

文章编号: 100025013(2007)020196205

# 粘钢补强钢筋混凝土梁的正截面承载性能

高轩能<sup>1</sup>, 朱皓明<sup>1</sup>, 周期源<sup>2</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:** 对粘钢补强钢筋混凝土(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,得出粘钢板与RC梁协调工作系数主要随相对高度变化的结论。提出计算协调工作系数、抗弯承载能力和挠度的计算公式,给出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。

**关键词:** 粘钢加固; RC梁; 承载性能; 粘钢量; 粘钢位置; 协调工作系数

**中图分类号:** TU 375.102; TU 746.3

**文献标识码:** A

国内外研究者对粘钢加固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,得到了一些有价值的成果和承载能力计算的实用方法<sup>[124]</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,我国现行的5CECS 25:90 混凝土结构加固技术规范6(以下简称5加固规范6)<sup>[5]</sup>,仅在附录中给出了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。本文结合试验,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 RC梁粘钢加固后的正截面承载性能

### 1.1 加固梁的正截面承载力计算

对于配置受拉纵筋的RC梁,根据5加固规范6的规定,梁底粘钢截面面积按下式计算,有

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

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,当混凝土强度等级小于等于C50时,系数  $A = 1.0$ 。式(1)意味着,只要RC梁不属于超筋梁,采用粘钢加固来提高原结构的承载性能是可能的。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能力;但当粘钢面积到达一定数值后,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,不能提高RC梁的极限抗弯承载能力。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地限制。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,计算公式的推导基于如下基本假定<sup>[6]</sup>。(1) 梁的变形规律符合平均应变平截面假定。(2) 不考虑混凝土的抗拉强度,且取  $E = 0.003$ 。(3) 钢筋、钢板为理想弹塑性材料。(4) 钢筋和混凝土完全固结,粘胶层与钢及混凝土变形协调,不会产生相对滑移。粘钢加固RC梁的正截面承载力计算简图,如图1所示。图中,  $b_p$ ,  $t_p$  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

收稿日期: 200606227

**作者简介:** 高轩能(19622),男,教授,博士,主要从事工程结构稳定理论和钢2混凝土组合结构的研究. E2mail: gaonx@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省建设科技计划项目(闽建科0522217);江西省教育厅2004科技项目(2004212)

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<sup>1</sup> 因此, 在承载力计算时应考虑协调工作系数 B 梁正截面承载力计算公式的推导过

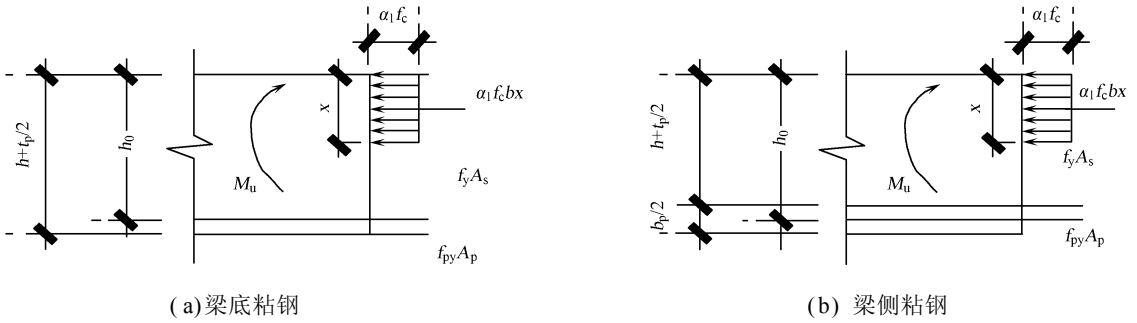


图 1 正截面承载力计算简图

Fig. 1 Calculation of flexural bearing capacity

程如下表述.

(1) 梁底粘钢正截面承载力计算公式, 由图 1(a)并根据平衡条件, 可得

$$B f_y A_s + f_{py} A_p = \alpha_1 f_c b x, \tag{2}$$

$$M = \alpha_1 f_c b x (h_{sp} - x/2); \tag{3a}$$

或

$$M = B (f_y A_s + f_{py} A_p) (h_{sp} - x/2) \tag{3b}$$

式中,  $x$  为粘钢梁混凝土受压区高度;  $B$  为粘钢板与 RC 梁协调工作系数, 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. 即

$$h_{sp} = [f_y A_s (h - A) + f_{py} A_p (h + t_p/2)] / (f_y A_s + f_{py} A_p) \tag{4}$$

设  $F = x/h_{sp} = Q_p B f_y / \alpha_1 f_c l$  换算配筋率  $Q_p = \frac{A_s + A_y A_p}{b h_{sp}}$ ,  $A_y = \frac{f_{py}}{f_y}$ ,  $M = \alpha_1 f_c b F h_{sp}^2 (1 - 0.5F)$ ,  $F \leq F_b$ ;  $F_b = B / (1 + \frac{f_y}{E_s E_m})$ , 通常情况,  $B = 0.8$

(2) 梁侧粘钢正截面承载力计算公式. 由图 1(b), 根据平衡条件同样可得到与梁底粘钢正截面承载力计算公式相同的一组计算式<sup>1</sup> 即

$$h_{sp} = [f_y A_s (h - A) + f_{py} A_p (h - b_p/2)] / (f_y A_s + f_{py} A_p) \tag{5}$$

### 1.2 加固梁的抗弯刚度计算

RC 梁的挠度计算, 关键在于求出其短期刚度. 试验过程和结果表明, 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  $5 = 1/r_m = (E_m + E_m)/h_{sp}$ , 参照普通 RC 梁的短期刚度公式推导方法, 可得到

$$E_m = 7 \frac{M_k}{\alpha_{sp} E_s (A_s + A_y A_p)}, \quad E_m = \frac{M_k}{I_b h_{sp}^2 E_c}, \tag{6}$$

$$B_s = \frac{M_k h_{sp}}{E_m + E_m} = \frac{E_s (A_s + A_y A_p) h_{sp}^2}{1.157 + 0.2 + 6 \alpha_{sp} Q_p} \tag{7}$$

式中,  $\alpha = E_s / E_c$ ,  $h_{sp}$  按式(4)计算<sup>1</sup> 则  $7 = 1.1 - 0.65 f_{tk} / (Q_p R_k)$ ,  $Q_p = (A_s + A_y A_p) / (0.5bh)$ ,  $R_k = M_k / [0.87 h_{sp} (A_s + A_y A_p)]$  (2) 梁侧粘钢加固时, 短期刚度计算公式同式(7), 此时,  $h_{sp}$  按式(5)计算.

## 2 试验研究

### 2.1 试验的主要内容和加载终止条件

试验量测和观测有 6 个主要内容<sup>1</sup> (1) 支座及跨中的位移变化值<sup>1</sup> (2) 跨中钢筋和混凝土侧面沿截

面高度的应变1(3) 加固钢板的应变值1(4) 观察裂缝开展情况,并随时记录裂缝的变化1(5) 每级加载下的梁挠度和极限弯矩1(6) 观察和记录破坏特征. 在试验过程中,当试件出现下列 8 种情况之一时<sup>[7]</sup>,认为已达到承载能力的极限状态,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 0.011(2) 加固钢板应力达到屈服强度,受拉钢板应变达到 0.011(3) 受拉主钢筋处竖直最大裂缝宽度达到 1.5 mm1(4) 梁挠度达到跨度的 1/501(5) 受压区混凝土压碎1(6) 受拉主钢筋拉断1(7) 加固钢板出现大面积撕裂或剥离1(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,得出钢板与 RC 梁协调工作系数 B 本文按不同粘钢位置、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1 其中,3 根为对照梁、未粘钢板加固, A 类试件变粘钢位置和宽厚比, B 类试件变混凝土强度等级,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 JGN20 型建筑结构胶,粘钢时涂抹结构胶约 2 mm 厚,粘贴后用钢筋箍箍紧,在常温下固化 24 h 后卸压. 粘钢 RC 试验梁的粘钢位置,如图 2 所示. 试验采用分级加载法进行,荷载分级和荷载维持时间按文[7]确定,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 LA2, CLA2 系列梁,  $E_p = 208.6 \text{ GPa}$ ,  $f_{py} = 235 \text{ MPa}$ ; 对 La2, CLa2 系列梁,  $E_p = 206 \text{ GPa}$ ,  $f_{py} = 245 \text{ MPa}$ ; 对 BL2 系列梁,  $E_p = 206 \text{ GPa}$ ,  $f_{py} = 248 \text{ MPa}$ . 钢筋和混凝土的力学特性实测值为: 对 LA2, CLA2 系列梁,混凝土 C30,  $f_c = 14.3 \text{ MPa}$ ,  $f_y = 370 \text{ MPa}$ ; 对 La2, CLa2 系列梁,混凝土 C25,  $f_c = 11.9 \text{ MPa}$ ,  $f_y = 370 \text{ MPa}$ ; 对 BL20~ 5 梁,混凝土 C20,  $f_c = 9.6 \text{ MPa}$ ,  $f_y = 345 \text{ MPa}$ ; 对 BL26~ 11 梁,混凝土 C35,  $f_c = 16.7 \text{ MPa}$ ,  $f_y = 365 \text{ MPa}$ . 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.

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得较晚且发展缓慢,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,钢板宽厚比越大,钢板越薄,则梁的裂缝越细密,开裂荷载也更高1 表明粘钢加固的钢板不宜太厚,宽厚比不宜太小.

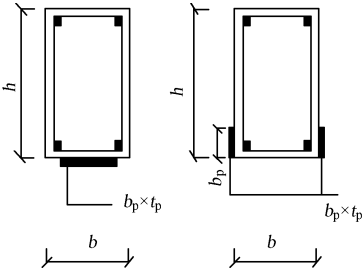


图 2 粘钢位置图  
Fig.2 Position of bonded steel

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 3 为底面和侧面粘钢加固梁的实测荷载( P )2 挠度( w ) 曲线. 图 3 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约 10%~ 20%1 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 3 同时显示,超界限粘钢梁的荷载2 挠度曲线/ 很陡0, 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 梁弯曲承载能力的影响

表 1 为粘钢梁与相应对照梁极限弯矩的比值,表中,  $A_p$  为粘钢面积,  $M_u^T, M_u^0$  为分别为粘钢梁和对照梁的极限弯矩试验值. . 从表 1 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,粘钢宽厚比和位置对梁的极限承载能力有明显影响. 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 LA24~ LA26, CLA23~ CLA261 说明钢板宽厚比过小将不利于构件整体性能的发挥,加固梁的钢板宽厚比宜大于 13,每层钢板

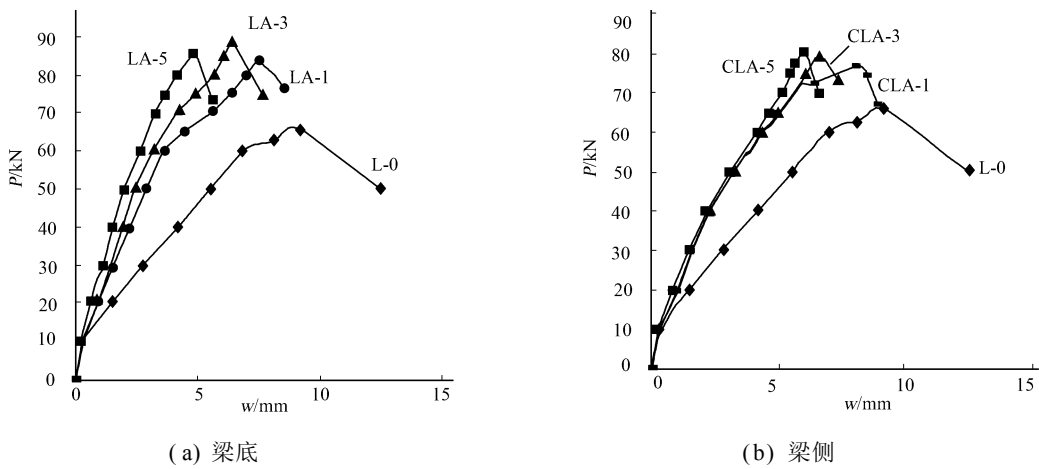


图 3 粘钢梁荷载挠度曲线

Fig. 3 Load&deflection curves of steel bonded beams

的厚度宜小于 5 mm. 从 BL 梁的两组试验可以看出, 混凝土强度越高, 粘钢梁承载能力的提高就越多. 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, 梁的整体承载能力发挥越好.

表 1 实测粘钢梁与对照梁极限弯矩的比值

Tab. 1 Ratios of ultimate bending moments between testing bonded steel beam and comparison beam									
试件编号	$A_p / \text{mm}^2$	$M_u^t / \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_u^t / M_u$	粘钢位置	试件编号	$A_p / \text{mm}^2$	$M_u^t / \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_u^t / M_u$	粘钢位置
I20	0	20.76	1.000	-	BL20	0	9.00	1.000	-
LA21	160.4	26.40	1.271	底面	BL21	120.6	12.90	1.433	底面
LA22	160.0	25.38	1.223	底面	BL22	122.4	13.26	1.473	底面
LA23	320.4	27.95	1.346	底面	BL23	123.0	12.84	1.427	底面
LA24	320.8	27.50	1.325	底面	BL24	123.0	12.78	1.420	底面
LA25	480.0	27.38	1.319	底面	BL25	121.5	12.60	1.400	底面
LA26	478.8	28.26	1.361	底面					
平均值			1.307		平均值			1.431	
CLA21	160.0	24.21	1.166	侧面	BL26	0.0	7.20	1.000	-
CLA22	160.4	24.09	1.160	侧面	BL27	120.3	10.80	1.500	底面
CLA23	321.6	25.10	1.209	侧面	BL28	120.6	11.10	1.542	底面
CLA24	320.8	24.05	1.159	侧面	BL29	119.1	11.10	1.542	底面
CLA25	480.0	25.38	1.223	侧面	BL210	118.5	11.10	1.542	底面
CLA26	482.4	25.35	1.221	侧面	BL211	117.0	10.80	1.500	底面
平均值			1.190		平均值			1.525	

3.3 粘钢加固梁协调工作系数

为正确判断粘钢后 RC 梁承载性能的变化, 在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  $G$  和  $G_s$ , 分别取  $G = 1.4$  和  $G_s = 1.1$ , 则

$$M_{ku}^C = 1.4A_f \epsilon_b h f_{sp}^2 (1 - 0.5F), \quad F [ F_b ] \tag{8}$$

因此, 假使粘钢板与混凝土 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, 需要考虑协调工作系数  $B$ . 一般可认为  $B = 0.80 \sim 0.95$ , 文[1]建议取  $B = 0.9$ , 尚缺乏足够的根据. 本文理论计算和试验表明,  $B$  并不是一个常量, 而是随截面大小、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  $F$  关系密切. 由  $M_u^T / M_u^C = G$ , 即  $M_u^T / M_{ku}^C = 1$ , 通过式(3)可以确定粘钢与 RC 梁的协调工作系数. 经回归分析, 本文给出  $B$  的计算公式为

$$B = 1.0, \quad F [ 0.300, \tag{9a}$$

$$B = 1.19 / F - 0.20 / F^2 - 0.79, \quad 0.300 < F [ F_b, \tag{9b}$$

$$B= 0.75, \quad F \setminus F_b \tag{9c}$$

式中,  $F$  为按粘钢和纵筋的总含钢量求得的相对受压高度;  $F_b$  为界限相对高度.

4 结 束 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性能有显著影响. 因此, 本文得出如下 3 点结论: (1) 应严格控制粘钢量, 使梁处于适筋梁范围, 即满足  $F \leq F_b$ ; 否则, 粘钢补强的效果不能充分发挥. 粘钢板宽厚比不宜小于 10 mm, 单层钢板厚度不应大于 5 mm. 在粘钢面积相同下, 钢板越薄宽厚比越大, 加固 RC 梁的承载性能越好. 板端应有可靠的锚固措施. (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, 应优先考虑梁底粘钢. 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. (3) 在进行粘钢加固梁的正截面承载力计算时, 可按本文提出的式(9)计算钢板与混凝土之间的协调工作系数  $B$ . 否则, 有高估粘钢加固钢筋混凝土梁承载能力的危险.

参考文献:

[ 1 ] 吕西林. 建筑结构加固设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35277.  
[ 2 ] 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(11): 1214.  
[ 3 ] ROBERTS T M, HAJEKAZEMI H. A theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates [ J ]. Proc Inst Civil Eng, 1989, ( 2 ): 39255.  
[ 4 ] 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 ): 253271.  
[ 5 ] 四川省建筑科学研究院. CECS 25:90 混凝土结构加固技术规范[ S ]. 北京: 中国计划出版社, 1991: 4854.  
[ 6 ] 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: 92124.  
[ 7 ] 中国建筑科学研究院. GB 50152- 92 混凝土结构试验方法标准[ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992: 242.

Flexural Bearing Behavior of RC Beams  
Strengthened by Bonded Steel Plates

GAO Xuan2neng<sup>1</sup>, ZHU Hao2ming<sup>1</sup>, ZHOU Qi2yuan<sup>2</sup>

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

2. School of Architecture Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: The deformation and failure modes of reinforced concrete (RC) beams strengthened with bonded steel plates are investigated theoretically and experimentally. It's discussed the influence of bonded steel position, area and quantity on short2tern stiffness, deflection, cracking load, ultimate load and failure modes of RC beam. Comparing the theoretical re2sults with the experimental ones, it's concluded that the co2worked coefficient of bonded steel plate and RC beam varies mainly with the relative depth of compression zone. The formulas to calculate co2worked coefficients, flexural bearing ca2pacity and deflections are put forward. The design suggestions and technical measures to determine the suitable width2to2thickness ratios, positions and areas of bonded steel plate are also presented.  
Keywords: strengthened with bonded steel plates; RC beam ; bearing behavior; quantity of bonded steel; position of bonded steel; co2worked coefficient

( 责任编辑: 黄仲一)