

文章编号 1000-5013(2002) 03-0267-05

# 玻璃纤维增强塑料加固砼梁的抗剪试验

黄奕辉 蔡志鸿

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

**摘要** 通过对 15 根玻璃纤维增强塑料(GFRP)片材加固混凝土梁的抗剪试验, 研究 GFRP 片材的形状、加固方式、加固率, 以及梁的剪跨比对加固梁抗剪承载力和破坏模式的影响. 文中采用拱形桁架模型解释 GFRP 加固梁的剪切破坏机理, 提出 GFRP 片材加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力的计算公式.

**关键词** 混凝土梁, 玻璃纤维增强塑料, 抗剪性能加固, 受剪承载力

**中图分类号** TU 377. 903

**文献标识码** A

所谓纤维增强塑料(FRP), 就是把高分子材料织物浸润在合成树脂基质中, 待基质固化成型. 从材料种类上划分, 主要有碳纤维增强塑料(CFRP)、玻璃纤维增强塑料(GFRP)和芳纶纤维增强塑料(AFRP). FRP 材料具有能对结构的不同部位、不同环境下的构件进行施工. 其施工工期短, 加固后结构外观和基本尺寸没有明显变化, 加固效果明显<sup>[1-3]</sup>. 本文采用的 FRP 片材是国产的玻璃纤维增强塑料(GFRP), 对 15 根梁(包括 13 根 GFRP 片材抗剪加固混凝土梁和 2 根对比梁)进行了抗剪性能试验研究. 其主要参数有 GFRP 片材形状、加固方式、GFRP 片材厚度、梁剪跨比等.

## 1 抗剪性能试验

### 1.1 材料与试件

混凝土采用福建产普通硅酸盐水泥, 其立方体强度 $f_{cu} = 24.5 \text{ MPa}$ , 轴心抗压强度 $f_{ck} = 12.4 \text{ MPa}$ , 抗拉强度 $f_{tk} = 1.13 \text{ MPa}$ , 弹性模量 $E_c = 25.3 \text{ GPa}$ . 钢筋和 GFRP 片材的力学性能, 如表 1 所示. 表中,  $f_y$  为屈服强度,  $f_s$  为极限强度,  $E$  为弹性模量,  $G$  为剪切模量. 试件模型, 如图 1 所示.

### 1.2 测试方法及仪器设备

试验采用反力架倒挂液压千斤顶, 通过分配梁实现两点加载. 加载采用分级加载的形式, 用压力传感器控制每级荷载; 采用电阻应变仪和百分表, 分别测量应变和位移(试验测量的主要内容, 有剪跨区内 GFRP 片材应变、梁的跨中截面的竖向位移). 在试验过程中, 用刻度放大

收稿日期 2002-01-17

作者简介 黄奕辉(1962-), 男, 副教授

基金项目 福建省科学委员会工业基金资助项目; 福建省建设委员会科研基金资助项目

表 1 钢筋和 GFRP 片材力学性能

材料	$f_y$ / MPa	$f_s$ / MPa	$E$ / GPa	$G$ / GPa
$\cong 18$	353.0	532.0	210.0	—
$\cong 8$	283.0	471.0	210.0	—
$\cong 6$	251.0	454.0	210.0	—
GFRP 片材	—	230.0	11.0	—
粘胶层	—	—	5.7	2.05

镜观察裂缝宽度,并记录裂缝的开展情况。

1.3 试验结果分析

试验的主要结果,如表 2 所示。表 2 中, $\lambda$  为剪跨比,  $\rho_{\text{GFRP}}$  为 GFRP 片材加固率,  $P_{V1}$  为未加固梁的极限承载力,  $P_{V2}$  为加固后梁的极限承载力,  $\Delta = (P_{V2} - P_{V1}) / P_{V1}$ 。图 2, 3, 4 分别为 VL-04 的应变片布置图、荷载( $f$ ) - 跨中位移( $d$ ) 图和 GFRP 片材荷载( $f$ ) - 应变( $\sigma$ ) 图。

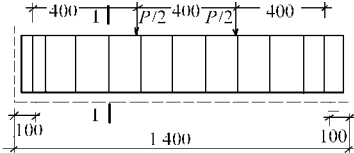


图 1 试件模型图

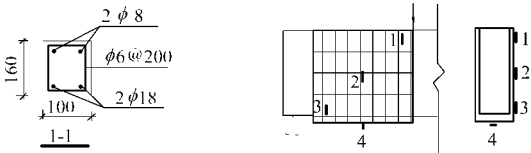


图 2 VL-04 应变片布置图

表 2 试件参数及试验结果

编 号	$\lambda$	$\rho_{\text{GFRP}} / (\%)$	加固方式	破坏形式	$P_{V1} / \text{kN}$	$P_{V2} / \text{kN}$	$\Delta$
VL-01	2.4	—	—	剪弯区剪压破坏	55.1	—	—
VL-02	1.6	—	—	剪弯区斜压破坏	61.6	—	—
VL-03	2.4	2	单层 I 形片状	片材粘结剥离破坏	55.1	64.8	0.18
VL-04	2.4	2	单层 U 形片状	片材粘结剥离破坏	55.1	67.5	0.22
VL-05	2.4	2	单层封闭片状	混凝土前压破坏	55.1	74.1	0.35
VL-06	2.4	4	双层 U 形片状	片材粘结剥离破坏	55.1	67.3	0.22
VL-07	1.6	2	单层 I 形片状	片材粘结剥离破坏	61.6	70.3	0.14
VL-08	1.6	2	单层 U 形片状	片材粘结剥离破坏	61.6	74.5	0.21
VL-09	1.6	2	单层封闭片状	混凝土剪压破坏	61.6	78.1	0.27
VL-10	2.4	1	单层 I 形片状	片材粘结剥离破坏	55.6	61.3	0.11
VL-11	2.4	1	单层 U 形片状	片材粘结剥离破坏	55.1	64.4	0.17
VL-12	2.4	1	单层封闭条状	片材断裂破坏	55.1	72.6	0.32
VL-13	1.6	1	单层 I 形片状	片材粘结剥离破坏	61.6	66.7	0.08
VL-14	1.6	1	单层 U 形片状	片材粘结剥离破坏	61.6	69.6	0.13
VL-15	1.6	1	单层封闭条状	片材断裂破坏	61.6	75.1	0.22

1.3.1 梁的破坏形态 VL-01 和 VL-02 分别是剪跨比为 2.4 和 1.6 的对比梁。两根梁均是由于发生从支座延伸到加载点的斜裂缝,导致梁产生斜截面剪切破坏。与对比梁相比,加固梁的极限荷载提高的幅度在 8% ~ 35% 之间。从图 3 可以看出,加固梁的刚度也得到了提高。当荷载很小且混凝土未开裂之前,剪力主要由混凝土承担,箍筋的应力很小。此时,GFRP 片材各点的应变基本按线性增加,且数值都很小。这说明在裂缝出现之前,GFRP 片材承担的剪力很小。随着荷载增加,剪跨区内支座附近处梁底开始出现垂直方向的微细裂缝,GFRP 的应

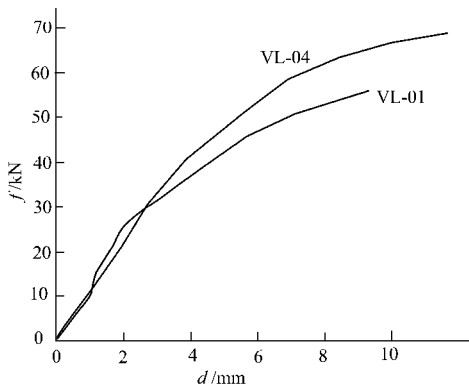


图 3 VL-04 荷载-跨中位移图

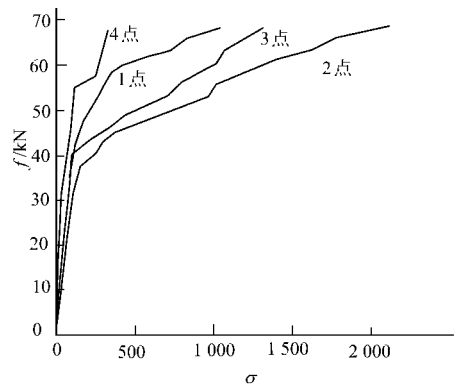


图 4 GFRP 片材荷载-应变图

力有所增加, GFRP 片材应变曲线斜率开始发生变化. 但剪力仍主要由混凝土承担. 继续增大荷载, 剪跨区内的裂缝断续发展形成了斜裂缝, GFRP 片材的应变开始较快地增大, GFRP 片材承担的剪应力开始迅速增大. 对于片状中固的梁, 从 GFRP 片材表面出现的沿斜裂缝颜色发白的迹象, 可以判断斜裂缝的角度 ( $\theta$  在  $35 \sim 50$  之间). 随着荷载的继续增加, GFRP 片材应变增大逐步加快, 跨中位移也迅速发展, 直到梁达到极限破坏状态. GFRP 片材的破坏形态, 有粘结剥离破坏(混凝土被拉下)和断裂破坏两种.

1.3.2 各主要因素对加固效果的影响 (1) 剪跨比对加固效果的影响. 对大剪跨比、出现斜拉和剪压破坏的梁破坏时, 梁出现主拉斜裂缝, GFRP 片材承担剪力可减小裂缝的宽度, 加固效果好. 对小剪跨比、出现斜压破坏的梁(试验中剪跨比为 1.6 的梁出现斜压破坏), 抗剪承载力主要取决于混凝土的强度. 破坏时, 剪压区混凝土被分割成多个受压混凝土斜柱. 斜柱受压导致混凝土膨胀, 加之 GFRP 片材上下端部的锚固剪应力, 导致片材较早发生剥离. 因此, 加固效果较差. (2) GFRP 片材粘贴方式对加固效果的影响. 对于 I 形、U 形加固方式, 加固梁的破坏均是由于 GFRP 片材剥离破坏, 而丧失承担剪力的能力, 导致混凝土梁发生剪切破坏. 对于封闭加固方式, 当加固率较小时, 可能发生 GFRP 片材断裂破坏(如 VL-15); 而当加固率较大时, 破坏形式为剪压区混凝土压碎的剪切破坏. 无论是哪种方式, 破坏时 GFRP 片材的应变均未达到极限拉应变. 破坏时 GFRP 片材的应变越大, 其抗剪承载力提高的幅度越大. 从加固的效果看, 封闭加固效果最好, U 形加固次之, I 形加固最差. (3) 片材形状对加固效果的影响. 对于 I 形、U 形加固方式, 破坏以片材粘结剥离破坏为主<sup>[8]</sup>. 片状的锚固区比条状大, 所以加固效果较好. 对于封闭加固方式, 尽管破坏以片材断裂或剪压区混凝土压碎破坏为主, 但片状较条状更有效地约束斜裂缝的生成和开展. 所以, 其加固效果效好. (4) 加固层数对加固效果的影响. 由于 GFRP 的强度较高, 破坏时片材的应力远未达到材料极强度, 而且较大的加固率(层数)意味着片材的刚度较大, 反而更容易发生剥离破坏. 所以, 加固效果不一定随加固率(层数)的提高而提高.

## 2 GFRP 加固混凝土梁的承载力分析

图 4 为采用 GFRP 片材抗剪加固的混凝土梁. 本文不考虑 GFRP 片材对混凝土和箍筋的抗剪性能的影响, 则加固梁的抗剪承载力  $V_u$  可以为由三部分组成, 即

$$V_u = V_c V_s V_{gf}. \tag{1}$$

在式(1)中,  $V_c$  是混凝土承担的剪力,  $V_s$  是混凝土梁中箍筋承担的剪力; 按《GBJ 10-89 混凝土结构设计规范》<sup>[6]</sup> 公式计算,  $V_{gf}$  是 GFRP 片材承担的剪力按下式计算, 即

$$V_{gf} = \rho_{gf} E_{gf} \epsilon_{gf,e} b h_{gf}, \tag{2}$$

式中  $\rho_{gf}$  为 GFRP 片材加固率. 条状加固时,  $\rho_{gf} = 2w_{gf}t_{gf}/b(s_{gf} + w_{gf})$ , 而片状加固时,  $\rho_{gf} = 2t_{gf}/b$ . 其中  $w_{gf}$  为 GFRP 片材条带宽度,  $b$  为梁截面宽度,  $t_{gf}$  为 GFRP 片材厚度,  $s_{gf}$  为 GFRP 片材条带净间距,  $E_{gf}$  为 GFRP 片材的弹性模量. 而  $\epsilon_{gf,e}$  为达到受剪承载力极限状态时, GFRP 片材的有效应变,  $h_{gf}$  为 GFRP 片材在梁高度方向的长度. 不同的加固方式, GFRP 片材的有效应变不同. 为了消除材料的影响, 引入 GFRP 片材强度发挥系数为

$$\gamma = \epsilon_{gf,u} / \epsilon_{gf,e}, \tag{3}$$

式中  $\epsilon_{gf,u}$  为 GFRP 的极限应变. 于是, 式(2)为

$$V_{gf} = \gamma \rho_{gf} E_{gf} \epsilon_{gf,e} d h_{gf}. \tag{4}$$

由式(4)可见, 决定 GFRP 片材剪力  $V_{gf}$  的是, 加固梁剪切破坏时片材的有效应变  $\epsilon_{gf,e}$ , 也即是材料的强度发挥系数  $\gamma$ . 表 3 列出了本文试验 GFRP 片材有效应变的实测值, 剪跨比  $\lambda$ , 以及强度发挥系数  $\gamma$  (GFRP 片材的极限应变按 0.02 计算).

表 3 GFRP 片材有效应变实测值和强度发挥系数

编 号	加固方式	$\rho_{gf}/$ (%)	$\lambda$	$\epsilon_{gf,e} \times$ $10^{-6}$	$\gamma$ (%)	编 号	加固方式	$\rho_{gf}/$ (%)	$\lambda$	$\epsilon_{gf,e} \times$ $10^{-6}$	$\gamma$ (%)
VL-03	单层 I 形片状	2	2.4	1 685	8.4	VL-10	单层 I 形片状	1	2.4	2 155	10.8
VL-04	单层 U 形片状	2	2.4	2 130	10.7	VL-11	单层 U 形片状	1	2.4	3 630	18.2
VL-05	单层封闭片状	2	2.4	3 610	18.1	VL-12	单层封闭条状	1	2.4	6 514	32.6
VL-06	双层 U 形片状	4	2.4	1 260	6.3	VL-13	单层 I 形片状	1	1.6	1 731	8.7
VL-07	单层 I 形片状	2	1.6	1 613	8.1	VL-14	单层 U 形片状	1	1.6	2 979	14.9
VL-08	单层 U 形片状	2	1.6	2 409	12.0	VL-15	单层封闭条状	1	1.6	4 667	23.3
VL-09	单层封闭片状	2	1.6	3 115	15.6						

加固梁在极限破坏状态时, 影响 GFRP 片材有效应变的因素复杂多样. 例如剪切斜裂缝的形成、位置、大小, 以及角度等都具有一定的随机性. 因此, 无法采用精确的理论公式计算加固梁达到极限状态时, GFRP 片材的有效应变. 本文参照《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程(征求意见稿)》中斜截面受剪承载力计算的形式, 结合试验数据, 拟合 GFRP 片材强度发挥系数的计算公式. 本文建议当采用 I 形加固时,  $\gamma = 0.059 + 0.016\lambda$ ; 当采用 U 形加固时,  $\gamma = 0.116 + 0.012\lambda$ ; 当采用封闭加固时,  $\gamma = 0.078 + 0.073\lambda$ .

3 结束语

由于影响梁抗剪承载力的因素很多, 同时具有一定的随机性, 如要应用于工程加固设计, 尚需更多的试验研究. 根据对本文试验结果的分析, 得到 4 点结论: (1) GFRP 片材抗剪加固

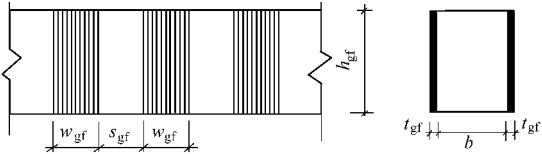


图 4 梁加固截面图

混凝土梁,不但可以明显地提高加固梁的抗剪承载力,还可以有效的提高的刚度,减小跨中位移,并延缓剪切斜裂缝的开展和延伸。(2) GFRP 片材提高梁的抗剪承载力的作用机理与箍筋类似。加固梁的抗剪承载力是由剪压区混凝土、箍筋和 GFRP 片材三部分组成。(3) 对剪跨比大、配箍率低的梁加固效果较好。加固方式应优先采用缠绕片状或条状、U 形片状或条状次之,而 I 形片状或条状尽量不要采用,除非片材端部有可靠的锚固。实际工程中,缠绕方式较难实现。而 U 形片状效果好,且容易实现。若采用条状加固,可采用压条或螺栓锚固。(4) 对于普通钢混凝土梁,箍筋数量增加到一定程度时,剪压区混凝土破坏导致抗剪承载力无法随箍筋数量的增加而增大。因此,《GBJ 10~89 混凝土结构设计规范》对梁的最大抗剪承载力做了限制。当采用 GFRP 片材加固混凝土梁时,也应满足这个限制。

### 参 考 文 献

- 1 欧阳煜. 玻璃纤维(GFRP)片材加固混凝土框架结构的性能研究[D]: [学位论文]. 杭州: 浙江大学土木工程系, 2001. 70~87
- 2 肖建庄, 秦灿灿, 朱伯龙. 钢筋混凝土梁抗剪加固试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1999, 27(4): 407~411
- 3 吴 刚, 安 琳, 吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗剪加固的实验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 16~20
- 4 欧阳煜, 黄奕辉. 粘钢加固 RC 梁的锚固剪应力参数分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 282~286
- 5 中华人民共和国城乡建设环境保护部编. GBJ 10~89 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 43~57

## Testing the Shear Resistance of Concrete Beam Strengthened with Glassfibre Reinforced Plastics

Huang Yihui   Cai Zhihong

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** The shear resistance of fifteen RC beams strengthened with the sheets of glassfibre reinforced plastics (GFRP) is tested. The shape of GFRP sheet, the form and the rate of strengthening are studied; the effect of shear span ratio of the beam on the shear bearing force and the rupture pattern of the strengthened beam are also studied. An arched truss model is adopted to explain the shear rupture mechanism of the beam strengthened with GFRP; and a formula is put forward for calculating shear bearing force of the RC beam strengthened with GFRP sheet.

**Keywords** concrete beam, glassfibre reinforced plastics, strengthening of shear performance, shear bearing force