

## 碳纤维板加固梁的理论计算与试验分析

叶 良,夏建中

(浙江科技学院 建筑工程学院, 杭州 310023)

**摘 要:** 通过计算内嵌碳纤维增强复合材料(CFRP)抗弯加固钢筋混凝土构件开裂时的开裂荷载和受拉钢筋屈服时的屈服荷载,并对加固梁和对比梁进行了静力加载试验,结果表明该计算结果和试验基本吻合,可以用来分析碳纤维板加固梁的效果。混凝土梁经碳纤维板加固后,开裂荷载和屈服荷载都有一定程度的提高,内嵌碳纤维板能提高梁的极限承载力,是一种有效的加固方法。

**关键词:** 碳纤维增强复合材料;加固梁;理论计算;试验分析

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2014)03-0215-04

## Theoretical calculation and experimental analysis on beam strengthening with CFRP plate

YE Liang, XIA Jianzhong

(School of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Science and  
Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** By calculating the load of the concrete splitting and steel yielding on the beams with strengthened carbon fibre reinforced plastics (CFRP) plate, static load tests are carried on between the strengthened beam and the normal beam. The results are in accordance with the theory and show the effect of the beams strengthened CFRP plate. The concrete splitting load and the ultimate bearing capacity of the beam strengthened are enhanced in a certain degree compared with the normal beam. Thus it is an effective method to use the CFRP plate to strengthen a beam.

**Key words:** carbon fibre reinforced plastics; strengthening beam; theoretical calculation; experimental analysis

---

收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 浙江省科技计划项目(2005C31067)

作者简介: 叶 良(1973— ),男,浙江省嘉兴人,副教授,硕士,主要从事建筑结构的教学和研究。

碳纤维增强复合材料补强加固技术由于具有重量轻、强度高、耐腐蚀、施工便捷、几乎不改变构件原尺寸等优点而成为一种新兴的技术含量高的建筑物补强加固方法<sup>[1-2]</sup>。碳纤维表层内嵌加固方法是胶黏剂将碳纤维增强复合材料(CFRP)板材嵌入钢筋混凝土构件表面的凹槽中(事先用切割机械开槽),从而改善构件的力学性能。采用碳纤维表层内嵌加固方法,处理混凝土的工作量会大大减少,同时,又能提高碳纤维板材的防火性能、抗冲击性和耐久性能<sup>[3-5]</sup>。本研究计算了内嵌 CFRP 抗弯加固钢筋混凝土构件开裂时的开裂荷载和受拉钢筋屈服时的屈服荷载,并对加固梁和对比梁进行了静载试验。

## 1 算例设计

### 1.1 简支梁

设计 2 根矩形截面简支梁,编号为 L1、L2,截面尺寸与配筋如图 1 所示。其中,设计配筋率 0.53%;纵向钢筋强度 HPB335;混凝土设计强度 C20。L1 作为对比梁不进行加固,L2 采用 CFRP 板条加固,加固方式为将 2 层厚 1.5 mm、宽 50 mm 的 CFRP 板条嵌入梁底的凹槽中。

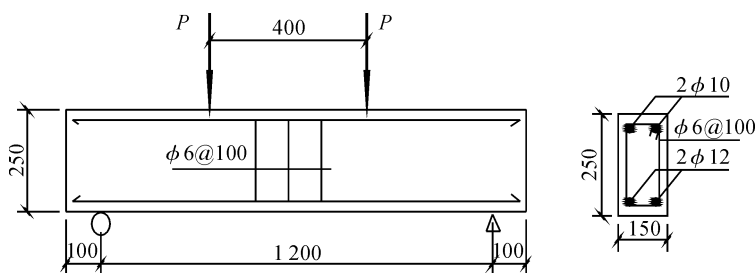


图 1 梁的示意图

Fig. 1 Diagram of beam

### 1.2 板条的性能指标

抗拉强度 2 860 MPa,弹性模量 168 GPa,伸长率 1.75%,泊松比 0.2。

### 1.3 黏胶材料性能指标

黏胶材料采用专用结构胶。其压缩强度 84.6 MPa,拉伸强度 36.4 MPa,黏接拉伸强度 26.9 MPa,拉伸剪切强度 19.8 MPa,弯曲强度 59.8 MPa,弹性模量 3.35 GPa。

## 2 梁的理论分析

### 2.1 梁理论分析的基本假定

- 1) 平截面假定;
- 2) 无滑移假定:FRP 能可靠黏结到混凝土上并无相对滑移;
- 3) 根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》选取混凝土、钢筋的应力-应变关系,FRP 为线弹性材料。

由于梁实际破坏时的状态比较复杂,这里仅计算构件开裂时的开裂荷载和受拉钢筋屈服时的屈服荷载。

### 2.2 开裂荷载计算

混凝土梁的受拉区在荷载的作用下首先出现塑性变形,其应力图形大部分呈均匀分布,拉应力达到抗拉强度,但由于混凝土抗压强度很高,这时的受压区最大应力远小于抗压强度,塑性发展不明显,应力图形仍接近于三角形。因此,在计算受拉区混凝土开裂临界状态的开裂荷载时,受拉区的混凝土应力分布取矩形,受压区的混凝土应力分布取三角形,根据平截面假定条件得:

$$\epsilon_c = x_0 \epsilon_{tu} / (h - x_0) \leq 0.002,$$

$$\sigma_c = f_c [1 - (1 - \epsilon_c / \epsilon_0)^2]$$

受压区混凝土合力  $C$  可以通过对受压区积分求得:

$$\begin{aligned}
C &= \int_0^{x_0} \sigma_{cx} b dx = f_c b x_0 [1 - \epsilon_c / (3\epsilon_0)] \epsilon_c / \epsilon_0 \\
\epsilon'_s &= (x_0 - a'_s) \epsilon_{tu} / (h - x_0), \sigma'_s = E_s \epsilon'_s \\
\epsilon_s &= (h_0 - x_0) \epsilon_{tu} / (h - x_0), \sigma_s = E_s \epsilon_s \\
\epsilon_f &= (h_f - x_0) \epsilon_{tu} / (h - x_0), \sigma_f = E_f \epsilon_f
\end{aligned}$$

平衡条件:

$$\begin{cases} C + \sigma'_s A'_s = \sigma_s A_s + \sigma_f A_f + f_{tu} b (h - x_0) \\ M_{cr} = f_{tu} b (h - x_0) (h/2 + x_0/6) + \sigma_s A_s (h_0 - x_0/3) + \sigma_f A_f (h_f - x_0/3) + \sigma'_s A'_s (x_0/3 - a'_s) \end{cases}$$

式中:  $M_{cr}$ —混凝土梁开裂弯矩;  $x_0$ —即将开裂时受压区真实高度;  $\epsilon_c$ —受压边缘混凝土应变;  $\epsilon_0$ —混凝土压应力达到轴心抗压强度时的混凝土压应变;  $\epsilon_s$ —受拉钢筋应变;  $\epsilon'_s$ —受压钢筋应变;  $\epsilon_f$ —CFRP 板条的应变;  $b$ —截面宽度;  $h$ —高度;  $h_0$ —截面有效高度;  $h_f$ —CFRP 板条距离受压区边缘的距离;  $\sigma_c$ —受压边缘混凝土应力;  $f_c$ —混凝土抗压强度设计值;  $\sigma_{cx}$ —受压区距离中和轴为  $x$  的混凝土压应力;  $\sigma_s$ —受拉钢筋应力;  $\sigma'_s$ —受压钢筋应力;  $\sigma_f$ —CFRP 板条应力;  $f_{tu}$ —混凝土极限抗拉强度;  $\epsilon_{tu}$ —混凝土极限拉应变;  $a'_s$ —受压区钢筋重心距离受压混凝土边缘距离。根据轴向力平衡可得受压区真实高度  $x_0$ , 进而可求得开裂弯矩值和开裂荷载。经计算, L1 的开裂荷载为 20 kN, L2 的开裂荷载为 22 kN, 加固梁相对于对比梁开裂荷载提高了 10%。

### 2.3 屈服荷载计算

内嵌 CFRP 加固板条的混凝土梁破坏分为黏结破坏、弯曲破坏和剪切破坏。本研究中的梁主要反映出弯曲破坏的特点, 这里仅就弯曲破坏时的极限荷载进行分析。由于内嵌 CFRP 板条的混凝土梁中同时存在拉压钢筋和 CFRP 板条, 在研究加固梁受弯破坏时, 需要同时考虑钢筋屈服、混凝土压碎及 CFRP 板条拉断 3 种情况。文献[4]对于单筋梁的弯曲破坏极限承载力做了相关分析计算。对于双筋梁的弯曲破坏, 可以采用类似的研究方法, 相关分析如下。

根据梁破坏时的特征不同, 可分为 3 种极限破坏形态:

- 1) 钢筋屈服前混凝土压碎, CFRP 未拉断 ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ ;  $\epsilon_s < \epsilon_y$ ;  $\epsilon_f < \epsilon_{fu}$ );
- 2) 钢筋屈服后混凝土压碎, CFRP 未拉断 ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ ;  $\epsilon_s = \epsilon_y$ ;  $\epsilon_f < \epsilon_{fu}$ );
- 3) 钢筋屈服后 FRP 拉断, 混凝土未压碎 ( $\epsilon_c < \epsilon_{cu}$ ;  $\epsilon_s = \epsilon_y$ ;  $\epsilon_f = \epsilon_{fu}$ )。

$\epsilon_{cu}$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_{fu}$  分别为混凝土极限压应变、受拉钢筋屈服应变和 CFRP 的极限拉应变, 其他符号同上。上述 2 种临界破坏及 3 种破坏状态下的受压钢筋的应力可以根据平截面假定求出, 且钢筋的最大压应力低于抗压强度设计值。

假定试验梁的破坏特征为钢筋屈服后混凝土压碎, CFRP 板条未拉断, 在这种破坏极限状态下:

$$\begin{aligned}
\epsilon_c &= \epsilon_{cu}, \sigma_c = f_c \\
\epsilon'_s &= (x_0 - a'_s) \epsilon_{cu} / x_0, \sigma'_s = E_s \epsilon'_s \leq f'_y \\
\epsilon_s &= \epsilon_y, \sigma_s = E_s \epsilon_y = f_y \\
\epsilon_f &= (h_f - x_0) \epsilon_{cu} / x_0 \leq \epsilon_{fu}, \sigma_f = E_f \epsilon_f
\end{aligned}$$

平衡条件:

$$\begin{cases} \alpha_1 f_c b x + \sigma'_s A'_s = f_y A_s + \sigma_f A_f \\ M_u = f_y A_s (h_0 - x/2) + \sigma_f A_f (h_f - x/2) + \sigma'_s A'_s (x/2 - a'_s) \end{cases}$$

式中:  $\alpha_1 = 1.0$ ;  $M_u$ —混凝土梁极限弯矩;  $x$ —相对受压区高度,  $x = 0.8x_0$ ;  $f_y$ —钢筋抗拉;  $f'_y$ —抗压强度设计值, 其他符号同上。

根据轴向力平衡可求得相对受压区高度  $x$ , 进而可以求解出极限弯矩值和极限荷载。经计算, L1 的屈服荷载为 76 kN, L2 的屈服荷载为 87 kN, 加固梁相对于对比梁屈服荷载提高了 14%。

### 3 试验结果及分析

为了复核以上的计算结果, 进行了加载试验。利用 200 kN 电液伺服压力机进行 2 点加载。L1(对比

梁)每级按 2 kN 分级加载,L2(加固梁)按 4 kN 分级加载,得到开裂荷载和屈服荷载,其数据和分析结果如表 1 所示。

表 1 试验结果与理论计算值对比  
Table 1 Comparison between experimental results and theoretical analyses

梁编号	开裂荷载			屈服荷载		
	计算值/kN	试验值/kN	计算值/试验值	计算值/kN	试验值/kN	计算值/试验值
L1	20	22	0.91	76	72	1.06
L2	22	25	0.92	87	81	1.07
L2 与 L1 相比 承载力提高率/%	10	14	—	14	12.5	—

表 1 列出了 L1、L2 的静载试验结果。所有试验梁符合理论分析的基本假定,每根梁的受拉钢筋先屈服,然后受压区混凝土被压碎,而碳纤维板条均未被拉断。从表 1 中可以看出,L2 的开裂荷载相对于 L1 提高了 14%,而屈服荷载相对于 L1 提高了 12.5%。这是由于刚开始加载时,CFRP 会抑制混凝土的变形,并推迟混凝土的开裂,从而提高了加固梁的开裂荷载。因此,采用碳纤维板嵌入加固能不同程度地提高梁的承载力。

4 结 论

- 1)试验结果中,L1、L2 的开裂荷载和屈服荷载与理论计算值的差值在 10%以内,表明了本研究的算法和试验基本吻合,可以用来分析碳纤维板加固梁的效果。
- 2)通过与未加固的梁对比,用碳纤维板加固的混凝土梁,其开裂荷载和屈服荷载都有一定程度的提高,表明在梁构件中内嵌碳纤维板能提高梁的极限承载力,是一种切实有效的加固方法。

参考文献:

[1] 卢再光. CFRP 加固钢筋混凝土梁承载力的计算方法和仿真[D]. 兰州:兰州交通大学,2013.

[2] 王振华. 纤维增强复合材料(FRP)加固混凝土柱的研究综述[J]. 南京工程学院学报:自然科学版,2012,10(2): 19-24.

[3] 岳清瑞,李庆伟,杨勇新. 纤维增强复合材料嵌入式加固技术[J]. 工业建筑,2004,34(4):1-4.

[4] 姚谏. FRP 复合材料加固混凝土结构新技术研究进展[J]. 科技通报,2004,20(3):216-221.

[5] 李荣,滕锦光,岳清瑞. FRP 材料加固混凝土结构应用的新领域:嵌入式(NSM)加固法[J]. 工业建筑,2004,34(4): 5-10.