

二次受力碳纤维布加固钢筋混凝土梁短期刚度的计算

黄楠, 李辉*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 进行了6根碳纤维布加固钢筋混凝土梁的抗弯性能试验研究. 通过砝码杠杆加载较准确地模拟了碳纤维布加固钢筋混凝土梁的二次受力状况, 得出了碳纤维布加固梁在二次受力下的典型荷载—位移曲线. 在分析二次受力下碳纤维布加固钢筋混凝土梁截面刚度变化的基础上, 通过理论分析并结合试验统计数据, 建立了考虑二次受力碳纤维布加固钢筋混凝土矩形截面梁短期刚度的计算方法. 在对计算结果与试验数据及其他计算方法进行了对比分析后, 表明所建公式具有较好的精确度.

关键词: 碳纤维布; 钢筋混凝土梁; 二次受力; 刚度

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 04-0059-05

现有学者关于碳纤维布加固钢筋混凝土梁的短期刚度计算主要有二种情形. 一是基于碳纤维布加固未受损梁试验的刚度计算方法, 其忽略二次受力的影响, 主要是在给出受拉纵筋和纤维材料应变的不均匀系数计算公式基础上建立纵筋屈服前后加固梁的截面刚度计算公式, 如张普等^[1]提出的公式. 二是基于碳纤维布加固受损梁试验的刚度计算方法, 其在平截面假定基础上, 通过曲率分析得到加固梁在正常使用阶段的刚度计算公式, 再通过试验数据对刚度综合变化系数进行修正, 以此来考虑二次受力因素, 如杨勇新等^[2]、张学礼等^[3]、张彦洪^[4]提出的公式.

笔者基于试验基础, 通过平截面假定和曲率分析得到了含二次受力影响系数的截面短期刚度计算公式, 再结合统计分析得到二次受力影响系数的表达式, 从而建立了基于二次受力碳纤维布加固钢筋混凝土矩形截面梁短期刚度的计算方法.

1 试验概况

1.1 构件设计

本试验共制作7根尺寸为200 mm×200 mm×2 600 mm钢筋混凝土梁, 其中1根为无加固钢筋混

凝土对比梁. 所有构件采用相同配筋, 试验梁配筋及加载示意如图1所示, 试件设计布置见表1.

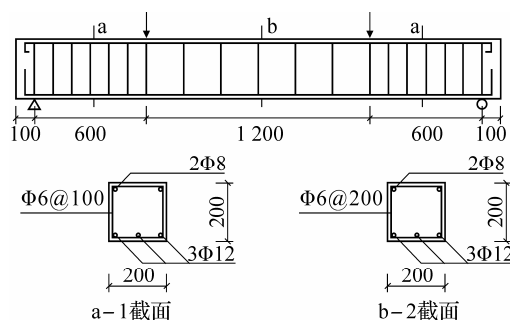


图1 试验梁配筋及加载示意图(单位: mm)

1.2 加载装置

试验中通过砝码杠杆预加载装置, 在持载状态下粘贴碳纤维布, 使其与梁底充分结合, 养护一段时间后, 继续通过千斤顶加载.

试验加载装置如图2所示. 装置特点如下: (1) 采用砝码杠杆加载可以很好地模拟实际梁加固前的初始受力状态, 消除了千斤顶加载模拟过程中徐变而致的卸载现象. (2) 在对称集中荷载作用处(四分点)与跨中布置位移计, 通过测定跨中与四分点的位移差可以确定简支梁跨中等刚度区域在荷载作用下的挠度.

收稿日期: 2014-11-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(20010240); 宁波市重点学科项目(XKL11D2083).

第一作者: 黄楠(1987-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土结构. E-mail: huangnan1014@163.com

*通信作者: 李辉(1963-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 主要研究方向: 混凝土结构. E-mail: lihui@nbu.edu.cn

表 1 试件设计布置

梁编号	加载历史	加固层数	CFRP 尺寸/mm ³	破坏模式
LA-0-0	对比梁	-	-	适筋梁破坏
LA-0-1	加载至破坏	1 层	2 200×100×0.167	准适筋梁破坏
LA-0-2	加载至破坏	1 层	2 200×200×0.167	准适筋梁破坏
LB-1-1	预加载至 0.32M _u , 保持荷载贴纤维布, 待和梁结合良好后, 加载至破坏	1 层	2 200×100×0.167	准适筋梁破坏
LB-2-1	预加载至 0.45M _u , 保持荷载贴纤维布, 待和梁结合良好后, 加载至破坏	1 层	2 200×100×0.167	准适筋梁破坏
LB-2-2	和梁结合良好后, 加载至破坏	1 层	2 200×200×0.167	准适筋梁破坏
LB-3-2	预加载至 0.58M _u , 保持荷载贴纤维布, 待和梁结合良好后, 加载至破坏	1 层	2 200×200×0.167	准适筋梁破坏



图 2 加载装置

1.3 试验现象

如图 3 所示, 对照普通混凝土适筋梁, 碳纤维布在加固二次受力条件下, 钢筋混凝土梁的刚度变化过程大致也可以分为 3 个阶段。

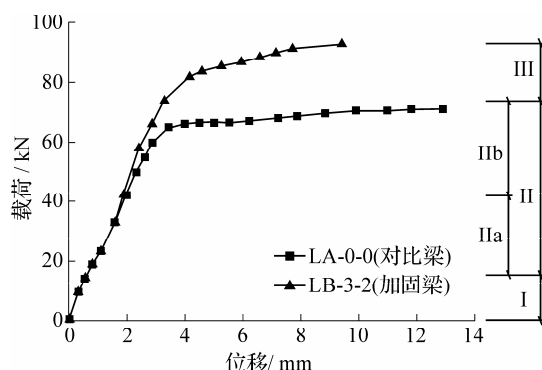


图 3 碳纤维布加固梁在二次受力下的典型荷载-位移曲线

第 I 阶段——开裂前阶段: 从加荷到受拉区混凝土开裂, 该阶段混凝土未开裂, 整截面参与受力, 截面抗弯刚度较大, 挠度较小, 钢筋应力也很小。当受拉区边缘混凝土应变达到极限拉应变时, 混凝土开裂, 即为第 I 阶段的临界状态。该阶段加固梁的变形特征与对比梁的变形特征完全类同。

第 II 阶段——带裂工作阶段可分 2 个亚阶段, 粘贴纤维布前(IIa 阶段)与粘贴纤维布后(IIb 阶段)。

粘贴纤维布前(IIa 阶段): 当截面开裂后, 开裂区混凝土退出工作, 此时释放的拉力转由钢筋承担, 使开裂截面处钢筋应变明显增大, 对应处中和轴上升, 截面刚度降低, 挠度较开裂前有较快的增加。该阶段加固梁变形特征与对比梁完全类同。

粘贴纤维布后(IIb 阶段), 碳纤维布约束了受拉区混凝土裂缝的继续发展, 同时与受拉钢筋一起承担梁底纵向拉应力, 加固梁的刚度对比梁的刚度值有一定提高, 随后荷载—位移曲线斜率基本不变。此阶段为加固梁的正常使用阶段, 为加固梁刚度计算的条件依据。

第 III 阶段——屈服阶段: 从受拉钢筋屈服至极限状态。受拉钢筋屈服后, 钢筋应力基本不再增加, 碳纤维布的应力则急剧增加, 裂缝宽度加速增大, 中和轴迅速上升, 此时的荷载—位移曲线上有个明显的拐点, 且截面刚度明显下降, 挠度快速增加, 直至极限状态。本阶段加固梁刚度对比梁的刚度有较大提高。

2 加固梁截面刚度计算

2.1 变形条件

钢筋混凝土梁在初始弯矩 M_i 作用下存在初始应变 ε_{si} , 相应截面上受拉边缘的初始应变为 ε_i , 受压区边缘混凝土应变为 ε_{ci} 。已有大量试验表明, 在正常使用阶段弯矩 M_q 作用下, 加固梁截面平均应变符合平截面假定(图 4)^[5]。

考虑二次受力因素, 即碳纤维布存在滞后应变 ε_i , 在加固后正常使用阶段, 开裂截面上受拉边

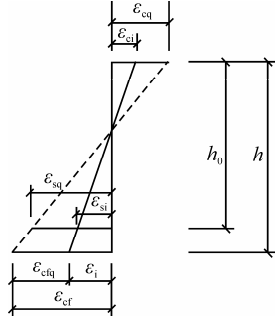


图4 梁截面应变

缘的总应变 ε_{cf} 与碳纤维布的应变 ε_{cfq} 关系为:

$$\varepsilon_{cfq} = k\varepsilon_{cf} = k(\varepsilon_i + \varepsilon_{cfq}), \quad (1)$$

其中, ε_{cfq} 为使用阶段碳纤维布的应变. 为方便公式推导, k 为二次受力影响系数.

2.2 本构关系

在弯矩 M_q 作用下, 开裂截面处受拉钢筋、碳纤维布及受压区混凝土的应力分别为:

$$\sigma_{sq} = \varepsilon_{sq} E_s, \sigma_{cfq} = \varepsilon_{cfq} E_{cf}, \sigma_{cq} = \varepsilon_{cq} \nu E_c, \quad (2)$$

式中, ε_{cq} 为受压区边缘混凝土的应变; ε_{sq} 为裂缝处钢筋的应变; E_c, E_s, E_{cf} 为混凝土、钢筋和碳纤维布的弹性模量; ν 为混凝土弹性系数.

ε_{cfq} / k 与 ε_{sq} 近似地存在以下关系^[2]:

$$\varepsilon_{cfq} / k = h\varepsilon_{sq} / h_0 = h\sigma_{sq} / (h_0 E_s).$$

所以, σ_{cfq} 可表示为:

$$\sigma_{cfq} = E_{cf} \varepsilon_{cfq} = k E_{cf} h \sigma_{sq} / (E_s h_0). \quad (3)$$

2.3 平衡条件

裂缝截面应力分布如图5所示. 图中平均应力为 $\omega\sigma_{cq}$, 其中, ω 为混凝土压应力图形丰满系数, η 为混凝土截面内力臂系数, ξ_0 为裂缝截面处受压区高度系数, 混凝土压力 $C = \omega\sigma_{cq}\xi_0 h_0 b$. 忽略受拉区混凝土拉应力的情况, 建立如下平衡方程:

$$M_q = \omega\sigma_{cq}\xi_0 h_0 b \cdot \eta h_0 + \sigma_{cfq} A_{cf} a, \quad (4)$$

$$M_q = \sigma_{sq} A_s \eta h_0 + \sigma_{cfq} A_{cf} (\eta h_0 + a). \quad (5)$$

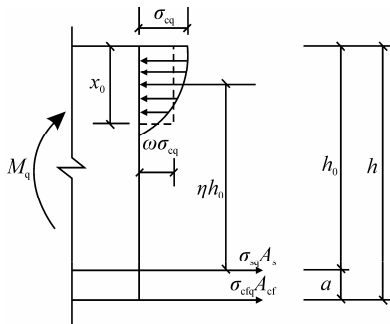


图5 截面应力分布

将(3)式代入(5)式可得:

$$\sigma_{sq} = M_q / (A_s \eta h_0 + k E_{cf} h A_{cf} (\eta h_0 + a) / (E_s h_0)). \quad (6)$$

将(3)式和(6)式代入(4)式可得:

$$\sigma_{cq} = M_q / (\omega \xi_0 \eta b h_0^2) \cdot \frac{A_s \eta h_0 + k E_{cf} A_{cf} \eta h / E_s}{A_s \eta h_0 + k E_{cf} h A_{cf} (\eta h_0 + a) / (E_s h_0)}. \quad (7)$$

2.4 平均应变

由(2)式的本构关系, 并利用平均应变与裂缝截面应变的关系, 即 $\varepsilon_{sm} = \psi \varepsilon_{sq}$ 和 $\varepsilon_{cm} = \psi_c \varepsilon_{cq}$, 得到钢筋和受压边缘混凝土的平均应变为:

$$\varepsilon_{sm} = \psi \varepsilon_{sq} = \psi \sigma_{sq} / E_s = \frac{\psi M_q}{E_s A_s \eta h_0 + k E_{cf} A_{cf} h (\eta h_0 + a) / h_0}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{cm} = \psi_c \varepsilon_{cq} = \psi_c \sigma_{cq} / \nu E_c = M_q / (\zeta b h_0^2 E_c) \cdot \frac{A_s \eta h_0 + k E_{cf} A_{cf} \eta h / E_s}{A_s \eta h_0 + k E_{cf} A_{cf} h (\eta h_0 + a) / (E_s h_0)}, \quad (9)$$

式中, $\zeta = \omega \xi_0 \eta \nu / \psi_c$ 为混凝土受压区综合应变系数; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; ψ_c 为受压边缘混凝土压应变不均匀系数.

2.5 短期刚度的表达式

截面弯曲刚度公式如下:

$$B_s = M_q / \phi = M_q h_0 / (\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{cm}). \quad (10)$$

将(8)式和(9)式的平均应变代入(10)式, 并记

$\alpha_E = E_s / E_c, \rho = A_s / b h_0, \beta_E = E_{cf} / E_s, \rho_{cfs} = A_{cf} / A_s$. 可得截面刚度计算公式如下:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2 + k E_{cf} A_{cf} h (\eta h_0 + a) / \eta}{\psi / \eta + \alpha_E \rho (1 + k h \beta_E \rho_{cfs} / h_0) / \zeta}, \quad (11)$$

式中的系数 $\eta, \psi, \alpha_E \rho / \zeta$ 均参照文献[6]确定, 对矩形截面梁则有:

$$\eta = 0.87, \psi = 1.1 - 0.65 f_{tk} / \rho_{te} \sigma_{sq}, \alpha_E \rho / \zeta = 0.2 + 6 \alpha_E \rho, \quad (12)$$

其中, 开裂截面处钢筋应力由于纤维布的作用, 可近似按下式计算:

$$\sigma_{sq} = M_i / (0.87 h_0 A_s) + (M_q - M_i) / (0.87 h_0 A_s^e), \quad (13)$$

$$A_s^e = A_s + \beta_E A_{cf}, \quad (14)$$

并令 $\eta h_0 + a \approx \eta h$, 则(11)式可整理为:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2 + k E_{cf} A_{cf} h^2}{1.15 \psi + (0.2 + 6 \alpha_E \rho) (1 + k h \beta_E \rho_{cfs} / h_0)}. \quad (15)$$

2.6 二次受力影响系数 k

根据前述平截面假定, 有应变的近似关系:

$$(\varepsilon_{cfq} + \varepsilon_i) / \varepsilon_s = k_1 h / h_0, \quad (16)$$

并根据钢筋和碳纤维布的本构关系及平衡方程(5)式可得碳纤维布的应变:

$$\varepsilon_{cfq} = \frac{M_q - \eta E_s A_s h_0^2 \varepsilon_i / k_1 h}{\eta E_s A_s h_0^2 / (k_1 h) + E_{cf} A_{cf} (\eta h_0 + a)}, \quad (17)$$

式中, k_1 为近似系数.

截面受拉边缘混凝土的初始应变 ε_i 按相应规范^[7]规定计算:

$$\varepsilon_i = \alpha_f M_i / (E_s A_s h_0), \quad (18)$$

式中, α_f 为综合考虑受弯构件裂缝截面内力臂变化下钢筋拉应力不均匀以及钢筋排列影响等的计算系数. 将(17)式和(18)式代入(1)式可得:

$$k = \frac{1 - \eta \alpha_f h_0 M_i / (k_1 h M_q)}{1 + \alpha_f \beta_E \rho_{cfs} (\eta h_0 + a) M_i / (h_0 M_q)}. \quad (19)$$

分析各参数的特点及变化范围对 k 的敏感性, 确定 k 值主要与 M_i / M_q 和 ρ_{cfs} 有关, 并考虑到与普通钢筋混凝土梁的短期刚度计算公式相衔接, 当 $M_i = M_q$ 时, $k = 0$. 根据试验结果, 得到了在正常

使用状态下 k 与 M_i / M_q 的关系(图 6), 其统计表达式为:

$$k = (1 - M_i / M_q) / (1 - 3.2 \beta_E \rho_{cfs} M_i / M_q). \quad (20)$$

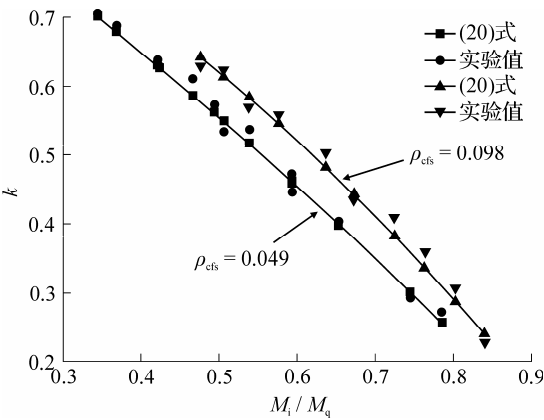


图 6 二次受力影响系数 k 与 M_i/M_q 的关系

3 理论与试验比较

荷载效应准永久值一般为荷载效应基本组合

表 2 梁挠度的理论计算值与实验值的对比

梁编号	荷载[极限荷载]/kN	挠度/mm				本文算值/		
		实测值	本文算值	文献[2]算值	文献[3]算值	实测值	文献[2]算值/实测值	文献[3]算值/实测值
LA-0-0	40[71]	1.87	1.85	1.37	-	0.99	0.73	-
	50[71]	2.32	2.42	1.71	-	1.04	0.74	-
	55[71]	2.60	2.72	1.88	-	1.05	0.72	-
LA-0-1	40[75.6]	1.69	1.72	1.27	-	1.02	0.75	-
	50[75.6]	2.14	2.26	1.59	-	1.06	0.74	-
	55[75.6]	2.41	2.54	1.75	-	1.05	0.73	-
LA-0-2	50[88.7]	2.06	2.14	1.49	-	1.04	0.72	-
	55[88.7]	2.27	2.40	1.64	-	1.06	0.72	-
	65[88.7]	2.83	2.91	1.93	-	1.03	0.68	-
LB-1-1	40[76.29]	1.70	1.79	1.27	1.50	1.05	0.75	0.88
	50[76.29]	2.21	2.33	1.59	1.90	1.05	0.72	0.86
	55[76.29]	2.52	2.60	1.74	2.11	1.03	0.69	0.84
LB-2-1	40[76.35]	1.81	1.82	1.27	1.75	1.01	0.70	0.97
	50[76.35]	2.37	2.36	1.59	2.18	1.00	0.67	0.92
	55[76.35]	2.62	2.63	1.74	2.40	1.00	0.66	0.92
LB-2-2	50[93.07]	2.31	2.28	1.49	2.18	0.99	0.65	0.94
	55[93.07]	2.57	2.53	1.64	2.40	0.98	0.64	0.93
	65[93.07]	3.01	3.04	1.93	2.84	1.01	0.64	0.94
LB-3-2	50[92.39]	2.39	2.35	1.49	2.34	0.98	0.62	0.98
	55[92.39]	2.72	2.60	1.64	2.57	0.96	0.60	0.94
	65[92.39]	3.23	3.10	1.93	3.04	0.96	0.60	0.94

注: 每根梁选取的荷载值约为该梁极限荷载的 0.5、0.6 和 0.7 倍.

值的 0.4~0.8 倍, 因此, 分别选取荷载值为该梁极限荷载的 0.5、0.6 和 0.7 倍, 由本文推导的短期刚度计算公式与文献[2]、文献[3]提出的公式分别计算出加固梁跨中等刚度区域的挠度, 并与试验数据比较。由表 2 可见, 本文公式计算的挠度值与实测挠度值比值的平均值为 1.02, 标准差为 0.03。文献[2]公式计算的挠度值与实测挠度值比值的平均值为 0.69, 标准差为 0.05。文献[3]公式计算的挠度值与实测挠度值比值的平均值为 0.92, 标准差为 0.04。相比之下, 本文的建议公式计算结果更接近于试验值, 且计算结果具有较高的精度。

4 结论

根据试验目的设计了符合实际结构二次受力状态的实验装置, 很好地模拟了实际混凝土梁加固及使用时的受力状态。试验结果表明, 二次受力下碳纤维布加固梁的刚度变化过程大致也可以分为 3 个阶段, 其中第 II 阶段(带裂工作阶段)可分 2 个亚阶段, 粘贴纤维布前(IIa 阶段)与粘贴纤维布后(IIb 阶段), IIb 阶段刚度较普通混凝土对比梁的刚度值有一定提高。

通过截面变形与刚度的理论分析, 引入了二次受力影响系数 k 并结合试验结果统计分析, 给出

了考虑二次受力下碳纤维布加固钢筋混凝土矩形截面梁的短期刚度计算方法。试验研究也表明新公式具有较高的精度, 所建议的刚度计算方法适用于碳纤维布加固二次受力下钢筋混凝土梁的短期刚度计算, 根据 k 的不同取值, 也适用于碳纤维布直接加固无初始荷载梁($k=1$)的短期刚度计算, 同时, 与现行规范中的普通钢筋混凝土梁($k=0$)的短期刚度计算公式衔接紧密。

参考文献:

- [1] 张普, 朱虹, 孟少平, 等. FRP 片材增强钢筋混凝土梁刚度与变形计算[J]. 建筑结构学报, 2011(4):87-94.
- [2] 杨勇新, 岳清瑞. 碳纤维布加固混凝土梁截面刚度计算[J]. 工业建筑, 2001, 31(9):1-4.
- [3] 张学礼, 贾瑞强, 尹显南, 等. 碳纤维布加固混凝土梁截面刚度计算及计算机模型[J]. 工业建筑, 2006, 36(增1):1042-1045.
- [4] 张彦洪. 碳纤维布加固梁在“二次”受力条件下短期刚度的计算方法[J]. 中国农村水利水电, 2007(8):67-69.
- [5] 王文伟, 赵国藩, 黄承逵, 等. 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] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [7] GB50367-2013, 混凝土结构加固设计规范[S].

Formula for Calculating the Stiffness of RC Beam Strengthened with CFRP under Secondary Loading

HUANG Nan, LI Hui*

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this paper the flexural behavior of six reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber sheets is tested. Using the weights and lever loading system, the tests have simulated the condition of secondary load on the reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber sheets, and obtained the typical load-displacement curve of the reinforced concrete beams. Based on analysis of the stiffness changes on the cross-section of the reinforced concrete beams, and using both theoretical and experimental statistics, this paper proposes the method of calculating the short-term stiffness on the rectangular section of the reinforced concrete beams. The accuracy is validated by comparing the experimental results with those obtained from generic calculation methods.

Key words: carbon fiber sheet; reinforced concrete beam; secondary loading; stiffness

(责任编辑 章践立)