

文章编号:1673-2049(2006)03-0054-07

# 粘钢加固 RC 梁的正截面承载力

朱皓明<sup>1</sup>, 周期源<sup>2</sup>, 高轩能<sup>1</sup>, 张惠华<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021; 2. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330029)

**摘要:**对粘钢加固 RC 梁在荷载作用下的变形过程和破坏形式进行了理论和试验研究, 讨论了粘钢位置和粘钢量对 RC 梁的短期刚度、挠度、开裂荷载、极限荷载和破坏形式等承载性能的影响, 通过理论计算结果与试验结果的比较分析, 得出了粘钢加固 RC 梁承载力折减系数主要随截面相对高度变化的结论, 提出了粘钢加固 RC 梁承载力折减系数、抗弯承载力和挠度的计算公式, 给出了工程设计建议和确定合适钢板宽厚比、粘钢位置和粘钢量的技术措施, 为粘钢加固 RC 梁的设计和承载力确定提供了参考依据。

**关键词:**粘钢加固 RC 梁; 承载力; 粘钢量; 粘钢位置; 承载力折减系数

**中图分类号:** TU375.1

**文献标志码:** A

## Normal Section Bearing Capacity of RC Beams Strengthened by Bonded Steel Plates

ZHU Hao-ming<sup>1</sup>, ZHOU Qi-yuan<sup>2</sup>, GAO Xuan-neng<sup>1</sup>, ZHANG Hui-hua<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian, China;

2. School of Architectural Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, Jiangxi, China)

**Abstract:** By accomplishing tests of some RC beams, the deformation processes and destruction modes of those glued-steel RC beams under loading tests were carried out. The effects of amount of glued-steel, positions and areas of steel plates on the bearing behavior of the RC beams, such as short period rigidity, deflection, cracked load, ultimate load and destruction modes were discussed. Through compared the theoretical results with the tested ones, it was found that the reduction coefficients of bearing capacity of glued-steel RC beams were mainly varied with the relative depth of compression zone. The formulations of calculating reduction coefficients, bearing capacity of bending and deflections were put forward. The designing suggestions and technique measures to decide the suitable width-to-thickness ratios, positions and areas of glued-steel RC beams were also presented. All these can be acted as the good reference for designing and determining bearing capacity of the RC beams strengthened by bonded steel plates.

**Key words:** RC beam strengthened by bonded steel plate; bearing capacity; amount of glued-steel; position of glued-steel; reduction coefficient of bearing capacity

## 0 引言

随着结构胶结剂技术的成熟, 钢材优良的抗拉性能和钢与混凝土表面粘结的简易性使粘钢技术在

RC 梁的工程加固中应用越来越广泛。与其他的结构加固方法相比, 在 RC 结构或构件中采用粘钢加固补强和增强有其独特的优点: ①施工方法简单快速, 工期短, 对场地的正常使用干扰小; ②施工场地

收稿日期: 2006-06-02

基金项目: 江西省教育厅科技基金项目(2004-12)

作者简介: 朱皓明(1962-), 女, 福建莆田人, 工程师, E-mail: zhuhm@hqu.edu.cn.

简洁干净,现场无湿作业;③传力直接,加固效果可靠,耐久性好;④基本不增加结构的质量和不改变结构的外观,结构轻巧美观,不会导致结构物内其他构件的连锁加固;⑤粘贴钢板的方案灵活多样,适应性强;⑥经济性好,节省材料和工期,加固费用低。各国研究者对粘钢加固 RC 梁在各种作用下的承载性能和受力机理进行了很多理论和试验研究,得到了一系列有价值的成果和承载力计算的实用方法<sup>[1-9]</sup>,但 RC 梁粘钢加固的工作机理和技术尚有许多待完善之处。作为粘钢加固工程设计和施工的主要依据,即中国现行《混凝土结构加固技术规范》(CECS 25:90)<sup>[10]</sup>,下文中简称加固规范,在附录中给出的混凝土构件外部粘钢加固法的一些技术要求和规定,已无法满足快速发展的工程实践需要。笔者结合试验,对粘钢量和粘钢位置等因素对 RC 加固梁的破坏形式、开裂荷载、挠度和极限弯矩等承载性能的影响进行系统研究。

## 1 粘钢加固 RC 梁的正截面承载力

### 1.1 正截面承载力计算

对于配置受拉纵筋的 RC 梁,根据加固规范的规定,梁底粘钢截面面积按式(1)计算

$$A_p = (\alpha_1 f_c b x - f_y A_s) / f_{py} \quad (1)$$

式中: $A_p$  为加固钢板截面面积; $A_s$  为纵向受拉钢筋截面面积; $b$  为梁的宽度; $x$  为混凝土受压区高度; $f_{py}$  为钢板强度设计值; $f_y$  为钢筋抗拉强度设计值; $f_c$  为混凝土抗压强度设计值,当混凝土强度等级不大于 C50 时,系数  $\alpha_1 = 1.0$ 。式(1)表明,只要 RC 梁不属于超筋梁,采用粘钢加固提高原结构的承载性能是可行的。从式(1)可知,粘钢面积和位置并不是随意的,对适筋梁,在受拉区粘钢可提高梁的承载力,但当粘钢面积达到一定值后,梁的受压区高度大于其界限受压区高度时,继续增加粘钢面积就已不能再能提高 RC 梁的极限抗弯承载力,因此,粘钢的面积并不能无限制地增加,而是受到界限受压区高度的限制;同样,粘钢位置的不同,对 RC 梁的加固效果也不同。

为便于与一般 RC 梁比较并使计算公式形式统一,粘钢加固 RC 梁的正截面承载力计算如图 1 所示,图 1 中  $b_p$ 、 $t_p$  分别为钢板的宽度和厚度, $h$  为梁高。在应力图简化过程中,遵循如下原则:①保持受压区混凝土合力大小和作用点不变;②保持受拉钢筋和钢板的合力大小和作用点不变。由于钢板与混凝土之间仅通过结构胶单面粘结,且粘钢质量受施

工质量影响较大,钢板不能像原梁中钢筋那样与混凝土共同工作,钢板与混凝土之间存在应力滞后现象,强度有所损失,因此,在计算承载力时应考虑折减系数  $\beta$ 。

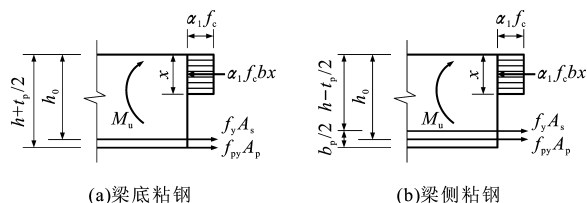


图 1 正截面承载力计算

Fig. 1 Calculation of Normal Section Bearing Capacity

#### 1.1.1 梁底粘钢

由图 1(a),根据平衡条件得

$$\beta(f_y A_s + f_{py} A_p) = \alpha_1 f_c b x \quad (2)$$

$$M = \begin{cases} \alpha_1 f_c b x (h_{sp} - x/2) \\ \beta(f_y A_s + f_{py} A_p) (h_{sp} - x/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x$  为粘钢 RC 梁混凝土受压区高度; $\beta$  为粘钢 RC 梁的承载力折减系数,它与混凝土标号、配筋量和钢板的牌号等因素有关,可根据试验结果确定; $h_{sp}$  为粘钢 RC 梁截面的换算有效高度,即受拉纵筋和钢板合力作用点至梁顶面的距离

$$h_{sp} = \frac{f_y A_s (h - a_s) + f_{py} A_p (h + t_p/2)}{f_y A_s + f_{py} A_p} \quad (4)$$

设  $\xi = \frac{x}{h_{sp}} = \rho_{sp} \frac{\beta f_y}{\alpha_1 f_c}$ , 则换算配筋率

$$\rho_{sp} = \frac{A_s + \alpha_{py} A_p}{b h_{sp}}, \alpha_{py} = \frac{f_{py}}{f_y} \quad (5)$$

$$M = \alpha_1 f_c b \xi h_{sp}^2 (1 - 0.5 \xi) \quad \xi \leq \xi_b \quad (6)$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + f_y / (E_s \epsilon_{cu})} \quad (7)$$

式中: $\xi$  为按粘钢和纵筋的总含量求得的受压高度; $\xi_b$  为界限相对高度。

#### 1.1.2 梁侧粘钢

由图 1(b),根据平衡条件同样可得与梁底粘钢正截面承载力计算公式相同的一组计算式,此时

$$h_{sp} = \frac{f_y A_s (h - a_s) + f_{py} A_p (h - b_p/2)}{f_y A_s + f_{py} A_p} \quad (8)$$

### 1.2 抗弯刚度计算

RC 梁的挠度计算关键在于求出其短期刚度。试验表明,粘钢加固 RC 梁受弯破坏的全过程与普通 RC 梁基本一致,也具有明显的 3 个工作阶段,即开裂前工作阶段、带裂缝工作阶段和截面破坏阶段,因此,粘钢加固 RC 梁的刚度计算可参照普通 RC 梁的方法进行。考虑到粘贴钢板后 RC 梁的有效截面会改变,但仍然符合平截面假设,因此,截面的有

效高度仍采用  $h_{sp}$ , 则可得梁的短期刚度计算公式。

(1) 梁底粘钢加固时, 梁的平均曲率为

$$\phi = 1/r_m = (\epsilon_{sm} + \epsilon_{cm})/h_{sp} \quad (9)$$

参照普通 RC 梁的短期刚度公式推导方法, 得

$$\epsilon_{sm} = \Psi \frac{M_k}{\eta h_{sp} E_s (A_s + \alpha_{py} A_p)} \quad (10)$$

$$\Psi = 1.1 - 0.65 f_{tk} / (\rho_{te} \sigma_{sk}) \quad (11)$$

$$\rho_{te} = (A_s + \alpha_{py} A_p) / (0.5bh) \quad (12)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87 h_{sp} (A_s + \alpha_{py} A_p)} \quad (13)$$

$$\epsilon_{cm} = \frac{M_k}{\zeta b h_{sp}^2 E_c} \quad (14)$$

则

$$B_s = \frac{M_k h_{sp}}{\epsilon_{sm} + \epsilon_{cm}} = \frac{E_s (A_s + \alpha_{py} A_p) h_{sp}^2}{1.15\Psi + 0.2 + 6\alpha_E \rho_{sp}} \quad (15)$$

式中:  $\alpha_E = E_s/E_c$ ;  $h_{sp}$  按式(4)计算。

(2) 梁侧粘钢加固时, 短期刚度计算公式同式(15), 此时,  $h_{sp}$  按式(8)计算。

上述计算公式的推导基于如下基本假定<sup>[11-13]</sup>: 梁的变形规律符合平均应变平截面假定; 不考虑混凝土的抗拉强度, 且取  $\epsilon_u = 0.0033$ ; 钢筋、钢板为理想弹塑性材料; 钢筋和混凝土完全固结, 不会产生相对滑移; 粘胶层与钢筋及混凝土变形协调, 不会产生相对滑移。

## 2 试验研究

### 2.1 主要内容和加载终止条件

试验量测和观测的主要内容为: ① 支座及跨中位移变化值; ② 跨中钢筋和混凝土侧面沿截面高度应变值; ③ 加固钢板的应变值; ④ 观察裂缝开展情况, 并随时记录裂缝的变化; ⑤ 每级加载下的梁挠度和极限弯矩; ⑥ 观察和记录破坏特征。在试验过程中, 当试件出现下列情况之一时<sup>[14]</sup>, 则认为已达到承载力的极限状态, 立即终止加载: ① 主钢筋应力达到屈服强度, 受拉主钢筋应变达到 0.01; ② 加固钢板应力达到屈服强度, 受拉钢板应变达到 0.01; ③ 受拉主钢筋处竖直最大裂缝宽度达到 1.5 mm; ④ 梁挠度达到跨度的 1/50; ⑤ 受压区混凝土压碎; ⑥ 受拉主钢筋拉断; ⑦ 加固钢板出现大面积撕裂或剥离; ⑧ 加固钢板端部锚固件损坏或脱落。

### 2.2 试验方法

为研究粘钢位置和宽厚比对加固 RC 梁承载性能的影响, 找出粘钢加固 RC 梁的承载力折减系数  $\beta$ , 笔者按不同粘钢位置、不同截面尺寸和混凝土强

度等级将试验梁设计成两类 12 组 33 根试件, 其中 3 根为对照梁, 未采用粘钢加固, A 类试件改变粘钢位置和宽厚比, B 类试件改变混凝土强度等级, 以研究粘钢 RC 梁在不同影响因素下的承载性能。粘贴的钢板端部离支座 50 mm, 采用膨胀螺栓锚固以防止钢板剥离。试验梁混凝土浇注后在标准条件下浇水养护 28 d。粘贴钢板前, 对混凝土梁表面和钢板表面进行打磨和清理处理。试验所用结构胶为工程用 JGN-II 型建筑结构胶, 粘钢时涂抹结构胶约 2 mm 厚, 粘钢后用钢筋箍紧, 常温下固化 24 h 后卸压。粘钢 RC 试验梁的粘钢位置和试验装置如图 2、3 所示。

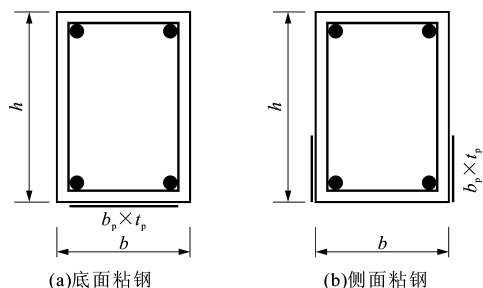


图 2 粘钢位置

Fig. 2 Position of Glued-Steel

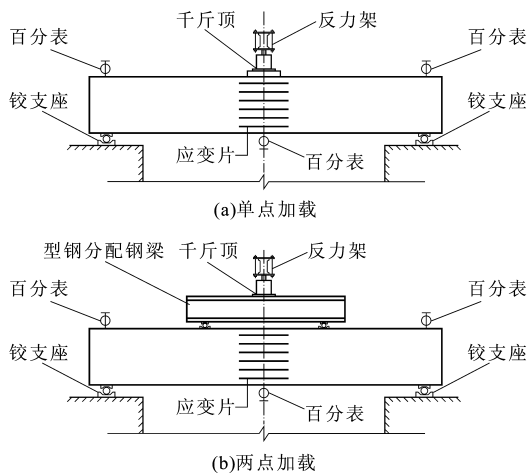


图 3 试验装置

Fig. 3 Test Setup

加载试验在胶体强度完全形成后进行。试验用分级加载法进行, 荷载分级和荷载维持时间按《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152-92) 确定: 50 kN 以下, 每级加载增量 10 kN; 50 kN 以上, 每级加载增量 5 kN; 接近理论极限承载力  $P_u$  时, 根据试验情况按每级不超过 2.5 kN 加载, 直至梁破坏。在每级荷载末期, 均读取应变和变形数据, 同时观察混凝土表面裂缝开展情况。

2.3 试验结果和试件的承载特征

2.3.1 材料的力学性能测试结果

在试件制作前,对钢筋、钢板和混凝土的力学性能均进行了测试。钢板采用 Q235 钢,对 LA、CLA 组梁, $E_p=2.086\times10^5$  MPa, $f_{py}=235$  MPa;对 La、

CLa 组梁, $E_p=2.06\times10^5$  MPa, $f_{py}=245$  MPa;对 BL 组梁, $E_p=2.06\times10^5$  MPa, $f_{py}=248$  MPa。钢筋和混凝土的力学特性实测值见表 1、2。混凝土在梁浇注前进行了配合比试配和强度试压,以保证混凝土强度等级与设计一致。

表 1 A 类试验梁基本参数

Tab.1 Basic Parameters of Type A Test Beam

试件 编号	实测截面尺寸		实测混凝土		梁受拉纵筋		粘钢尺寸		粘钢 宽厚比值	粘钢 位置	计算跨度/ mm	备 注
	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	强度等级	$f_c/\text{MPa}$	规格	$f_y/\text{MPa}$	$b_p/\text{mm}$	$t_p/\text{mm}$				
L-0	120.0	206.6	C30	14.3	2Φ14	370	0.0	0.0		底面	1 900	三分点处 两点集中 荷载加载
LA-1	122.4	209.8					80.2	2.0	40.1			
LA-2	122.4	207.8					80.0	2.0	40.0			
LA-3	124.2	204.4					80.1	4.0	20.0			
LA-4	123.8	206.2					80.2	4.0	20.0			
LA-5	126.4	204.6					80.0	6.0	13.3			
LA-6	126.6	209.4					79.8	6.0	13.3			
CLA-1	123.8	206.2	C30	14.3	2Φ14	370	40.0	2.0	20.0	侧面	1 900	三分点处 两点集中 荷载加载
CLA-2	126.4	204.6					40.1	2.0	20.0			
CLA-3	126.6	209.4					40.2	4.0	10.0			
CLA-4	123.8	206.2					40.1	4.0	10.0			
CLA-5	126.4	204.6					40.0	6.0	6.7			
CLA-6	126.6	209.4					40.2	6.0	6.7			
La-1	120.6	206.6	C25	11.9	2Φ14	370	80.1	1.0	80.1	底面	1 800	三分点处 两点集中 荷载加载
La-2	120.6	206.6					80.0	1.0	80.0			
La-3	122.4	209.8					80.2	1.5	53.5			
La-4	122.4	207.8					79.8	1.5	53.2			
CLa-1	124.2	204.4	C25	11.9	2Φ14	370	40.1	1.0	40.1	侧面	1 800	三分点处 两点集中 荷载加载
CLa-2	123.8	206.2					40.2	1.0	40.2			
CLa-3	126.4	204.6					40.1	1.5	26.7			
CLa-4	126.6	209.4					40.0	1.5	26.7			

2.3.2 粘钢加固 RC 梁的裂缝开展

与对照梁相比,粘钢梁的初始裂纹出现较晚而且发展缓慢,裂纹较细密均匀,开裂荷载提高较多。与同面积底面粘钢梁相比,侧面粘钢梁的底面裂缝出现较早,侧面裂缝出现较晚,裂缝发展较慢但最终裂缝宽度较大,而底面粘钢梁的裂缝主要出现在梁侧面,但向上发展较快,最终裂缝宽度较小。对于粘钢面积相同的梁,钢板宽厚比值越大,钢板越薄,则梁的裂缝越细密,开裂荷载也更高,表明粘钢加固的钢板不宜太厚,宽厚比值不宜太小。

2.3.3 承载特征

试件的弯曲试验破坏特征如表 3 所示。当粘钢面积没有超过界限粘钢面积,即  $\xi\leqslant\xi_b$  时,梁的承载

特性与 RC 适筋梁类似,承载力的提高与粘钢量成正比并具有良好的变形能力,破坏形式主要表现为钢筋和钢板屈服。当粘钢面积超过梁的界限粘钢面积,即  $\xi>\xi_b$  时,梁的承载力不再随粘钢面积的增加而线性增加,而是在达到一定值后,钢筋和钢板尚未屈服的情况下,梁的混凝土压碎或钢板锚固破坏,破坏主要表现为脆性破坏特征,钢筋和钢板未能充分发挥其承载力。试验过程中,超界限侧面粘钢梁的脆性破坏特征尤为明显。特别需要引起注意的是,侧面粘钢板越厚,超界限粘钢越多,梁的脆性破坏越明显,表明 RC 梁在粘钢加固中应严格控制粘钢量,使梁处于适筋梁范围,即满足  $\xi\leqslant\xi_b$ ,充分发挥粘钢补强的效果。

表 2 B 类试验梁基本参数

Tab.2 Basic Parameters of Type B Test Beam

试件 编号	实测截面尺寸		实测混凝土		梁受拉纵筋		粘钢尺寸		粘钢 宽厚比值	粘钢 位置	计算跨度/ mm	备 注
	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	强度等级	$f_c/\text{MPa}$	规格	$f_y/\text{MPa}$	$b_p/\text{mm}$	$t_p/\text{mm}$				
BL-0	100.0	200.0	C20	9.60	2Φ10	345	0.0	0	13.4	底面	1 800	三分点处 两点集中 荷载加载
BL-1	100.0	200.0					40.2	3				
BL-2	101.5	204.5					40.8	3				
BL-3	102.0	202.0					41.0	3				
BL-4	101.5	202.0					41.0	3				
BL-5	101.0	201.0					40.5	3				
BL-6	101.5	150.0	C35	16.70	2Φ10	365	0.0	0	13.4	底面	1 200	跨中集中 荷载加载
BL-7	102.0	151.0					40.1	3				
BL-8	102.4	151.5					40.2	3				
BL-9	102.0	150.0					39.7	3				
BL-10	101.5	150.6					39.5	3				
BL-11	101.0	150.6					39.0	3				

表 3 试验梁的破坏特征

Tab.3 Failure Characteristics of Test Beam

试件编号	破坏特征	试件编号	破坏特征	试件编号	破坏特征
L-0	钢筋屈服	CLA-1	弯剪破坏	BL-1	钢板屈服
LA-1	弯剪破坏	CLA-2	弯剪破坏	BL-2	钢板屈服
LA-2	弯剪破坏	CLA-3	混凝土压碎	BL-3	钢板屈服
LA-3	弯剪破坏	CLA-4	混凝土压碎	BL-4	弯剪破坏
LA-4	混凝土压碎	CLA-5	锚固破坏	BL-5	钢板屈服
LA-5	锚固破坏	CLA-6	锚固破坏	BL-6	钢筋屈服
LA-6	锚固破坏	CLa-1	钢板屈服	BL-7	弯剪破坏
La-1	钢板屈服	CLa-2	钢板屈服	BL-8	弯剪破坏
La-2	钢板屈服	CLa-3	钢板屈服	BL-9	弯剪破坏
La-3	钢板屈服	CLa-4	钢板屈服	BL-10	钢板屈服
La-4	钢板屈服	BL-0	钢筋屈服	BL-11	钢板屈服

3 理论计算与试验结果比较分析

3.1 粘钢加固对 RC 梁挠度的影响

图 4、5 为底面和侧面粘钢加固梁的实测荷载-挠度曲线。图 4、5 中表明,底面和侧面粘钢梁的开裂荷载分别比对照梁提高了 100%~200%,跨中挠度比对照梁小 10%~20%,表明粘钢加固 RC 梁能很好地改善梁的抗开裂性能,提高梁的抗弯刚度。图 4、5 中也表明,超界限粘钢梁的荷载-挠度曲线“很陡”,延性很差,超过越多,脆性破坏特征越明显。

3.2 粘钢加固对 RC 梁弯曲承载力的影响

表 4 为粘钢梁与相应对照梁极限弯矩的比值。从表 4 可知,与对照梁相比,粘钢加固梁的极限弯矩都有较大程度的提高,粘钢宽厚比值和位置对梁的

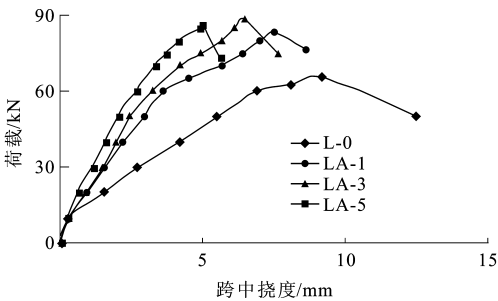


图 4 梁底粘钢梁的荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load and Deflection Curve of Glued-Steel at Beam-Bottom

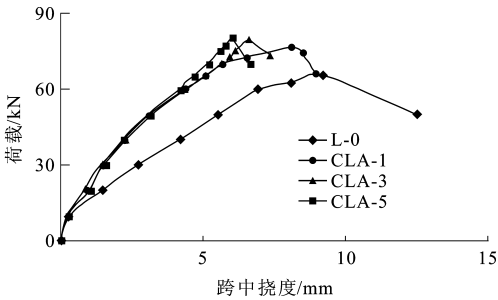


图 5 梁侧粘钢梁的荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load and Deflection Curve of Glued-Steel on Beam-Sides

极限承载力有明显影响。LA 组梁的极限弯矩普遍比 CLA 组梁高 10%左右,表明梁底粘钢板加固的承载效率比梁侧高。随着钢板厚度及粘钢面积的增加,极限弯矩也增加,但并不成线性关系,当粘钢面积超过梁的界限粘钢面积时,梁的破坏呈现脆性性质,如 LA-4~LA-6、CLA-3~CLA-6,说明钢板宽厚

表 4 实测粘钢梁与对照梁极限弯矩的比值

Tab. 4 Ultimate Bending Moment Ratios Between Actual-Testing Glued-Steel Beam and Collated Beam

试件编号	$A_p/\text{mm}^2$	$M_u^T/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u^T\cdot(M_u^0)^{-1}$		粘钢位置
			实际值	平均值	
L-0	0.0	20.76	1.000	1.307	
LA-1	160.4	26.40	1.271		底面
LA-2	160.0	25.38	1.223		底面
LA-3	320.4	27.95	1.346		底面
LA-4	320.8	27.50	1.325		底面
LA-5	480.0	27.38	1.319		底面
LA-6	478.8	28.26	1.361		底面
CLA-1	160.0	24.21	1.166	1.190	侧面
CLA-2	160.4	24.09	1.160		侧面
CLA-3	321.6	25.10	1.209		侧面
CLA-4	320.8	24.05	1.159		侧面
CLA-5	480.0	25.38	1.223		侧面
CLA-6	482.4	25.35	1.221		侧面
BL-0	0.0	9.00	1.000	1.431	
BL-1	120.6	12.90	1.433		底面
BL-2	122.4	13.26	1.473		底面
BL-3	123.0	12.84	1.427		底面
BL-4	123.0	12.78	1.420		底面
BL-5	121.5	12.60	1.400		底面
BL-6	0.0	7.20	1.000	1.525	
BL-7	120.3	10.80	1.500		底面
BL-8	120.6	11.10	1.542		底面
BL-9	119.1	11.10	1.542		底面
BL-10	118.5	11.10	1.542		底面
BL-11	117.0	10.80	1.500		底面

注: $A_p$  为粘钢面积; $M_u^T$ 、 $M_u^0$  分别为粘钢梁和对照梁的极限弯矩试验值。

比值过小将不利于构件整体性能的发挥,加固梁的钢板宽厚比值宜大于 10,钢板厚度宜小于 6 mm。从两组 BL 梁的试验可以看出,混凝土强度越高,粘钢梁承载力提高就越多。另一方面,从 La、CLa 两组梁的理论和试验结果还可发现,在适筋梁内,总含钢量越低则钢板越容易达到其屈服强度,梁的整体承载力发挥越好。

3.3 承载力折减系数  $\beta$

为正确判断粘钢后 RC 梁承载性能的变化,在用粘钢加固梁的极限弯矩理论计算标准值时,应考虑混凝土和钢材的材料分项系数  $\gamma_c$  和  $\gamma_s$ ,分别取

$\gamma_c=1.4$ 和  $\gamma_s=1.1$ ,则

$$M_{ku}^C=1.4\alpha_1f_cb\xi h_{sp}^2(1-0.5\xi)\quad \xi\leqslant\xi_b\quad (16)$$

因此,假使粘钢板与 RC 梁能够完全共同工作,理论上应该有  $M_u^T=M_{ku}^C$ ,但从试验结果可以看到,几乎所有粘钢加固 RC 梁的极限弯矩试验值  $M_u^T$  均比  $M_{ku}^C$  小,表明粘钢 RC 梁的钢板与混凝土之间并不能完全协调工作,为了使梁的可靠度不降低,在计算其承载力时需考虑折减系数  $\beta$ 。一般认为  $\beta=0.80\sim 0.95$ ,文献[3]中建议取  $\beta=0.90$ ,但尚缺乏足够的根据。本文理论计算和试验表明, $\beta$  并不是一个常量,而是随梁截面大小、钢筋等级和配筋率、混凝土强度等级和粘钢面积等多种影响因素变化的一个变量,但主要与混凝土相对受压高度  $\xi$  关系密切。由  $M_u^T/M_u^C=\gamma_c$ ,即  $M_u^T/M_{ku}^C=1$ ,通过式(3)可以确定粘钢加固 RC 梁的承载力折减系数。经回归分析,本文中给出  $\beta$  的计算公式如下

$$\beta=\begin{cases} 1.00 & \xi\leqslant 0.300 \\ 1.19/\xi-0.20/\xi^2-0.79 & 0.300<\xi\leqslant\xi_b \\ 0.75 & \xi>\xi_b \end{cases}\quad (17)$$

式(17)计算的  $\beta$  和由试验确定的  $\beta$  值见图 6。图 6 表明利用本文公式计算的结果与试验结果吻合较好。考虑到实际工程中一般不容许超筋粘钢加固,本文中建议下限取为  $\beta=0.75$ 。

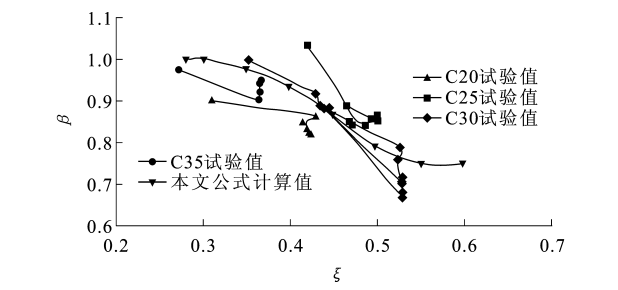


图 6  $\beta$  与  $\xi$  关系

Fig. 6 Relation of  $\beta$  and  $\xi$

4 结 语

通过上述试验研究、理论分析和计算可以看出,采用粘钢对 RC 梁进行补强是一种良好的加固方法,但粘钢位置、钢板宽厚比和粘钢量对加固梁的承载力、开裂刚度、挠度和延性有显著影响。为此,笔者得出如下结论:

- (1)应严格控制粘钢量,使梁处于适筋梁范围,即满足  $\xi\leqslant\xi_b$ ,否则粘钢补强的效果不能充分发挥。
- (2)对 RC 梁的正截面抗弯承载力和刚度进行补强时,梁底和梁侧粘钢均具有较好的增强能力和

效果,在可能的情况下,应优先选用梁底粘钢。

(3)对梁的抗裂刚度进行补强时,梁侧粘钢比梁底粘钢更有效,应优先采用梁侧粘钢。

(4)在进行粘钢加固 RC 梁的承载力计算时,必须考虑承载力折减系数  $\beta$ ,  $\beta$  可按式(17)计算,否则有高估粘钢加固 RC 梁承载力的危险。

(5)粘钢的锚固对 RC 梁的补强效果至关重要,板端应有可靠的锚固措施,可采用 U 型钢板箍或膨胀螺栓等构造措施。

(6)在粘钢面积相同的条件下,宽厚比较大、厚度比较小的钢板,加固 RC 梁的效果较好,因此,建议粘钢加固 RC 梁的钢板宽厚比值不宜小于 10,每层粘钢板的厚度也不宜过大。

## 参考文献:

## References:

- [1] 吕西林. 建筑结构加固设计[M]. 北京:科学出版社, 2001:35-77.  
LU Xi-lin. Strengthening Design of Building Structures[M]. Beijing: Science Press, 2001:35-77.
- [2] 鲍安红,殷学钢,吴永. 多层粘钢加固混凝土梁的有限元仿真[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(6):142-145.  
BAO An-hong, YIN Xue-gang, WU Yong. FEM Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Bonded Multi-layer Steels[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(6):142-145.
- [3] 王天稳,廖理杨. 混凝土构件粘钢加固正截面计算中的若干问题[J]. 建筑结构, 1997, 27(11):12-14.  
WANG Tian-wen, LIAO Li-yang. Discuss on Bearing Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Bonded Steel Plates[J]. Building Structure, 1997, 27(11):12-14.
- [4] 万墨林,韩继云. 混凝土结构加固技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995:121-136.  
WAN Mo-lin, HAN Ji-yun. Strengthening Technique of Reinforced Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995:121-136.
- [5] JONES R, SWAMY R N, CHARIF A. Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates [J]. Structure Engineer, 1988, 66(5):85-94.
- [6] SWAMY R N, JONES R, BLOXHAM J W. Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates[J]. Structural Engineer, 1987, 65(2):59-68.
- [7] ROBERTS T M, HAJI-KAZEMI H. A Theoretical Study of the Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates[J]. Proc Inst Civil Eng, 1989, 74(2):39-55.
- [8] ZIRABA Y N, BALUCH M H. Computational Model for Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1995, 20(4):253-271.
- [9] 欧新新,金崇正. 钢筋混凝土梁粘钢加固抗裂及截面刚度研究[J]. 工程力学, 2000, 17(S1):867-871.  
OU Xin-xin, JIN Chong-zheng. Anti-cracking and Bending Rigidity of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Bonded Steel Plates[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(增 1):867-871.
- [10] CECS 25:90, 混凝土结构加固技术规范[S].  
CECS 25:90, Technical Specification for Strengthening Concrete Structures [S].
- [11] 东南大学,天津大学,同济大学. 混凝土结构:混凝土结构设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001:49-72.  
Southeast University, Tianjin University, Tongji University. Reinforced Concrete Structures: Principles of Reinforced Concrete Structures Design[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001:49-72.
- [12] 梁兴文,王社良,李晓文,等. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:科学出版社, 2003:92-124.  
LIANG Xing-wen, WANG She-liang, LI Xiao-wen, et al. Principles of Reinforced Concrete Structures Design[M]. Beijing: Science Press, 2003:92-124.
- [13] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010-2002, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [14] GB 50152-92, 混凝土结构试验方法标准[S].  
GB 50152-92, Standard Methods for Testing of Concrete Structures[S].