

文章编号: 1000-4750(2005)04-0155-08

U 型 FRP 加固钢筋混凝土梁 受剪剥离性能的有限元分析

张子潇, *叶列平, 陆新征

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 采用 FRP 布对梁进行抗剪加固, 可以有效的解决梁因配箍率不足而导致的受剪承载力偏低的问题。根据文献[1]中 7 根试验梁的参数, 针对工程中常用的 U 型 FRP 受剪加固形式, 建立三维有限元分析模型, 采用商业有限元计算软件 ANSYS, 数值模拟了加载全过程和受剪剥离受力性能, 根据试验结果确定了 FRP-混凝土界面粘结剥离强度, 并建议了合适的裂面剪力传递系数。根据有限元分析结果, 作者又进一步研究了 U 型 FRP 布的应变分布、分担剪力的贡献、剥离破坏的过程, 以及加固量、FRP 类型和粘贴面积率对加固梁受剪承载力的影响。在有限元分析的基础上结合试验结果, 建议了 U 型粘贴加固的受剪剥离承载力计算方法。

关键词: 混凝土梁; FRP; 加固; 受剪承载力; 有限元; 剥离

中图分类号: TU375 文献标识码: A

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHEAR BEHAVIOR OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH U-SHAPED FRP SHEETS

ZHANG Zi-xiao, *YE Lie-ping, LU Xin-zheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The utilization of FRP in shear strengthening for reinforced concrete beams is an effective way in upgrading the low loading capacity of the beams. Based on the test data of seven beams, this paper presents analysis of FRP strengthened RC beams using 3-D finite element model which is implemented in ANSYS. The effects of various parameters on numerical results are discussed. The bond strength between FRP and concrete, shear retention coefficients for cracks are determined. The results are in good agreement with the experimental results. To gain a better understanding of the role that FRP plays in the RC beam shear strengthening, further investigation is conducted in regard to the distribution of strain in FRP under each load level, the FRP's contribution to the overall shear strength, the peeling-off process of FRP from the concrete's surface and the relationship between the efficiency and the amount of FRP used in the shear strengthening.

Key words: reinforced concrete beam; FRP; strengthening; shear strength; finite element; debonding

纤维增强复合材料(以下简称 FRP)加固混凝土结构技术近年来已得到广泛应用^[2], 然而对于 FRP

各种加固形式的计算理论, 尤其是加固受力机理目前还缺乏深入研究, 仅仅依靠试验研究工作量又非

收稿日期: 2003-08-25; 修改日期: 2003-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(50238030)和国家 863 计划资助项目(2001AA336010)

作者简介: 张子潇(1982), 男, 山东临朐人, 本科生, 从事结构工程研究;

*叶列平(1960), 男, 浙江温州人, 教授, 从事 FRP 加固研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978), 男, 安徽芜湖人, 博士生, 从事钢筋混凝土有限元分析。

常巨大，不能在短期内取得成果。目前的计算机技术已经允许人们通过数值计算来模拟试验，不仅可以对有限的试验结果进行补充，也能在更深层次上有助于对受力机理有更清楚的认识和理解^[3]。

本文针对工程中常用的 U 型 FRP 受剪加固形式，以文献[1]中的七根梁的受剪试验为依据，建立三维有限元分析模型，采用商业有限元计算软件 ANSYS^[4,5]，数值模拟了加载全过程和受剪剥离受力性能，根据试验结果确定了 FRP-混凝土界面粘结剥离强度，并建议了合适的裂面剪力传递系数。根据有限元分析结果，进一步研究了 U 型 FRP 布的应变分布、分担剪力的贡献、剥离破坏的过程，以及加固量、FRP 类型和粘贴面积率对加固梁受剪承载力的影响。在有限元分析的基础上结合试验结果，提出了 U 型 FRP 加固的受剪剥离承载力计算方法。

1 试验研究概况

试验梁尺寸如图 1，采用四点加载，两个加载点的距离随剪跨比的不同而变化。梁的钢筋配置均相同(见图 2)，纵筋配置足够多以保证发生受剪破坏，梁两侧箍筋为不对称配置以保证破坏发生在 FRP 加固侧。七根试验梁中有一根是未加固对比梁，另外六根梁的 FRP 加固量、FRP 材料、剪跨比和加固形式不同。各试验梁的加固形式和参数见表 1 和

表 2。

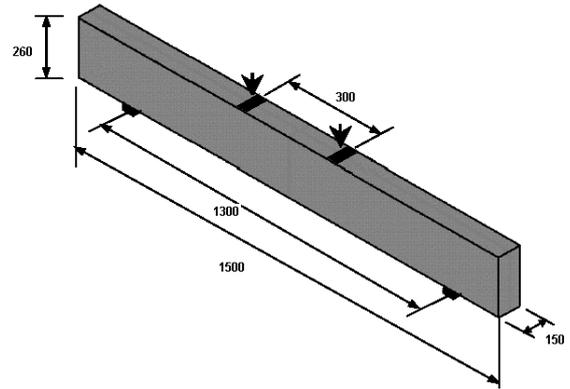


图 1 梁加载及尺寸图

Fig.1 Size and loading of test beams

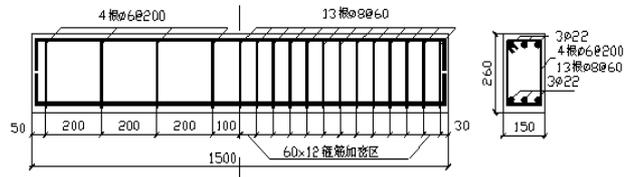


图 2 梁配筋图

Fig.2 Reinforcement of test beams

FRP 材料有 GFRP 布和 CFRP 布两种。GFRP 布的弹模为 97GPa，抗拉强度为 2777MPa，厚度为 0.169mm；CFRP 布弹模为 235GPa，抗拉强度为 3500MPa，厚度为 0.111mm。

表 1 试验梁加固及应变片位置示意图

Table 1 Arrangement of U-wraps and location of strain gauges of the test beams

S0-2-0	S-GU-1-1	S-GU-2-1(a) & S-CU-2-1
S-GU-2-3	S-GU(B)-2-1	S-GU-3-1

表 2 试件参数

Table 2 Parameters of specimens

试件编号	剪跨比	混凝土立方块抗压强度 f_{cu} /MPa	纵筋屈服强度 f_{cu} /MPa	箍筋屈服强度 f_{cu} /MPa	加固材料	加固方式
S-0-2-0	2.155	31.8	395	377	无	不加固
S-GU-1-1	1.5	39.2	395	377	GFRP	U
S-GU-2-1a	2.155	39.2	395	377	GFRP	U
S-GU-2-3	2.155	38.3	395	377	GFRP	全长 U
S-GU(B)-2-1	2.155	40.1	395	377	GFRP	U+压条
S-GU-3-1	2.8	40.1	395	377	GFRP	U
S-CU-2-1	2.155	37.6	395	377	CFRP	U

2 有限元建模

由于 U 型 FRP 受剪加固梁最终均发生界面剥离破坏,正确模拟 FRP 布与混凝土界面的粘结性能对数值试验至关重要,因此本文采用三维有限元模型。计算分析采用商用有限元软件 ANSYS 进行^[4-6],混凝土使用 SOLID65 三维实体单元模型;钢筋使用 LINK8 杆单元;混凝土与钢筋之间采用位移协调式模型,钢筋单元与混凝土单元共节点;FRP 布采用 SHELL63 壳单元,并将其抗弯刚度设为 0,退化成膜单元使用;FRP 与混凝土界面单元采用 COMBIN39 非线性弹簧单元。

本文将混凝土看作连续均匀材料,单轴受压应力-应变曲线采用过镇海建议^[7],以 Von-Mises 作为屈服准则,开裂准则采用 Rankine 最大拉应力准则,并采用弥散式裂缝模型。钢筋按理想弹塑性材料考虑,FRP 按弹性材料考虑。试验梁的最终破坏由 FRP 剥离控制,FRP 剥离后计算便不再收敛,计算结束^[6]。

FRP 与混凝土界面单元采用下列粘结-滑移本构关系^[8]:

$$\tau = \tau_{\max} \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{\max}}} \quad (1)$$

其中, τ_{\max} 为粘结强度; δ_{\max} 为相应 τ_{\max} 时最大滑移位移。由于采用弥散裂缝模型,这会导致应力应变均匀化,又由于粘结应力是 FRP 布应变的导数,因此有限元分析得到的粘结应力会小于试验梁中局部的粘结应力^[9]。为此,本文在计算中以试验梁达到受剪剥离承载力时计算得到的截面粘结应力作为计算粘结强度,其值为 1.867MPa。此外,本文简化假定 FRP 布相对于混凝土发生的相对滑移主要是沿梁的高度方向,在其它两个方向将混凝土上的节点

和纤维布上的节点的位移耦合。

混凝土结构的有限元计算结果对某些模型参数十分敏感,其中裂缝剪力传递系数影响最大。SOLID65 混凝土实体单元积分点处的裂缝具有两种状态:张开和闭合,分别定义有张开裂缝剪力传递系数 β_t , 闭合裂缝剪力传递系数 β_c ^[5,10]。通过数值分析,单调加载情况下梁在加载的全过程中,裂缝大都处于张开状态,只有在少量几个单元中会出现裂缝闭合状态。因此,张开裂缝剪力传递系数 β_t 对梁的刚度起决定性的作用。同时,也不能忽略闭合裂缝剪力传递系数 β_c 对计算结果的影响,因为如果两个系数相差太大,会使梁中个别位置出现严重的应力集中,导致结果不能收敛;同样,如果这两个系数过于接近,也是不合理的,紧闭的裂缝传递剪力的能力显然要比张开的裂缝强很多,这样构造出来的梁中将不再出现应力集中现象,不能反映混凝土梁中的实际受剪破坏情况,而可能使得原本应该受剪破坏的梁一直算到受弯破坏。本文通过对计算分析结果综合后,取裂缝剪力传递系数为:未加固梁 $\beta_t=0.03$, $\beta_c=0.3$;加固梁 $\beta_t=0.06$, $\beta_c=0.6$ 。

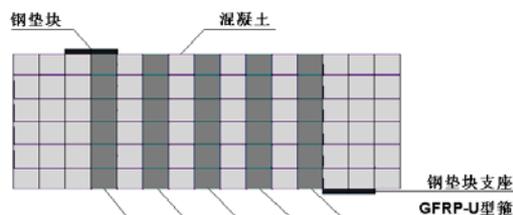


图 3 单元划分

Fig.3 Meshing

考虑到试验梁的对称性,取 1/4 梁进行分析,并设定中剖面上的节点在厚度方向的位移为零,跨中截面上的节点在长度方向上位移为零,如图 3 所示。混凝土单元的尺寸取 50mm 左右。非线性计算

采用位移收敛准则，位移相对残差为 5%^[5,10]。

3 计算结果分析

图 4 为各梁荷载-挠度曲线的计算结果与试验结果的对比，可见：

(1) 对于非加固梁，数值分析得到的荷载-挠度曲线的走势与试验结果基本吻合，两条曲线的最大承载力误差在 5% 以内，但数值梁发生破坏时的挠度要比实际梁小的多，这主要是由于试验梁的销栓作用没有被很好的模拟出来。

(2) 对于加固梁，荷载-挠度曲线的分析结果与试验结果吻合的相当好，数值梁最后的破坏形式也与实际相符，都是由于 U 型 FRP 箍剥离破坏，最大承载力的计算结果与试验结果对比见表 3。

图 5 为部分加固梁 FRP 布的应变分布云图，可见 FRP 布在主斜裂缝位置处的发挥效果最为显著，并沿与斜裂缝垂直的方向向两侧逐渐减小。图 6 为 S-GU-2-1(a)梁沿斜裂缝的各 U 型 FRP 箍的应变分布，由于试验中应变片的位置与计算点位置不一致，以及弥散裂缝与实际裂缝之间的差别，数值结果和实测结果有一些差别，但是总体上数值结果还

是能够反映实际情况的。

表 3 最大承载力试验值与计算值的对比

Table 3 Comparison between experimental and numerical results of the ultimate loads

梁编号	实测承载力/kN	计算承载力/kN	误差/%
S0-2-0	194.3	185.9	-4.3
S-GU-2-1a	294.1	299.5	1.8
S-GU-2-3	336.2	345.6	2.8
S-GUB-2-1	299.6	293.7	-2.0
S-GU-1-1	339.9	344.3	1.3
S-GU-3-1	215.4	198.4	-7.9
S-CU-2-1	272.6	296.6	8.8

图 7 为根据分析结果得到的 FRP 箍和箍筋承担剪力的分担率。可以看出，FRP 箍和箍筋不是从一开始就发挥作用，而是在跨中挠度接近 1mm 的时候才开始分担剪力，此时也正是梁中开始出现斜裂缝的时候。随着荷载增加，U 型箍和箍筋对剪力的分担率也基本呈线性增加。箍筋屈服后，其剪力分担率保持不变，而 FRP 布则继续增加，直至 FRP 布产生剥离而告破坏。

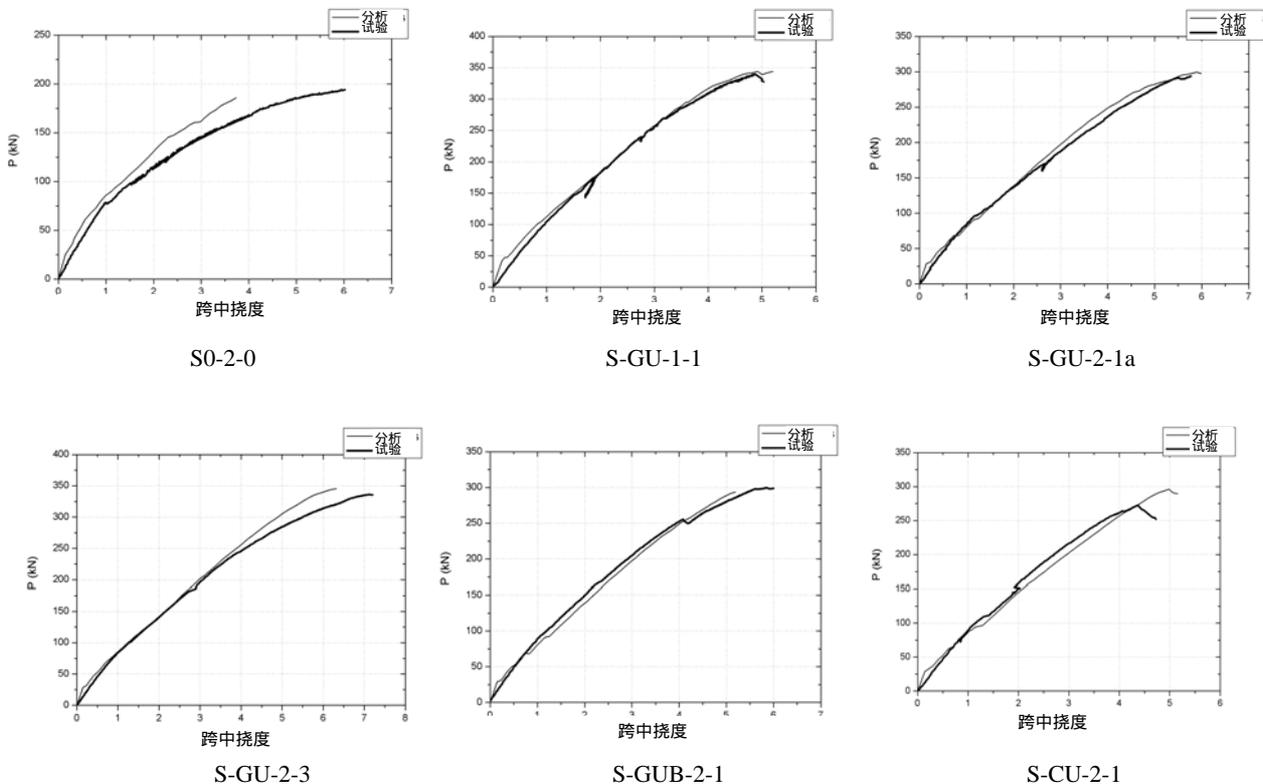


图 4 荷载-跨中挠度曲线计算结果与试验结果的对比

Fig.4 Comparison between experimental and calculated load-midspan deflection curves

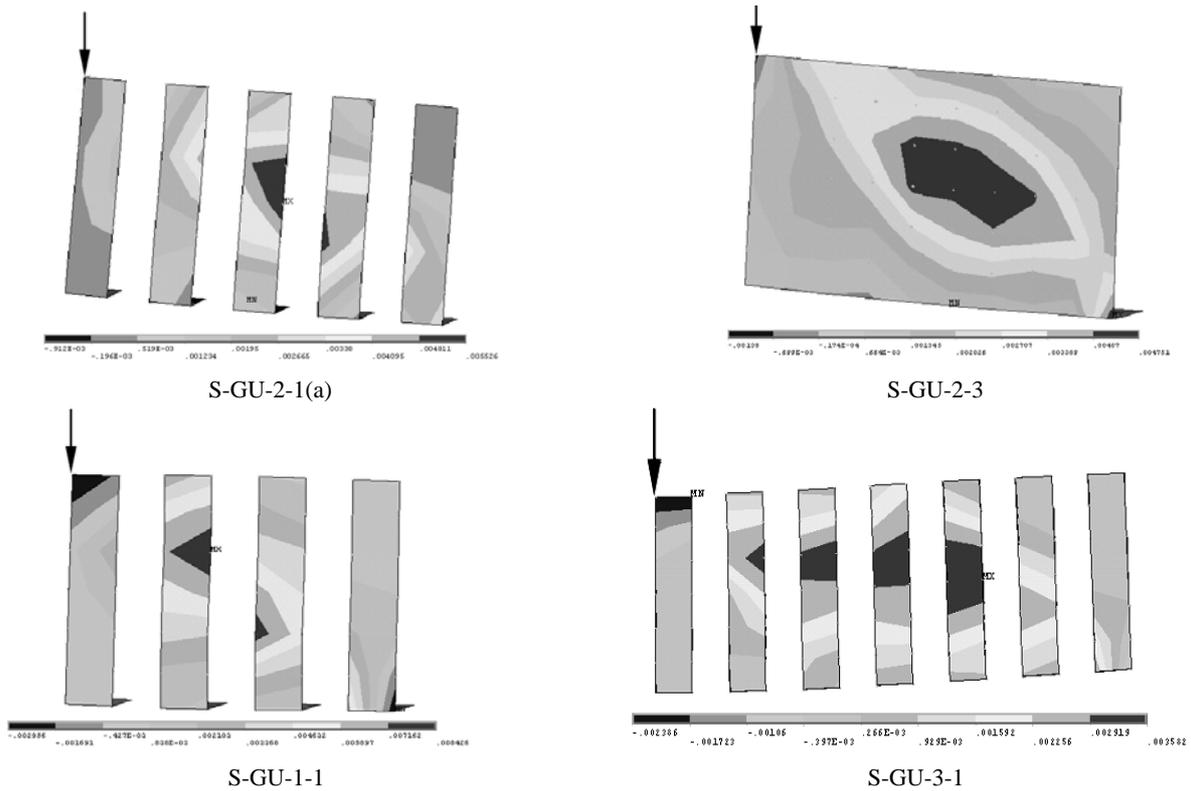
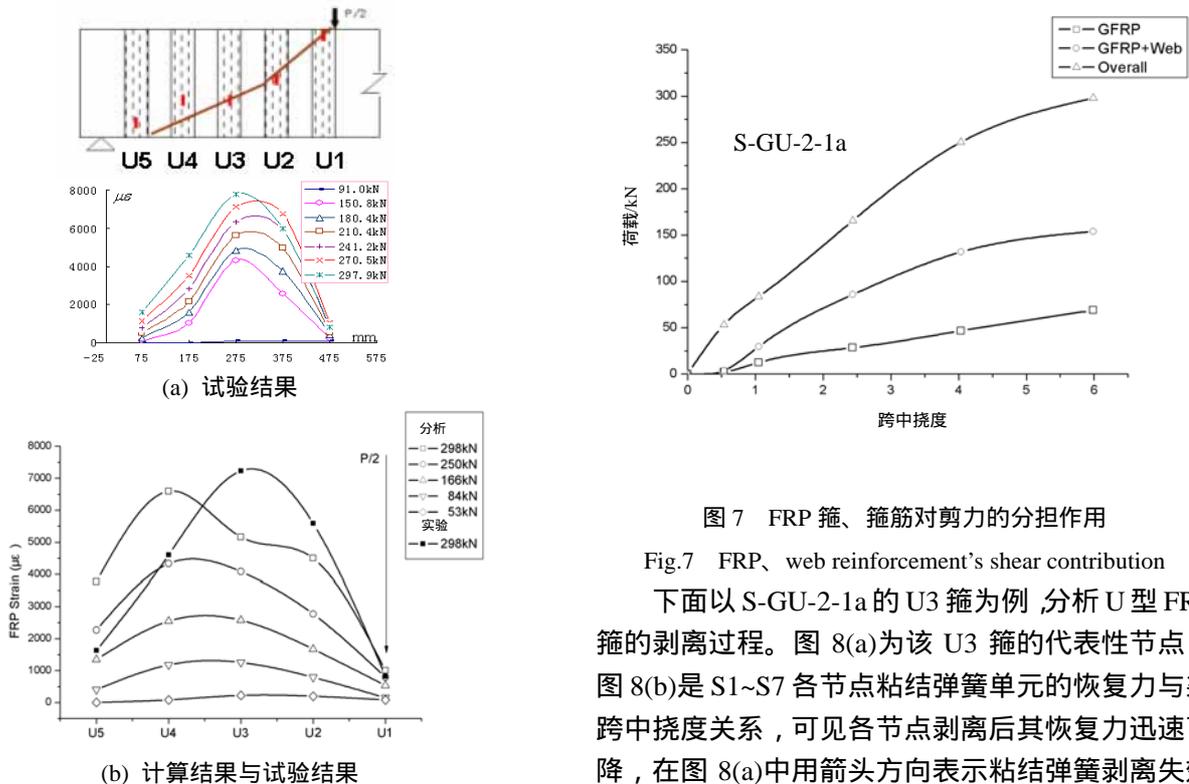


图 5 加固梁 FRP 布应变分布云图以及主斜裂缝位置

Fig.5 Strain distribution and location of major shear crack for strengthened beams



(b) 计算结果与试验结果

图 6 S-GU-2-1a 梁各 U 型箍在不同荷载下裂缝处的应变计算值及试验值的比较

Fig.6 Comparison between the experimental and numerical results of maximum strain of the U-wraps under different load levels for beam S-GU-2-1(a)

图 7 FRP 箍、箍筋对剪力的分担作用

Fig.7 FRP, web reinforcement's shear contribution

下面以 S-GU-2-1a 的 U3 箍为例,分析 U 型 FRP 箍的剥离过程。图 8(a)为该 U3 箍的代表性节点,图 8(b)是 S1~S7 各节点粘结弹簧单元的恢复力与梁跨中挠度关系,可见各节点剥离后其恢复力迅速下降,在图 8(a)中用箭头方向表示粘结弹簧剥离失效的先后顺序,裂缝上侧依次是 S3 S2 S1,裂缝下侧依次是 S5 S6 S7,剥离次序与试验相符。

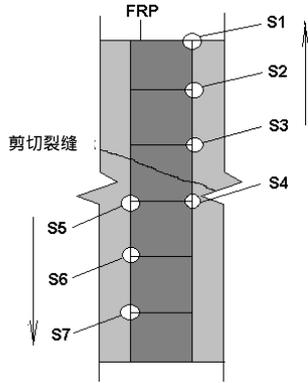
图 9 为梁 S-GU-2-1a 中沿主斜裂缝各条 FRP 箍的应变实测值与计算值,可见两者总体发展规律基

本一致,各条 FRP 箍均是在梁中出现斜裂缝之后才开始受力,中间几条 FRP 箍(U2,U3,U4)发挥的作用较大,应变值达到 6000 $\mu\epsilon$ 左右,并首先发生剥离而到达最大受剪承载力。梁达到最大承载力时各 FRP 箍应变的实测值和计算值对比见表 5。

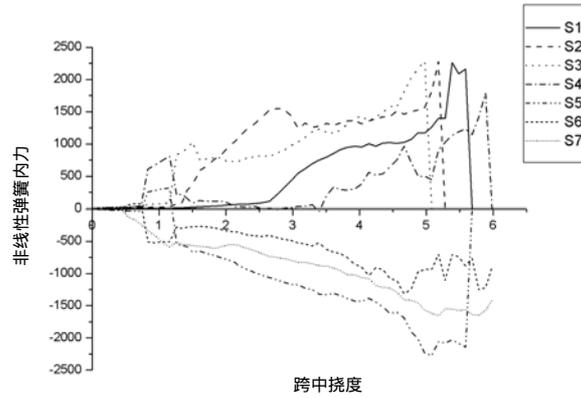
表 4 最大承载力时各 FRP 箍应变值($\mu\epsilon$)

Table 4 Strains in the FRP strips at the maximum load

FRP 箍	U1	U2	U3	U4	U5
实测值	1630	4606	7230	5588	823
计算值	3774	6594	5161	4496	1000



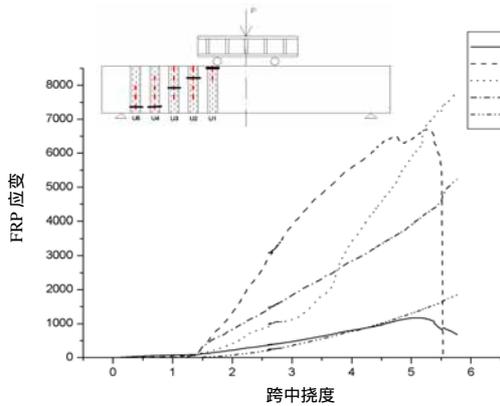
(a) U3 箍剥离示意图



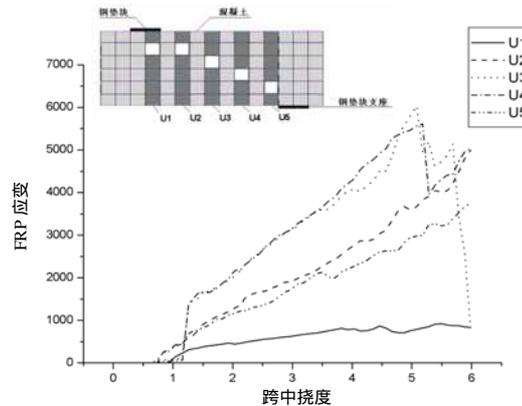
(b) 7 个主要受力位置粘结应力弹簧的恢复力随加载变化图

图 8 S-GU-2-1a 梁 U3 箍的剥离过程

Fig.8 Mechanism of the FRP peeling-off process



(a) 实测结果



(b) 计算结果

图 9 梁 S-GU-2-1a 中主斜裂缝处 U 型箍应变实测值与计算值

Fig.9 Experimental and numerical strains along the diagonal crack in the FRP wraps of S-GU-2-1(a)

4 FRP 受剪剥离承载力分析

根据试验和计算分析,对于 U 型受剪加固产生剥离破坏时,影响 FRP 的直接受剪贡献 V_f 的因素有 FRP 的受剪加固量,用受剪配纤率 $\rho_{fv} = 2w_f t_f / (w_f + s_f) b$ 表示; FRP 面积粘结率 $\eta = w_f / (w_f + s_f)$ (其中, w_f 为 FRP 条带的宽度、 s_f 为 FRP 条带之间的净间距、 t_f 为 FRP 的厚度); 剪跨比; FRP 材料品种(弹性模量 E_f 和极限强度 f_{fu}) 和 FRP 与混凝土界面的剥离强度 τ_{max} 。参照钢筋混

凝土梁中箍筋的受剪贡献表达形式^[11,12], FRP 的受剪贡献可表达为,

$$V_f = \alpha_{fv} \rho_{fv} f_{fu} b h \quad (2)$$

式中, α_{fv} 为 FRP 受剪系数。

根据本文前述有限元分析方法,分别对 GFRP 的 4 种厚度、CFRP 的 3 种厚度和 3 种面积粘结率进行数值计算(计算中 τ_{max} 均取 1.867MPa),并结合试验结果对影响 FRP 受剪贡献的参数进行了分析。对于剪跨比为 2.155 梁,图 10 为 FRP 受剪系数 α_{fv} 与 FRP 受剪配纤率 ρ_{fv} 关系的试验结果和本文有限

元分析得到的结果。由图可见,FRP 受剪系数 α_{fv} 与随加固量的增加而减小,而并非常数。

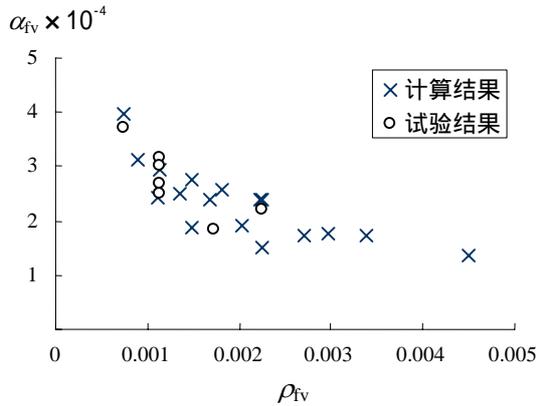


图 10 $\alpha_{fv} - \rho_{fv}$ 关系
Fig.10 $\alpha_{fv} - \rho_{fv}$ relation

因为 FRP 厚度和面积粘贴率均会使加固量产生变化,表 5 列出了 FRP 厚度和面积粘贴率变化组合对 FRP 受剪贡献 V_f 影响的分析结果。表中下划线的数据为 GFRP 加固量相同($\eta t_f = 0.169$),但面积粘贴率不同的 3 种情况,可见在同样加固量情况下,面积粘贴率越大,FRP 受剪贡献 V_f 越大。这是因为受剪剥离承载力主要取决于面积粘贴率和剥离强度 τ_{max} ,而 FRP 厚度以及品种的变化对 V_f 的影响不是很大。

表 5 V_f 的分析结果(kN)

Table 3 Analysis results of shear contribution of FRP

FRP 品种	$t_f / \text{mm} \backslash \eta$	0.500	0.667	1.000
	GFRP	0.169	35.936	36.812
0.254		43.630	<u>42.054</u>	63.042
0.338		<u>36.856</u>	51.074	66.398
CFRP	0.167	37.138		73.110

考虑到上述分析结果,按图 11 斜裂缝上部粘贴面积 A_{fb} 与剥离强度 τ_{max} 建立受剪剥离承载力计算公式更为合理,此时 FRP 受剪贡献 V_f 可表达为,

$$V_f = 2k_f \tau_{max} A_{fb} \quad (2)$$

式中, k_f 为受剪剥离时沿斜裂缝 FRP 的综合受力系数,称为受剪剥离系数;系数 2 表示梁两侧面。对于剪跨比为 2.155 梁,受剪剥离系数 k_f 与面积粘贴率关系的试验结果和分析结果见图 12,可见受剪剥离系数 k_f 基本为常数,随面积粘贴率 η 的增加

略有减小。图 13 为受剪剥离系数 k_f 随剪跨比变化关系的试验结果,可见受剪剥离系数 k_f 随剪跨比减小而减小,这是由于在剪跨比较小时,FRP 受剪的不均匀程度有所增大。

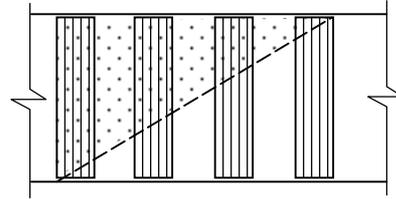


图 11 斜裂缝上部粘贴面积
Fig.11 Bond area of FRP sheets

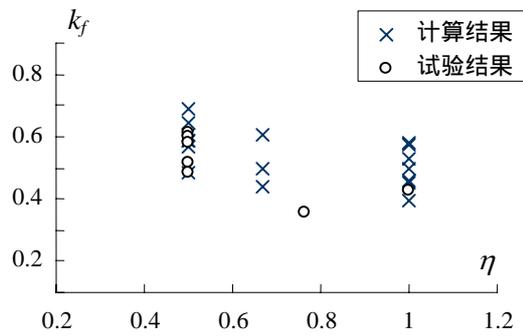


图 12 受剪剥离系数 k_f
Fig.12 Shear debonding coefficient k_f

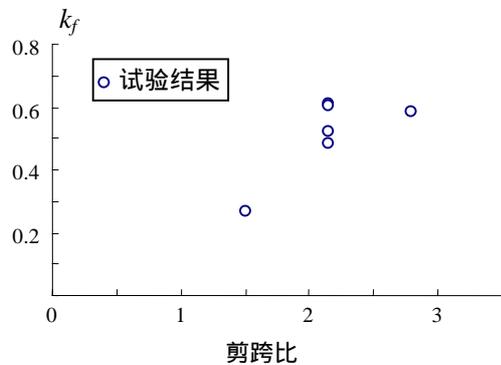


图 13 受剪剥离系数 k_f 与剪跨比的关系
Fig.13 Relation of k_f and shear span ratio

另一个值得注意的问题是,达到最大受剪承载力时钢筋混凝土的受剪贡献也会受到 FRP 加固参数的影响。表 4 给出两根面积粘贴率相同($\eta = 0.5$)梁达到最大受剪承载力时的计算结果,梁 A 为 $t_f = 0.169\text{mm}$ 的 GFRP 加固梁(弹性模量为 97GPa),梁 B 用到的 CFRP 布厚度为 0.222mm 的 CFRP 加固梁(弹性模量为 235GPa)。由表可见,因为面积粘贴率相同,梁 A 和梁 B 的 FRP 受剪贡献基本一致,但两者钢筋混凝土的受剪贡献 $V_{RC} = V - V_f$ 却有较

大差别,CFRP 加固梁的 V_{RC} 仅为 GFRP 加固梁 V_{RC} 的 55.8%。产生这种现象的原因是,梁 B 的 FRP 刚度($E_f t_f$)是梁 A 的 3 倍多,在 FRP 发生剥离的时候,梁 A 的箍筋已经发生屈服,而梁 B 的箍筋却还远未屈服,从而影响到钢筋混凝土部分受剪承载力的发挥。试验实测结果也验证这种现象,梁 S-GU-2-1(a)当 FRP 剥离时其 $V_{RC}=117.7\text{kN}$,而采用 CFRP 加固的 S-CU-2-1 梁,当 FRP 剥离时其 $V_{RC}=108.9\text{kN}$ 。这两个试验梁的 FRP 布刚度相差不多(前者为 16.393,后者为 26.085),因此上述现象不如数值试验中那么明显。

表 6 钢筋混凝土受剪贡献分析

Table 6 Analysis of shear contribution of RC part

梁号	V_u/kN	V_f/kN	V_{RC}/kN	挠度/mm	σ_{SV}/MPa
梁 A	74.81	17.97	56.84	5.80	377
梁 B	50.82	19.07	31.75	2.96	285

5 结 语

本文以谭壮所进行的一系列 FRP 抗剪加固钢筋混凝土试验梁为依据,建立了合理的三维有限元模型,并通过试验对比分析,找到了合适的模型参数,包括 FRP-混凝土界面粘结剥离强度、混凝土裂缝剪力传递系数等。由该模型计算得到的荷载-跨中挠度曲线与试验曲线吻合的很好。在此基础上,本文又进一步对 FRP 抗剪加固的力学性能和机理进行了深入的研究,分析了 FRP 布的应变分布、对分担剪力的贡献、剥离破坏的过程以及加固量对其发挥效果的影响,不仅印证了试验,还提供了不少从试验中难以获得的结果,并从有限元的角度对现象进行了解释。在有限元分析的基础上,结合试验结果对 FRP 的受剪贡献及其影响参数进行较为深入的分析,为建立 U 型 FRP 加固受剪剥离承载力提供了依据。

参考文献:

[1] 谭壮. GFRP 布加固混凝土梁受力性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
Tan Z. Experimental study of RC beams strengthened with GFRP [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)

[2] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. FRP- strengthened RC structures [M]. UK: John Wiley & Sons, 2002.

[3] 陆新征, 谭壮, 叶列平, 江见鲸. FRP 布-混凝土界面粘结性能的有限元分析[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 45~50.
Lu Xinzheng, Tan Zhuang, Ye Leping, Jiang Jianjing. Finite element analysis of debonding in the interface between FRP sheet and concrete [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 45~50. (in Chinese)

[4] ANSYS, User's manual [M]. Ansys Company, 1999.

[5] 陆新征, 江见鲸. 利用 ANSYS Solid 65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构[J]. 建筑结构, 2003, 33(6): 22~24.
Lu Xinzheng, Jiang Jianjing. Analysis of concrete structures under complex stress condition with solid 65 Element of ANSYS [J]. Building Structures, 2003, 33(6): 22~24. (in Chinese)

[6] 陆新征, 冯鹏, 叶列平. FRP 布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 46~51.
Lu Xinzheng, Feng Peng, Ye Lieping. Behavior of FRP confined concrete square columns under uniaxial loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 46~51. (in Chinese)

[7] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
Guo Zhenhai. The principle of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)

[8] Lu Xinzheng, Teng Jinguang, Ye Lieping and Jiang Jianjing. Bond-slip models for FRP sheet/plate-to-concrete interfaces [A]. Proc. 2nd International Conference of Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction [C]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd, 2004. 152~161.

[9] Teng Jinguang, Lu Xinzheng, Ye Lieping, Jiang Jianjing. Recent research on intermediate crack debonding in FRP strengthened RC beams [A]. Proceedings of 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, (ACMBS IV) [C]. Calgary, Alberta, Canada, July, 2004. CDROM.

[10] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1994. 120.
Jiang Jianjing. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures [M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 1994. 120.

[11] 混凝土结构设计规范 GB 50010-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Code for design of concrete structures GB 50010-2002[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese)

[12] 叶列平. 混凝土结构(上)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 309.
Ye Lieping. Concrete structures (I) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 309. (in Chinese)