

文章编号: 1000-4750(2006)09-0125-06

复合砂浆钢筋网加固抗弯 RC 梁的非线性分析

*卜良桃, 王月红, 尚守平

(湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 复合砂浆钢筋网薄层加固是一种有效的加固方法, 能够显著地提高钢筋混凝土梁的抗弯承载力、变形能力以及抗裂性能。以 8 根复合砂浆钢筋网加固 RC 梁的试验研究结果为参考, 通过非线性有限元分析广泛地研究了加固梁纵向配筋率、配箍特征值、梁高宽比对极限荷载提高幅度的影响, 并初步分析了少筋梁和超筋梁加固后的荷载-跨中挠度曲线的变化规律。根据分析和试验结果, 通过等效假定给出了复合砂浆钢筋网加固 RC 梁的极限承载力计算公式和抗弯刚度计算公式。

关键词: 结构工程; 加固; 非线性分析; 复合砂浆; 钢丝网; 钢筋混凝土梁

中图分类号: TU317, TU376 **文献标识码:** A

NONLINEAR FEM ANALYSIS OF RC BEAM STRENGTHENED WITH FERROCEMENT MORTAR

*BU Liang-tao, WANG Yue-hong, SHANG Shou-ping

(Civil Engineering College, Hunan University, Hunan Changsha 410082, China)

Abstract: Ferrocement mortar technology is an efficient method to reinforce RC beam. It can significantly increase the load-bearing capacity, deflection capacity and crack-resisting behavior. Based on experimental researches of eight RC beams strengthened with ferrocement mortar a finite element method is employed to analyze the influence of tension reinforcement ratio, stirrup characteristic value and height-width ratio on the incremental amplitude of ultimate load. The rule of load-deflection curves of under-reinforced and over-reinforced beam is initially investigated. A computational expression of load-bearing capacity and flexural rigidity of RC beam strengthened with ferrocement mortar is proposed based on the experimental and analytical results.

Key words: structural engineering; strengthening; nonlinear analysis; composite mortar; steel wire mesh; RC beam

高性能复合砂浆是一种理想的钢筋混凝土结构和砌体结构的无机复合加固材料, 因其优良的物理力学性能, 目前在国外已应用于土木工程结构的加固^[1]。高性能复合砂浆钢筋网加固法秉承了其他众多加固法的优点, 同时又发挥了其优良的材料特性, 具有其他加固方法所不具有的很多优势^[2,3], 因

此是未来工程加固领域的重要发展方向之一。

复合砂浆钢筋网补强加固虽然在国外应用已经十分广泛^[4], 但是在国内却由于缺乏相关的试验数据, 应用很少。随着这种高性能复合砂浆材料研究的不断深入, 国内学者^[5-7]已开始在这一领域开展了广泛地试验研究和理论探索。本文在已有足尺

收稿日期: 2005-06-24; 修改日期: 2005-11-16

基金项目: 湖南省科技厅科技重点项目(05SK2010); 湖南省交通厅科技项目——高性能复合砂浆钢筋网加固混凝土构件研究(200514)

*卜良桃(1963), 男, 湖南南县人, 副教授, 博士, 《混凝土加固设计规范》、《建筑结构加固工程施工质量验收规范》、《高性能复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程》编委, 主要从事工程结构理论与技术研究(E-mail: plt63@sina.com);

王月红(1981), 女, 湖南邵东人, 硕士生, 主要从事结构加固研究;

尚守平(1953), 男, 山东黄县人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构与地基工程交叉领域的研究, 结构加固理论与技术的研究。

构件的试验研究之上,模拟加载条件,对复合砂浆加固 RC 梁进行数值模拟分析,并广泛地分析被加固 RC 梁加固前不同配筋率、配箍特征值、梁高宽比对复合砂浆钢筋网加固 RC 梁极限承载荷载提高幅度的影响;在现有普通 RC 梁的计算理论之上通过合理地假定建立复合砂浆钢筋网加固 RC 梁抗弯承载力和截面刚度的计算方法。

1 分析对象与材料本构关系

1.1 分析对象

为便于与试验研究结果比较,非线性有限元分析中梁的几何参数和材料强度与试验梁的一致,加固梁模板及配筋形式如图 1,其他设计参数如下面

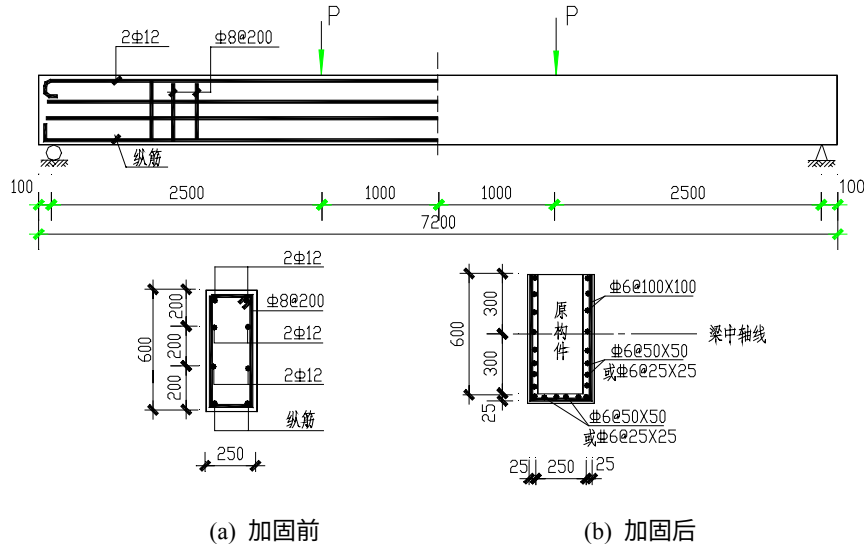


图 1 梁模板与配筋图

Fig.1 Geometric details and configuration of beams

1.2 材料本构模型

(1) 混凝土和复合水泥砂浆

采用 3D 弹塑性单元模拟复合砂浆钢筋网加固 RC 梁。考虑箍筋和钢筋网的约束效应,钢筋网以内核心区混凝土采用非线性常约束效应模型^[8],应力-应变关系如图 2。由于目前还没有复合水泥砂浆这种材料的本构关系可以参考,但考虑到复合水泥砂浆与原混凝土梁的混凝土为相同的水泥基,因此分析中假定与混凝土梁的混凝土具有相同的应力-应变关系,外围砂浆不考虑钢筋网的约束作用。非线性分析中的混凝土和复合砂浆强度均为圆柱体抗压强度,按式(1)换算:

$$f'_c = 0.79 f_{cu} \quad (1)$$

式中, f'_c : 混凝土或复合水泥砂浆圆柱体抗压强度;

所述:

(1) 梁纵向钢筋均为热轧钢筋 HRB335, 加固钢筋网钢筋为 HRB400, 箍筋为 HPB235, 弹性模量按混凝土设计规范直接取值;混凝土设计强度 C30, 复合砂浆为与混凝土梁具有相同水泥基的复合水泥砂浆^[6], 材料实测的平均强度如表 1, 弹性模量由立方体抗压强度按混凝土设计规范的公式计算。

(2) 采用三面 U 型加固形式, 两种加固方案, 即钢筋网格纵横间距梁底和梁两侧中轴以下为 $\Phi 6@50 \times 50$ ①或 $\Phi 6@25 \times 25$ ②, 梁两侧中轴以上均为 $\Phi 6@100 \times 100$, 复合水泥砂浆加固厚度 25mm。

f_{cu} : 混凝土或复合水泥砂浆立方体抗压强度。

在加固施工中采用了机械打磨、高压水洗、表面植销钉以及涂抹界面剂等措施, 试验结果很少出现交界面剥离现象, 因此非线性分析中假定混凝土与复合水泥砂浆间无相对滑移, 不考虑两者交界面的粘结破坏。

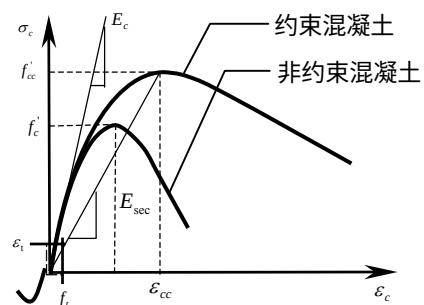


图 2 混凝土应力-应变关系

Fig.2 Stress-strain curve for concrete

(2) 钢筋和钢筋网钢筋

在加固梁中, 钢筋和钢筋网钢筋基本处于单轴受力状态, 应力-应变关系相对比较简单, 因此钢筋和钢筋网钢筋均采用简单的双线性刚度硬化应力-应变关系, 如图 3。

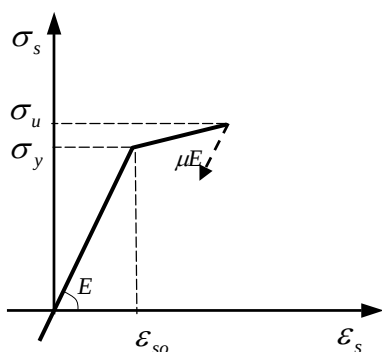


图 3 钢筋应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain curve for reinforcing bars

2 非线性参数分析

2.1 非线性分析程序验证

采用美国中部地震研究中心的非线性分析软件 ZeusNL^[9]进行静力增量模拟试验分析。为了确保分析结果的准确性, 首先对分析结果与试验结果进行了比较。非线性分析所采用的几何参数和材料强度与现场试验梁完全相同。对 4 根试验梁(第 A 组)进行了对比分析, 试验梁的编号及基本数据如表 1 所示。复合砂浆钢筋网加固 RC 梁荷载-跨中挠度曲线的非线性分析结果与试验结果的比较如图 4。从图可知, 试验结果和分析结果的承载荷载基本吻合, 分析结果稍偏小; 而分析结果的极限变形比试验量测的变形大, 这是由于试验时构件进入极限承载力阶段后由于试验设备的限制无法量测构件的变形发展而存在的差异。

表 1 试验梁参数

Table 1 Detail of test beams

试验梁 编号	纵筋配 筋	纵筋屈服 强度 /(N/mm ²)	钢筋网钢筋 屈服强度 /(N/mm ²)	混凝土立方 体抗压强度 /(N/mm ²)	复合砂浆 抗压强度 /(N/mm ²)	加固 方案
BA-1	4Φ25	380.1	440.2	31.2	45.3	①
BA-2	4Φ22	360.6	441.2	30.8	44.2	①
BA-3	3Φ22	361.3	440.6	30.2	44.2	①
BA-4	2Φ25	381.2	441.0	31.5	46.1	①
BB-1	4Φ22	359.8	440.3	30.6	46.5	②
BB-2	3Φ22	360.5	440.6	31.2	44.9	②
BB-3	2Φ25	382.2	300.5	31.5	45.3	②
BB-4	2Φ25	380.3	440.9	30.9	44.9	②

2.2 极限荷载影响因素分析

非线性分析中主要改变梁纵向配筋率、配箍特征值和梁高宽比来分析加固 RC 梁极限荷载提高幅度的变化。

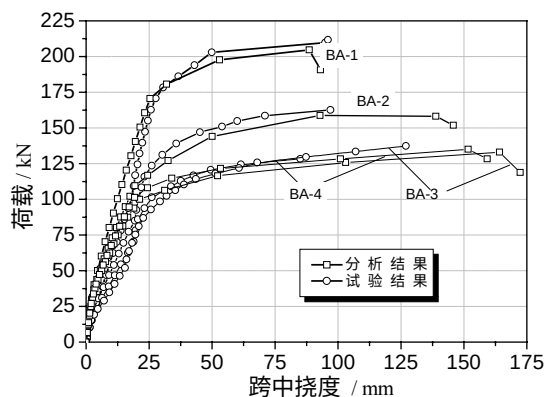


图 4 试验结果与分析结果比较

Fig.4 Comparison between test and analytic results

(1) 纵向配筋率

保持其他参数不变, 通过参数化分析加固 RC 梁(适筋梁)纵向配筋率 ρ_s 对极限荷载提高幅度的影响。定义极限荷载提高幅度为 λ :

$$\lambda = P_u^T / P_u^s \quad (2)$$

式中, P_u^T : 加固梁分析的极限荷载; P_u^s : 未加固梁分析的极限荷载。

非线性分析结果表明极限荷载提高幅度 λ 随纵向配筋率 ρ_s 的增大而减小, 如图 5。当配筋率达到一定数值后, 提高幅度保持在一个稳定的幅度; 当配筋率较小时, 极限荷载提高幅度较大, 这说明复合砂浆加固是一种能有效提高适筋和少筋抗弯构件承载力的加固方法。

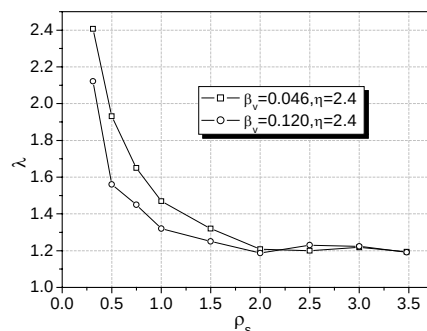


图 5 纵向配筋率对极限荷载提高幅度的影响

Fig.5 The influence of tension reinforcement ratio on the incremental amplitude of ultimate load

(2) 配箍特征值

配箍特征值 β_v 是构件体积配箍率 ρ_v 、箍筋屈服强度 f_{yk} 和混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 的综合指标,

定义如下：

$$\beta_v = \rho_v f_{yk} / f_{kc} \tag{3}$$

$$\rho_v = (n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2) / A_{cor} s \tag{4}$$

式中， ρ_v ：构件的体积配筋率； $n_1, n_2, A_{s1}, A_{s2}, l_1, l_2$ ：构件截面两个方向的箍筋根数、单根箍筋的截面面积和长度； A_{cor} ：核心区混凝土面积； s ：箍筋间距。

非线性分析结果表明极限荷载提高幅度 λ 随配箍特征值 β_v 的增大而减小，但不是很显著。当 β_v 较小时变化显著，而随 β_v 的逐渐增大， λ 基本保持为一常数，如图6。

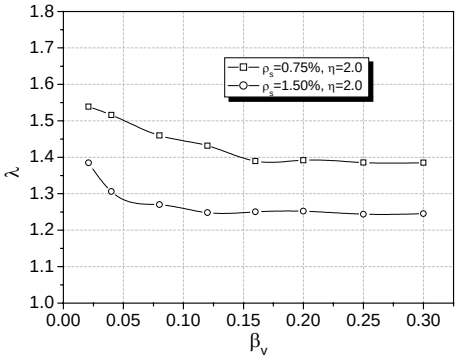


图6 配箍特征值对极限荷载提高幅度的影响

Fig.6 The influence of stirrup characteristic value on the incremental amplitude of ultimate load

(3) 梁高宽比

复合砂浆钢筋网加固受弯构件承载力计算中，梁侧钢筋网的作用效应通常采用一个与梁高宽比相关的影响系数来体现^[6]，因此分析梁高宽比对极限荷载提高幅度影响十分必要。事实上，梁的高宽比对加固效应有很大的影响，如图7，随高宽比 η 的增大，极限荷载提高幅度 λ 逐渐减小，当 η 大于2.5左右， λ 趋于稳定。这说明复合砂浆加固对小高宽比钢筋混凝土梁有很好的效果。

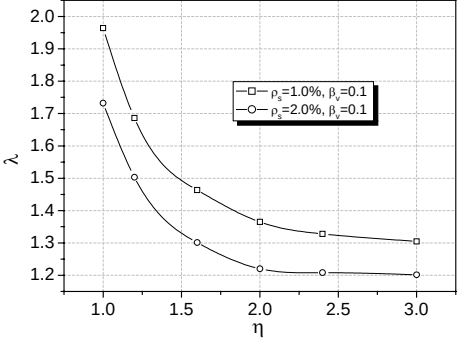


图7 高宽比对极限荷载提高幅度的影响

Fig.7 The influence of height-width ratio on the incremental amplitude of ultimate load

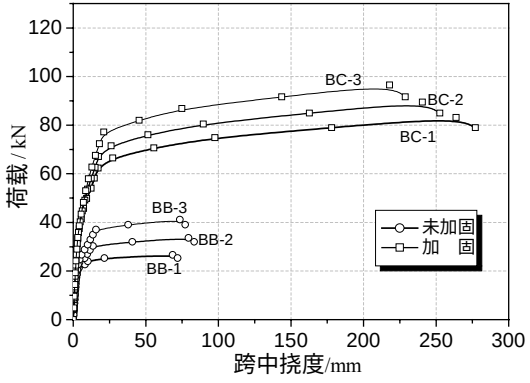
2.3 少筋梁和超筋梁分析

前面主要分析了适筋梁极限荷载提高幅度随设计参数变化的规律。为了全面地了解复合砂浆钢筋网加固的效应，本文对3种不同配筋的少筋梁和超筋梁进行了分析。分析梁设计参数如表2，分析结果如图8。由图8(a)与图8(b)的比较可知，少筋梁的荷载-挠度曲线与超筋梁的荷载-挠度曲线有很大的差别，少筋梁加固后承载力显著提高，而且构件的刚度也相应的提高；超筋梁加固后承载力和构件的刚度亦有所提高，但相对提高幅度有限，而且塑性变形很少，因此依然是脆性破坏。

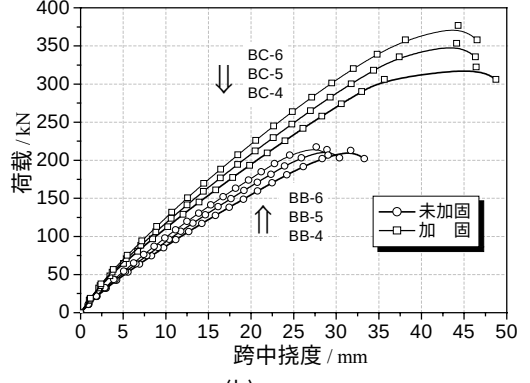
表2 分析梁参数

Table 2 Design detail of analytic beam

对比梁	加固梁	$\rho_s / \%$	β_v	η	配筋范围
BB-1	BC-1	0.20	0.034	2.4	少筋梁
BB-2	BC-2	0.25	0.034	2.4	少筋梁
BB-3	BC-3	0.31	0.034	2.4	界限梁
BB-4	BC-4	4.50	0.034	2.4	超筋梁
BB-5	BC-5	4.00	0.034	2.4	超筋梁
BB-6	BC-6	3.48	0.034	2.4	界限梁



(a)



(b)

图8 不同配筋率的梁荷载-跨中挠度曲线

Fig.8 Load-deflection curves of beams with different tension reinforcement ratio

3 加固梁理论设计方法

通过详细地分析复合砂浆钢筋网加固 RC 梁各构成单元的应力应变关系,虽然可以相对准确的计算出加固梁各阶段的承载能力和抗弯刚度,但并不能满足加固设计应用时的简便实用原则的要求,因此在现有普通 RC 梁计算方法之上,通过合理的等效假定建立加固梁受弯承载力计算式和截面刚度计算式十分必要。

3.1 加固梁受弯承载力计算方法

加固梁受弯承载力按极限状态计算,基本假定和普通钢筋混凝土梁正截面承载力计算^[10]的基本假定相同,根据平衡条件推导的实用承载力计算公式如下:

$$0.8(f_c b + 2f_s t)x_c = f_y A_s + f_{sm} A_{sm} \quad (5)$$

$$M_u = f_y A_s \left(h_0 - \frac{0.8x_c}{2} \right) + \beta_1 f_{sm} A_{sm} \left(h + \frac{d}{2} - \frac{0.8x_c}{2} \right) \quad (6)$$

式中, b : 梁截面宽度; t : 加固宽度; h : 梁截面高度; h_0 : 截面有效高度; x_c : 截面受压区高度; d : 加固钢筋直径; M_u : 受弯极限承载力; f_c : 混凝土轴心抗压强度; f_s : 复合砂浆轴心抗压强度; f_{sm} : 钢筋网钢筋屈服强度; f_y : 钢筋屈服强度; A_{sm} : 梁底钢筋网纵筋面积; A_s : 加固梁纵向钢筋面积; β : 考虑侧面钢丝网对加固构件的影响系数,由试验确定为 $\beta_1 = 0.86h/b$ 。

为了验证上述公式在计算构件抗弯极限承载力的有效性,用试验结果^[6]与按式(5)和式(6)计算的结果进行了比较,比较结果如表 3,表中计算极限荷载为 $P_u = M_u / 2.5$ 。从表可知,计算值与试验值基本吻合,8 个样本平均误差为 5.94%,计算值偏小,偏安全。

表 3 试验梁极限荷载计算值与试验值的比较

Table 3 Comparison between experiment results and theoretical values of ultimate load

试验梁 编号	试验极限荷载 P_u / kN	理论计算极限荷载 P_u^c / kN	P_u^c / P_u
BA-1	202.94	186.61	0.92
BA-2	162.60	149.57	0.92
BA-3	128.36	122.92	0.96
BA-4	129.67	115.66	0.89
BB-1	170.57	176.93	1.04
BB-2	151.33	151.20	1.00
BB-3	146.22	124.48	0.85
BB-4	152.90	143.88	0.94

根据实际经验以及试验过程中出现的不确定因素,在式(6)的计算公式中引入另一修正参数 β_2 ,

$$M_u = f_y A_s \left(h_0 - \frac{0.8x_c}{2} \right) + \beta_1 \beta_2 f_{sm} A_{sm} \left(h + \frac{d}{2} - \frac{0.8x_c}{2} \right) \quad (7)$$

修正参数 β_2 解释两个方面的因素:一是考虑实际加固构件的使用年限,混凝土和钢筋均存在不同程度的徐变、收缩和松弛等不确定性因素;二是考虑加固界面并非完全的如试验状态,从安全角度考虑,作出适当的调整。参数 β_2 可以取值在 0.6~0.9 之间,更为合理准确的取值,有待以后多方面的研究。

3.2 加固梁截面刚度计算方法

将加固钢筋网的梁底纵向钢筋面积和梁侧沿梁高 1/4 内钢筋面积按刚度等效换算为梁纵向钢筋面积,将复合砂浆截面面积按刚度等效均匀换算为与核心区混凝土同强度等级的混凝土面积,然后按混凝土设计规范^[10]计算普通 RC 梁截面刚度的方法来进行计算。复合砂浆钢筋网加固 RC 矩形截面梁的刚度计算公式如下:

$$B_s = \frac{E_s A_s' h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + 6\alpha_E \rho} \quad (8)$$

$$\text{其中,} \quad \psi = 1.1 - \frac{0.65 f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{ss}} \quad (9)$$

$$A_s' = A_s + A_{sm}' + A_{smn}' = A_s + (E_{sm} / E_s)(A_{sm} + A_{smn}) \quad (10)$$

$$\rho = \frac{A_s'}{b' h_0} \quad (11)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s'}{0.5b'h'} \quad (12)$$

$$\sigma_{ss} = \frac{M}{0.87h_0 A_s'} \quad (13)$$

$$A_c' = b' \times h' = A_c + A_{cf}' = A_c + (E_{cf} / E_c) A_{cf} \quad (14)$$

式中, B_s : 加固梁等效刚度; E_s, E_{sm} : 纵向钢筋弹性模量和钢筋网钢筋弹性模量; E_c, E_{cf} : 混凝土弹性模量和复合砂浆弹性模量; A_s' : 等效纵向钢筋总面积; A_{smn}, A_{smn}' : 沿梁高 1/4 范围内的侧面钢筋网钢筋面积及其等效钢筋面积; A_c' : 等效混凝土总面积; A_{cf}' : 复合砂浆等效为混凝土的面积; A_{cf} : 复合砂浆面积; f_{tk} : 混凝土抗拉强度; b', h' : 等效截面宽度和高度; 其他符号含义同前面定义或规范^[9]中符号含义。

试验加固梁是采用的二次受力进行分析的,即当荷载加载到计算屈服荷载的 75%(A 组)或 50%(B 组)时,不卸载进行加固处理后再加载,因此挠度计

算也分两阶段计算。加固前按普通 RC 梁计算,加固后采用式(8)计算刚度,再根据简支梁挠度计算式计算挠度,两阶段的挠度和为最终的挠度结果。试验梁计算挠度值与试验量测的挠度值比较如表 4,表中 Δ_t , Δ_c 分别代表跨中挠度试验值和计算值,荷载水平 $0.75 P_y$ 对应挠度为加固前挠度,荷载水平 $0.85 P'_y$ 对应挠度可视为正常使用极限状态的挠度。由表可知,计算结果如试验结果基本吻合,16 个样本的平均误差为 1.48%,因此等效简化计算方法是可行的。

表 4 试验梁跨中挠度理论计算值与试验值的比较(mm)

Table 4 Comparison between experimental results and theoretical values of deflections at mid-span

试验梁编号	荷载水平	Δ_t	Δ_c	Δ_c / Δ_t
BA-1	$0.75 P_y$	18.25	19.73	1.081
	$0.85 P'_y$	23.99	25.66	1.070
BA-2	$0.75 P_y$	19.38	19.34	0.998
	$0.85 P'_y$	21.49	21.59	1.005
BA-3	$0.75 P_y$	18.88	19.26	1.020
	$0.85 P'_y$	19.80	20.47	1.034
BA-4	$0.75 P_y$	15.41	14.78	0.959
	$0.85 P'_y$	19.24	17.84	0.927
BB-1	$0.75 P_y$	17.13	17.28	1.009
	$0.85 P'_y$	20.31	20.17	0.993
BB-2	$0.75 P_y$	16.39	17.77	1.084
	$0.85 P'_y$	23.37	22.11	0.946
BB-3	$0.75 P_y$	10.76	9.51	0.884
	$0.85 P'_y$	18.57	16.22	0.873
BB-4	$0.75 P_y$	10.12	9.69	0.958
	$0.85 P'_y$	21.07	19.42	0.922

注: P_y 加固前的计算屈服荷载; P'_y 加固后的试验屈服荷载(纵筋屈服)

4 结论

通过对复合砂浆钢筋网加固抗弯 RC 梁的非线性分析及其与试验梁的比较,可得到以下几点结论:

(1) 加固梁的极限承载能力提高幅度随加固梁纵向配筋率的增大而减小;随配筋特征值的增大而减小,但变化不显著;随梁高宽比的增大而减小。

(2) 复合砂浆钢筋网加固抗弯 RC 梁能有效的提高被加固少筋梁和超筋梁抗弯承载力和截面刚度,但对少筋梁的加固效果更为显著。

(3) 通过等效假定,采用普通 RC 梁的计算理

论能够相对准确的计算复合砂浆钢筋网加固 RC 梁的抗弯承载力和截面刚度。

参考文献:

- [1] Paramasivam P, Lim C T E, Gong K C. Strengthening of RC beams with ferrocement laminates [J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20: 53~65.
- [2] 吴刚, 安琳, 吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗弯加固的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 3~6. Wu Gang, An Lin, Lu Zhitao. Experiment investigation and analysis on the shear strengthening for RC beams bonded with CFS [J]. Building Structure, 2000, 30(7): 3~6. (in Chinese)
- [3] 万墨林, 王怀彬, 蒋伟, 何小青. DJR 胶粘钢加固梁承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(8): 39~42. Wang Molin, Wang Huaibin, Jiang Wei, He Xiaoqing. Research on reinforced concrete beams strengthened with steel plate cohored by DJR-PT adhesive [J]. Building Structure, 2000, 30(8): 39~42. (in Chinese)
- [4] ACI Committee. A guide for the design, construction and repair of ferrocement [J]. ACI Structural Journal, 1988, 85(3): 323~351.
- [5] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网水泥复合砂浆加固 RC 偏心受压柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 18~25. Shang Shouping, Jiang Longmin, Zhang Maoxin. Experimental investigation into the strengthening of eccentric compression RC column using composite mortar laminate reinforced with mesh reinforcement [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 18~25. (in Chinese)
- [6] 尚守平, 曾令宏, 彭晖, 方萍. 复合砂浆钢丝网加固 RC 受弯构件的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 87~91. Shang Shouping, Zeng Linghong, Peng Hui, Fang Ping. Flexural behavior of reinforced concrete beams with ferrocement [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 87~91. (in Chinese)
- [7] 曾令宏, 尚守平, 彭晖. 钢丝网复合砂浆加固混凝土梁抗弯刚度计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 127~129. Zeng Linghong, Shang Shouping, Peng Hui. Calculation on flexural stiffness of reinforced concrete beam with ferrocement [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2003, 30(3): 127~129. (in Chinese)
- [8] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J] Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804~1826.
- [9] Paul S Baglin, Richard H Scott. Finite element modeling of reinforced concrete beam-column connections [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(6): 886~894.
- [10] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范 GB50010-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. Ministry of Construction of the P.R.China. Code for design of concrete structures GB50010-2002 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)