

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.021

# 钢纤维水泥砂浆加固钢筋混凝土足尺梁抗弯性能

卜良桃 彭超 李为

(湖南大学土木工程学院 湖南长沙 410082)

摘要:为了使钢纤维水泥砂浆这种新的加固材料能早日在土木工程领域得到应用,对采用此材料加固的梁的抗弯性能进行了试验研究.试验包括 1 根对比梁和 6 根用钢纤维水泥砂浆钢筋网加固的试验梁,试验梁采用三面 U 形加固形式,量测主要项目为试验梁裂缝分布形态、荷载-挠度曲线、钢筋、混凝土及加固砂浆的应变发展规律等.通过改变加固梁的加固配筋率和受力形态,研究了这种加固技术对钢筋混凝土梁的承载力、破坏形态、截面刚度及裂缝分布等的影响.试验结果表明:采用钢纤维水泥砂浆对足尺钢筋混凝土梁进行抗弯加固,能较大幅度地提高钢筋混凝土梁正截面承载力和刚度.钢纤维水泥砂浆中的钢纤维能有效地抑制裂缝的产生,使试件具有良好的抗裂性能.

关键词:钢纤维水泥砂浆;受弯;钢筋混凝土梁;加固

中图分类号:TU375.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2010)01-0098-06

钢纤维水泥砂浆加固是一种新型的混凝土结构及砌体结构加固补强新技术.该加固技术利用纤维砂浆优良的物理力学性能及界面剂优良的黏结作用,使得加固砂浆薄层与原构件具有较好的整体工作性能.钢纤维水泥砂浆的抗拉强度、刚度和温度线膨胀系数等均与被加固的混凝土材料相接近,能很好地、协调地共同受力,其具有较好的耐火、耐久性,且施工简单,因此具有巨大的科研价值和广阔的应用前景<sup>[1]</sup>.为了使钢纤维水泥砂浆这种加固新材料能早日在土木工程领域得到应用,笔者对采用此技术加固的钢筋混凝土足尺梁的抗弯性能进行了试验研究.

## 1 材性试验

### 1.1 原材料

湖南韶峰水泥集团有限公司生产的韶峰牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥;中砂,细度模数为 2.3~2.6;自来水;鞍山昌宏钢纤维厂生产的镀铜钢纤维,长度为 12~15 mm,直径  $d = 0.15 \sim 0.20$  mm,抗拉强度为 2 GPa;ZM 外加剂,由长沙市固力实业有限公司提供.

### 1.2 试验过程及结果

由于影响钢纤维水泥砂浆强度的主要因素是基体水泥砂浆配合比<sup>[2]</sup>,本次试验将钢纤维掺量恒定为体积的 2%.以砂浆的抗压强度作为主要研究指标,选用不同组合配合比的钢纤维水泥砂浆进行抗压强度试验.试验所得强度等级为 M30<sup>[3]</sup>的钢纤维水泥砂浆中水泥、砂、水和钢纤维的质量分数分别为 27%、53%、13%和 7%.每种配合比取 6 个试块进行试验,各配合比钢纤维水泥砂浆的抗压强度试验结果见表 1.

表 1 各配合比钢纤维水泥砂浆的抗压强度试验结果

Table 1 Test results of compressive strength for steel fiber ferrocement mortar with different proportion ratios

u(水泥)/%	u(砂)/%	u(水)/%	u(钢纤维)/%	14 d 立方体抗压强度/MPa						$\mu_f$ /MPa	$\sigma_f$ /MPa	$f_{ck}$ /MPa
				试块 1	试块 2	试块 3	试块 4	试块 5	试块 6			
36	39	18	7	67.1	51.2	68.0	64.6	64.9	60.3	62.68	6.23	52.44
35	45	13	7	67.9	65.2	55.3	53.5	58.1	60.5	60.08	5.61	50.85
32	47	14	7	55.3	49.6	42.3	48.9	44.5	51.3	48.65	4.69	40.94
27	53	13	7	39.7	40.3	33.7	36.6	34.5	42.7	37.92	3.55	32.08
23	57	13	7	25.3	24.6	23.2	29.6	27.8	30.2	26.78	2.84	22.10

注: $\mu_f$ 表示试块抗压强度平均值; $\sigma_f$ 表示试块抗压强度标准差; $f_{ck}$ 表示试块抗压强度标准值.

收稿日期:2008-11-03

基金项目:湖南省科技厅科研项目(2007CK3066)

作者简介:卜良桃(1963—),男,湖南南县人,教授,博士,主要从事工程结构理论与技术研究. E-mail: plt63@126.com

## 2 试验方案

为了保证钢筋网纤维砂浆薄层与试件能很好地共同工作, 采用涂抹界面黏结剂和植抗剪销钉的方法, 为了研究采用此加固方法加固的受弯试件可能产生的破坏形式以及正截面受弯承载力的提高程度等<sup>[4]</sup>, 分别对 3 根一次受力和 3 根二次受力的加固梁进行了抗弯性能试验。

### 2.1 试验梁设计

本试验采用了不加固的对比梁 1 根, A 组一次受力的试验梁 3 根, B 组二次受力的试验梁 3 根。试验梁的截面尺寸为  $b \times h = 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , 跨度为  $l = 4400 \text{ mm}$ , 净跨  $l_0 = 4200 \text{ mm}$ , 混凝土强度设计值为 C25, 其中水泥、砂、石和水的质量分数分别为 13%、27%、53% 和 7%, 基本参数见表 2。纵向受拉钢筋为 3  $\Phi 16$ , 架立筋为 2  $\Phi 10$ , 纵向配筋率  $\rho_s = 0.754\%$ <sup>[5]</sup>。

为了研究不同加固钢筋网对试验梁抗弯性能的影响, 本次试验加固钢筋网采用 3 种不同的加固方法<sup>[6-7]</sup>。加固方法 1: 加固网格梁底和梁两侧中轴线以下采用  $\Phi 6@100 \times 100$ , 梁两侧中轴线以上采用  $\Phi 6@100 \times 100$  (3 种加固方法均同)。加固方法 2: 梁底及梁两侧中轴线以下采用  $\Phi 6@75 \times 75$ 。加固方法 3: 梁底及梁两侧中轴线以下采用  $\Phi 6@50 \times 50$ 。纤维砂浆厚度梁底及梁两侧均为 25 mm, 如图 1 所示。图中  $P$  为试验所加外荷载, 经分配梁分配, 每个节点所加荷载为  $P/2$ 。

表 2 试验梁参数

Table 2 Parameters for test beams

试件	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_s/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_{sm}/\text{MPa}$	加固方法	一次加载水平/%
对比梁	26.7		382.3			
A1	26.4	35.3	360.5	441.2	方法 1	
A2	28.1	32.8	361.3	440.3	方法 2	
A3	27.9	36.2	359.8	440.6	方法 3	
B1	27.1	34.5	381.2	440.6	方法 1	75
B2	28.7	35.6	362.2	441.3	方法 2	75
B3	28.5	33.9	370.3	440.8	方法 3	75

注:  $f_{cu}$  表示混凝土立方体抗压强度;  $f_s$  表示纤维砂浆立方体抗压强度;  $f_y$  表示试验梁原底筋实测屈服强度;  $f_{sm}$  表示加固钢筋实测屈服强度; 一次加载水平是指加固梁一次受力时所加荷载占相应对比梁实测钢筋屈服荷载的比例。

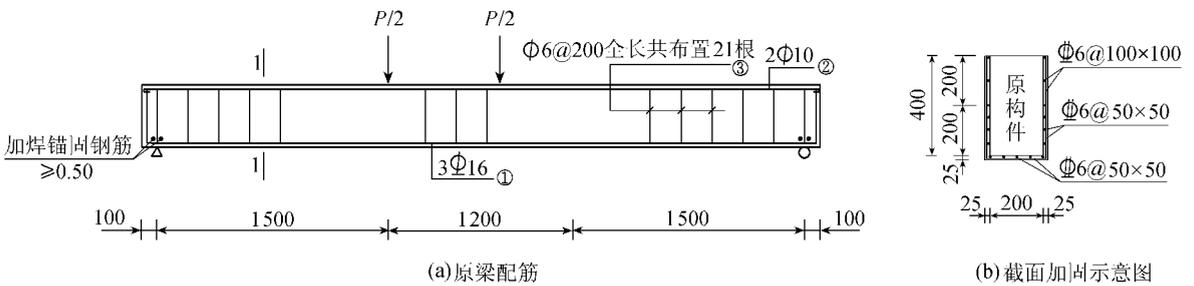


图 1 试验梁模板、配筋及加固示意图 (尺寸单位 mm)

Fig. 1 Pattern plate, reinforcement and strengthening (unit of size mm)

### 2.2 加载方案与测试内容

本试验采用的加载装置为杠杆, 放大系数为 5.2 (图 2)。对比梁和一次受力加固梁分级加载至纵筋屈服和破坏; 二次受力加固梁一次受力后, 在不卸载的情况下进行加固处理, 养护后再进行二次加载, 直到钢筋屈服破坏为止。

试验过程中通过百分表测量每级荷载下的跨中挠度, 通过静态电阻应变仪测量原试件底筋、部分钢筋网钢筋和加固层的应变值, 通过裂缝刻度放大镜观测梁裂缝出现部位、发展过程、最终分布情况, 并记录裂缝发展过程中关键部位的最大裂缝宽度<sup>[8]</sup>。



图 2 试验装置

Fig. 2 Test devices

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验梁的破坏形态

对比梁的破坏形态为典型的钢筋混凝土适筋梁破坏, 首先底部钢筋屈服, 最后以受压区混凝土压碎为破坏标志。加固梁的破坏形态: 加固后试件的延性较好, 加载过程中, 当原梁底筋的应变超过钢筋弹性阶段的应

变时,裂缝开展宽度及跨中最大挠度远小于对比梁,说明此时加固梁仍处于稳定阶段,可以继续承受荷载;当原梁钢筋屈服时,受压区混凝土的变形较小,应力较小;当荷载继续增加时,钢筋变形很快增大,试件进入变形和裂缝开展较快的阶段,此时受压区混凝土仍未被压碎;当荷载再继续增加时,纤维砂浆表面出现的竖向裂缝快速向上延伸,与水平裂缝交汇,在试件受压区形成三角形的破坏区,混凝土被压碎,破坏的形态近似于延性很好的钢筋混凝土适筋梁,如图3所示。



图3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of specimens

从试验过程描绘的试件裂缝开展情况可以看出,钢纤维砂浆钢筋网加固使得试件具有良好的抗裂性能,加固后试件的裂缝形态与未加固试件相比,在相同荷载等级下,纯弯段的裂缝分布明显具有密而细的特点,钢纤维水泥砂浆良好的抗拉性能使得裂缝的发展较对比梁缓慢,试件破坏时,加固梁表面的裂缝与对比梁相比,数量要多,间距要小,裂缝宽度要小,相对于二次受力梁,一次受力的加固梁裂缝要密而且发展更充分。

3.2 承载力

试验结果见表3。从表3可以看出,加固梁与对比梁相比,其开裂荷载、屈服荷载及极限荷载都有不同程度的提高。从试验数据可以看出,相同受力形态下,加固配筋率越高,加固梁的荷载提高幅度越大;加固配筋率相同的梁,一次受力比二次受力的荷载提高幅度大。

表3 承载力试验结果

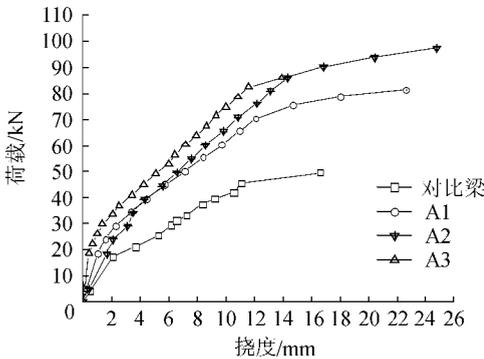
Table 3 Test results of bearing capacity

试件	$P_{cr}/kN$	$R$	$P_y/kN$	$\Delta P_y \cdot P_y^{-1}/\%$	$P_u/kN$	$\Delta P_u \cdot P_u^{-1}/\%$
对比梁	7.5		45.5		53.1	
A1	18.5	2.5	75.5	65.9	90.5	70.4
A2	20.1	2.7	82.3	80.9	96.8	82.3
A3	23.9	3.2	86.1	89.2	107.0	101.5
B1			66.4	45.9	82.2	54.8
B2			79.4	74.5	95.7	80.2
B3			84.1	84.8	100.3	88.9

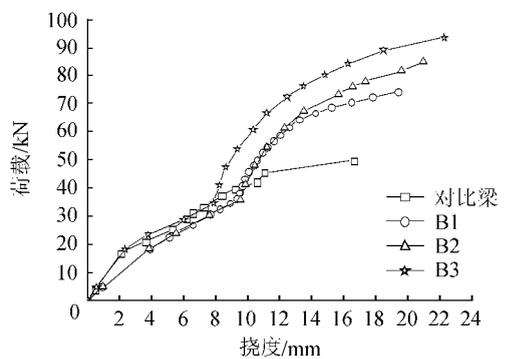
注: $P_{cr}$ 表示开裂荷载试验值; $R$ 表示加固梁与对比梁的开裂荷载比值; $P_y$ 表示屈服荷载试验值; $P_u$ 表示极限荷载的试验值。

3.3 挠度

一次受力梁的荷载-跨中挠度曲线如图4(a)所示。从图4(a)可以看出,加固梁在给定的荷载下,跨中挠度相对于对比梁均有所减小,曲线斜率都有不同程度的增大,可见试件的抗弯刚度都得到了提高。



(a) 一次受力梁



(b) 二次受力梁

图4 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Curves of load-deflection for test beams

二次受力梁的荷载-跨中挠度曲线如图4(b)所示。从图4(b)可以看出:在一次受力阶段,梁的曲线基本重合。二次受力的开始阶段,所有加固梁的荷载-挠度曲线斜率明显增大,即加固后截面刚度明显提高;随着

荷载的增加,在原梁底纵筋屈服时,曲线出现转折点,最大跨中挠度均大于对比梁破坏前的最大挠度,在此过程中,梁侧加固纵筋发挥了作用,使得构件的延性有较明显的提高,同时对裂缝的发展起到一定约束作用。在荷载-挠度曲线中,加固配筋率较大的加固梁的曲线斜率,能将小配筋率的曲线基本“包络”,这说明加固底筋的配筋率较大时,截面刚度的提高也较明显。

### 3.4 应变

#### 3.4.1 钢筋应变

从图 5 可知:在一次受力的情况下,对比同级荷载,对比梁的钢筋应变大于纤维砂浆加固的梁,说明加固钢筋参与了原构件的共同工作,分担了部分荷载。一次受力试验梁,基本上出现原梁纵筋与加固纵筋同时屈服的现象,部分梁出现加固纵筋比原梁纵筋先屈服的现象,说明加固效果良好,原梁纵筋与加固纵筋能共同工作。

从图 5 还可以看出:二次受力的加固梁,开始阶段原底纵筋的荷载-应变曲线与对比梁基本重合,曲线斜率均有所增大,且加固底筋的应变增大幅度较原底纵筋稍大,验证了加固后加固层和原试件之间能基本保持平截面假定;此后两者的应变稳步增大,原底纵筋屈服后,增加的荷载由加固钢筋网来承担,此时,梁挠度增大的幅度较大,侧向钢筋进一步发挥作用,使得试件的极限承载力和延性都有明显的提高。

#### 3.4.2 混凝土和砂浆应变

混凝土表面应变:在同期荷载下,对比梁的混凝土表面应变大于加固梁,说明钢筋网纤维砂浆薄层有效地限制了裂缝的开展。从图 6 可知,从加载开始到破坏前,跨中受压区混凝土与砂浆层测点的压应变基本上是同步增大的,两者曲线的形状比较相似,说明加固层和原试件协同工作的性能良好,加固侧向砂浆层能直接参与受压。因此,在建立极限承载力公式时,考虑纤维砂浆的作用是必要的。

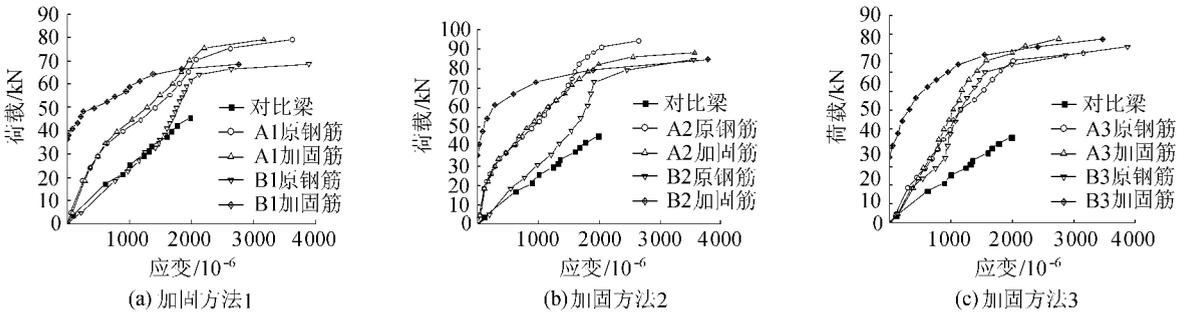


图 5 荷载-跨中纵筋拉应变曲线

Fig. 5 Curves of load-tensile strain of longitudinal reinforcement for test beams

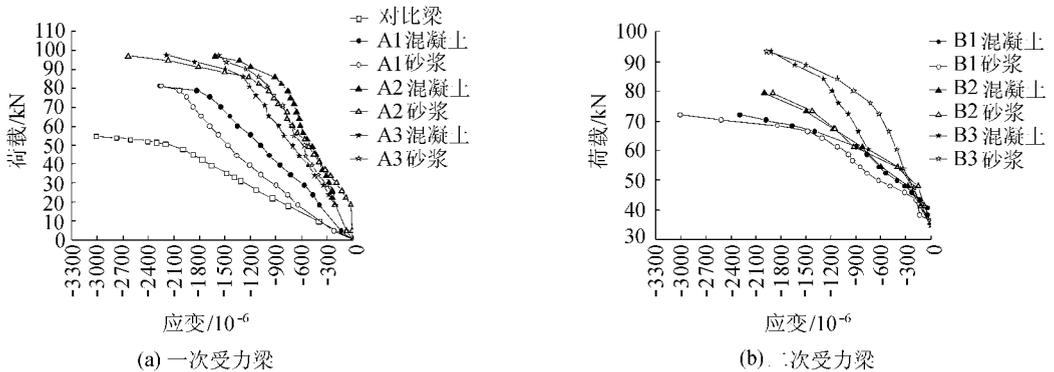


图 6 荷载-跨中混凝土及砂浆压应变曲线

Fig. 6 Curves for load-compressive strain of concrete and mortar for test beams

## 4 承载力计算

根据试验结果,钢筋网加固的试件仍然基本符合平截面假定,依据极限平衡状态,可列出平衡方程。根据一次受力试验结果导出了简单实用的承载力计算公式

$$0.8(f_c b + f_s t)x = f_y A_s + \sigma_{sm} A_{sm} \tag{1}$$

$$M_u = f_y A_s \left( h_0 - \frac{0.8x}{2} \right) + \beta \sigma_{sm} A_{sm} \left( h - \frac{0.8x}{2} \right) \tag{2}$$

根据二次受力试验结果导出的计算公式为

$$(f_c b + 2f_s t)x = f_y A_s + f_{sm} A_{sm} + \beta f_{sm} A'_{sm} \tag{3}$$

$$M_u = f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{sm} A_{sm} \left( h + \frac{d}{2} - \frac{x}{2} \right) + \beta f_{sm} A'_{sm} h_{sm} \tag{4}$$

式中： $f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值； $b$ ——矩形截面宽度； $h$ ——截面高度； $x$ ——混凝土受压区高度； $A_s$ ——受拉区或受压区纵向非预应力钢筋的截面面积； $M_u$ ——构件的正截面受弯承载力设计值； $h_0$ ——截面有效高度； $f_s$ ——纤维砂浆轴心抗压强度； $t$ ——加固层宽度； $A_{sm}$ ——梁底钢筋网纵筋面积； $A'_{sm}$ ——梁侧钢筋网纵筋面积； $\sigma_{sm}$ ——梁底钢筋网纵筋应力，极限状态取为 $f_{sm}$ ； $d$ ——加固底筋的直径； $\beta$ ——侧向钢筋作用综合影响系数，根据试验结果，取为 $1.5h/b$ ； $h_{sm}$ ——侧向钢筋网合力作用点对受压区混凝土合力作用点的力臂高度，根据试验结果，可用公式 $h_{sm} = h - 2.6x$ 进行计算，当 $h_{sm} < \frac{h}{2}$ 时按 $h_{sm} = \frac{h}{2}$ 计算。

根据以上公式计算得到的极限荷载与试验实测的极限荷载如表4所示。由表4可知，计算值和试验值吻合较好。

表4 极限荷载计算值与试验值的比较

Table 4 Comparison between calculated and test ultimate loads

试件	$P_u$	$P'_u$	$P_u/P'_u$
对比梁	53.1	52.8	1.00687
A1	90.5	83.6	1.08308
A2	96.8	91.6	1.05708
A3	107.0	102.2	1.04742
B1	82.2	78.3	1.05021
B2	95.7	90.3	1.05927
B3	100.3	97.1	1.03297

注： $P'_u$ 表示极限荷载计算值。

## 5 非线性有限元分析

### 5.1 材料本构模型

a. 混凝土和钢纤维水泥砂浆。采用3D弹塑性单元模拟钢纤维砂浆钢筋网加固钢筋混凝土梁。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<sup>[9]</sup>。虽然目前还没有钢纤维水泥砂浆这种材料的本构关系可以参考，但考虑到钢纤维水泥砂浆与原混凝土梁的混凝土为相同的水泥基，分析中假定钢纤维水泥砂浆与混凝土梁的混凝土具有相同的应力-应变关系。非线性分析中的混凝土和钢纤维砂浆强度均为圆柱体抗压强度 $f'_c$ ， $f'_c = 0.79f_{cu}$ 。

b. 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。

### 5.2 非线性分析程序验证

利用ANSYS有限元软件对加载试验进行非线性有限元模拟，选取采用加固方法2的A2梁和B2梁进行分析。为便于与试验结果进行比较，非线性有限元分析采用与试验相一致的梁的几何参数和材料强度，如表2所示。钢纤维砂浆钢筋网加固钢筋混凝土梁荷载-跨中挠度曲线的非线性分析结果与试验结果的比较如图7所示。从图7可知，试验结果和分析结果的承载荷载基本吻合，分析结果的承载荷载略小，而分析结果的极限变形比试验结果的变形大，这是由于试验时构件进入极限承载力阶段后无法测量构件的变形发展而存在的差异。

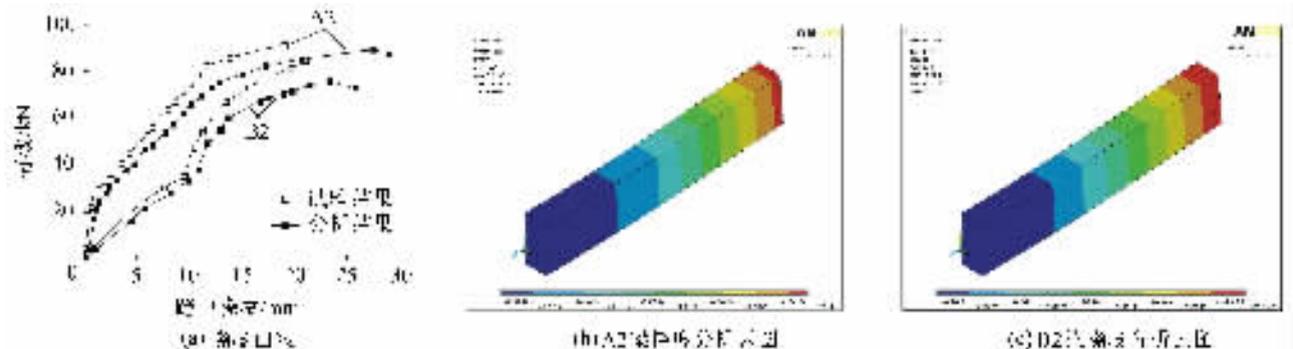


图7 采用加固方法2的加固梁挠度曲线和分析云图

Fig. 7 Curves and FE images of deflection of test beams reinforced by Method 2

## 6 结 论

a. 采用钢纤维水泥砂浆对足尺钢筋混凝土梁进行抗弯加固, 能较大幅度提高钢筋混凝土梁正截面承载力和刚度, 相同受力形态下, 加固配筋率越高, 加固梁的荷载提高幅度越大, 加固配筋率相同的梁, 一次受力比二次受力的荷载提高幅度大。

b. 钢纤维水泥砂浆中的钢纤维能有效地抑制裂缝的产生, 使试件具有良好的抗裂性能, 其良好的抗拉性能使得裂缝的发展较对比梁缓慢, 试件破坏时, 加固梁表面的裂缝与对比梁相比, 数量要多, 间距要小, 裂缝宽度要小, 明显具有密而细的特点, 还能较大地增大梁的抗弯刚度, 提高构件的延性。

c. 在平截面假定的基础上导出的极限受弯承载力公式, 其计算值与试验值吻合较好。

d. 非线性有限元分析结果和试验结果基本吻合, 试验取得了比较理想的效果。

### 参考文献:

- [1] DESAYI P, RAO B K. Probabilistic analysis of tensile strength of Ferrocement[J]. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1988, 10(1):15-25.
- [2] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [3] 卜良桃, 叶蓁, 周子范, 等. 钢筋网复合砂浆加固受弯足尺 RC 梁二次受力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5):93-100. (BU Liang-tao, YE Zhen, ZHOU Zi-fan, et al. Experimental study on RC beam reinforced by reinforcing steel bar mesh mortar subjected to secondary load[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5):93-100. (in Chinese))
- [4] 卜良桃, 岳锋, 程露敏. 钢筋网复合砂浆加固混凝土梁的裂缝和刚度计算[J]. 沈阳建筑大学学报, 2007, 23(1):52-56. (BU Liang-tao, YUE Feng, CHENG Lu-ming. Calculation on crack and flexural stiffness of RC beams strengthened with reinforcing steel bar mesh[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Sciences, 2007, 23(1):52-56. (in Chinese))
- [5] 卜良桃, 罗兴华, 高伟. 销钉用于 HPF 加固混凝土构件的界面黏结性能[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3):367-370. (BU Liang-tao, LUO Xing-hua, GAO Wei. Contribution of pins to the interfacial bonding property of HPF-reinforced concrete specimen[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(3):367-370. (in Chinese))
- [6] 聂建国, 王寒冰, 张天申, 等. 高强不锈钢绞线-渗透性聚合砂浆抗弯加固的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2):1-9. (NIE Jian-guo, WANG Han-bing, ZHANG Tian-shen, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2):1-9. (in Chinese))
- [7] 卜良桃, 岳锋. 复合砂浆钢筋网加固足尺 RC 梁的二次受力抗弯性能研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(11):23-35. (BU Liang-tao, YUE Feng. Experimental study on flexural performance of RC beam strengthened with reinforcing steel bar mesh subject to secondary load[J]. Building Structure, 2006, 36(11):23-35. (in Chinese))
- [8] PARAMMASIVAM P, LIM C T E, GONG K C. Strengthening of RC beams with ferrocement laminates[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20:53-65.
- [9] 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.

## Flexural behaviors of RC beams reinforced by steel fiber ferrocement mortar

BU Liang-tao, PENG Chao, LI Wei

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

**Abstract:** In order to make steel fiber ferrocement mortar—a new reinforcement material soon be applied in the field of civil engineering, experimental tests were performed on the flexural behaviors of RC beams reinforced by steel fiber ferrocement mortar. A datum beam and six test beams reinforced with the steel fiber ferrocement mortar were employed. The test beams were reinforced in the form of U-shape. The crack distribution, load-deflection and strain development of concrete, steel and mortar were measured. By changing the reinforcement ratio and force patterns of RC beams, the influences of the proposed method on the bearing capacity, failure mode, section stiffness and crack distribution were studied. The results show that the use of the steel fiber ferrocement mortar in RC beams for flexural behaviors can greatly enhance the bearing capacity and stiffness of the normal section of RC beams. The steel fibers in the steel fiber ferrocement mortar can effectively restrain the crack development so as to ensure that the specimens have favorable anti-cracking performance.

**Key words:** steel fiber ferrocement mortar; flexural behavior; RC beam; reinforcement