

· 地基与基础 ·



# 粘贴碳纤维布与钢板加固 RC 梁的 承载力计算方法\*

张章, 吴锋

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 根据提出的加固材料强度系数, 并基于试验数据分析, 分别提出了粘贴碳纤维布和粘贴钢板加固钢筋混凝土梁的抗弯承载力提高系数计算公式。研究表明, 粘贴钢板比粘贴碳纤维布对梁的抗弯承载力有更好的加固效果。

**关键词:** 碳纤维布; 钢板; 加固; 梁; 抗弯承载力

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0147-05

## Calculation of flexural capacity of RC beams strengthened with CFRP or steel plate

ZHANG Zhang, WU Feng

(Shanghai Third Harbour Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** This paper proposes the flexural capacity formula of reinforced concrete beams strengthened with CFRP or steel plate based on the material strength factor and the experimental data. The research results show that the beam strengthened with steel plate has better strengthening effect in the flexural capacity than that with CFRP.

**Keywords:** CFRP; steel plate; strengthening; beam; flexural capacity

碳纤维布强度高, 弹性模量与钢筋接近, 粘贴碳纤维布可以显著提高构件的承载能力、改善其受力性能。与其他加固方法相比, 碳纤维布自质量轻, 对加固结构的附加荷载小, 碳纤维布及粘结剂本身具有极佳的耐久性能, 加固后能大大提高构件的耐久性; 此外, 碳纤维布可广泛用于各种结构类型、结构形状、结构部位的加固修补, 且不改变结构形状及不影响结构外观, 适用面广。碳纤维加固 RC 梁的研究大多基于试验, 近年来取得了较丰富的成果和研究结论<sup>[1-5]</sup>。采用碳纤维加固的钢筋混凝土梁的抗弯承载性能有明显提高, 其中极限受弯承载力的提高最为显著。梁底粘贴碳纤维布后, 在受弯状态下混凝土裂缝的发展和延伸得到了有效的限制, 加固后的梁的延性及刚

度均得到改善<sup>[6-7]</sup>。

粘贴钢板法的加固机理与粘贴碳纤维相似, 也是通过结构胶将钢板与混凝土构件表面粘结起来, 使二者协同工作, 从而使钢板起到构件中类似钢筋的作用, 达到提高构件承载力的目的。粘贴钢板加固后, 梁在受力情况下的裂缝间距减小、宽度减小、数量增加, 更能达到塑性破坏的模式<sup>[8-10]</sup>。增加钢板用量和减小锚固间距均能有效提高开裂荷载和极限荷载, 降低梁在受力下的挠度<sup>[11]</sup>。此外, 粘贴钢板可以有效抑制裂缝的开展, 对提高普通钢筋混凝土构件耐久性也有重要作用。

粘贴碳纤维和钢板加固钢筋混凝土梁的效果, 除了受材料自身强度制约外, 粘胶的性能决定了新粘贴材料是否可以与原钢筋混凝土协同工作、

收稿日期: 2014-12-24

\*基金项目: 交通运输部建设科技项目基金 (201332849A090)

作者简介: 张章 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事钢筋混凝土结构耐久性研究。

充分发挥加固材料本身的强度。此外,相对于钢板,碳纤维布在施工前处于松弛状态,粘贴施工时碳纤维布应尽可能拉紧,而实际工程中,最终的加固效果很大程度上取决于施工条件及施工质量。

### 1 粘贴加固梁承载力提高系数

钢筋混凝土梁两侧分别为受压区和受拉区,采用粘贴碳纤维或钢板加固梁的基本原理都是利用碳纤维和钢板的抗拉强度,等同于在梁受拉区增加一根“拉杆”。加固后梁在外荷载作用下,新粘贴的碳纤维或钢板承受拉力,并与原受拉钢筋协同工作,以此提高抗弯性能。本文提出粘贴碳纤维或钢板加固后的钢筋混凝土梁抗弯承载力提高系数可采用下式计算:

$$\varphi = \frac{M}{M_0} \quad (1)$$

式中:  $\varphi$  为抗弯承载力提高系数;  $M_0$ 、 $M$  分别为粘贴前后构件抗弯承载力。

承载力提高系数的影响因素包括:粘贴材料抗拉强度、使用量、粘胶性能。本文定义材料强度系数  $e$  来表示粘贴材料的相对使用量:

$$e = \frac{f_f A_{fe}}{f_s A_s} \quad (2)$$

式中:  $f_f$ 、 $A_{fe}$  分别为材料抗拉强度值和受拉截面积;  $f_s$ 、 $A_s$  分别为构件原有受拉钢筋抗拉强度和受拉截面积。

材料强度系数  $e$  反映的是新增的粘贴材料与原构件中的受拉钢筋所能提供最大拉力的比值,  $e$  越大,表明加固材料的相对投入量越大。

### 2 粘贴碳纤维承载力提高系数

本文收集了大量粘贴碳纤维加固梁的试验数据,经与不加固梁的对比,整理得到粘贴碳纤维加固梁的抗弯承载力提高系数如表1所示。其中所采用的碳纤维材料均为碳纤维布,加载方式均为4点弯曲加载,碳纤维布的粘贴层数为1层或2层,已根据厚度和截面宽度换算成纤维截面积。

表1 粘贴碳纤维加固梁承载力提高系数换算

文献	试件编号	纤维截面积/mm <sup>2</sup>	纤维抗拉强度/MPa	钢筋截面积/mm <sup>2</sup>	钢筋抗拉强度/MPa	抗弯承载力/kN		材料强度系数	承载力提高系数
						加固前	加固后		
文献[1]	A1	13.32	3 550	226	210	45.4	62.2	1.00	1.37
	A2	13.32	3 550	226	210	45.4	61.9	1.00	1.36
	A3	13.32	3 550	226	210	45.4	63.4	1.00	1.40
	A4	13.32	3 550	226	210	45.4	63.5	1.00	1.40
	A5	26.64	3 550	226	210	45.4	75.8	1.99	1.67
	A6	26.64	3 550	226	210	45.4	78.3	1.99	1.72
	A7	26.64	3 550	226	210	45.4	75.7	1.99	1.67
	A8	26.64	3 550	226	210	45.4	73.2	1.99	1.61
	A9	13.32	3 550	402	210	68.7	82.4	0.56	1.20
	A10	13.32	3 550	402	210	68.7	91.3	0.56	1.33
	A11	13.32	3 550	402	210	68.7	92.1	0.56	1.34
	A12	13.32	3 550	402	210	68.7	90.1	0.56	1.31
	A13	26.64	3 550	402	210	68.7	85.1	1.12	1.24
	A14	26.64	3 550	402	210	68.7	98.5	1.12	1.43
	A15	26.64	3 550	402	210	68.7	96.1	1.12	1.40
	A16	26.64	3 550	402	210	68.7	92.4	1.12	1.34
文献[2]	B1	68	4 200	1 407	360	519.11	580.39	0.89	1.12
	B2	136	4 200	1 407	360	519.11	623.57	0.83	1.20
	B3	204	4 200	1 407	360	519.11	675.96	0.77	1.30

续表 1

文献	试件编号	纤维截面积/mm <sup>2</sup>	纤维抗拉强度/MPa	钢筋截面积/mm <sup>2</sup>	钢筋抗拉强度/MPa	抗弯承载力/kN		材料强度系数	承载力提高系数
						加固前	加固后		
文献[3]	C1	12.1	1 800	100.5	481.8	31.0	41.5	0.75	1.34
	C2	12.1	1 800	100.5	481.8	31.0	43.0	0.72	1.39
	C3	12.1	1 800	100.5	481.8	31.0	47.5	0.65	1.53
	C4	12.1	1 800	100.5	481.8	31.0	50.5	0.61	1.63
	C5	12.1	1 800	100.5	481.8	31.0	68.0	0.46	2.19
	C6	12.1	1 800	157.0	356.7	32.5	44.0	0.74	1.35
	C7	12.1	1 800	157.0	356.7	32.5	54.0	0.60	1.66
文献[4]	D1	44.4	2 807	509.0	547.5	60.0	88.0	0.68	1.47
	D2	44.4	2 807	509.0	547.5	60.0	86.0	0.70	1.43
文献[5]	E1	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	140.0	0.73	1.37
	E2	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	135.0	0.76	1.32
	E3	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	125.0	0.82	1.23
	E4	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	128.0	0.80	1.25
	E5	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	125.0	0.82	1.23
	E6	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	145.0	0.70	1.42
	E7	33.3	3 350	462.0	535.9	102.0	128.0	0.80	1.25
文献[6]	F1	22.2	3 550	402.0	585.0	110.0	149.0	0.74	1.35
	F2	44.4	3 550	402.0	585.0	110.0	159.0	0.69	1.45
	F3	66.6	3 550	402.0	585.0	110.0	168.0	0.65	1.52
	F4	22.2	3 550	603.0	585.0	143.0	169.4	0.84	1.18
	F5	44.4	3 550	603.0	585.0	143.0	172.2	0.83	1.20
	F6	66.6	3 550	603.0	585.0	143.0	205.6	0.70	1.44
	F7	22.2	3 550	804.0	585.0	198.4	212.2	0.93	1.08
	F8	44.4	3 550	804.0	585.0	198.4	215.4	0.92	1.10
	F9	66.6	3 550	804.0	585.0	198.4	235.0	0.84	1.20
文献[7]	G1	60.12	3 400	6 434.0	335.0	487.1	493.8	0.99	1.01
	G2	90.18	3 400	6 434.0	335.0	487.1	518.8	0.94	1.07

注: 表中抗弯承载力数值均采用千斤顶加载值。

试验结果显示, 随着碳纤维用量的增大, 梁的抗弯承载力呈大致线性增大趋势。拟合得到粘贴碳纤维布对承载力提高系数的计算公式:

$$\varphi_1 = 0.406e + 1 \quad (3)$$

### 3 粘贴钢板承载力提高系数

本文基于收集到的粘贴碳纤维加固梁的试验

数据, 经计算整理, 得到了粘贴钢板加固梁的抗弯承载力提高系数 (表 2)。根据试验数据进行计算, 建立了材料强度系数与抗弯承载力提高系数的关系。试验加载方式均为 4 点弯曲加载, 采用的钢板厚度为 1.5 ~ 6 mm, 已根据厚度和截面宽度换算成钢板截面积。

表 2 粘贴钢板加固梁承载力提高系数换算

文献	试件编号	钢板截面积/mm <sup>2</sup>	钢板抗拉强度/MPa	钢筋截面积/mm <sup>2</sup>	钢筋抗拉强度/MPa	抗弯承载力/kN		材料强度系数	承载力提高系数
						加固前	加固后		
文献[7]	H1	640	235	6 434	335	487.1	525.78	0.07	1.08
	H1	960	235	6 434	335	487.1	544.49	0.10	1.12
	H1	1 280	235	6 434	335	487.1	562.61	0.14	1.15
	H1	1 600	235	6 434	335	487.1	580.13	0.17	1.19

续表 2

文献	试件 编号	钢板截 面积/mm <sup>2</sup>	钢板抗拉 强度/MPa	钢筋截 面积/mm <sup>2</sup>	钢筋抗拉 强度/MPa	抗弯承载力/kN		材料强度 系数	承载力 提高系数
						加固前	加固后		
文献[8]	I2	77.25	259.6	100.5	257.7	35.61	42.55	0.77	1.19
	I3	112.50	219.5	100.5	257.7	35.61	45.12	0.95	1.27
文献[9]	J1	240	250	226	302.78	69.6	107.5	0.88	1.54
	J2	240	250	226	302.78	69.6	106.3	0.88	1.53
	J3	240	250	226	302.78	69.6	110.5	0.88	1.59
	J4	360	250	226	302.78	69.6	120.0	1.32	1.72
	J5	360	250	226	302.78	69.6	130.5	1.32	1.88
	J6	360	250	226	302.78	69.6	120.0	1.32	1.72
	J7	360	250	226	302.78	69.6	122.8	1.32	1.76
	J8	360	250	226	302.78	69.6	139.8	1.32	2.01
文献[10]	K1	160.4	235	308	370	20.76	26.4	0.33	1.27
	K2	160.0	235	308	370	20.76	25.38	0.33	1.22
	K3	320.4	235	308	370	20.76	27.95	0.66	1.35
	K4	320.8	235	308	370	20.76	27.50	0.66	1.32
	K5	480.0	235	308	370	20.76	27.38	0.99	1.32
	K6	478.8	235	308	370	20.76	28.26	0.99	1.36
	K7	80.1	245	308	370	20.76	20.55	0.17	0.99
	K8	80.0	245	308	370	20.76	21.84	0.17	1.05
	K9	120.3	245	308	370	20.76	22.35	0.26	1.08
	K10	119.7	245	308	370	20.76	21.90	0.26	1.05
	K11	120.6	248	157	345	9.00	12.90	0.55	1.43
	K12	122.4	248	157	345	9.00	13.26	0.56	1.47
	K13	123.0	248	157	345	9.00	12.84	0.56	1.43
	K14	123.0	248	157	345	9.00	12.78	0.56	1.42
	K15	121.5	248	157	345	9.00	12.60	0.56	1.40
	K16	120.3	248	157	365	7.20	10.80	0.52	1.50
	K17	120.6	248	157	365	7.20	11.10	0.52	1.54
	K18	119.1	248	157	365	7.20	11.10	0.52	1.54
	K19	118.5	248	157	365	7.20	11.10	0.51	1.54
	K20	117.0	248	157	365	7.20	10.80	0.51	1.50
文献[11]	L1	42	317.2	157	456.3	41.05	52.95	0.19	1.29
	L2	42	317.2	157	456.3	41.05	44.75	0.19	1.09
	L3	42	317.2	157	456.3	41.05	48.51	0.19	1.18
	L4	84	317.2	157	456.3	41.05	56.10	0.19	1.37
	L5	84	317.2	157	456.3	41.05	57.23	0.19	1.39
	L6	84	317.2	157	456.3	41.05	46.70	0.19	1.14
	L7	84	317.2	157	456.3	41.05	52.83	0.19	1.29

注：除文献 [10] 外，表中抗弯承载力数值单位为 kN，文献 [10] 加固前后承载力单位均为 kN·m。

试验结果显示，随着钢板用量增大，梁的抗弯承载力呈增大趋势。根据试验结果拟合出基于材料强度系数的粘贴钢板加固梁承载力提高系数的计算公式为：

$$\varphi_2 = 0.61e + 1 \quad (4)$$

#### 4 粘贴碳纤维及钢板加固效果对比

基于材料强度系数的加固梁抗弯承载力提高系数如图 1 所示，粘贴钢板比粘贴碳纤维布加固梁的承载力提高系数增长更快，即式(4)比式(3)斜率更大。

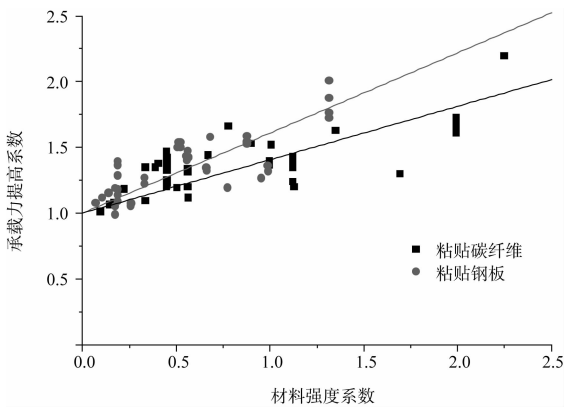


图1 粘贴碳纤维和钢板承载力提高系数对比

为了控制加固后构件的裂缝宽度和变形,且为了避免因受弯承载力提高后导致构件受剪破坏先于受弯破坏,GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》和 JTS 311—2011《港口水工建筑物修补加固技术规范》均规定,采用粘贴碳纤维和钢板加固梁的正截面受弯承载力的提高幅度不应超过40%。将 $\varphi = 1.4$ 分别代入式(3)和式(4),得到 $e_1/e_2 = 1.5$ ,表明为使加固后梁的抗弯承载力提高40%,所需粘贴碳纤维布的相对用量比钢板多50%;反之,若投入相同的相对材料,将 $e = 0.9$ 分别代入式(3)和式(4),得到 $\varphi_1/\varphi_2 = 0.88$ ,粘贴钢板加固梁的承载力比碳纤维高13.4%。在许可范围内,加固材料投入量越大,两种加固方式对承载力提高幅度的差距越明显,粘贴钢板加固梁比粘贴碳纤维布具有更高的加固效果。

根据目前的粘贴碳纤维布施工方法,在涂刷底胶并找平后,粘贴时手工滚压碳纤维无法保证碳纤维布处于拉紧的状态。胶粘剂硬化后,碳纤维需在构件发生一定的挠度后才能拉紧,进而与原钢筋、混凝土协同工作,碳纤维受力存在明显的滞后效应。因此,对于粘贴碳纤维技术,采用碳纤维板,或采用预应力碳纤维技术可以克服存在的问题,有效提高粘贴碳纤维加固效益。

粘贴钢板基本不存在上述问题,且粘贴钢板一般会沿构件轴向,特别是在端部布置锚固螺栓,能够有效提高钢板与原构件的协同工作性能,在承载能力极限状态下更能发挥新增钢板的强度,提高整体构件的承载力。

## 5 结语

1) 本文提出了粘贴碳纤维和粘贴钢板加固梁抗弯承载力提高系数及材料强度系数的概念,并根据对试验数据的分析和计算,分别拟合得到了粘贴碳纤维布和粘贴钢板承载力提高系数的计算公式,可用于粘贴加固梁抗弯承载力的简化计算。

2) 根据试验结果,随着碳纤维和钢板用量的增大,加固梁承载力呈线性增大趋势,两种加固方法都适用于钢筋混凝土梁的承载性能加固。

3) 若投入相同的相对材料强度,粘贴钢板加固梁比粘贴碳纤维具有更高的承载力提升幅度,粘贴钢板比粘贴碳纤维布具有更好的加固效果。

## 参考文献:

- [1] 李贵炳,张爱晖,金伟良. 承载下外贴纤维布加固 RC 梁抗弯性能研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(1): 70-75.
- [2] 刘建起,王敬莎,丁乃庆. 碳纤维加固预应力梁抗弯承载力试验研究[J]. 土木工程学报,2005,38(11): 9-13.
- [3] 谢剑,赵彤,王亨. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯承载力设计方法的研究[J]. 建筑技术,2002,33(6): 411-413.
- [4] 孔琴,刘立新. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2004,25(4): 24-27.
- [5] 王文伟,赵国藩,黄承逵. 碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J]. 工程力学,2004,21(4): 172-178.
- [6] 邓宗才. 碳纤维布增强钢筋混凝土梁抗弯力学性能研究[J]. 中国公路学报,2001,14(2): 45-51.
- [7] 王敏容. 粘贴碳纤维或钢板加固受弯构件的效果对比[J]. 五邑大学学报:自然科学版,2013,27(3): 61-67.
- [8] 任伟,贺拴海,赵小星,等. 粘贴钢板加固持荷钢筋混凝土 T 型梁模型试验[J]. 中国公路学报,2008,21(3): 64-68.
- [9] 段与坤. 粘贴钢板和碳纤维在桥梁加固中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [10] 高轩能,周期源,陈明华. 粘钢加固 RC 梁承载性能的理论 and 试验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(8): 38-44.
- [11] 翟爱良,刘夫江,冯耀奇,等. 粘贴钢板加固混凝土梁的正截面承载力计算[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2002,33(3): 343-346.