

文章编号:1673-0062(2011)03-099-04

CFRP 筋混凝土梁正截面承载力设计建议

唐小林

(南华大学 城市建设学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:CFRP 加固混凝土结构技术具有诸多优点,目前在国内外得到广泛的运用.国外对 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力公式制定了规范,而我国还没有对 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力制定专门的规范.本文在试验基础上,参考国外的有关资料,提出了 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力设计建议.结果表明本文的承载力建议值与实验结果吻合较好,能较准确地计算 CFRP 筋混凝土梁的承载力,为工程设计提供了参考.

关键词:设计建议;CFRP 加固;极限承载力;CFRP 筋混凝土梁

中图分类号:TU528 **文献标识码:**B

Design Suggestion for Normal Section Ultimate Strength of the Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Sheet

TANG Xiao-lin

(School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: At present, CFRP strengthened reinforced concrete has been applied more and more widely in China because of many advantages. Normal section ultimate strength has been formulated for the specifications and standards to the CFRP reinforced concrete beams in overseas, but not in our country. Based on the experiment and referring to the overseas, this paper puts forward the design suggestion for normal section ultimate strength of the CFRP reinforced concrete beams. The results show that the agreement between the suggested result the experimental result is satisfactory, and that the suggested formula can accurately calculate the ultimate strength of the CFRP reinforced concrete beams. The result of this paper has reference value for engineering design.

key words: design suggestion; carbon fiber sheet strengthening; ultimate strength; reinforced concrete beams with carbon fiber sheet

CFRP 加固混凝土结构技术具有力学性能优良、加固效果明显、施工方便等优点,目前在国内外

得到广泛的运用.利用 CFRP 粘贴在钢筋混凝土梁底,提高梁的极限承载能力和变形能力是这种

收稿日期:2011-06-14

基金项目:衡阳市科技局基金资助项目(2009KG45)

作者简介:唐小林(1968-),男,湖南衡阳人,南华大学城市建设学院讲师.主要研究方向:碳纤维应用.

加固技术的一个主要运用形式,这已经在国外大量的试验研究中得到证实,并已在工程中得到较多的运用^[1-4].

国外对于 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力及挠度公式制定了规范,而我国对于 CFRP 筋混凝土梁抗弯性能的试验研究的人员不多,还没有对 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力及挠度制定专门的规范,本文在试验基础上,参考国外的有关资料,提出了 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力及挠度设计建议.

1 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力设计方法

1.1 CFRP 筋混凝土梁的性能分析

CFRP 筋具有强度高、质量轻、抗腐蚀、低松弛、易加工等诸多优良的特性,是钢筋的良好替代物,国内目前所生产出的碳纤维增强塑料筋(CFRP)产品中,主要采取的方法有两种,一种是采用表面粘砂技术以提高粘结性能,另一种是在光圆筋表面利用机械缠绕技术制成螺纹以提高粘结性能.本文所使用的碳纤维塑料筋系由南京某厂生产的,其螺纹筋采用了机械缠绕成型处理. CFRP 筋在外力作用下应力应变始终保持线弹性变化,甚至被拉断也不会出现屈服现象,在极限状态下的破坏是突然的,呈现典型的脆性破坏形式,而钢筋超过比例极限以后即出现塑性特征.受 CFRP 筋的性能影响,CFRP 筋混凝土梁与钢筋混凝土梁相比在外力作用下始终保持线弹性变化,在极限状态下的破坏具有突然性,几乎没有塑性变形,而构件在正常工作状态下产生的挠度和变形在外力移去后自动恢复.受拉区混凝土在外荷载产生的裂缝与钢筋混凝土梁相比数量少而间距大.一般情况下,以受压混凝土被压碎或 CFRP 筋被拉断作为其破坏的依据.这些特性决定 CFRP 筋混凝土梁的设计有别于钢筋混凝土梁的设计.

1.2 混凝土的性能分析

为了充分利用 CFRP 的较高的极限抗拉强度,用高强混凝土代替普通强度混凝土很有必要,CFRP 筋混凝土梁工作原理同钢筋混凝土梁,受力后,受拉区混凝土先承受拉力,由于混凝土抗拉强度较低,随着荷载增大,受拉区混凝土退出工作,CFRP 筋承受拉力,由于 CFRP 筋抗拉强度较高,这就要求抗压区混凝土强度较普通强度混凝土高,使抗压区混凝土随荷载达到极限荷载破坏时,CFRP 筋达到屈服,即所谓的 CFRP 筋混凝土梁正截面适筋破坏,两种材料强度得到充分利用,

承载能力得到更大的提高.

1.3 钢筋混凝土梁的弯曲破坏

钢筋混凝土梁的抗弯强度取决于已知的混凝土和钢筋应变,受压破坏时混凝土极限压应变假定为 0.0033.混凝土应力应变曲线理想状态被认为是抛物线、梯形、矩形或其它任何形状,其预测强度与大量的试验结果能很好的吻合.当梁达到混凝土受压破坏时,使用平衡相容条件来评估梁的抗弯强度.由于钢筋存在弹塑性性能,因而定义有三种可能的破坏形态.第一种,如果破坏时钢筋应变处于弹性阶段,梁是超筋破坏,这种情形与 CFRP 筋混凝土梁破坏形态相同;第二种如果破坏时钢筋应变恰好等于屈服应变,梁是适筋破坏;第三种,如果破坏时钢筋应变高于屈服应变,梁是少筋破坏,此时钢筋已屈服.根据《混凝土结构设计规范 GB50010—2010》,单筋矩形截面正截面的抗弯强度:

$$M_u = \alpha_1 f_y A_s (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (1)$$

式中,当混凝土强度等级不超过 C₅₀ 时 α_1 取 1; f_y 为钢筋屈服强度; A_s 为钢筋面积; h_0 为梁的有效高度,即极限受压纤维到钢筋重心的距离; x 为理想受压区高度.

1.4 CFRP 筋混凝土梁的弯曲破坏

钢筋混凝土梁的破坏被压碎前钢筋达到屈服,由屈服的钢筋提供塑性变形和破坏预警,而无塑性变形的 CFRP 筋则没有屈服点,不能提供塑性变形和破坏预警.试验证明,CFRP 筋混凝土梁有以下三种形式:当 CFRP 配筋较多时,在极限荷载作用下受压混凝土被压碎而 CFRP 筋依然保持弹性工作状态; CFRP 配筋相对较小时,达到极限荷载时 CFRP 筋被拉断而受压区混凝土尚未达到极限压应变; CFRP 筋混凝土梁配筋适中,达到极限荷载时混凝土被压碎同时 CFRP 筋被拉断^[5].

1.5 CFRP 筋混凝土梁正截面承载力设计方法

与钢筋混凝土梁受弯构件相似,确定 CFRP 筋混凝土梁的强度须作如下假定:

1) 平截面假定,即在荷载作用下,构件截面保持为平面,混凝土纤维应变值和 CFRP 筋应变值的大小与其到中和轴的距离成正比; 2) 忽略混凝土的抗拉强度; 3) CFRP 筋始终保持线弹性工作状态直到构件破坏; 4) CFRP 筋和混凝土之间存在完好的粘结应力; 5) 混凝土的极限应变值取为 0.003.

由于 CFRP 筋应变呈线弹性,设法定义一个“等效”屈服点作为 CFRP 筋的屈服强度. Nawy 和 Neuwerth^[6]对玻璃纤维增强塑料筋混凝土梁进行

了研究,他们在式(1)中用 GFRP 筋的实际试验应力代替屈服应力,使用这种方法能得到很好的结果,应用较广泛. Faza 和 GangaRao 通过使用 FRP 筋上 80% 的实际应力分析 45 根 FRP 筋混凝土梁样本并对 Nawy 和 Neuwerth 使用的方程进行了修改,考虑了一个 1.2 的安全系数. Alsayed 和 Alhozaimy 基于 ACI 规范对钢筋混凝土梁和 FRP 筋混凝土梁提供了一个修正方法. Alkhrdaji 在 Faza 和 GangaRao, Nanni 及 GangaRao 和 Vijay 的研究基础上对 FRP 筋混凝土梁抗弯性能进行了研究^[7],并提出了一种推荐方法.

2 设计方法

2.1 基本假定

假定如下:1) 受压混凝土的应力—应变满足 Hognested 曲线典型抛物线方程,非线性分析过程中采用等效矩形应力分布取代抛物线应力分布;2) 混凝土的极限应变值取为 0.003;3) 平截面假定,即弯曲前后截面仍保持为平面;4) CFRP 筋与混凝土之间有很好的粘结性能.

2.2 建议设计方法

Nawy 和 Neuwert 等是对 GFRP 筋混凝土梁进行了研究,CFRP 筋比 GFRP 筋有更高的抗拉强度,延性较 GFRP 筋差,结合 CFRP 筋的特点,分混凝土受压破坏,建议公式中 f_y 为屈服强度,取其残余应变为 2% 时相应的强度;CFRP 筋破坏,建议公式中 f_u 为 CFRP 筋极限抗拉强度,表明 CFRP 筋已拉断,取其破坏时的强度. 作者对 CFRP 筋混凝土梁的抗弯极限承载力有如下的建议设计公式.

混凝土受压破坏,即 CFRP 筋拉断以前,混凝

土压碎,极限承载力公式如下:

$$M_u = A_f E_f f_y \varepsilon_{cu} \left(\frac{h_0}{c} - 1 \right) (h_0 - \gamma c) \quad (2)$$

式中, γ 可参考 Park 和 Paulay 的公式得:

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_{cu}} \varepsilon_c \sigma_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu} \int_0^{\varepsilon_{cu}} \sigma_c d\varepsilon_c} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{\varepsilon_{cu}}{12\varepsilon'_c}}{1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon'_c}} \quad (3)$$

式中, A_f 为 CFRP 筋面积; E_f 为 FRP 筋的弹性模量; ε_{cu} 为受压混凝土的最大应变 0.003; c 为中和轴到极限受压纤维的距离; ε'_c 为达到混凝土抗压强度 f'_c 时对应的应变.

CFRP 筋破坏,即混凝土压碎以前,CFRP 筋拉断,极限承载力公式如下:

$$M_u = A_f f_u (h_0 - \gamma c) \quad (4)$$

式中, f_u 为 CFRP 筋极限抗拉强度.

3 实验与计算结果对比分析

3.1 试件的设计和制作

本试验方案碳纤维增强塑料(CFRP)筋普通混凝土梁及普通钢筋混凝土梁规格及尺寸一样,长度为 2 100 mm(净跨为 1 800 mm),截面宽度为 140 mm,截面高度为 $h = 200$ mm,梁试件共 8 根,编号分别为 PB-1、PB-2、PB-3、PB-4,每个编号的梁各 2 根. 试件尺寸及配筋见表 2. 纤维筋直径为 9.5 mm,弹性模量为 12.4×10^4 MPa,屈服强度为 1 080 MPa,极限强度为 1 440 MPa. 为了充分利用 CFRP 筋较高的抗拉性能,采用的混凝土的抗压强度等级为 C40,实验中所用纵筋的力学参数见表 1.

表 1 纵筋的力学参数

Table 1 Sizes and reinforcements of test beams

试件参数的变化	编号	试件尺寸/mm	纵筋类型及规格	纵筋数量	箍筋数量	架立筋
不同纵筋配筋率	PB-1	2105 × 147 × 203	CFRP 螺纹筋	1	无	无
	PB-2	2104 × 135 × 206	直径 9.5 mm	2		
加箍筋	PB-3	2120 × 139 × 202	CFRP 螺纹筋 直径 9.5 mm	1	直径 6 mm, 间距 150 mm	2φ6
加入聚丙烯纤维	PB-4	2104 × 137 × 210	CFRP 螺纹筋 直径 9.5 mm	1	无	无

注:试件尺寸为长 × 宽 × 高,表中数据为实测值.

3.2 试验装置及试验方法

梁试件的加载采用三分点竖向加载方案,如图 1 所示,无箍筋梁以及普通钢筋混凝土梁的加载方案同有箍筋梁,采用 MTS 加载系统进行加载,加载方式为两点加载,加载点为试验梁的三分

点,通过作用在分配梁上的液压千斤顶逐级加载,每级荷载为 2.5 kN,在开裂点附近或接近破坏时,适当增加荷载级别,以确定梁的开裂荷载和破坏荷载,数据采集采用 DH3816 静态应变测量系统自动采集. 梁试件的挠度由分别置于梁两端及

正中的三个百分表读取。

3.3 试验结果与分析

CFRP 筋混凝土梁的正截面破坏过程与普通钢筋混凝土梁相似,加载初期,当弯矩较小时,梁受拉区边缘的纵向应变尚小于混凝土的极限拉应变,混凝土未开裂,整个截面参与受力,梁如一弹性匀质材料,挠度及筋应变均与弯矩成正比,这一阶段称为弹性阶段,其特点是梁处于弹性工作阶段。当受拉边缘的混凝土应变达到其极限拉应变时,受拉区混凝土开裂,裂缝出现的弯矩即为开裂弯矩。截面开裂以后,构件刚度降低,随着荷载增加,挠度较开裂前有较快的增长,荷载-挠度曲线出现第一个转折点。同时,由于开裂截面拉区混凝土退出工作,它所承担的拉力将传给 CFRP 筋,使开裂截面 CFRP 筋应变有明显的增大(突变)。开裂后中和轴往上移,裂缝出现后梁进入初裂阶段。普通钢筋混凝土梁试件的屈服是以试件的荷载-挠度曲线上明显的拐点作为判别标准,而 CFRP 筋混凝土梁的屈服在相关资料中一般取相应碳纤维筋极限承载力的 75%~80% 作为其屈服标志的,此时梁等弯矩段截面主筋已达到屈服强度或名义屈服强度,弯曲裂缝的数量、长度和宽度均有明显发展,主筋应力增加迅速,试件已进入塑性工作阶段。随着荷载继续增加,梁试件很快达到最大荷载点,即极限阶段。CFRP 筋混凝土梁正截面的破坏模式有混凝土压碎和 CFRP 筋断裂破坏两种。然而,由于试验中的有几根 CFRP 筋混凝土梁没配箍筋,因此还可能发生斜截面的剪切破坏。在 CFRP 筋混凝土梁的试验中有三种破坏形态 1) 受压区混凝土压碎;2) CFRP 筋断裂;3) 剪切破坏。

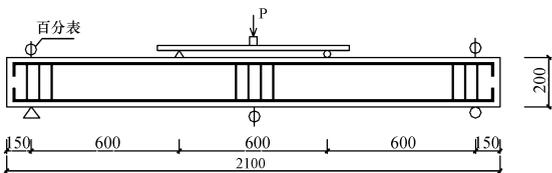


图1 碳纤维增强塑料筋普通混凝土梁试件简图

Fig.1 Sample diagram of concrete beam reinforced with CFRP bar

根据建议设计公式计算得到的极限承载力与实验得到的极限承载力对比见表2。

Alkhrdaji 的强度推荐公式是根据配筋率的大小,所得到的结果与试验结果相差较大。从表2

的可知,根据本文提出的建议公式计算得到的抗弯强度与试验结果相差接近。说明共本文的建议公式所计算得到的结果更较准确的计算 CFRP 筋混凝土梁的极限承载力。

表2 极限承载力对比表

Table 2	Ultimate load-carrying capacity	kN · m	
试件编号	计算结果 /(kN · m)	实验结果 (kN · m)	计算结果/ 实验结果
PB-1	12.41	12.00	1.034
PB-2	23.61	21.00	1.124
PB-3	12.41	13.80	0.899
PB-4	12.41	11.40	1.089

4 结论

CFRP 筋混凝土梁受弯构件与钢筋混凝土梁受弯构件相比在外力作用下始终保持线弹性变化,在极限状态下的破坏具有突然性,几乎没有塑性变化。因此,CFRP 筋混凝土梁的设计有别于钢筋混凝土梁的设计,CFRP 筋混凝土梁不宜按照弹塑性理论计算其承载力,而其极限承载力应按弹性理论求得。Alkhrdaji 的强度推荐公式是根据配筋率的大小,所得到的结果与试验结果相差较大,而根据本文提出的建议公式得到的抗弯强度与试验结果相差接近,说明本文的建议公式能较准确的计算出 CFRP 筋混凝土梁的极限承载力。

参考文献:

- [1] Amir Mirmiran. Behavior of concrete columns confined by fiber composites [J]. Journal of Structure Engineering, 1997(5): 583-590.
- [2] Michel Samaan. Model of concrete confined by fiber composites [J]. Journal of Structure Engineering, 1998(9): 1025-1031
- [3] 岳清瑞,杨勇新. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程介绍 [J]. 建筑结构, 2003(6): 69-72.
- [4] 赵彤,谢剑,戴自强. CFRP 加固钢筋混凝土梁得受弯承载力试验研究 [J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 11-15.
- [5] 程东辉,郑文忠. 关于 CFRP 增强混凝土受弯构件设计的建议 [J]. 工业建筑(增刊), 2004, 34(37): 179-181.
- [6] Nawy E G, Neuwerth G E. Fiber reinforced concrete slabs and Innovations and beams [J]. Journal of the Structural Division. Proceedings of the ASCE, 1997, 103: 421-440.
- [7] Alkhrdaji T, Mettemeyer M, Nanni A, et al. Flexural behavior of FRP- Reinforced concrete members [D]. The state of Missouri; University of Missouri-Rolla. Center for Infrastructure Engineering Studies, 1999.