

文章编号: 1000-4750(2008)08-0127-06

复杂应力状态对混凝土梁 外贴 FRP 条带抗剪贡献的影响

曲 哲^{1,2}, *叶列平^{1,2}, 陈建飞³, 陆新征^{1,2}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 爱丁堡大学基础设施与环境研究所, 英国)

摘 要: FRP 剥离是外贴 FRP 抗剪加固混凝土梁主要的破坏模式之一。以往研究中往往简单的将面内剪切试验得到的 FRP-混凝土界面粘结滑移关系应用于外贴 FRP 抗剪加固梁的剥离承载力计算。外贴 FRP 抗剪加固梁中 FRP 下的混凝土的应力状态与面内剪切试验情况有较大差别, 这对 FRP-混凝土界面的力学性能具有较大的影响。因此, 以往的方法高估了 FRP 条带的抗剪贡献。该文研究了混凝土多轴应力状态对 FRP-混凝土界面性能的影响, 并根据试验研究结果, 提出了 U 形 FRP 加固混凝土梁中 FRP 剥离应变的折减系数。与试验结果的对比计算分析表明: 使用该折减系数修正后的设计公式更加合理。

关键词: 钢筋混凝土梁; FRP 抗剪加固; FRP-混凝土界面; 三轴应力状态; 界面剥离

中图分类号: TU375.1 **文献标识码:** A

INFLUENCE OF CONCRETE STRESS STATE ON SHEAR CONTRIBUTION OF FRP STRIPS ON RC BEAMS

QU Zhe^{1,2}, *YE Lie-ping^{1,2}, CHEN Jian-fei³, LU Xin-zheng^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Beijing 100084, China;

3. Institute for Infrastructure and Environment, The University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JN, UK)

Abstract: FRP (fibre reinforced polymer) debonding is one of the major failure modes for reinforced concrete beams shear-strengthened with external FRP strips. Currently, the properties of the FRP-concrete interface based on pull-off tests are adopted in the capacity prediction of FRP shear-strengthened reinforced concrete beams. However, the concrete layers underneath FRP strips in these two cases are in different stress states, and so are the behaviours of the FRP-concrete interfaces. As a result, the FRP shear contribution may be over-estimated. This effect is examined in this paper, and a reduction factor accounting for the effect of the complex stress state in U jacketed RC beams is proposed based on test results from literature. A comparison with test results shows that better agreement is achieved using the proposed factor to modify FRP shear contribution.

Key words: RC beams; shear strengthening; FRP-concrete interface; tri-axial stress state; interface debonding

近年来, FRP 加固混凝土结构技术已得到广泛应用^[1], 其中粘贴 U 形 FRP 条带抗剪加固混凝土梁

是一种重要的加固形式, 大多研究者都采用 FRP 抗剪贡献与未加固梁抗剪承载力相叠加的形式来计

收稿日期: 2007-01-15; 修改日期: 2007-09-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50238030); 英国皇家学会-NSFC 中英合作项目(IS16657)

作者简介: 曲 哲(1983-), 男, 陕西西安人, 博士生, 从事结构工程研究(E-mail: qz@mails.thu.edu.cn);

*叶列平(1960-), 男, 浙江温州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事高性能工程材料应用等方面的研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

陈建飞(1963-), 男, 浙江永嘉人, 讲师, 博士, 主要从事 FRP 的工程应用方面的研究(E-mail: j.f.chen@ed.ac.uk);

陆新征(1978-), 男, 安徽芜湖人, 讲师, 工学博士, 主要从事复杂结构的有限元分析(E-mail: luxinzheng@263.net).

算 FRP 抗剪加固梁的抗剪承载力,因此研究工作主要集中在 FRP 的抗剪贡献。表 1 列出了目前研究中比较典型的 FRP 抗剪贡献计算模型^[2-10],并比较了各种模型考虑的设计参数。几乎所有模型都考虑了 FRP 的几何信息(加固厚度、宽度、间距等)与物理信息(弹性模量、强度等)。规范公式考虑的设计参数相对较少,一般不涉及梁的剪跨比和斜裂缝角

度,而研究公式则考虑的比较全面。需要指出的是,曹双寅模型^[9]只给出了一个模式,该模型考虑的因素最为全面,但其中部分关键参数的取值仍无公式可循。除文献[8]属简化公式外,表 1 中其它 FRP 抗剪贡献模型均具有类似的表达形式,其中比较关键也难以确定的两个参数是 FRP 的有效应变 ϵ_{fe} 和梁腹斜裂缝的角度 θ 。

表 1 FRP 抗剪贡献设计公式
Table 1 Design models for FRP shear contribution

	FRP 参数							混凝土梁参数				
	名义厚度	单条宽度	间距	弹性模量	极限拉应变	有效高度	纤维方向	混凝土强度	梁宽	梁高	剪跨比	斜裂缝角度
美国 ACI 440 ^[2]	●	●	●	●	●	●	●	f'_c				
英国 TR 55 ^[3]	●	●	●	●	●	●	●	f'_c	●			
Ye L P (2005) ^[4]	●	●	●	●	●	●	●	f_t	●	●		○
Aprile (2004) ^[5]	●	●	●	●	●	●	●	f_t	●	●		●
Deniaud (2004) ^[6]	●	●	●	●	●	●	●	f'_c				●
Chen & Teng (2003) ^[7]	●	●	●	●	●	●	●	f'_c	●	●		○
谭壮(2003) ^[8]	●	●	●	●	●	●	●	f_t	●	●	●	
曹双寅(2002) ^[9]	●	●	●	●	●	●	●	f_c	●		●	○
Khalifa (2002) ^[10]	●	●	●	●	●	●	●	f'_c	●			

注: ●-包含此参数且有明确的计算表达式; ○-包含此参数但无明确的计算表达式。

f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; f_c 为混凝土棱柱体抗压强度; f_t 为混凝土抗拉强度。

FRP 有效应变 ϵ_{fe} 是剥离破坏时沿斜裂缝 FRP 应变的平均值。它的取值可以分为两个问题,一是 FRP 剥离应变,主要取决于 FRP-混凝土界面粘结行为,与 FRP 的有效锚固长度有关;二是 FRP 应变沿斜裂缝的分布。现有 FRP 抗剪贡献的设计模型在确定 FRP 剥离应变时,均直接采用基于 FRP-混凝土单剪试验得到的 FRP-混凝土界面行为的研究成果,未考虑 FRP 抗剪加固混凝土梁中 FRP-混凝土界面行为的特点。

在 FRP 抗剪加固混凝土梁中,粘贴在梁侧面的 FRP 条带发挥的作用与箍筋相似,可以拉住主斜裂缝两侧的混凝土,FRP 条带的受力状态虽然与单剪试验类似,但 FRP 条带下混凝土的受力状态却与单剪试验不同。根据试验研究结果,粘贴施工质量可靠时,FRP-混凝土界面剥离破坏行为主要取决于界面下的混凝土^[1]。因此,基于单剪试验结果得到的 FRP-混凝土界面粘结滑移模型不宜直接用于 FRP 抗剪加固混凝土梁剥离承载力的分析。本文根据单剪试验与 FRP 加固混凝土梁中 FRP-混凝土界面力学行为的差别,以试验数据为基础,提出了 U 形 FRP 抗剪加固混凝土梁中 FRP 剥离应变的折减系数。

1 试验研究

进行了 3 个 U 形 FRP 条带加固混凝土梁的抗剪试验,并详细记录了 FRP 条带上的应变分布以及混凝土梁腹的应变情况。表 2 列出了试件的基本参数和主要试验结果^[11],3 个未加固对比梁用 RC 编号,加固梁用 U 编号,RC1 即是 U4 的未加固对比梁。

表 2 文献[11]试验的基本参数与主要试验结果
Table 2 Basic parameters and test results in [11]

试件编号	非加固对比梁			FRP 抗剪加固梁		
	RC1	RC2	RC3	U4	U5	U6
梁宽 b_w /mm	100	200	300	100	200	300
梁高 h /mm	200	400	600	200	400	600
梁有效高度 d /mm	166	330	498	166	330	498
剪跨比 λ	340	680	1020	340	680	1020
混凝土轴心抗压强度 f_c /MPa	37.9	36.8	37.4	37.9	37.9	37.7
混凝土劈裂抗拉强度 f_{ts} /MPa	2.55	2.93	3.16	2.55	2.93	3.16
FRP 弹性模量 E_f /GPa				235	235	235
FRP 名义厚度 t_f /mm				0.111	0.222	0.333
FRP 条带宽度 w_f /mm				30	60	90
FRP 条带间距(中到中) s_f /mm				50	100	150
FRP 纤维倾角 β /($^\circ$)				90	90	90
F3 条带上的 FRP 最大应变/ $\mu\epsilon$				4112	4053	3063
梁半跨抗剪承载力/kN	79.7	354.6	813.0	101.4	404.6	1009.0

文献[12]推导了单剪试验中 FRP 轴向应变分布的解析解。运用该解析解,结合文献[13]提出的 FRP-混凝土界面粘结滑移双线性模型,可计算各试件中央 U 形 FRP 条带(见图 1)的应变分布的发展过程。计算中,梁腹主斜裂缝上方的 FRP 条带视为与单剪试验中的 FRP 条带类似,主斜裂缝相当于加载端,梁顶相当于自由端,U4 梁、U5 梁和 U6 梁的计算结果见图 2(b)~图 2(d)。图中显示了不同加载阶段,从梁腹主斜裂缝到梁顶的 FRP 轴向应变沿梁高方向(亦即 FRP 纤维方向)的分布。同时,还计算了文献[14]中一个单剪试验的 FRP 应变分布发展用作比较,见图 2(a)。

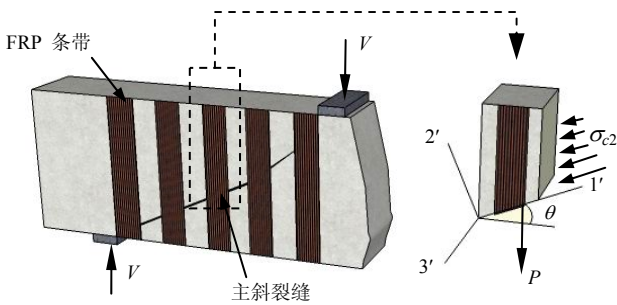
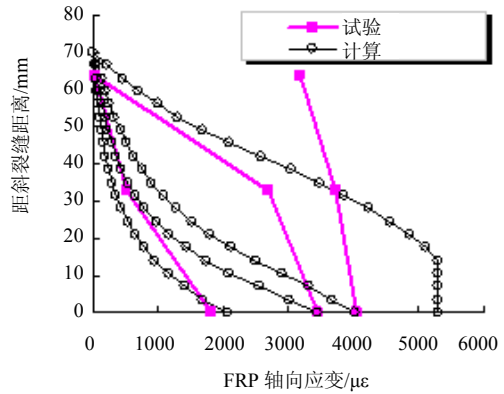
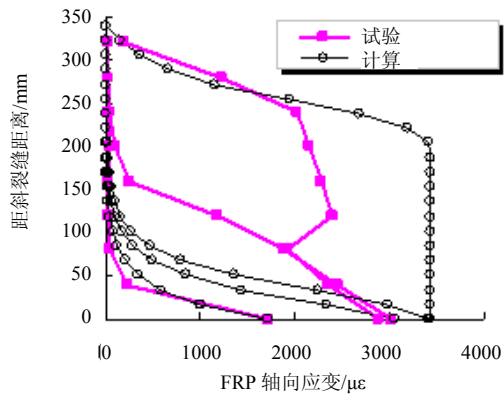


图1 FRP抗剪加固混凝土梁中的FRP条带
Fig.1 FRP strips in shear-strengthened RC beam



(c) U5 试件的中央条带



(d) U6 试件的中央条带

图2 FRP 应变分布解析解与试验值的比较

Fig.2 Analytical FRP strain distributions compared with test results

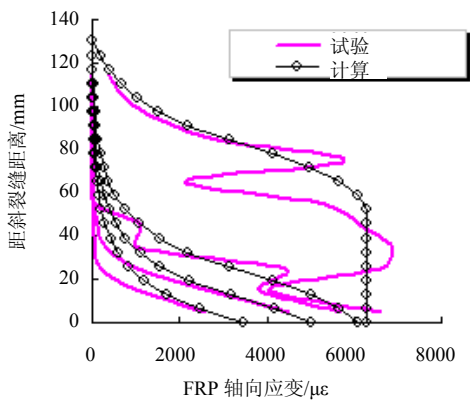
由图 2(a)可见,对于单剪试验,解析解与试验结果吻合良好;而对于 U 形 FRP 加固梁,解析解与试验结果有如下明显的偏差:

1) FRP 剥离应变计算值往往高于试验值,其中 U4 试件尤其明显,计算值比试验值高出 1260 $\mu\epsilon$ 。且当 FRP-混凝土界面处于弹性-软化阶段^[12]时,界面刚度计算结果明显高于试验结果。如果保持加载端处 FRP 应变的计算值与试验值相等,则加载端附近的 FRP 应变的计算值明显小于试验值。

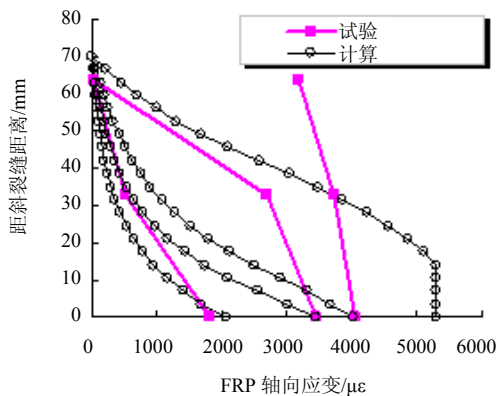
2) 在解析解中,当加载端处开始发生界面剥离时,FRP 将达到其最大应变,不再可能增长,这与单剪试验结果一致。然而在 FRP 加固梁中,即使主斜裂缝处已经发生剥离,FRP 的应变仍会继续增长,如图 2(b)~图 2(d)所示。

因此,简单将单剪试验研究得到的 FRP-混凝土界面本构粘结滑移模型用于 U 形 FRP 抗剪加固梁的剥离分析是不合适的。其原因如下:

在单剪试验中,FRP 条带下的混凝土基本处于单剪状态,如图 3 中的 A 状态。而在 FRP 加固混



(a) PC1-1Cb (文献[14])



(b) U4 试件的中央条带

混凝土梁中，主斜裂缝上方的 U 形 FRP 条带下的混凝土不仅有单剪受力状态(图 3 中 A 状态)，同时还因梁受剪，梁腹混凝土还受斜向压应力(见图 1)，如忽略梁腹混凝土中的拉应力，则可简化为图 3 的 B 状态。因此，加固梁中 FRP 条带下混凝土的实际应力状态为 A 状态、B 状态的组合，如图 3 中 C 状态。处于 C 状态所示的三轴应力下的混凝土强度将有所降低，从而使 FRP-混凝土界面的承载能力降低，降低的幅度基本与混凝土斜压应力呈正相关。

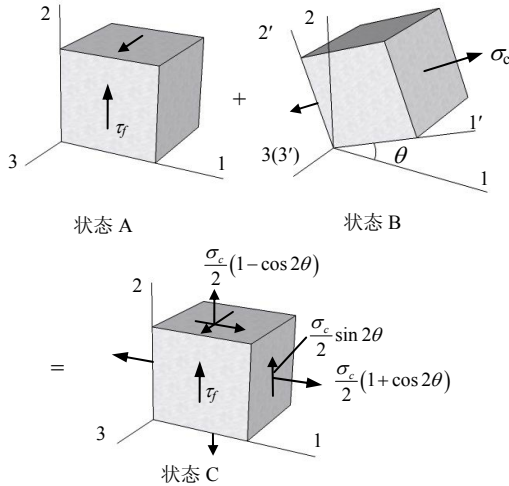


图 3 混凝土加固梁中 FRP 条带下混凝土的应力状态
Fig.3 Concrete stress state underneath the FRP strip in strengthened beam

试验结果显示：梁腹上混凝土斜压应变基本呈纺锤状分布，即主斜裂缝处与其平行的混凝土应变值最大，远离斜裂缝则减小。受此影响，FRP 条带上各处的 FRP-混凝土界面的行为有所不同，越靠近主斜裂缝，FRP-混凝土界面粘结强度越小，这样即使斜裂缝处 FRP 已经剥离，FRP 应变仍有可能上升；同时 FRP 条带总的剥离承载力低于单剪试验结果。

2 混凝土多轴应力对 FRP 有效应变的折减

虽然各国学者针对 U 形 FRP 抗剪加固混凝土梁进行了大量试验研究，但只有较少的试验记录了 FRP 的应变分布及其发展。本文搜集了 21 个有 FRP 最大剥离应变记录的试验结果^[10,11,14-20]，并采用文献[7]提出的 FRP 抗剪贡献计算公式计算了各试验梁的 FRP 最大剥离应变。计算结果与试验结果的比较如图 4 所示。选用文献[7]的计算公式，是因为该公式给出了 FRP 最大剥离应变，而其它模型仅给出 FRP 的有效应变，不便于与试验结果对比。从图 4 可见，首先，FRP 最大剥离应变的计算值普遍偏高，

这是因为该公式是基于单剪试验的研究结果，没有考虑混凝土多轴应力对 FRP-混凝土界面性能的影响；其次，剪跨比越小，该公式对 FRP 最大剥离应变的高估越严重。本文认为这是因为剪跨比较小时，梁腹混凝土斜压应力水平较高，对 FRP-混凝土界面性能的影响也较大。

图 4 中同时给出了对数据点进行线性拟合后得到的趋势线。由图 4 可见，当剪跨比 $a/h_0 \geq 4$ 时，可不再考虑混凝土多轴应力对 FRP 剥离应变的折减作用。基于图 4 线性拟合结果，本文提出以下 FRP 剥离应变折减公式。

$$\varepsilon'_{fd} = \frac{8}{12 - a/h_0} \cdot \varepsilon_{fd} \quad (1)$$

其中： a/h_0 为梁的剪跨比，当 $a/h_0 > 4$ 时，取 $a/h_0 = 4$ ； ε'_{fd} 为 FRP 剥离应变； ε_{fd} 为折减后的 FRP 剥离应变。

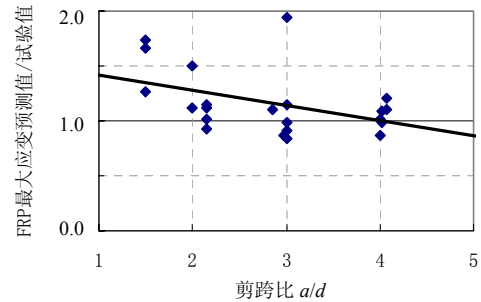


图 4 文献[7]模型计算的 FRP 最大剥离应变与试验结果的比较

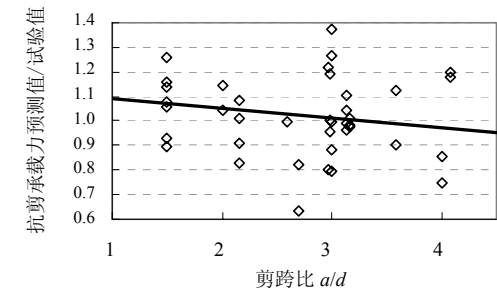
Fig.4 FRP debonding strains predicted by model in [7] compared with test results

3 考虑折减后 FRP 抗剪贡献的计算结果

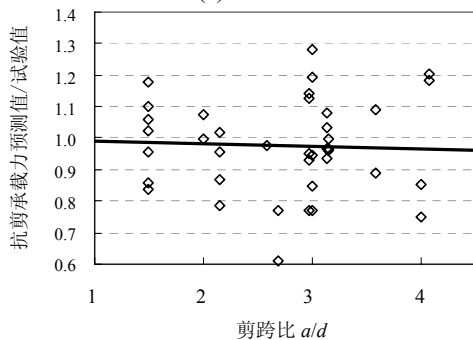
FRP 抗剪贡献的设计公式通常用 FRP 有效应变表达，而 FRP 剥离应变与 FRP 有效应变成正比，因此 FRP 抗剪贡献的设计公式中的 FRP 有效应变可直接用式(1)中的折减系数予以折减，即可考虑斜裂缝以上部分斜向压应力对受剪剥离承载力降低的影响。

本文分别采用了美国规范 ACI 440^[2]，英国规范 TR 55^[3]，文献[4]公式计算了从文献[10,11,14-25]中搜集到的 37 个 U 形 FRP 加固混凝土梁的抗剪承载力。加固梁的总抗剪承载力等于由上述设计公式计算得到的 FRP 抗剪贡献与试验中未加固对比梁的承载力之和。与此同时，用式(1)折减各设计公式中的 FRP 有效应变(或有效应力)，将得到的计算结

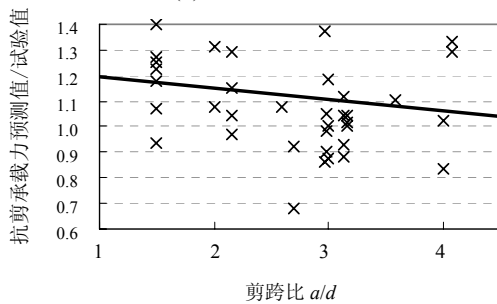
果与未折减前的结果相比较,如图 5 所示。由图 5 可见,不考虑混凝土多轴应力对 FRP-混凝土界面性能的削弱影响时,各设计公式给出的剥离破坏时的总抗剪承载力与试验值相比,普遍偏高估计了抗剪承载力,且其偏差与剪跨比存在比较明显的相关性,即随着剪跨比的减小,高估得越多(图 5(a)、图 5(c)、图 5(e))。按本文建议考虑混凝土多轴应力影响折减后,FRP 加固梁剥离破坏时的抗剪承载力计算值和试验值之间的偏差对剪跨比的依赖性明显减小,表明了本文建议考虑混凝土多轴应力影响的折减方法的合理性。



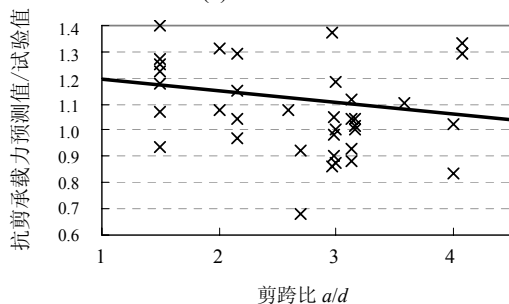
(a) ACI 440^[2]



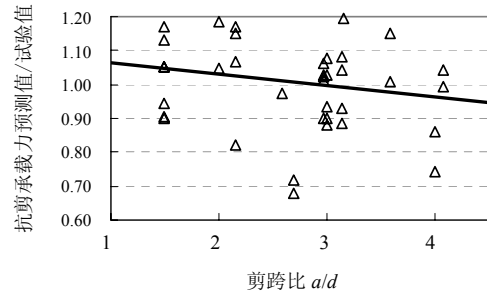
(b) 折减后的 ACI 440



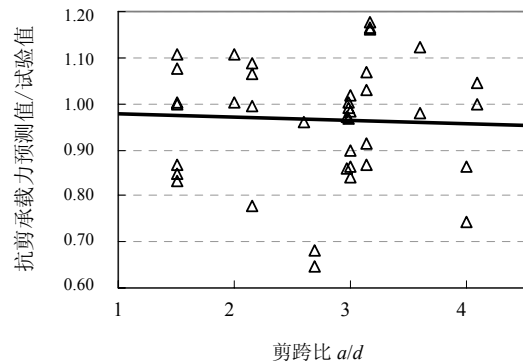
(c) TR 55^[3]



(d) 折减后的 TR 55



(e) 文献[4]



(f) 折减后的文献[4]公式

图 5 折减前后设计公式对 FRP 抗剪加固梁承载力的预测
Fig.5 Prediction of shear capacity by Code before and after modification

4 结论

本文以试验观测为基础,考察了外贴 FRP 加固钢筋混凝土梁梁腹混凝土多轴应力状态对 FRP-混凝土界面性能的影响,提出了 U 形 FRP 加固混凝土梁抗剪剥离承载力计算中 FRP 剥离应变的折减方法。本研究得到以下结论:

(1) FRP 抗剪加固混凝土梁中的 FRP-混凝土界面行为与单剪试验中的不同,表现在强度与刚度两个方面。现有的基于单剪试验的粘结滑移模型往往高估 FRP 加固混凝土梁受剪剥离时的 FRP 最大应变,这主要是由梁腹中混凝土的应力状态与单剪试验中的情况不同所引起的。

(2) 本文提出的考虑梁腹中混凝土多轴应力状态对 FRP 剥离应变的折减方法,可以直接用于现有规范中 FRP 混凝土梁的抗剪剥离承载力计算公式。与试验结果的对比表明:采用本文建议的折减方法,可使计算结果更加合理的反映实际情况。

参考文献:

[1] Teng J G, Chen J F, Smith S T, Lam L. FRP-strengthened RC structures [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
[2] ACI 440.2R-02, Guide for the design and construction of

- externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures [S]. Michigan, United States: American Concrete Institute, 2002.
- [3] Concrete Society Technical Report No. 55 (2nd Edition), Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials [S]. Surrey, United Kingdom: The Concrete Society, 2004.
- [4] Ye L P, Lu X Z, Chen J F. Design proposals for the debonding strengths of FRP strengthened RC beams in the Chinese design code [C]// Chen J F, Teng J G. Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures. Hong Kong: International Institute for FRP in Construction, 2005: 55—62.
- [5] Aprile A, Benedetti A. Coupled flexural-shear design of RC beams strengthened with FRP [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2004, 35(1): 1—25.
- [6] Deniaud C, Cheng J J R. Simplified shear design method for concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer sheets [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(5): 425—433.
- [7] Chen J F, Teng J G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(1): 27—41.
- [8] 谭壮, 叶列平. 纤维复合材料布加固混凝土梁受剪性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(11): 12—18.
Tan Zhuang, Ye Lieping. Experimental research on shear capacity of RC beam strengthened with externally bonded FRP sheets [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(11): 12—18. (in Chinese)
- [9] 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分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(4): 766—770.
Cao Shuangyin, Pan Jianwu, Qiu Hongxing. Analysis of shear strength models for beams strengthened by externally bonded FRP composites [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2002, 32(4): 766—770. (in Chinese)
- [10] Khalifa A, Nanni A. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(3): 135—146.
- [11] Qu Z, Lu X Z, Ye L P. Size effect of shear contribution of externally bonded FRP U-jackets for RC beams [C]// Chen J F, Teng J G. Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures. Hong Kong: International Institute for FRP in Construction, 2005: 371—379.
- [12] Yuan H, Teng J G, Seracino R, Wu Z S, Yao J. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(5): 553—565.
- [13] Lu X Z, Teng J G, Ye L P, Jiang J J. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(6): 920—937.
- [14] 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, 2003.
Tan Zhuang. Experimental study on mechanical behaviour of GFRP strengthened RC beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [15] Khalifa A, Tumialan G, Naani A, Belarbi A. Shear strengthening of continuous reinforced concrete beams using externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheets [C]// Dolan C W, Rizkalla S H, Nanni A. Proceedings of the 4th International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforcement Concrete Structures. Michigan, United States: American Concrete Institute, 1999: 995—1008.
- [16] Khalifa A, Nanni A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2000, 22(3): 165—174.
- [17] Deniaud C, Cheng J J R. Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(3): 386—394.
- [18] Adhikary B B, Mutsuyoshi H, Ashraf M. Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage [J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(5): 660—668.
- [19] Adhikary B B, Mutsuyoshi H. Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(3): 258—264.
- [20] Boushelham A, Chaallal O. Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer — An experimental study [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(3): 339—347.
- [21] Sato Y, Ueda T, Kakuta Y, Tanaka T. Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beams [C]// El-Badry M M. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Quebec, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, 1996: 612—617.

(参考文献[22]—[25]转第149页)

- Journal of Sound and Vibration, 2005, 285: 1093—1107.
- [11] 赵跃宇, 康厚军, 冯锐, 劳文全. 曲线梁研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 170—187.
Zhao Yueyu, Kang Houjun, Feng Rui, Lao Wenquan. Advances of research on curved beams [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(2): 170—187. (in Chinese)
- [12] 龙驭球, 包世华. 结构力学教程(I)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Long Yuqiu, Bao Shihua. Structural mechanics (I) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 赵颖华, 李晓飞. 多跨曲线桥在集中荷载和变温作用下横向位移[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2004, 20(2): 97—99.
Zhao Yinghua, Li Xiaofei. Transverse displacement of multispan curved bridge under concentrated loads and uniform temperature loads [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute (Natural Science), 2004, 20(2): 97—99. (in Chinese)

(上接第132页)

- [22] Taerwe L, Khalil H, Matthys S. Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets [C]. Okamura H. Proceedings of the 3rd International Symposium on Non Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Japan: Japan Concrete Institute, 1997: 483—490.
- [23] Norris T, Saadatmanesh H, Ehsani M R. Shear and flexural strengthening of RC beams with carbon fiber sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(7): 903—911.
- [24] Deniaud C, Cheng J J R. Reinforced concrete T-beams strengthened in shear with fiber reinforced polymer sheets [J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(4): 302—310.
- [25] Islam M R, Mansur M A, Maalej M. Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems [J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(3): 413—420.