

外贴纤维加固梁斜截面纤维应变分布的试验研究

曹双寅

滕锦光

陈建飞

邱洪兴

(东南大学)

(香港理工大学)

(爱丁堡大学)

(东南大学)

摘要 外贴纤维复合材料可以提高混凝土梁斜截面抗剪承载力。对外贴封闭纤维箍加固构件,其破坏过程经历了从梁侧纤维剥离到最终纤维拉断两个状态。显然,从适用性的角度,梁侧纤维剥离状态也是一个重要的状态,但是,目前该领域的研究都集中在最后的纤维拉断状态。本文通过外贴封闭纤维箍加固梁的试验研究,重点研究了梁侧纤维剥离之前,斜截面纤维应变发展及分布的规律。试验表明,梁侧纤维的剥离破坏和纤维拉断破坏首先产生在其中一条纤维箍上,然后沿着斜裂缝其它纤维箍相继产生。在斜裂缝上,纤维应变的分布是极不均匀的。斜截面纤维应变分布系数,即沿斜裂缝上纤维应变的平均值除以相应条件下斜裂缝上纤维应变的最大值,与纤维配置量的关系不大,但随着荷载水平的增大而缓慢增加,它的主要影响因素是剪跨比。本文在试验分析的基础上,提出了纤维加固梁斜截面纤维应变分布系数的初步计算模式。

关键词 纤维复合材料 加固 抗剪承载力 剥离 应变分布系数

中图分类号: TU375.1 **文献标识码**: A

文章编号: 1000-131X(2003)11-0006-06

EXPERIMENTAL STUDY ON STRAIN DISTRIBUTION IN EXTERNALLY BONDED FRP FOR SHEAR STRENGTHENING OF RC BEAMS

Cao ShuangYin

Teng JinGuang

Chen Jianfei

Qiu HongXing

(Southeast University)(Hong Kong Polytechnic University)(Nottingham University) (Southeast University)

Abstract

The strain distribution in the externally bonded FRP for shear strengthening RC beams is studied in the paper. Twelve pieces of simply supported RC beams with externally bonded FRP are tested. It is stressed on the development and distribution of strains in externally bonded FRP before debonding. It is found that the both debonding and FRP rupture occurred in the most critically stressed FRP strip first, and then spread across the shear crack. Along the shear crack, the strain distribution of FRP is found with strong non-uniform. At last, a simply approach to predict the strain distribution coefficient of FRP is proposed in the paper.

Keywords: fiber reinforced polymer (FRP), strengthen, shear capacity, debonding, strain distribution coefficient

1 引言

试验表明^[1-4],纤维加固混凝土梁斜截面承载能力明显提高,加固后构件主要产生纤维拉断和纤维剥离两种破坏形式。目前,纤维加固混凝土梁斜截面承载力计算模式是在普通混凝土梁计算模式的基础上形成的^[5-7],一般表示为构件原有承载力($V_c + V_s$)和纤维的贡献 V_{frp} 之和,即 $V_u = V_c + V_s + V_{frp}$ 。

由于纤维材料是脆性材料,不象钢筋那样,在达

到极限状态前由于屈服,在斜裂面上会产生比较充分的应力重分布,而是其中一处达到极限应变(断裂)或剥离时就会退出工作,此时斜裂面上其它位置的纤维可能还远没有达到其能力。因此,在确定纤维对抗剪承载力贡献 V_{frp} 时,必须考虑斜裂缝上纤维应力分布的不均匀性。文献^[5-7]通过对试验结果的分析,提出了 V_{frp} 的计算模式,在这些模式中采用了纤维材料强度折减系数,它定义为材料的有效强度除以极限强度,将沿裂缝应变分布的不均匀性包含其中。但是,当加固构件产生剥离破坏时,其纤维材料远没有达到极限强度,因此以极限强度作为折减的对象是不恰当

收稿日期: 2003-04

的,另外,折减系数是依据承载力试验结果,而不是直接测试斜裂缝上应变分布回归得到的,所以它并不是反映沿斜截面应变的分布系数,因此这种表示方法概念模糊。文献^[8,9]分别对采用封闭纤维箍和非封闭纤维箍加固的构件,达到承载力极限状态时的应力分布进行了理论分析,并分别建立了承载力计算模式。但是没有对封闭箍加固构件产生纤维剥离破坏时,相应的承载力进行分析,另外,其计算模式是依据假设的应变分布而建立的。

封闭箍加固构件大多数经历了梁侧纤维剥离破坏,虽然此后由于纤维在梁顶面和底面的锚固作用,仍继续承受荷载直至纤维拉断,但这时裂缝宽度和构件变形等非常严重。因此,对外贴封闭箍加固的构件,除了应该研究纤维拉断时构件的承载力外,尚应研究梁侧剥离破坏时相应的承载力^[10],以保证在使用荷载下不会产生纤维剥离破坏。本论文主要目的是通过试验,观察裂缝处纤维局部剥离的形成和发展,重点研究外贴纤维加固构件产生梁侧纤维剥离破坏之前,斜截面纤维应变发展及分布的规律和影响因素。

2 试验设计

本文试验分四组共 12 个构件,各组剪跨比分别为 3.02, 2.56, 1.86 和 1.40。L1、Ba、L5 和 Bd 为对比构件,不加固,其余 8 个构件均采用封闭箍加固。第二、四组构件采用香港 L & M 特种工程公司生产的玻璃纤维及配套(环氧类)粘结剂,第一、三组构件采用南京玻璃纤维设计研究院生产的玻璃纤维及配套(环氧类)粘结剂,纤维与混凝土粘结试验表明,粘结破坏面位于混凝土基层内。为了便于测点布置,在

加固前首先将构件预裂,然后完全卸载进行加固。表 1 给出了构件的预裂情况和主要技术参数,表中,纤维配置指数 ω_f 系无量纲系数,它反映纤维配置的对数量,其定义为:

$$\omega_f = \rho_{frp} \frac{E_{frp}}{E_c} = \frac{2A_{frp1}}{bs_{frp}} \frac{E_{frp}}{E_c} \quad (1)$$

式中, ρ_{frp} 表示斜截面纤维配置率; A_{frp1} 是单肢纤维箍的面积, $A_{frp1} = w_{frp} t_{frp}$; w_{frp} 是纤维箍的宽度,当纤维沿着轴向连续粘贴时,取 $w_{frp} = s_{frp}$; t_{frp} 是纤维复合材料的厚度; s_{frp} 是纤维箍的间距; b 是梁的截面宽度; E_{frp} 表示纤维复合材料的弹性模量; E_c 表示混凝土的弹性模量。

根据本次试验的目的,在每一条纤维箍与预裂缝相交处粘贴一个应变片,图 1 和图 2 示出了部分构件的预裂缝及应变片布置。试验采用两点集中加载,如图 3 所示。

3 受力全过程

从总体上看,所有加固构件表现出相似的破坏过程。当荷载达到预裂缝荷载时,由于纤维的加固作用,构件完好,预裂缝没有明显开展。此后,随着荷载的增大,预裂缝逐渐展开,并伴有新的裂缝出现,部分

表 1 构件一览表

Table 1 List of tested specimens

编号	截面尺寸 (mm)	剪跨比	预裂荷载 (kN)	预裂缝倾角 (度)	外贴纤维		
					粘贴方案	宽度×间距	ω_f (%)
L1	150×250	3.02	-----	-----	对比构件	-----	-----
L2	150×250	3.02	48	26.1	封闭箍	25×50	0.176
L3	150×250	3.02	55	23.3	封闭箍	25×100	0.088
Ba	150×250	2.56	-----	-----	对比构件	-----	-----
Bb	150×250	2.56	50	29.1	封闭箍	20×40	0.495
Bc	150×250	2.56	63	33.7	封闭箍	20×80	0.266
L5	150×250	1.86	-----	-----	对比	-----	-----
L6	150×250	1.86	79	43.3	封闭箍	25×50	0.176
L7	150×250	1.86	79	36.7	封闭箍	25×100	0.088
Bd	150×250	1.40	-----	-----	对比构件	-----	-----
Be	150×250	1.40	54	50.6	封闭箍	20×40	0.528
Bf	150×250	1.40	61	44.4	封闭箍	20×80	0.261

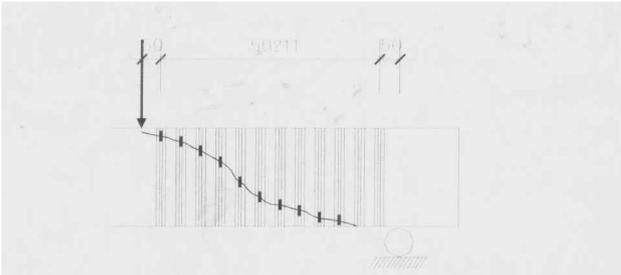


图 1 L2 应变片布置

Fig.1 Lay out of strain gauges for L2

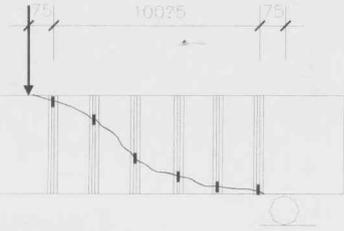


图 2 L3 应变片布置

Fig.2 Lay out of strain gauges for L3

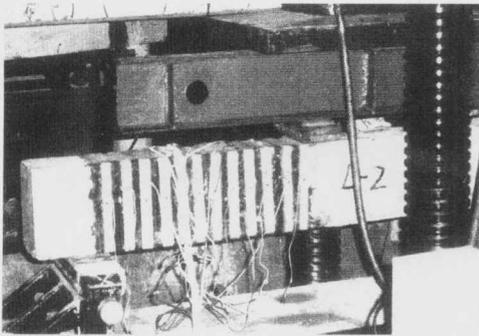


图 3 试验装置照片

Fig.3 Set up of test

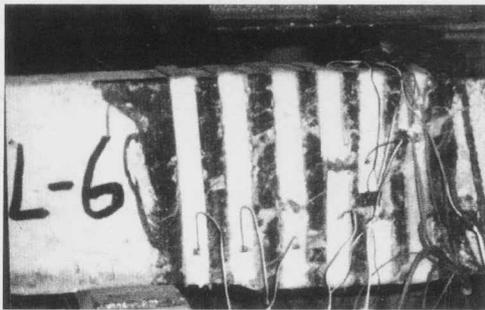


图 4 破坏后的加固构件

Fig.4 Test specimen after failure

纤维在与预裂缝相交处颜色变白，开始产生局部剥离。随着荷载的继续增大，局部剥离范围不断发展，当荷载增加到一定程度时，其中一条纤维箍与梁侧完全剥离，接着其它大部分纤维箍在梁侧的剥离区域迅

速扩大甚至完全剥离，此时，大部分纤维箍只有在梁的底面和顶面与混凝土的粘结基本完好。此后，由于采用封闭箍，虽然这时在梁的侧面上已经产生纤维剥离破坏，荷载仍可以增大。当达到极限荷载时，一条纤维箍因材料达到极限强度而断裂，接着其它与裂缝相交的纤维箍相继断裂，构件破坏。图 4 为加固构件破坏后的照片。

4 斜截面纤维应变的分布

4.1 斜截面应变的特点

试验结果表明，随着荷载的增加，斜截面上外贴纤维布的应变不断增加，但各位置增加速度不一样。在与裂缝相交处，纤维的应变增加较快，在未与裂缝相交处，其应变增加缓慢。在与裂缝相交的纤维布上，纤维应变在斜裂面上的分布也是不均匀的，在靠近剪跨中部区域，纤维的应变增加较快，而在靠近剪跨两端，纤维的应变增加相对缓慢。图 5 给出了部分试件在纤维剥离前，纤维应变分布随着荷载变化的实测结果。图中，横座标表示离支座的距离，纵座标表示纤维的应变。

试验结果还表明，不同的受力阶段，纤维应变增加的速度也不同。在加载初期，纤维应变很小，随后随着荷载的增加缓慢增加，增加值与荷载增加幅度基本呈线性关系，当荷载达到相应对比构件的极限荷载后，纤维增加速度开始增大，并随着荷载的继续增加而逐渐加快，直至产生梁侧剥离破坏。

表 2 给出了试验各阶段主要实测结果汇总。表中， V_1 表示局部剥离开始时的实测剪力值， V_2 表示梁侧产生剥离破坏时(以第一条纤维箍产生梁侧剥离破坏为准)的实测剪力值 (kN)， V_u 表示实测的极限抗剪能力(kN)； ϵ_{max} 表示相应荷载下穿过裂缝各测点纤维应变的最大值， ϵ_{min} 表示最小值， ϵ_{av} 表示平均值，单位 $\mu\epsilon$ 。

4.2 斜截面纤维应变分布系数

根据试验结果，构件破坏时斜截面纤维应变的发展是不均匀的，因此合理确定斜截面纤维的平均应变对加固后构件承载力的计算是非常重要的。对于纤维加固构件，由于施工工艺、粘结剂和加固形式及材料强度取值的不同，因此剥离破坏时纤维能达到的最大应变各不相同，为了消除这些方面的影响，在分析斜裂面纤维应变分布时，以斜裂面应变分布系数，即所有穿越斜裂面纤维的平均应变除以其相应条件下的最大纤维应变值为分析对象。根据定义，斜裂面纤维

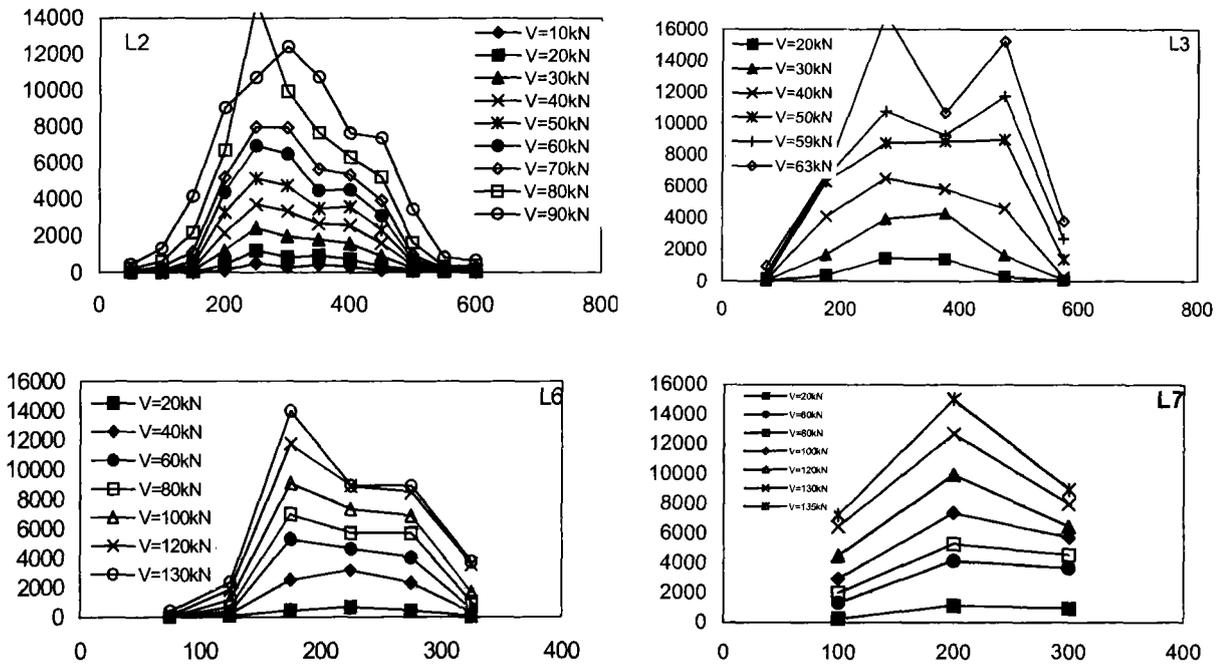


图 5 裂缝上纤维应变分布随着荷载变化的实测结果

Fig.5 Test results of strain distribution in FRP varied with loads along shear crack

表 2 各阶段主要实测数据

Table 2 Major tested results in different stages

编号	局部剥离开始				梁侧剥离破坏				达到极限状态	
	V_1	ϵ_{max}	ϵ_{min}	ϵ_{av}	V_2	ϵ_{max}	ϵ_{min}	ϵ_{av}	V_u	破坏模式
L1	--	----	----	----	---	----	----	----	64	剪切破坏
L2	60	6938	159	3154	90	12396	651	6691	104	纤维拉断
L3	50	8963	158	5713	73	16933	929	9040	99	纤维拉断
Ba	---	----	----	----	---	----	----	----	66	剪切破坏
Bb	116	6408	1050	3949	120	8995	1902	6693	136	纤维拉断
Bc	100	7387	4843	5734	104	7532	4402	6418	121	纤维拉断
L5	---	----	----	----	---	----	----	----	115	剪切破坏
L6	80	6980	687	4014	130	13960	2344	7586	162	纤维拉断
L7	85	5727	2203	4245	135	15006	7223	10392	150	纤维拉断
Bd	---	----	----	----	---	----	----	----	150	剪切破坏
Be	164	6896	5463	6078	178	10009	7378	8020	178	纤维拉断
Bf	147	7073	6483	6799	161	9639	8321	8941	161	纤维拉断

应变分布系数 D_f 可以表示为:

$$D_f = \frac{\int_0^l \epsilon(x) dx}{l \epsilon_{max}} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n \epsilon_{max}} \quad (2)$$

式中, l 是斜裂缝水平投影的长度; $\epsilon(x)$ 是纤维应变沿斜裂缝的分布; x 是离开裂缝起始点的水平距离; ϵ_i 是第 i 条穿过斜裂缝纤维箍的应变; n 是与裂缝相交纤维箍的数量, 此处假设纤维箍是

均匀布置的。

根据上述定义和分析, 对纤维应变的试验结果进行了整理, 图 6 显示了斜裂面纤维应变分布系数随着斜截面受力程度变化的规律。从图中可以看出, 加固构件斜裂面纤维应变分布系数随着荷载的增加而逐渐增加, 但是增加幅度不大, 尤其是当剪跨比较小时, 纤维应变分布系数随着荷载水平的变化非常小。

表 3 给出了斜裂面纤维应变分布系数的统计结果, 在表中数据统计时偏于保守地忽略荷载水平的影响, 在受力全过程中每间隔 10kN 左右采集一个应变分布系数进行统计。根据统计结果可以看出, 在梁侧

产生纤维剥离破坏之前,应变分布系数与剪跨比有关,构件剪跨比越大,斜裂面纤维应变分布系数越小。图7给出了应变分布系数实测结果和剪跨比的关系。另外,从图8可以看出,当纤维配置量正常的条件下,斜裂面纤维应变分布系数与纤维配置指数关系很小。

为了简化起见,在建立斜截面纤维平均应变计算模式时,忽略荷载水平的影响(这是偏于保守的,因为随着荷载水平的增加,其值略有增加),取纤维剥离破坏之前的平均值作为统计数据(表3),并近似假设纤维应变分布系数 D_f 与剪力跨比 λ 成线性关系,经回归可以得到:

$$D_f = a + b\lambda = 1.0 - 0.18\lambda$$

表3给出了斜裂面纤维应变分布系数的实测值

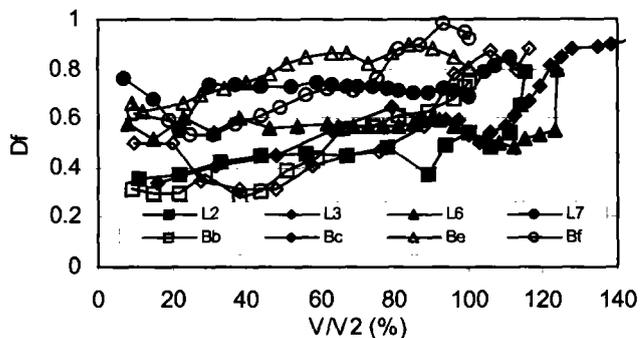


图6斜裂面纤维应变分布系数随荷载的变化

Fig.6 Strain distribution coefficient in FRP varied with load along shear cracks

表3 纤维应变分布系数 D_f 实测值及与计算值的对比

Table 3 Comparison of strain distribution coefficient D_f between tested and computed results

编号	实测值的统计结果				计算值及对比	
	平均值	最大值	最小值	均方差	计算值	计算/实测
L2	0.44	0.54	0.36	0.05	0.46	1.045
L3	0.53	0.64	0.34	0.09	0.46	0.868
Bb	0.48	0.74	0.29	0.16	0.54	1.125
Bc	0.46	0.78	0.32	0.13	0.54	1.174
L6	0.57	0.6	0.52	0.02	0.67	1.175
L7	0.71	0.76	0.55	0.04	0.67	0.944
Be	0.79	0.90	0.63	0.08	0.75	0.949
Bf	0.73	0.98	0.54	0.15	0.75	1.027

与计算值的对比结果,经统计 D_f 的计算值与实测值之比的平均值为 1.04, 均方差为 0.11。可见该模式的计算值与实测结果吻合均较好。

5 结 论

为了研究外贴纤维箍加固构件斜裂面纤维应变分布规律,笔者进行了预裂构件加固后的试验研究,得出以下初步结论:

1. 外贴封闭纤维加固的带裂缝混凝土梁斜截面破坏经历了梁侧纤维剥离和纤维拉断两个阶段。梁侧纤维剥离破坏产生后,由于纤维在梁顶面和底面的锚固,构件仍可以继续承担荷载,最后产生纤维拉断破坏。

2. 对外贴纤维加固混凝土梁斜截面,无论是产生梁侧纤维剥离还是纤维拉断,破坏是连续产生的,即首先一处纤维剥离或被拉断,接着其它位置纤维相继剥离或拉断,破坏时,沿斜裂缝纤维应变的分布是不均匀的,大部分位置处的外贴纤维无法得到充分利用。

3. 在产生纤维剥离破坏前,斜裂面纤维应变分布系数与纤维配置量关系不大,它的主要影响因素是剪跨比,剪跨比越大,纤维应变分布系数越小。另外,随着荷载水平的增加,斜裂面纤维应变分布系数也略有增大。

4. 根据试验结果,本文提出了简化的外贴纤维加固梁斜截面纤维应变不均匀系数的计算模式。

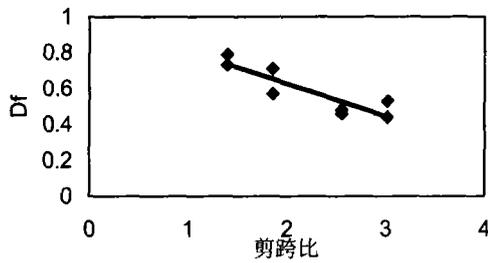


图7 应变分布系数与剪跨比的关系

Fig.7 Relation between strain distribution coefficient and shear-span ratio

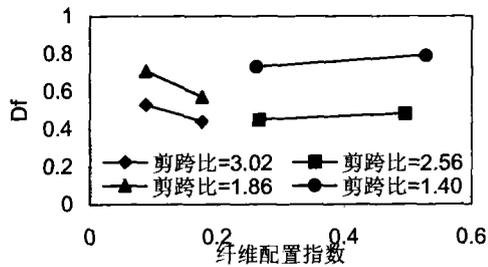


图8 应变分布系数与纤维配置指数的关系

Fig.8 Relation between strain distribution coefficient and FRP-reinforcement index

参 考 文 献

[1] T. Norris, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani. Shear and Flexural Strengthening of RC Beams with Carbon Fiber Sheets[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1997, Vol.123(7): 903-911
 [2] O. Chaalal, M.-J. Nollet And D. Perraton. Shear strengthening of RC beams by externally boded side CFRP strips[J]. Journal of composite for construction, 1998, Vol.2(2): 111-113

[3] A. Li, J. Assih and Y. Delmas. Shear strengthening of RC beams with external bonded CFRP sheets[J].ASCE Journal of structural engineering, 2001, Vol.127(4):374-380
 [4] Shuang-yin Cao, Jun Chen and Jian-wu Pan. Experimental study on the shear performance of R.C beams retrofitted by bonding GFRP strips [A].FRP Composites in Civil Engineering [C].ELSEVIER Publication, 2001: 677-684.
 [5] A. Khalifa, W. J. Gold, A. Nanni, and M.I. Abdel-Aziz. Contribution of external bonded FRP to the shear capacity of RC flexural members[J].Journal of composite for construction, ASCE, 1998, Vol.2(4):195-202
 [6] T. C. Triantafillou. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy bonded FRP composites[J].ACI structural journal,1998, Vol. 95(2): 107-115
 [7] T. C. Triantafillou And C. P Antonopoulos. Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP[J]. ASCE journal of composite for construction, 2000, Vol.1(4):198-205
 [8] J. F. Chen and J. G. Teng. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP Debonding[J]. construction and building materials, 2003, Vol.17(1): 27-41
 [9] J. F. Chen and J. G. Teng. Shear capacity of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams: fiber reinforced polymer rupture[J].ASCE Journal of structural engineering, 2003, Vol.129(5): 615-625
 [10] 曹双寅, 潘建伍, 邱洪兴. 外贴纤维加固梁抗剪承载力计算方法的分析[J].东南大学学报, 2002, Vol. 32(5):766-7

曹双寅 东南大学土木工程学院教授, 博士生导师, 主要从事工程结构鉴定与加固理论及应用、混凝土结构基本理论的研究。通讯地址: 210096 江苏南京东南大学土木工程学院, 电子邮件信箱: cao@public1.ptt.js.cn。

滕锦光 香港理工大学土木与结构工程学系教授, 主要从事工程结构加固、薄壳结构和钢结构理论的研究。

陈建飞 英国爱丁堡大学土木与环境工程研究所研究员, 博士, 主要从事结构建模、力学分析、非破损实验和工程结构加固理论及应用研究。

邱洪兴 东南大学土木工程学院教授, 主要从事工程结构加固、诊断与评估理论, 混凝土结构基本理论的研究。