



织物增强混凝土薄板加固钢筋混凝土梁 受弯性能试验研究

荀 勇¹, 支正东¹, 张 勤²

(1. 盐城工学院, 江苏盐城 224051; 2. 大连理工大学, 辽宁大连 116024)

摘要:提出一种采用织物增强混凝土(TRC)薄板加固钢筋混凝土梁的方法,以梁两端纯弯区外侧400mm范围内的锚固方式和加固层织物网层数为主要变化参数,进行3组10根TRC薄板加固钢筋混凝土梁和2根对比梁的受弯性能试验研究,分析加固梁的破坏模式、荷载-挠度关系、荷载-钢筋应变、荷载-混凝土应变关系、裂缝开展情况,研究配网率对受弯承载力的影响。研究表明:TRC薄板加固可以有效地提高梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载;加固后梁的延性略有降低;当配网率提高到一定程度后,加固梁承载力主要由加固层与老混凝土之间的局部脱粘破坏决定。根据不同的破坏模式,提出了TRC薄板加固梁的受弯承载力计算方法,给出了相关计算公式。

关键词:钢筋混凝土梁; 织物增强混凝土; 加固; 静力试验; 受弯承载力

中图分类号:TU528.043 TU375.1 **文献标志码:**A

Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced concrete sheets

XUN Yong¹, ZHI Zhengdong¹, ZHANG Qin²

(1. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method with textile reinforced concrete (TRC) sheets is proposed for the strengthening reinforced concrete (RC) beams. Ten strengthened beams and two no-strengthened beams were experimentally investigated. The strengthened beams were grouped into three according to the number of textile layers and anchorage modes in the scope of 400mm outside of pure bending section. The failure pattern, crack development, relationship of load-deflection, relationship of load-steel strain, relationship of load-concrete strain were analyzed. The bending capacity to be affected by the cross-sectional area ratio of the textile was studied. The test results indicated that compared with no-strengthened beams, the cracking loading, yield loading and ultimate loading of the strengthened beams were increased, and the ductility of the strengthened beams was slightly reduced. When the cross-sectional area ratio of the textile was increased to such an higher extent, the bending capacity of the strengthened beams mostly depends on the bonding between new layer of TRC sheet and old concrete of RC beam. According to the different of damaging appearance, the formulas of the bending capacity were derived for the strengthened beams.

Keywords: RC beam; textile reinforced concrete; strengthening; static test; flexural capacity

基金项目:国家自然科学基金项目(50378018)。

作者简介:荀勇(1964—),男,江苏滨海人,工学博士,教授。E-mail: yongxun@ycit.cn

收稿日期:2009年4月

0 引言

近年来由各类纤维和基体相结合形成的纤维增强材料在土木工程中的应用一直是国内外研究的热点,其中粘贴碳纤维布加固法是目前应用于土木工程领域较早、较成熟的一种加固技术。碳纤维作为外粘加固的材料,有诸多技术优势:高比强度(强度和重量之比);良好的耐腐蚀性能和耐久性;施工质量容易保证,对结构的影响小等。但是,它也有一些自身的弱点:碳纤维材料昂贵,防火性能差;粘贴碳纤维所用结构胶中的环氧树脂胶的耐火、耐高温性能差,易老化,与被加固的混凝土之间的相容性、相互渗透性差,透气、透水性能差,在加固设计时很难评估火灾、人为破坏或其他意外事故对该材料可能产生的风险。

纤维织物增强混凝土(TRC)在国内外都是一个很新的研究课题,许多国外学者在这方面已做了大量的研究工作^[1-3],国内的研究工作尚处于起步阶段,见著报道的文章较少。本文在 TRC 薄板的力学性能^[4]和与老混凝土的界面粘结性能^[5]试验研究的基础上,提出并试验研究了采用 TRC 薄板加固钢筋混凝土梁的方法,即采用纬向为碳纤维(沿梁的纵向)、经向为耐碱玻璃纤维的缝编织物增强细骨料混凝土薄板加固钢筋混凝土梁。同碳纤维布加固法相比,一方面,采用细骨料混凝土作为无机凝胶材料,与基材间有较好的相容性、协调性及相互渗透性,而且抗老化、耐火、耐久性较好,弥补了碳纤维增强塑料不适宜用于潮湿的基体表面及低温环境的缺陷^[6],同时也省去了界面粘贴技术中高成本粘结剂的使用;另一方面,由于碳纤维价格较高,因此采用织物的形式比碳纤维布具有较大的经济优势。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本次试验共制作了 12 个钢筋混凝土梁试件,截面尺寸及配筋见图 1。其中 2 个为未作加固处理的对比试件,其余 10 个试件在受拉侧跨中 1500mm 范围内粘贴 TRC 加固。为了增加 TRC 层与混凝土梁的粘结效果,加固区段均进行凿糙处理。为了加强加固层两端部的锚固,部分梁在两端纯弯区外侧 400mm 范围内除凿糙之外还采用植筋处理。凿糙与植筋完成后,采用高性能细骨料混凝土逐层粘贴纤维织物,最后一层织物粘贴完成后用一薄层高性能细骨料混凝土作保护层。加固方案见图 2。加固试件根据加固层两端部的锚固方式不同分为三组,每

组以织物铺设层数为主要变化参数。试件编号、加固参数见表 1,表中 B1 组仅作凿糙处理,凿糙度 $H \approx 3.19 \sim 3.61\text{mm}$; B2 组凿糙 ($H \approx 2.16 \sim 2.30\text{mm}$) + 植筋($4 \Phi 6$); B3 组凿糙 ($H \approx 2.26 \sim 2.40\text{mm}$) + 植筋($8 \Phi 6$)。

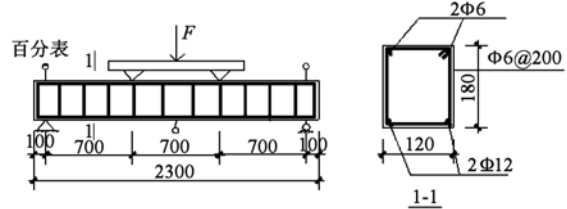


图 1 试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Section details and reinforcement arrangement of test beams

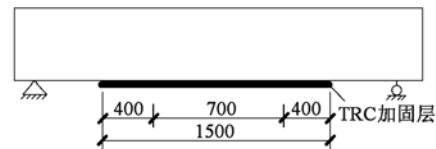


图 2 梁加固方案示意图

Fig. 2 Retrofitted mode of beams

表 1 试验梁加固参数

Table 1 Properties of test beams

组号	试件编号	织物铺设层数	混凝土立方抗压强度 f_{cu} /MPa
对比试件	B0-1	—	26.9
	B0-2	—	28.8
第 1 组	B1-1	1	26.9
	B1-2	2	26.9
	B1-3	3	26.9
	B1-4	4	28.8
第 2 组	B2-2	2	28.8
	B2-3	3	28.8
	B2-4	4	26.9
第 3 组	B3-2	2	28.8
	B3-3	3	28.8
	B3-4	4	26.9

钢筋力学性能见表 2,加固用织物的力学参数见表 3,高性能细骨料混凝土的 28d 立方抗压强度均值为 53.3MPa。

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical property of steel bars

钢筋类型	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	延伸率 δ_s /%
$\Phi 12$	339.5	514.6	25.3
$\Phi 6$	409.6	619.9	23.5

表 3 织物的主要参数

Table 3 Properties of textile

织物参数	拉伸强度 f_{ct} /MPa	拉伸模量 E_{ct} /GPa	伸长率 δ_{ct} /%
碳纤维	4660	231	2.0
玻璃纤维	3200	65	4.5

1.2 测点布置、加载方案及观测方法

1.2.1 测点布置

试验测量的主要内容:荷载-位移曲线、受拉纵向钢筋的应变、跨中截面混凝土应变、裂缝开展情况。

试件浇筑前在梁纵筋的中部及对应两加载点位置粘贴钢筋应变片,试验前在跨中梁顶面、梁侧面、加固层底面沿一定标距粘贴混凝土应变片,见图3。另外,加载前在梁跨中底面及支座处顶面架设百分表,以测量跨中挠度。

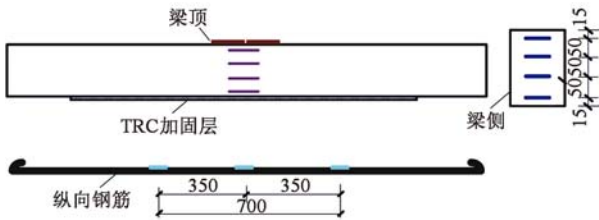


图3 试件应变片布置图

Fig. 3 Positions of strain gauges

1.2.2 加载方案及观测方法

试验在 5000kN 压力试验机上进行,采用三分点对称加载方式,加载装置见图4。荷载由分配梁与压力机压板间的力传感器来控制,力传感器和应变片均与数据采集仪 DT515 相连,按荷载级采集数据。试验时先进行 3kN 的预加载,然后以每级 3kN 分级加载,在达开裂荷载计算值前及钢筋屈服后分级适当加密。

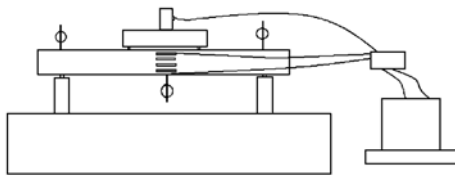


图4 加载装置

Fig. 4 Test set-up

2 试验结果及分析

试验现象表明,经凿糙或凿糙+植筋两种方法处理的叠合梁均未发生 TRC 加固层端部锚固区脱粘破坏,因此织物铺设层数可视为影响试验结果的主要参数。

2.1 破坏形态

根据试验,试验梁所呈现的破坏形态主要有以下几种类型:① 适筋破坏。B0 组对比试件呈现出典型的适筋梁破坏模式,即纵向受拉钢筋先屈服,随后钢筋经历较大的塑性变形后受压区混凝土被压碎而破坏,见图 5a。② 织物纤维被拉断,压区混凝土未被压碎。单双层 TRC 加固试件在受拉纵筋屈服后,继

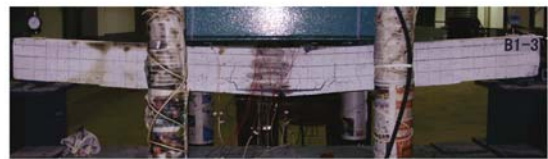
续增加的荷载主要由加固层来承受,由于配网率较小,当碳纤维上的应力达到其极限抗拉强度时,加固层被拉断,此时压区混凝土未被压碎,见图 5b。③ 加固层在跨中局部脱粘破坏。3 层、4 层 TRC 加固试件,在受拉纵筋屈服后,继续加荷至一定程度,跨中加固层与老混凝土之间脱粘,脱粘长度约为 300 ~ 450mm。脱粘后梁变形骤加,部分纤维被拉断,受压区顶部混凝土很快被压碎,试件破坏,见图 5c。



(a) 适筋梁破坏(B0-1)



(b) 纤维被拉断破坏(B1-2)



(c) 跨中脱粘破坏(B1-3)

图5 试件破坏模式

Fig. 5 Failure mode of test beams

2.2 跨中混凝土应变沿梁高的分布

如图 6 所示,在一定标距范围内,当混凝土未开裂时,跨中混凝土平均应变沿梁高度方向的分布能够较好地符合平截面假定;混凝土开裂以后,随着荷载的增加,由于受裂缝开展、应变片的量测标距有限、仪器误差、试验人为误差等各种因素的影响,这种情况没有混凝土开裂前明显,但仍能基本符合平截面假定。因此,在对加固梁的计算和分析过程中,可以把平截面假定作为一个基本假定。

2.3 承载力

试件的承载力试验结果见表4。由表4可知,加固后梁的开裂荷载 P_{cr} 、梁中受拉纵筋屈服荷载 P_y 及极限荷载 P_u 都有不同程度的提高。单层织物加固时,相比于对比试件,开裂荷载提高约11%,屈服荷载提高约6%,极限荷载提高约3%;2层织物加固时,开裂荷载提高约16%,屈服荷载提高约17%,极限荷载提高约9%;3层织物加固时,开裂荷载提高约23%,屈服荷载提高约22%,极限荷载提高约16%;4层织物加固时,开裂荷载提高约27%,屈服荷载提高约27%,极限荷载提高约30%。

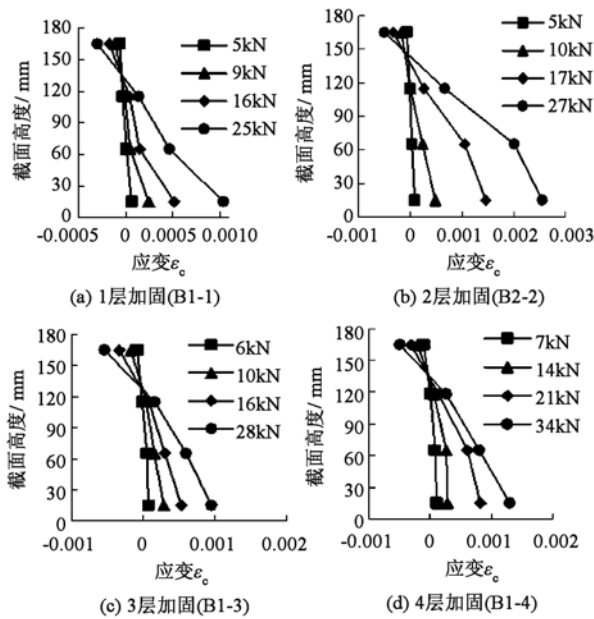


图 6 应变沿梁高分布

Fig. 6 Strain distribution on midspan sections of beams

表 4 试件开裂、屈服、极限荷载

Table 4 Cracking load, yield load and ultimate load of test beams

试件编号	P_{cr} /kN	P_y /kN	P_u /kN	P'_u /kN	$\frac{P_u}{P'_u}$	破坏形态
B0-1	6.16	25.37	30.03	27.89	1.08	适筋梁破坏
B0-2	5.98	25.13	30.92	28.08	1.10	适筋梁破坏
B1-1	6.72	26.86	31.34	27.89	1.12	TRC 被拉断
B1-2	6.72	27.79	32.46	27.89	1.16	TRC 被拉断
B2-2	7.32	29.66	33.51	28.08	1.19	TRC 被拉断
B3-2	7.12	30.88	33.92	28.08	1.21	TRC 被拉断
B1-3	7.47	30.96	34.88	27.89	1.25	跨中 TRC 脱粘
B2-3	7.28	29.47	33.76	28.08	1.20	跨中 TRC 脱粘
B3-3	7.65	31.71	37.67	28.08	1.34	跨中 TRC 脱粘
B1-4	7.83	32.08	40.65	28.08	1.45	跨中 TRC 脱粘
B2-4	7.73	32.45	39.54	27.89	1.42	跨中 TRC 脱粘
B3-4	7.59	31.64	38.79	27.89	1.39	跨中 TRC 脱粘

注: P_{cr} 、 P_y 、 P_u 分别为试件的开裂荷载、纵筋屈服荷载和极限荷载的实测值, P'_u 为梁未加固前的受弯极限承载力理论值。

结果表明,承载力的提高幅度与 TRC 的配网率 ρ_f (定义为织物横截面面积 A_{cf} 与 bh_f 的比值, b 、 h_f 为 TRC 加固层的平均宽度和厚度。本系列试验 TRC 加固层平均厚度分别为 10mm(1 层), 15mm(2 层), 18mm(3 层), 20mm(4 层)) 相关。当配网率增大时,试件的开裂荷载、纵筋屈服荷载、极限荷载提高呈现出不同的增长规律,如图 7 所示,图中 R_{cr} 、 R_y 、 R_u 分别为各试件开裂、受拉纵筋屈服、达到极限时相应荷载相对于 B0-1, B0-2 对比试件各阶段荷载均值的比值。采用单层及双层织物加固时,试件开裂荷载、屈服荷载提高幅度明显优于极限荷载,这主要是由于 TRC 加固层与原结构协同受力,分担了部分截面

弯矩,从而提高了开裂荷载和屈服荷载,但受拉钢筋屈服后,继续增加的荷载主要由 TRC 来承受,由于 TRC 中配网率有限,最终织物被拉断,使得极限承载力提高不明显;当加固层中织物层数达 3 层,试件极限荷载提高幅度明显加大,但提高比例仍小于开裂荷载及屈服荷载,主要是由于试件纯弯区界面粘结薄弱,最终织物未全部发挥作用时就因局部剥离脱粘而破坏;当加固层中织物层数增至 4 层时,虽然试件也在纯弯区发生了局部剥离脱粘破坏,部分纤维被拉断,但由于有足够配网率的保证,加固层仍能承担后期增长的荷载,其极限荷载提高幅度大于对应的开裂荷载及屈服荷载。

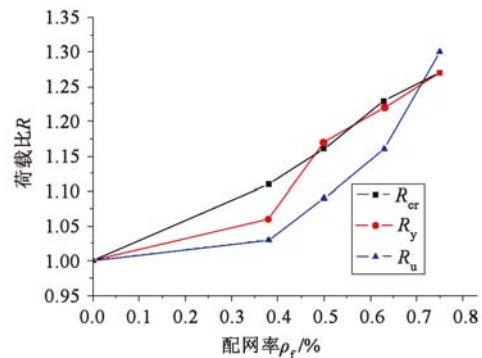


图 7 配网率 ρ_f 与荷载比 R 的关系

Fig. 7 Load versus network ratio curves

2.4 荷载-挠度及荷载-钢筋、混凝土应变

试验得到的部分试件的荷载-挠度、荷载-受拉纵筋跨中应变及荷载-跨中顶部混凝土应变关系分别见图 8、9、10。

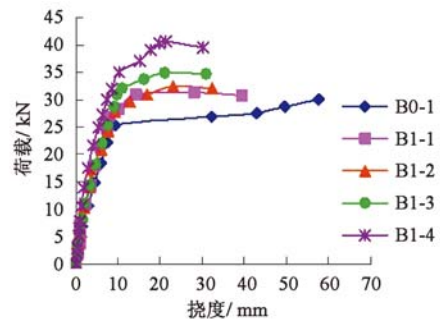


图 8 荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load versus deflection curves

由荷载-受拉纵筋应变关系图 9 可知,所有试件均经历开裂阶段和受拉纵筋屈服阶段。从图 8 ~ 10 可见:开裂前,由于荷载较小、变形较小,所有构件的挠度、纵筋应变、混凝土应变基本一致;开裂后至受拉纵筋屈服前,荷载由受拉纵筋和织物共同承担,相当于增加了试件的配筋率,因此随着织物层数的增加,试件的刚度稍有增加;又因碳纤维弹性模量较大,受拉纵筋应变滞后较明显;混凝土应变差别不明

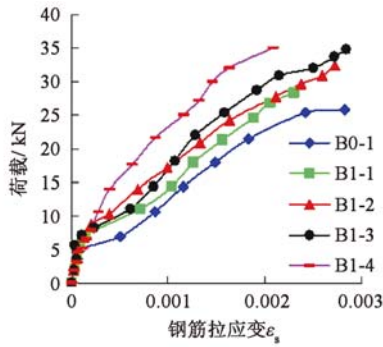


图9 荷载-受拉纵筋跨中应变关系

Fig. 9 Strain curves of longitudinal reinforcement of beams

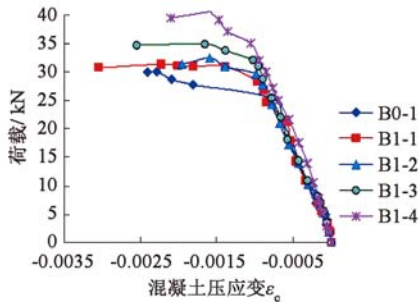


图10 荷载-梁顶混凝土的应变关系

Fig. 10 Load versus concrete strain curves of beams

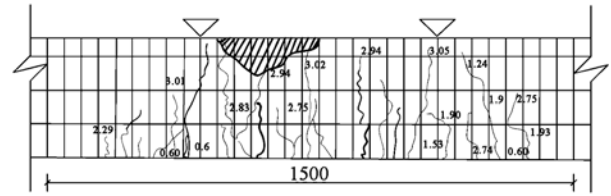
显,主要是由于在该阶段中和轴上移幅度较小。受拉纵筋屈服后,对比试件受拉纵筋在应力不变的情况下应变剧增,跨中挠度不断增大,中和轴迅速上移,混凝土应变剧增(此时梁仍能承担较大幅度增加的加荷)。加固试件在纵筋屈服后仍能承担较大增幅的荷载,继续增加的荷载主要由织物来承担,中和轴上移缓慢,因此,跨中挠度、纵筋应变、混凝土应变滞后较为明显。

另外,由图9可知,由于碳纤维的极限拉应变相对钢筋比较小,试件加固后,延性明显降低,但所有加固试件的延性相差不大,极限荷载时,跨中挠度基本都达到20mm以上,仍然表现出了较好的延性。

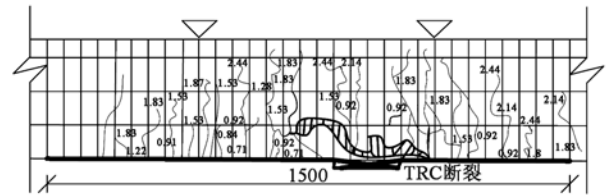
2.5 裂缝开展

对比试件加载过程中,首先在承受正应力最大的纯弯段下侧出现第一条细而短的裂缝,并与梁轴线垂直相交。随着荷载的增加,裂缝宽度不断增大并向上扩展延伸;同时,在纯弯段间隔一定距离相继出现新的裂缝,在剪跨区也开始出现裂缝。进一步加荷,纵向受拉钢筋屈服,跨中纯弯段的竖向裂缝宽度不断增大,并进一步向上延伸,形成几条竖向主裂缝,随后跨中附近的主裂缝突然增大并向上侧延伸,最后受压区混凝土压碎。B0-2试件裂缝分布见图11a。

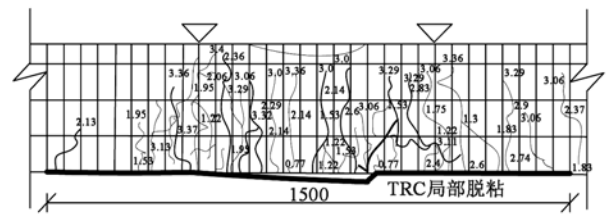
加固试件首先在纯弯区加固层下侧开裂,由于织物网与细骨料混凝土之间的粘结较好,且加固层较薄,一旦开裂迅速出现若干条裂缝,裂缝分布密而



(a) B0-2



(b) B3-2



(c) B3-4

图11 部分梁裂缝分布形式

Fig. 11 Split shape of beams

均匀。继续加荷,部分加固层裂缝向上延伸到梁混凝土上,混凝土梁开裂,裂缝分布仍比较均匀,分布范围较大。随后裂缝不断向上延伸,但速度较对比试件明显缓慢,尤其是纵筋屈服以后,这主要是由于加固层承担了相当一部分荷载,并且碳纤维的弹性模量比较大,使得梁受拉区混凝土的变形发展缓慢。进一步加荷,单、双层织物增强混凝土薄板加固试件的织物被拉断,加固层断裂(图11b);3、4层织物增强混凝土薄板加固试件则先在跨中附近加固层与梁混凝土之间出现水平向脱粘裂缝,裂缝沿水平向不断向两边发展,裂缝宽度不断增加。跨中加固层完全脱粘后,部分纤维被拉断,裂缝迅速向受压区发展,随后受压区混凝土被压碎(图11c)。

3 正截面受弯承载力计算

基于上述试验中TRC薄板加固RC梁的应力-应变的发展情况和破坏形态,其极限荷载计算可以采用以下基本假定:

- (1) 梁在受弯过程中截面应变保持平面;
- (2) 不考虑混凝土的抗拉强度;
- (3) 钢筋受拉、混凝土受压的应力-应变关系沿用GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》中的公式。

混凝土受压应力-应变关系如下:

$$\text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \text{ 时, } \sigma_c = f_c [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_0)^n] \quad (1)$$

$$n = 2 - 1/60(f_{cu,k} - 50) \quad (2)$$

$$\text{当 } \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \text{ 时, } \sigma_c = f_c \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5(f_{cu,k} - 50) \quad (4)$$

(4) 碳纤维织物的应力 σ_{cf} -应变 ε_{cf} 关系为:

$$\sigma_{cf} = E_{cf}\varepsilon_{cf} \quad (5)$$

根据加固试件破坏形态的不同,其正截面受弯承载力的计算可以分为织物纤维被拉断、受压区混凝土未被压碎和加固层在跨中局部脱粘、混凝土被压碎两种情况。

3.1 织物纤维被拉断,受压区混凝土未被压碎

对于这一种情况,构件的正截面受弯承载力计算简图如图 12 所示。

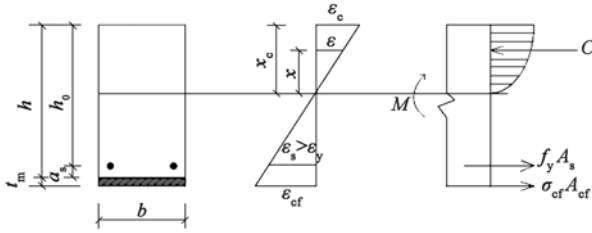


图 12 第一种破坏模式应力、应变及力的平衡图

Fig. 12 Strain and stress distributions over beam section and equilibrium forces of the first failure mode

梁顶混凝土未达到极限压应变,因此受压区合力为:

$$C = \int_0^{x_c} b\sigma_c dx = \frac{x_c}{\varepsilon_c} \int_0^{\varepsilon_c} b\sigma_c d\varepsilon \quad (6)$$

由力平衡条件可得:

$$\frac{x_c}{\varepsilon_c} \int_0^{\varepsilon_c} b\sigma_c d\varepsilon = f_y A_s + \sigma_{cf} A_{cf} \quad (7)$$

由力矩平衡条件可得:

$$M = \frac{x_c^2}{\varepsilon_c^2} \int_0^{\varepsilon_c} b\sigma_c \varepsilon d\varepsilon + f_y A_s (h_0 - x_c) + \sigma_{cf} A_{cf} (h + \frac{t_m}{2} - x_c) \quad (8)$$

由于 $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$, $\sigma_{cf} = \sigma_{cfu}$

$$x_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{cfu}} (h + \frac{t_m}{2}) \quad (9)$$

式中: C 为受压区混凝土的合力; ε_{cu} 为混凝土极限压应变; σ_{cfu} 、 ε_{cfu} 分别为碳纤维织物的极限抗拉强度和极限应变值; t_m 为 TRC 薄板的厚度。

联立式(1)、(3)、(5)、(6)、(7)、(8)、(9),即可求得极限弯矩 M_u 。

3.2 加固层在跨中局部脱粘,混凝土被压碎

在这种情况下,梁顶混凝土已达极限压应变,因此受压区混凝土合力 C 可采取等效矩形的方法计算。计算简图如图 13 所示。

由力平衡条件可得:

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s + f_{cf} A_{cf} \quad (10)$$

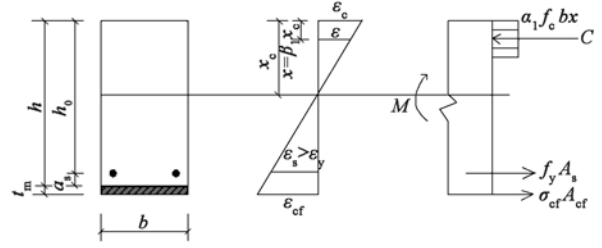


图 13 第二种破坏模式应力、应变及力的平衡图

Fig. 13 Strain and stress distributions over beam section and equilibrium forces of the second failure mode

由力矩平衡条件可得:

$$M_u = \alpha_1 f_c b x (h + \frac{t_m}{2} - \frac{x_c}{2}) - f_y A_s (h - h_0 + \frac{t_m}{2}) \quad (11)$$

式中, f_{cf} 可按式(12)计算:

$$f_{cf} = E_{cf} \varepsilon_{cu} \left[\frac{\beta_1 (h + \frac{t_m}{2})}{x} - 1 \right] \quad (\varepsilon_{cu} \leq \varepsilon_{cfu}) \quad (12)$$

利用上述公式计算试件正截面承载力,部分试件极限荷载的计算值 P_u^* 与试验值 P_u 的比较见表 5。结果表明计算值与试验值吻合较好。

表 5 极限承载力计算结果与实测结果比较

Table 5 Comparison of bending-resistance theoretical and experimental values

试编编号	试验值 P_u /kN	计算值 P_u^* /kN	相对误差/%
B1-1	31.34	30.23	-3.5
B1-2	32.46	34.11	5.1
B2-2	33.51	35.64	6.4
B3-2	33.92	32.21	-5.0
B1-4	40.65	39.49	-2.9

4 结论

(1) 采用 TRC 薄板加固,可以有效地提高 RC 梁的受弯承载力。且在一定范围内提高配网率,试件的开裂荷载、纵筋屈服荷载、极限荷载的提高幅度呈增长趋势。

(2) 加固试件的刚度略有提高,延性略降,但仍较好。配网率的提高对延性降低程度的影响不大。

(3) 加固试件在开裂前和正常使用阶段,纵向应变沿截面高度为直线变化,即符合平截面假定。

(4) 加固试件纵向钢筋的拉应变及梁顶混凝土压应变都呈现出一定程度的滞后现象。

(5) 加固层能够有效地改善试件的裂缝分布,加固试件的裂缝分布具有密而均匀的特点。

(6) 配网率提高到一定程度后,试件跨中加固层

与老混凝土之间出现局部脱粘现象,这是影响其承载力的一个重要因素,如何解决局部脱粘问题有待进一步研究。

(7)本文给出的加固梁正截面受弯承载力的计算公式具有一定的计算精度,计算值与试验值吻合较好。

参 考 文 献

- [1] Bruckner A,Ortlepp R, Curbach M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear[J]. Materials and Structures, 2006, 39(10):741-748.
- [2] Curbach M, Ortlepp R, Triantafillou T C. TRC for rehabilitation[C]// Textile Reinforced Concrete; State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006: 221-235.
- [3] Curbach M, Jesse F. High-performance textile-reinforced concrete [J]. Structural Engineering International,1999,9(4):54-62.
- [4] 荀勇,孙伟,Reinhart H W,等. 短纤维和织物增强混凝土薄板试验研究[J]. 土木工程学报, 2005,38(11):58-63. (Xun Yong, Sun Wei, Reinhart H W, et al. An experimental study on short fiber and textile reinforced concrete thin-slabs [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 58-63. (in Chinese))
- [5] 荀勇,孙伟,Reinhart H W,等. 碳纤维织物增强混凝土薄板的界面粘结性能试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2005,35(4):593-597. (Xun Yong, Sun Wei, Reinhart H W, et al. Experiment on interface bonding performance of carbon textile reinforced concrete sheets [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005,35(4):593-597. (in Chinese))
- [6] Triantafillou T C, Papanicolaou C G. Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets[J]. Materials and Structures, 2006, 39(10):93-103.