load-strain of FRP bars and stirrup relationship, stress redistribution on inclined section and shear ductility behavior are studied. Based on the arch truss model, the key coefficient is introduced to establish the formula of shear bearing capacity

收稿日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51208316);辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2015055)

作者简介:张海霞(1976—),女,教授,博士,主要从事既有结构加固方面研究.

of the strengthened beam. The results show that the shear capacity of the strengthened beam increase by 30% , compared to the control beam. The average ratio of the shear ductility coefficient of the strengthened beam for the shear failure to the control beam BS2 is 1.167. It shows the improvement of shear ductility to some extent. When the diagonal crack appears and the yielding of the stirrup, the stress redistribution on inclined section occurs. The ratio of the test results of the shear bearing capacity from the previous papers to the calculated results from this paper is in good agreement. The NSM FRP bars strengthening technology can improve the overall stiffness and shear capacity, effectively delay the propagation of diagonal cracks, reduce the crack width, and enhance aggregate interlock behavior of concrete. Consequently, the stressed state and deformation capacity of the strengthening component are improved.

Key words: NSM FRP bars; concrete beam; shear performance; shear ductility; calculating model in shear

近年来,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer Bars, FRP)因其抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀性好等优良的力学性能在国内外的加固工程中得到了广泛的应用^[1-4]. 利用FRP材料对混凝土构件加固的方法主要有内嵌式FRP筋加固法和外贴式FRP布加固法两种,其中内嵌式FRP筋加固法与传统的加固方法相比,具有加固效果好,加固构件表面的处理工作量少,施工效率高,质量易保证,附加荷载小,应用时效长,加固后维修费用低,加固后不改变结构的外观和形状等优点^[5-6]. 目前,国内外学者对内嵌FRP筋加固混凝土梁的抗剪性能进行了一些试验研究,在破坏模式、参数分析方面取得了一些有益的成果^[7-9]. 例如,张雪丽等^[10]通过对9根表层嵌入FRP板条加固混凝土梁和4根对比梁的抗剪试验研究,分析了试件的破坏形态、斜截面纤维应变分布特征及加固后试验梁极限承载力的影响因素;AI-MAHMOUD F等^[11]通过7根试验梁的抗剪试验,研究了不同填充材料、加载方式以及FRP筋加固率对试验梁抗剪性能的影响;MOFIDI A等^[12]通过T型梁的抗剪加固试验,研究了箍筋、内嵌FRP筋及配箍率等参量对试件抗剪性能的影响,同时详细地描述了在加载过程中,试件的抗剪承载力的变化情况. 然而,影

响内嵌FRP筋加固混凝土梁的受剪因素较多,对破坏模式、剪切变形性能以及抗剪承载力计算的研究还不充分,仍有待于进一步深入探讨. 基于此,笔者考虑FRP筋类型、间距和嵌入角度,进行内嵌FRP筋加固混凝土梁的抗剪性能和剪切延性性能分析,同时基于拱形桁架模型,建立加固梁抗剪承载力计算公式,为内嵌FRP筋抗剪加固的应用提供理论依据.

1 试验

1.1 试验设计

本试验设计了内嵌FRP筋加固梁7根,对比梁2根. 试件截面为矩形,其长宽为200 mm × 340 mm,试件净跨为1 800 mm. 混凝土强度设计等级为C30;梁内箍筋的保护层厚度为30 mm;试验采用正位四点加载. 梁内的纵筋采用3Φ22(HRB400),架立筋2Φ12(HRB400),加固区箍筋φ6.5@300(HPB300),加强区箍筋φ10@50(HPB300). 试件的截面尺寸及配筋情况如图1所示. 试验参数有FRP筋类型、FRP筋间距和FRP筋倾角,具体试件明细如表1所示,其中试件BS1、BS2为对比梁,BF1~BF7为加固梁. 另外,为了防止加固梁纯弯段提早发生弯曲破坏,在试验梁外部纯弯段进行加箍处理.

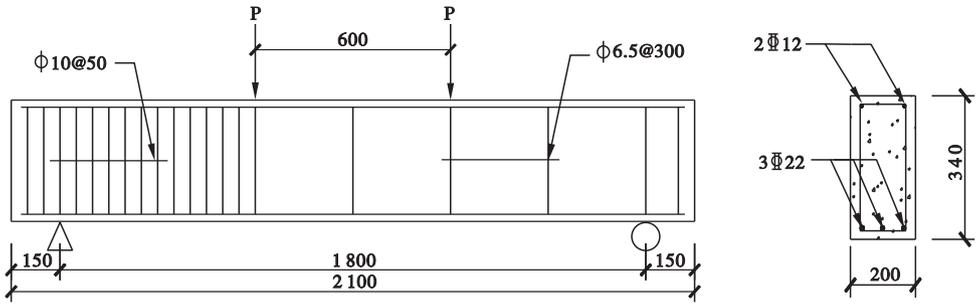


图1 试验梁截面尺寸及配筋情况

Fig. 1 Details of the test specimen

表1 加固梁明细

Table 1 Details of the beams strengthened with NSM FRP

试件编号	原梁内配筋情况		剪跨比 λ	FRP 筋类型	FRP 筋间距/mm	FRP 筋倾角/(°)
	加固区	加强区				
BS1	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.87	—	—	—
BS2	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	—	—	—
BF1	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	CFRP	300	90
BF2	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	CFRP	200	90
BF3	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	CFRP	150	90
BF4	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	CFRP	100	90
BF5	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	CFRP	200	60
BF6	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	BFRP	200	60
BF7	$\phi 6.5@300$	$\phi 10@50$	1.56	CFRP	200	45

1.2 加载装置和测量内容

试验根据试件抗剪理论计算值,采用 100 t 的液压千斤顶,对其使用油泵进行加载与卸载,加载装置如图 2 所示。

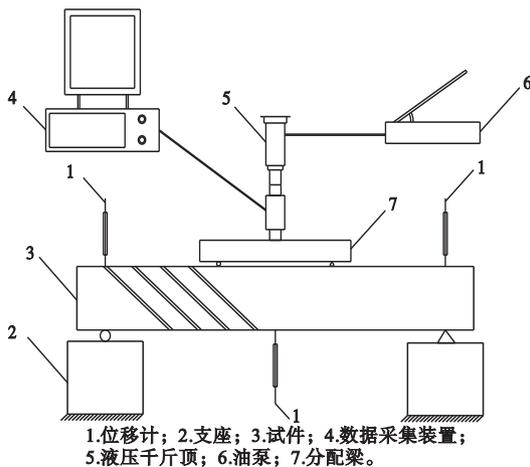


图2 试验加载装置

Fig. 2 Loading apparatus

对试件进行分级加载,先对试件施加

30 kN 的预加载,之后每级施加 50 kN 荷载,每级荷载的时间间歇为 2 ~ 3 min. 为了使试件受力均匀,故在钢垫板的下面铺设一层细沙. 试验测试内容:①记录首条弯曲裂缝和斜裂缝出现时的试验梁荷载大小及裂缝宽度;②观察斜裂缝的发展情况,测量裂缝宽度,记录梁支座及跨中位置处的挠度值;③监测各阶段下,纵筋应变、箍筋应变、FRP 应变及纯弯段混凝土应变的变化情况。

1.3 材料的力学性能指标

本试验共制作了 12 个标准混凝土试块,与试件在相同条件下进行养护,然后测得混凝土立方体试块的抗压强度平均值为 42.2 MPa. 试验中使用的粘结剂为 JGN - I 建筑植筋粘合剂,该结构胶性能参数由制作厂家提供. 试验中所采用的钢筋,经测定其力学性能指标见表 2. FRP 筋的力学性能指标同样由制作厂家提供,具体见表 2.

表2 钢筋和FRP筋力学性能

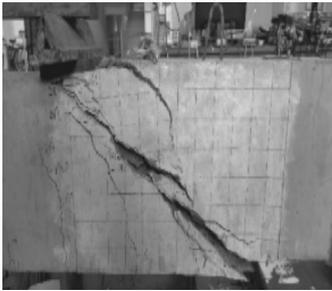
Table 2 Mechanical performance index of steel bars and FRP bars

材料	d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	$E/10^5 \text{MPa}$
Φ22	22	441	578	2.0
Φ12	12	492	626	2.0
Φ6.5@300	6.5	324	498	2.1
Φ10@50	10	414	509	2.1
CFRP筋	8	—	1 800	1.4
BFRP筋	8	—	700	0.5

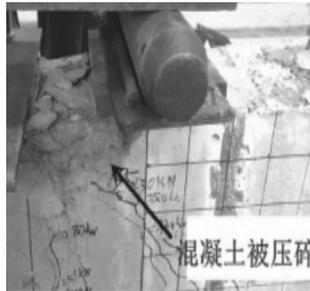
注: d 为钢筋或FRP筋的直径; f_y 为钢筋的屈服强度; f_u 为钢筋或FRP筋的极限抗拉强度; E 为钢筋或FRP筋的弹性模量。

2 试验现象

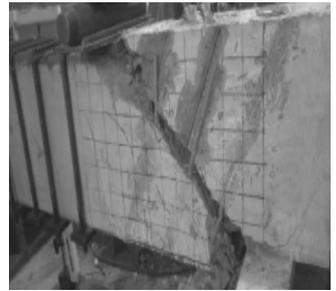
试验梁的破坏形态可以归纳为剪切破坏和弯剪破坏两种,其中对比梁BS1、BS2、加固梁BF3、BF5、BF6、BF7发生了剪切破坏,加固梁BF1、BF2及BF4发生了弯剪破坏。典型试件的破坏形态如图3所示。



(a)对比梁BS1



(b)加固梁BF2



(c)加固梁BF6

图3 试验梁的破坏形态

Fig. 3 Failure modes of specimens

2.2 弯剪破坏

发生弯剪破坏的试验梁在荷载加载的前期,裂缝的发展基本上与剪切破坏的试验梁相同,加固的FRP筋承担了试件的部分剪力。不同的是在后期持续加载过程中,因加固后试件斜截面的抗剪能力提高较多,而抗弯能力不足,使得主斜裂缝在贯穿加固区与FRP筋、箍筋均相交后,在持续加载过程中,集中力作用点位置处的混凝土压应力增大。在荷载达到极限值时,该位置处的混凝土被压碎,加固梁破坏。此时,受拉纵筋发生屈服,而FRP筋的应变未达到其极限抗拉强度,加固梁有弯曲破坏特征,故为弯剪破坏。

2.1 剪切破坏

以加固梁BF6为例,当荷载增加到极限荷载38%时,在加固梁纯弯段受拉区先出现了垂直裂缝。随着荷载的不断增加,垂直裂缝向上发展,同时,弯剪段的加固区梁底出现了多条斜裂缝。当荷载达到极限荷载的50%时,纯弯段垂直裂缝基本不发展,而梁加固区底部的斜裂缝宽度不断变大,且高度不断向加载点方向发展;当荷载达到极限荷载80%时,加固区逐渐形成了一条宽度较大的主斜裂缝,该裂缝与FRP筋、箍筋均相交,角度约为 40° 。随着荷载到达极限值时,试件发出一声巨响,与主斜裂缝相交的FRP筋及箍筋在梁中部被拉断,主斜裂缝贯穿整个试件的加固区,试验梁发生剪切破坏,且加载点处的箍筋混凝土保护层剥落严重。

3 试验结果分析

3.1 荷载-挠度曲线

各试验梁荷载-挠度曲线如图4所示。从图中可以看出,混凝土开裂之前,各试验梁的荷载-挠度曲线基本重合,其挠度随着荷载的增加而线性增加。混凝土开裂之后,加固梁的曲线斜率大于对比梁的曲线斜率,这说明内嵌的FRP筋可提高试件的整体刚度、延缓试件的变形。对于发生剪切破坏的试件,当荷载达到极限荷载时,其荷载-挠度曲线发生突变,快速下降,呈现明显的脆性破坏;对于发生弯剪破坏的试件,其荷载-挠度曲线

后期有明显的水平段,试件挠度增长快速.

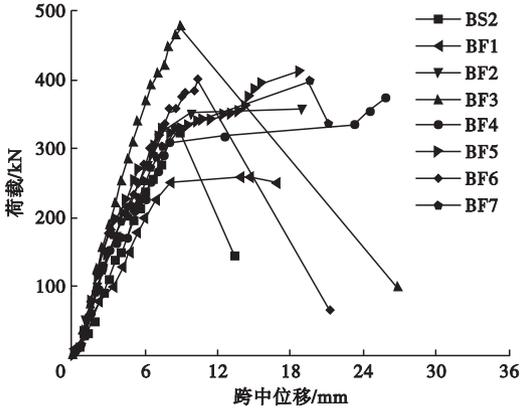


图4 试验梁的荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of specimens

各试验梁各阶段的荷载见表3.从表中可知,加固梁在斜截面出现裂缝时的荷载值、斜裂缝贯通时的荷载值以及极限荷载与对比梁BS2各个阶段的荷载比值的平均值分别为1.781、1.172和1.172,可见FRP筋的嵌入不仅可以提高试件出现斜裂缝时的荷载值,有效地限制斜裂缝的发展,提高裂缝处混凝土骨料间的咬合作用,而且可以提高试件

的极限承载力,具有承担部分剪力的作用.

表3 试验梁各阶段的荷载值

Table 3 Load capacity of specimens at each stage

试件编号	P_{cr} /kN	P_r /kN	P_u /kN
BS1	90	141	233
BS2	86	273	325
BF1	150	250	260
BF2	140	350	351
BF3	149	380	470
BF4	150	307	374
BF5	173	327	412
BF6	150	325	400
BF7	160	300	398

注: P_{cr} 为试验梁斜截面出现裂缝时的荷载; P_r 为试件斜裂缝贯穿加固区时的荷载; P_u 为试件极限荷载.

3.2 荷载-FRP筋、箍筋应变曲线

以发生剪切破坏的BF3加固梁为例.图5(a)、(b)分别为试件FRP筋和箍筋应变片分布位置图,图6(a)、(b)分别为BF3加固梁上距加载点不同距离FRP筋、箍筋的荷载-应变曲线.

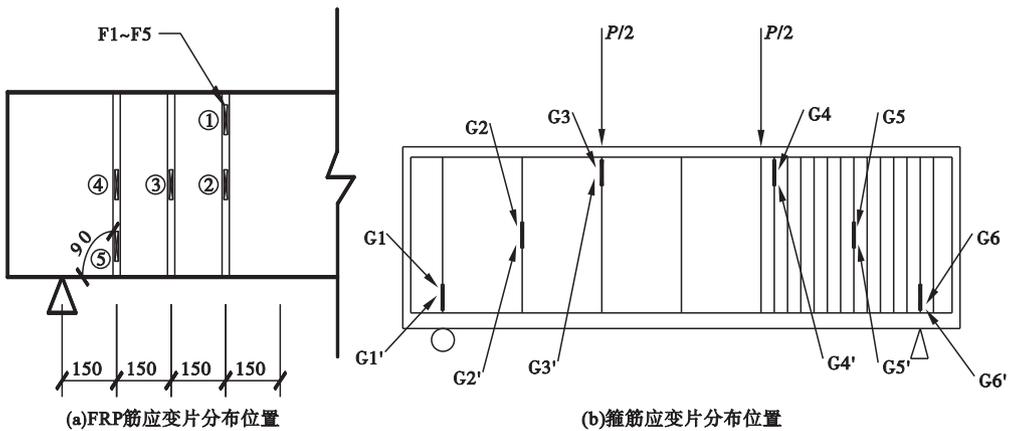


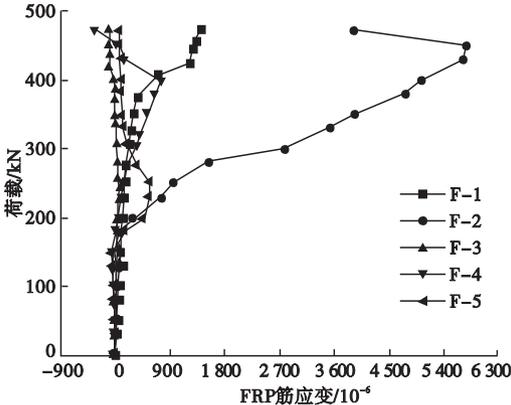
图5 试件FRP筋和箍筋应变片分布位置图

Fig. 5 Distribution of mensuration spots for strain of FRP bars and steel

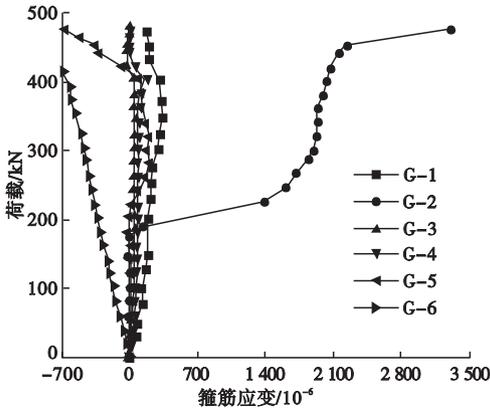
从图6中可以看出,在荷载加载初期,各位置处的FRP筋、箍筋应变较小,FRP筋几乎不承担剪力,而箍筋承担的剪力值较小,截面的剪力主要由混凝土承担.当荷载在200~400kN时,FRP筋上F2测点和箍筋G2测点的应变值随着荷载的增长而快速增大,其他

位置FRP筋和箍筋应变变化不大,这说明此处FRP筋和箍筋已与斜裂缝相交.另外,在相同荷载作用下,试件加固区内离加载点不同位置处的FRP筋、箍筋的应变以及同一根FRP筋、箍筋不同位置的应变值是不相同的.因此,在进行加固梁抗剪计算时,应考虑FRP筋在

加固梁破坏时应变不均匀分布的情况。



(a)不同位置FRP筋的荷载-应变曲线



(b)不同位置箍筋的荷载-应变曲线

图6 BF3梁荷载- FRP筋、箍筋应变曲线

Fig. 6 Load-strain relationship of FRP bars and stirrups of specimen BF3

3.3 斜截面应力重分布分析

图7为典型试件BF3的荷载- FRP筋、箍筋应力关系曲线。从图中可以看出,在试件弯剪段的加固区,斜裂缝出现以前(荷载为190.1 kN),内嵌的FRP筋和箍筋应变较小,且应力较小,FRP筋应力为31 MPa,箍筋应力为27.3 MPa,截面的应力主要由混凝土承担;在斜裂缝出现以后,箍筋屈服之前,截面应力发生了重分布,除了纵向受拉钢筋的应力增大和斜截面交接面上骨料之间的咬合作用逐渐减小外,FRP筋和箍筋应力随荷载的增大而快速增长,且箍筋应力增长的速度大于FRP筋应力增长的速度,FRP筋和箍筋均开始承担部分剪力;随着荷载的继续增大,FRP筋应力和与斜裂缝相交箍筋应力持续增

大,直到位于主斜裂缝附近的箍筋率先进入屈服阶段,此时箍筋屈服时荷载为240 kN,FRP筋应力为122.4 MPa,截面剪力由混凝土、箍筋和FRP筋共同承担。箍筋屈服之后,随着斜裂缝与结构胶相交,结构胶开裂,截面再次发生应力重分布,FRP筋应力迅速增大,斜裂缝截面的剪力大部分由剪压区混凝土和FRP筋承担,直至最终主斜裂缝贯穿试件的整个加固区,加固梁剪切破坏。

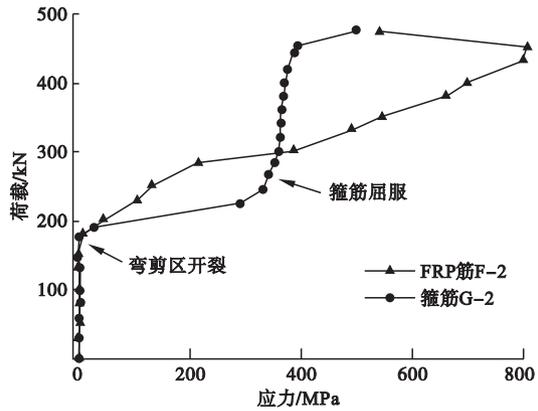


图7 BF3梁荷载- FRP筋、箍筋应力关系曲线

Fig. 7 Load-stress of FRP bars and stirrup relationship of specimen BF3

3.4 剪切延性

试件的剪切延性实际上就是结构吸收及化解不良影响能量的一种能力^[13]。剪切延性系数是评价构件剪切性能的指标。笔者参考文献[14]中基于能量法的剪切延性计算公式,图8是一个理想的弹塑性荷载-挠度关系曲线。

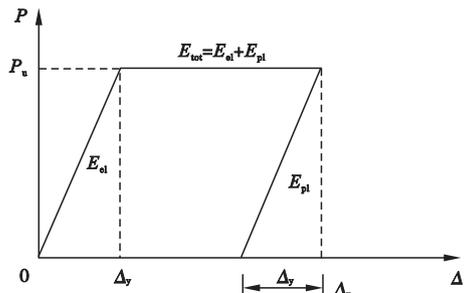


图8 理想弹塑性荷载-挠度曲线能量表述

Fig. 8 Energy expression of ideal elastic-plastic load-deflection curves

采用能量方式表述的形式,可定义剪切延性系数为

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y = (E_{tot} / E_{el} + 1) / 2, \quad (1)$$

$$E_{tot} = (\Delta_u - \Delta_y) P_u + \Delta_y P_u / 2, \quad (2)$$

$$E_{el} = \Delta_y P_u / 2, \quad (3)$$

$$E_{tot} / E_{el} = 2\Delta_u / \Delta_y - 1. \quad (4)$$

式中: E_{tot} 为荷载-挠度曲线下的总面积; E_{el} 为曲线从加载到屈服段下的面积,或卸载段下的面积; Δ_y 为屈服挠度(可通过卸载曲线得到); Δ_u 为极限挠度; P_u 为极限荷载。

式(1)是基于理想的弹塑性荷载-挠度关系曲线而推导的.若用于内嵌 FRP 筋加固混凝土梁有如图 9 所示的荷载-挠度关系,则取相应于 80% 的最大荷载值作为破坏荷载(P_1 为混凝土开裂时的荷载值, P_2 为钢筋屈服时的荷载值). E_{el} 的值需通过试验确定.针对发生剪切破坏试验梁求得剪切延性系数见表 4.

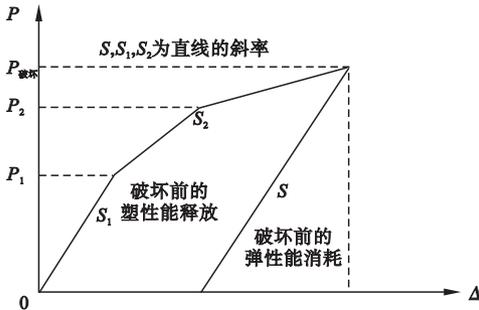


图 9 内嵌 FRP 混凝土梁荷载-挠度曲线能量表述

Fig. 9 Energy expression of load-deflection curves of concrete beam reinforced with NSM FRP rods

表 4 试验梁的剪切延性系数

Table 4 Shear ductility coefficient of specimens

试件编号	E_{el} / mm^2	E_{tot} / mm^2	μ_{Δ}
BS1	235	1 003	2.63
BS2	221	1 386	3.64
BF3	351	2 341	3.83
BF5	177	1 379	4.39
BF6	316	2 397	4.29
BF7	191	1 522	4.48

注: E_{el} 为箍筋发生屈服时,试件的荷载-挠度曲线与 x 轴所围成的面积; E_{tot} 为试件的主斜裂缝贯穿加固区时,其荷载-挠度曲线与 x 轴所围成的面积; μ_{Δ} 为试件的剪切延性系数。

从表 4 中可以看出,加固梁的剪切延性

系数均大于对比梁,在剪跨比相同的情况下,各加固梁的剪切延性系数与对比梁 BS2 的剪切延性系数的平均比值为 1.167,可知内嵌 FRP 筋能够改善试件的剪切延性,提高试件的剪切变形能力.另外 FRP 筋倾角为 45° 的试件 BF7,其剪切延性系数大于 FRP 筋倾角为 60° 的试件 BF5;而嵌入 CFRP 筋的试件 BF5 和嵌入 BFRP 筋的试件 BF6 其剪切延性系数相近。

4 加固梁抗剪承载力计算

4.1 抗剪计算模型

由试验可知,FRP 筋在混凝土梁抗剪加固受力过程中的作用近似于梁内箍筋,因此笔者借鉴混凝土有腹筋梁斜截面受剪机理的拱形桁架模型,将其作为加固梁抗剪计算的力学模型,其中拱体为上弦杆,裂缝间混凝土齿块为受压斜腹杆,箍筋为受拉腹杆,FRP 筋根据其嵌入角度的不同可以为受拉垂直腹杆或受拉斜腹杆,剪压区混凝土为上弦杆,受拉纵筋为下弦杆。

对于剪压破坏为主的加固梁,其进行抗剪计算时,有如下假定:

- (1) 加固梁发生剪压破坏时,忽略混凝土、箍筋和 FRP 筋之间的相互影响;
- (2) 不考虑混凝土的抗拉作用;
- (3) FRP 筋承受拉力,且与混凝土变形协调,共同受力;
- (4) 忽略斜裂缝处骨料的咬合力和纵向受力钢筋的销栓作用;
- (5) 剪压区混凝土的剪应力 τ 及压应力 σ 均匀分布。

内嵌 FRP 筋加固梁的抗剪承载力计算公式为

$$V = V_t + V_a. \quad (5)$$

式中: V_t 为桁架机构承担的剪力; V_a 为拱机构承担的剪力。

4.1.1 桁架机构承担的剪力

取主斜裂缝左侧的加固梁段进行桁架机

构受力分析,桁架机构计算简图见图10.

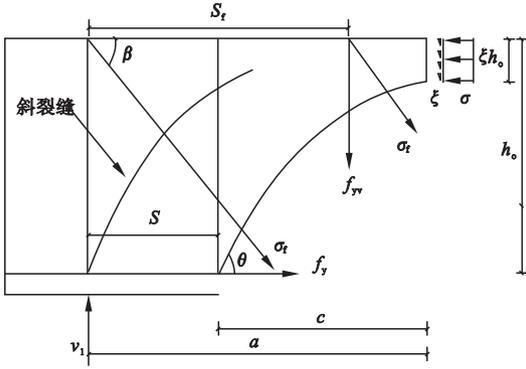


图10 桁架机构计算简图

Fig. 10 Truss calculation diagram

由脱离体力和弯矩的平衡条件得:

$$\sum X = 0 \quad \sigma \cdot b \cdot h_0 \cdot \xi = f_y \cdot A_s + \frac{c}{s_{cf}} \sigma_{cf} A_{cf} \cos\beta (1 + \tan\theta \cot\beta), \quad (6)$$

$$\sum Y = 0 \quad v_t = \tau \cdot b \cdot h_0 \cdot \xi + \frac{f_{yv} A_{sv}}{s} \cdot c + \frac{c}{s_{cf}} \sigma_{cf} A_{cf} \sin\beta (1 + \tan\theta \cot\beta), \quad (7)$$

$$\sum M = 0 \quad V_t \cdot a = f_y \cdot A_s \cdot h_0 (1 - 0.5\xi) + \frac{f_{yv} A_{sv}}{s} \cdot c \cdot \frac{c}{2} + \frac{c}{s_{cf}} \sigma_{cf} A_{cf} \sin\beta (1 + \tan\theta \cot\beta) \cdot \frac{c}{2}. \quad (8)$$

式中: ξ 为相对受压区高度; θ 为临界斜裂缝角度; β 为FRP筋嵌入角度; s_{cf} 为FRP筋间距; s 为箍筋间距; A_{cf} 为FRP筋截面面积; σ_{cf} 为剪压破坏时FRP筋应力; c 为临界斜裂缝的水平投影长度.

当剪压区混凝土的剪应力 τ 和压应力 σ 满足式(9)时,混凝土发生剪压破坏.

$$\frac{\tau}{f_c} = -0.2 \frac{\sigma}{f_c} + 0.5. \quad (9)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度.

对于临界斜裂缝投影长度和斜裂缝倾角的计算采用文献[15]中吕志涛院士提出的计算公式.

$$c = 0.9 \sqrt{\lambda} h_0, \quad (10)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{h}{c}\right). \quad (11)$$

式中: λ 为剪跨比;当 $\lambda < 1$ 时,取 $\lambda = 1$;当 $\lambda > 3$ 时,取 $\lambda = 3$; h_0 为截面有效高度.

此外,加固梁剪压区的相对受压区高度 ξ 与 λ 的关系^[16]为

$$\xi = 0.5 - 0.1\lambda. \quad (12)$$

同时假定 $f_c = 10f_t$,将式(9)~(12)代入到式(6)、(7)、(8)中,经整理并进行数据拟合,可得桁架承担的剪力为

$$V_t = (-0.49\lambda + 2.04)f_t \cdot b \cdot h_0 + (0.14\lambda + 0.69) \frac{f_{yv} A_{sv}}{s} \cdot h_0 + [(0.14\lambda + 0.69) \sin\beta - (0.02\lambda + 0.13) \cos\beta] \frac{\sigma_{cf} A_{cf}}{s_{cf}} \cdot h_0 (1 + \tan\theta \cot\beta). \quad (13)$$

4.1.2 拱机构承担的剪力

拱机构的计算简图如图11所示.

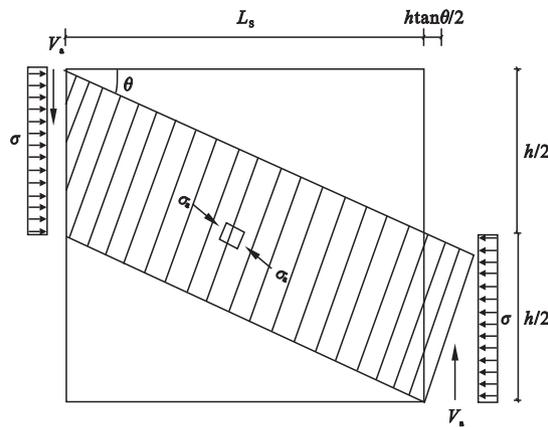


图11 拱机构简化计算模型

Fig. 11 Arch simplified calculation model

图11中 L_s 为一个剪跨段的长度,并假设:

(1)当剪跨比 $\lambda = 3$ 时,不考虑拱机构的作用;当 $\lambda = 0.5$ 时,不考虑桁架机构的作用.

(2)忽略压应力的扩散影响,假定拱机构在同一剪跨段内的宽度和压应力 σ_a 保持不变.

拱体内的压应力 σ_a 可表示为

$$\sigma_a = \begin{cases} \nu f_c, & \lambda = 0.5, \\ 0, & \lambda = 3, \\ (1.2 - 0.4\lambda) \nu f_c, & 0.5 < \lambda < 3. \end{cases} \quad (14)$$

式中: ν 为混凝土的强度软化系数, $\nu = 0.7 -$

$f_c/165$.

假设 $h_0 = 0.9h$, 由剪跨比定义可得

$$\tan\theta = \frac{h/2}{\lambda \cdot h_0} = \frac{1}{1.8\lambda} \quad (15)$$

由力平衡条件可得, 拱机构承担剪力为

$$V_a = \sigma_a \frac{bh}{2} \sin\theta \quad (16)$$

设 $f_c = 10f_t$, 并且 θ 很小时, $\sin\theta = \tan\theta$, 将式(14)、(15)带入式(16)中, 可得拱机构的承载力计算式为

$$V_a = \frac{30 - 10\lambda}{8.1\lambda} \nu f_t b h_0 \quad (17)$$

4.1.3 FRP 筋应力 σ_{cf} 的计算

加固梁剪压破坏时, 与裂缝相交的 FRP 筋的拉应力可能不均匀, 特别是靠近剪压区的 FRP 筋未能达到其极限抗拉强度, 故 FRP 筋的应力为

$$\sigma_{cf} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (18)$$

式中: ε_{fe} 为梁破坏时 FRP 筋的有效应变。

FRP 筋有效应变与 FRP 筋在加固梁抗剪过程中的利用程度和同一根 FRP 筋不同位置处的应变分布有关, 故此引入两个系数, 一个是 FRP 筋的利用率 D_u , 另一个是 FRP 筋应变分布折减系数 D_f , 故此 FRP 有效应变为

$$\varepsilon_{fe} = D_u D_f \varepsilon_{cu,f} \quad (19)$$

D_u 可以用梁破坏时 FRP 筋最大应变与极限应变之比来表示, 其值与 FRP 筋的加固量有关, 故此参照混凝土梁配箍率的定义, FRP 筋加固率为

$$\rho_{frp} = \frac{A_{cf}}{b \cdot s_{cf} \cdot \sin\beta} \quad (20)$$

图 12 为 D_u 与 ρ_{frp} 之间的关系曲线图. 从图中可以看出, D_u 随着 ρ_{frp} 的增大而不断减小. 通过数据拟合可得

$$D_u = -\rho_{frp} + 0.7 \quad (21)$$

研究表明, 无论加固的 FRP 筋嵌入角度如何, 对不同位置的同一根 FRP 筋, 其应变沿高度是不均匀分布的, 如图 13 所示. 从图中可以看出, 在不同荷载等级下, 梁中部 FRP 筋测点的应变值较大, 梁上下两端 FRP

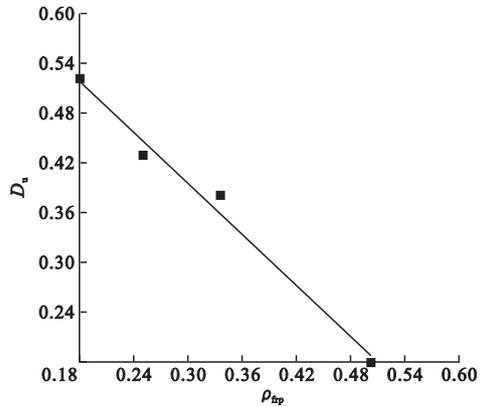


图 12 D_u 与 ρ_{frp} 之间的关系曲线

Fig. 12 Relationship curve of D_u and ρ_{frp}

筋测点的应变值较小. 笔者将加固梁斜截面出现裂缝后, FRP 筋开始发挥抗剪作用时, 不同荷载等级下的 FRP 筋沿高度的应变分布曲线与横轴所围成的面积 A'_{cf} 与同一荷载等级下 FRP 筋测点在任意高度时达到峰值应变与横轴所围成的面积 A_{cf} 进行比较, 偏于安全, 得到 FRP 筋应变折减系数取 $D_f = 0.6$.

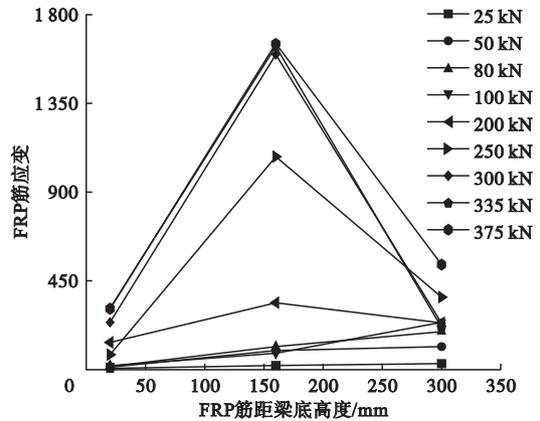


图 13 FRP 筋沿梁高度的应变分布

Fig. 13 Stain distribution of FRP bars along the height of the beam

4.2 公式验证

笔者总结了国内外已有的、发生剪切破坏模式的试验数据, 将试验值与笔者建立的内嵌 FRP 筋加固混凝土梁的抗剪承载力的计算值进行对比, 如表 5 所示. 由表可以看出, 在发生剪切破坏的基础上, 试验值与计算值比值的平均值为 1.000, 均方差为 0.047 4, 变异系数为 4.74%, 可见两者吻合较好.

表5 加固梁抗剪承载力计算值与试验值比较

Table 5 Comparison between calculated values and test values of shear bearing capacity

试验	试件编号	FRP 种类 筋/板	FRP 间 距/mm	嵌贴角 度/(°)	试验值 V_{exp}/kN	计算值 V_{cal}/kN	破坏形式	V_{exp}/V_{cal}
	BS1	—	—	—	233	263.1	剪切破坏	0.886
	BS2	—	—	—	325	328.86	剪切破坏	0.988
笔者	BF3	CFRP 筋	150	90	470	500.46	剪切破坏	0.939
	BF6	BFRP 筋	200	60	400	376.51	剪切破坏	1.062
	BF7	CFRP 筋	200	45	398	391.03	剪切破坏	1.018
文献[17]	BS	—	—	—	162	156.82	剪切破坏	1.033
	BF2	GFRP 筋	300	60	225	226.11	剪切破坏	0.995
文献[18]	BC	—	—	—	90	87	剪切破坏	1.034
	N320S	CFRP 板	320	90	117	110	剪切 + 粘结	1.064
	L0	—	—	—	55	56	剪切	0.982
文献[19]	L1	CFRP 板	235	90	75	71	剪切 + 剥离	1.056
	L2	CFRP 板	155	90	84	82	剪切	1.024
文献[20]	G-G8S18C20	GFRP 筋	150	90	111.8	113.4	剪压 + 剥离	0.986
	G-G8S20C20	GFRP 筋	150	90	109.5	112.6	剪压 + 剥离	0.972
文献[11]	FPT3	CFRP 筋	160	45	142.4	141.9	剪压	1.004
	TPT4	CFRP 筋	160	45	135.4	140.5	剪压	0.964

5 结 论

(1) FRP 筋间距的不同会影响试件的破坏形态,建议加固时 FRP 筋间距宜为 200 mm。

(2) 在相同荷载作用下,试件加固区内离加载点不同位置处的 FRP 筋的应变以及同一根 FRP 筋不同位置的应变值是不相同的。

(3) 对于内嵌 FRP 筋加固混凝土梁试件,其斜截面经历了 2 次应力重分布,分别是在斜裂缝出现时和箍筋屈服时。

(4) 在实际工程中,应根据加固目的不同合理地选取 FRP 筋嵌入角度。若从提高加固构件的抗剪承载力方向考虑,FRP 筋嵌入角度宜为 60°。若考虑提高加固构件的变形性能,则 FRP 筋嵌入角度宜为 45°。

(5) 内嵌 FRP 筋加固技术能够提高试件的整体刚度和抗剪承载力,有效地延缓斜裂缝的开展,减小斜裂缝的宽度,提高混凝土骨料之间的咬合作用,从而改善试件的受力情况及变形能力。

(6) 采用拱形桁架模型,并引入 FRP 筋利用率系数和 FRP 筋应变分布折减系数,推导了加固梁在剪切破坏时的斜截面抗剪承载力计算公式,并与国内外已有试验结果进行了对比,两者吻合较好。

参考文献

- [1] KOCALOZ S, SAMARANAYAKE V A, NANNI A. Tensile characterization of glass FRP bars [J]. Composites, 2005, 36: 127-134.
- [2] 薛伟辰. 纤维塑料筋混凝土研究新进展[J]. 中国科学基金, 2004, 18(1): 10-13. (XUE Weichen. Progress in studies on FRP re-bars reinforced concrete [J]. Bulletin of national natural science foundation of China, 2004, 18(1): 10-13.)
- [3] 曹国辉, 汪子鹏, 王志宏, 等. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2011, 20(4): 1-5. (CAO Guohui, WANG Zipeng, WANG Zhihong, et al. Study on application of fiber reinforced plastic in civil engineering [J]. Journal of Hunan city university (natural science), 2011, 20(4): 1-5.)
- [4] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.

- (YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China civil engineering journal, 2006, 39(3): 24 - 36.)
- [5] 李俊峰, 刘景园. 加固工程中常用 FRP 材料性能比较及研究现状[J]. 山西建筑, 2008, 34(4): 172 - 173.
(LI Junfeng, LIU Jingyuan. Properties comparison of four FRP materials and the applications of them in reinforcement of civil engineering [J]. Shanxi architecture, 2008, 34(4): 172 - 173.)
- [6] LORENZIS L D, TENG J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures [J]. Composites(part B), 2007, 38: 119 - 143.
- [7] 王韬, 姚谏. 表层嵌贴 FRP 加固 RC 梁新技术[J]. 科技通报, 2005, 21(6): 735 - 740.
(WANG Tao, YAO Jian. New technology of strengthening of RC beams with near surface mounted FRP[J]. Bulletin of science and technology, 2005, 21(6): 735 - 740.)
- [8] JALALI M, SHARBATDAR M K, CHEN J F, et al. Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars[J]. Construction and building materials, 2012, 36: 990 - 1000.
- [9] RIZZO A, LORENZIS L D. Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement [J]. Construction and building materials, 2009, 23(4): 1555 - 1567.
- [10] 张雪丽. 内嵌碳纤维增强塑料板条抗剪加固混凝土梁试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2006.
(ZHANG Xueli. Experimental study on reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted CFRP [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2006.)
- [11] AI-MAHMOUD F, CASTEL A, MINH T Q, et al. Reinforced concrete beams strengthened with nsm CFRP rods in shear[J]. Advances in structural engineering, 2015, 18(10): 1563 - 1574.
- [12] MOFIDI A, CHAALLAL O, CHENG L, et al. Investigation of near surface-mounted method for shear rehabilitation of reinforced concrete beams using fiber reinforced-polymer composites[J]. Journal of composites for construction, 2016, 20(2): 106.
- [13] 张云峰, 韩非飞, 陈佳楠. FRP 混凝土连续梁延性的试验分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2015, 35(1): 50 - 53.
(ZHANG Yunfeng, HAN Feifei, CHEN Jinnan. Experimental analysis of ductility of FRP concrete continuous beam ductility [J]. Journal of Liaoning shihua university, 2015, 35(1): 50 - 53.)
- [14] 张鹏, 唐小林, 郑文静. 纤维塑料筋混凝土梁延性分析的能量表示法[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(8): 49 - 51.
(ZHANG Peng, TANG Xiaolin, ZHENG Wenjing. An energy expression method of ductility analysis of concrete beam reinforced with fiber reinforced plastics bars [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2005, 27(8): 49 - 51.)
- [15] 汪晰. 嵌入式碳纤维板条增强混凝土梁受弯与受剪承载力研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
(WANG Xi. Study on flexural and shear strengthening of RC beams with near-surface-mounted FRP laminates [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.)
- [16] 史庆轩, 王朋, 王秋维. 桁架-拱模型用于钢筋混凝土梁的受剪承载力计算分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(4): 7 - 12.
(SHI Qingxuan, WANG Peng, WANG Qiwei. Shear capacity calculation analysis of reinforced concrete beams based on truss-arch model [J]. Journal of civil, architectural and environmental engineering, 2013(4): 7 - 12.)
- [17] 刘国瑞. 表面内嵌 FRP 加固混凝土梁抗剪性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
(LIU Guorui. Study on shear behavior of concrete beams strengthened with near-surface-mounted FRP [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [18] 贾庆扉. 混凝土梁表层嵌贴 CFRP 板条的抗剪加固试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
(JIA Qingfei. Experimental study on RC beams shear strengthened with NSM strips [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [19] 陈莉. 嵌贴 FRP 板材加固钢筋混凝土梁的试验研究[D]. 济南: 济南大学, 2009.
(CHEN Li. Experimental study on RC beams shear strengthened with NSM laminates [D]. Jinan: Jinan University, 2009.)
- [20] 张延年, 付丽, 李朝阳. 不同表面特征 GFRP 筋加固钢筋混凝土 T 形梁抗剪试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(2): 90 - 96.
(ZHANG Yannian, FU Li, LI Chaoyang. Experimental study on shear of T-shaped concrete beams reinforced with different surface characteristics of GFRP bars [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2015, 37(2): 90 - 96.)