

# 外贴 FRP 抗剪加固剥离破坏设计公式综述\*

陆新征 叶列平 庄江波  
(清华大学土木工程系 北京 100084)

**摘要:** 外贴 FRP 片材对混凝土结构进行抗剪加固往往由于 FRP 和混凝土之间的界面剥离而导致破坏。国内外已经对此进行了大量的研究工作,并提出了相应的设计公式。本文收集整理了现有的抗剪加固剥离破坏的设计公式,并与大量试验结果进行对比,从机理上讨论了这些公式存在的问题。

**关键词:** FRP 抗剪加固 剥离破坏 设计公式

## Review of the Design Models for Debonding in RC Structures

### Shearly Strengthened with Externally Bonded FRP Plates

Lu Xinzheng, Ye Lieping, Zhuang Jiangbo

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

**Abstract:** Debonding failures often take place in RC structures shearly strengthened with externally bonded FRP plates. Existing design models for this failure mode are reviewed, and the predictions of these models are compared with a large number of test results. Finally, the problems for the mechanism of these models are discussed with the comparison results.

**Keywords:** FRP, shearly strengthen, debonding, design model

## 1 引言

目前 FRP 片材大量的应用于混凝土结构的受弯加固,外贴 FRP 片材对 RC 梁进行受剪加固是另一种非常常见的加固形式。在工程中常用的受剪加固方法有以下三种<sup>[1]</sup>: (1) 侧面粘贴(图 1,  $\beta$ 为 FRP 粘贴角度); (2) U 型粘贴(图 2); (3) 包裹粘贴(图 3);

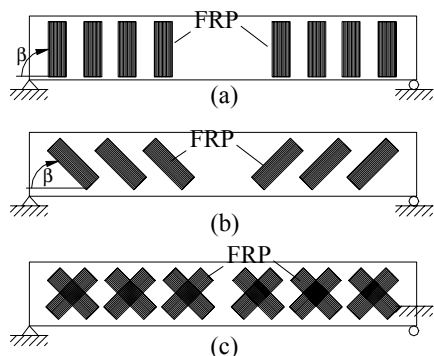


图 1 不同侧面粘贴加固方式

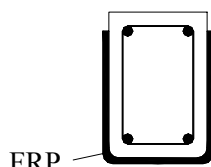


图 2 U 型粘贴

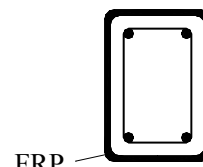


图 3 包裹粘贴

大量的试验结果表明, FRP 加固混凝土构件斜截面的破坏模式主要有 2 种: (1)FRP 断裂破坏,破坏形式是 FRP 被拉断。FRP 断裂破坏主要发生在封闭包裹粘贴的情况下,在有可靠的附加锚固措施的情况下,U 型粘贴和侧面粘贴也可能出现 FRP 断裂破坏<sup>[1]</sup>。(2)FRP 剥离破坏,剥离破坏是指外贴 FRP 在达到其极限拉应力之前,由于 FRP 与构件的粘结强度不足而与构件剥离,导致外贴 FRP 加固失效。试验结果表明,

几乎所有侧面粘贴方式和大部分 U 型粘贴方式在 FRP 端部没有可靠锚固时的破坏是由于剥离破坏引起的。剥离发生时，进展很快，几乎瞬间完成，形成脆性破坏形式<sup>[1]</sup>。

由于在抗剪加固中主要的加固形式为侧面粘贴和 U 型粘贴，其破坏形式又是以剥离破坏为主，因此很有必要对这些破坏形式进行深入的讨论，下面主要对国内外现有的抗剪加固剥离破坏试验和理论研究进行回顾和综述。

## 2 FRP 抗剪加固剥离的承载力公式

### 2.1 概述

目前，FRP 侧面粘贴混凝土构件受剪承载力的理论计算模型，一般是在钢筋混凝土构件计算模型的基础上，增加 FRP 对抗剪承载力贡献项，即

$$V_u = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

式中前两项分别为无腹筋梁的抗剪承载力和钢筋对抗剪承载力的贡献，可采用普通钢筋混凝土构件的计算方法。而各国学者建议的 FRP 贡献量  $V_f$  却各有不同，下面介绍几个有代表性的计算公式。

### 2.2 ACI-440 建议公式<sup>[2]</sup>

ACI-440 建议的  $V_f$  计算公式为：

$$V_f = \psi_f V_f^0 \quad (2a)$$

其中， $\psi_f$  是与粘贴方式有关的一个折减系数，ACI-440 建议，对于包裹粘贴取 0.95，对于侧面及 U 型粘贴取 0.85。 $V_f^0$  的计算公式为：

$$V_f^0 = \frac{A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \quad (2b)$$

$$A_f = 2n t_f w_f \quad (2c)$$

式中， $n$  为 FRP 层数； $t_f$  为 FRP 厚度； $w_f$  为单条 FRP 宽度； $d_f$  为 FRP 顶边到受拉钢筋中心距离； $s_f$  为 FRP 间距； $f_{fe}$  为 FRP 有效发挥应力， $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$ ； $E_f$  为 FRP 弹性模量； $\varepsilon_{fe}$  为 FRP 有效应变，取值方式和粘贴方式有关。对于包裹粘贴：

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \quad (2d)$$

对于 U 型粘贴或侧面粘贴

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004, \quad \kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (2e)$$

式中，有效锚固长度  $L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}}$ ；折减系数  $k_1 = \left(\frac{f_c'}{27}\right)^{2/3}$ ； $k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & \text{U型粘贴} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{侧面粘贴} \end{cases}$ 。

其中，参数  $k_2$  的物理意义有必要专门介绍一下。ACI 公式认为，对于侧面粘贴情况，斜裂缝两端粘结长度小于  $L_e$  的范围内 FRP 不能提供抗剪承载力，有效加固区只有  $d_f - 2L_e$ （图 4a）。类似的，对于 U 型加固，有效加固区只有  $d_f - L_e$ （图 4b）。这显然是不合理的，因为即使 FRP 粘结长度小于  $L_e$ ，仍然可以承受拉力，提供抗剪承载力。在后面和试验对比中发现，很多试件按式(2e)计算得到的  $\varepsilon_{fe}$  小于零（按等于零处理），即这些试件的  $V_f$  等于零，这明显和试验结果不一致。

外贴 FRP 抗剪加固剥离破坏设计公式综述—陆新征、庄江波、叶列平等

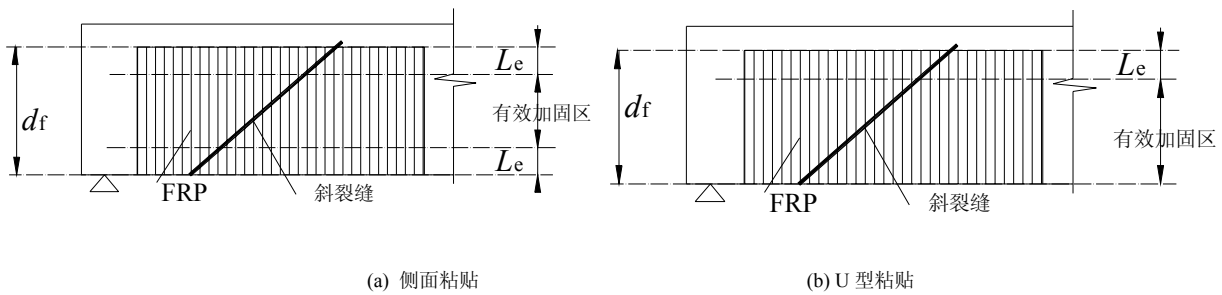


图 4  $k_2$  的物理意义

### 2.3 欧洲设计规范建议公式<sup>[3]</sup>

欧洲设计规范建议的剥离公式为:

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b h_0 (1 + \cot \beta) \sin \beta \quad (3a)$$

式中,  $\rho_f$  为 FRP 配箍率,  $\rho_f = (2t_f/b)(w_f/s_f)$ ;  $\varepsilon_{f,e}$  为 FRP 有效发挥应变, 对于包裹粘贴的 CFRP

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \left( \frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right) \varepsilon_{fu} \quad (3b)$$

对于侧面或 U 型粘贴的 CFRP

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[ 0.65 \left( \frac{f_c^{2/3}}{1000 E_f \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}, 0.17 \left( \frac{f_c^{2/3}}{1000 E_f \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (3c)$$

其中, 强度和模量的单位都是 MPa。

对于包裹粘贴的 AFRP

$$\varepsilon_{f,e} = 0.048 \left( \frac{f_c^{2/3}}{1000 E_f \rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad (3d)$$

### 2.4 英国设计规范建议公式<sup>[4]</sup>

英国规范建议的  $V_f$  计算公式为:

$$V_f = \frac{1}{\gamma_{mf}} A_f E_f \varepsilon_{f,e} \sin \beta (1 + \cot \beta) d_f / s_f \quad (4a)$$

$\gamma_{mf}$  为材料分项系数, 对 CFRP 为 1.4, 对 GFRP 为 3.5, 对 AFRP 为 1.5;  $E_f$  为 FRP 弹性模量, 单位为 GPa;  $A_f$  为 FRP 面积,  $A_f = 2t_f w_{fe}$  ( $w_{fe}$  为 FRP 的有效宽度, 其物理意义同图 4, 对于侧面粘贴,  $w_{fe} = d_f - 2L_e$ , 对于 U 型粘贴,  $w_{fe} = d_f - L_e$ ,  $L_e$  为 FRP 有效粘结长度,  $L_e = 461.3/(t_f E_f)^{.58}$ );  $\varepsilon_{f,e}$  为 FRP 有效应变, 如果是 FRP 拉断破坏, 则

$$\varepsilon_{f,e} = \varepsilon_{fu} \left[ 0.5622 (\rho_f E_f)^2 - 1.2188 (\rho_f E_f) + 0.778 \right] \quad (4b)$$

$$\rho_f = (2t_f/b)(w_f/s_f) \quad (4c)$$

如果是 FRP 剥离破坏, 则

$$\varepsilon_{f,e} = 0.0042 \left[ (0.835 f_{cu})^{2/3} w_{fe} \right] / \left[ (E_f t_f)^{.58} d_f \right] \leq 0.004 \quad (4d)$$

## 2.5 加拿大设计规范建议公式<sup>[5]</sup>

加拿大规范建议的 $V_f$ 计算公式为：

$$V_f = \phi_f A_f E_f \varepsilon_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f / s_f \quad (5a)$$

式中， $\phi_f$ 为FRP材料分项系数，该规范未给出其明确取值，对于CFRP可取为0.7~0.78，对于GFRP应不大于0.6； $A_f = 2t_f w_f$ ； $\varepsilon_{fe}$ 为FRP有效应变，对于FRP拉断破坏，则：

$$\varepsilon_{fe} = R \varepsilon_{fu}, \quad R = 0.8 \lambda_1 \left[ \frac{f_c^{2/3}}{\rho_f E_f} \right]^{\lambda_2} \quad (5b)$$

对于CFRP， $\lambda_1 = 1.35$ ， $\lambda_2 = 0.30$ ；对于AFRP和GFRP  $\lambda_1 = 1.23$ ， $\lambda_2 = 0.47$ 。

对于FRP剥离破坏

$$\varepsilon_{fe} = \frac{0.8 \phi_f k_1 k_2 L_e}{9525} \quad (5c)$$

式(5d)中相关的系数按下面进行计算： $L_e = \frac{25350}{(t_f E_f)^{0.58}}$ ， $k_1 = \left( \frac{f_c'}{27.65} \right)^{2/3}$ 。  $k_2$ 定义同ACI公式。

## 2.6 日本设计规范建议公式<sup>[6]</sup>

日本规范建议的 $V_f$ 计算公式为：

$$V_f = K [A_f f_{fu} (\sin \beta + \cos \beta) / s_f] d / \gamma_b \quad (6a)$$

式中， $\gamma_b$ 为材料分项系数，取为1.25。其它参数按下面进行计算：

$$K = 1.68 - 0.67R \quad (6b)$$

$$R = (\rho_f E_f)^{1/4} \left( \frac{f_{fu}}{E_f} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{f_c'} \right)^{1/3}, \quad 0.5 \leq R \leq 2.0 \quad (6c)$$

式中， $E_f$ 的单位为GPa。

## 2.7 Chen & Teng 公式<sup>[7]</sup>

Chen & Teng 建议的受剪承载力公式为：

$$V_f = 2 f_{fe} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot \theta + \cot \beta) \sin \beta}{s_f} \quad (7a)$$

式中， $\theta$ 为斜裂缝角度， $h_{fe}$ 为FRP有效高度，按下面进行计算：

$$h_{fe} = z_b - d_{ft}, \quad z_b = 0.9d - (h - d_f) \quad (7b)$$

其中， $d_{ft}$ ， $d_f$ ， $h$ ， $d$ 含义见图5。

$$f_{fe} = D_f \sigma_{f \max} \quad (7c)$$

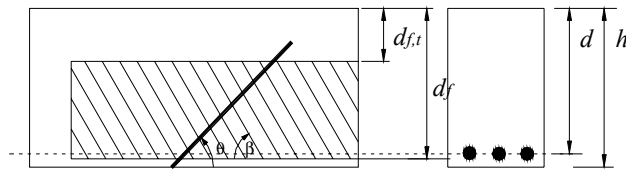


图 5 Chen & Teng 公式参数

$$\text{式中, } \sigma_{\max} = \min \begin{cases} f_{fu} \\ 0.427 \beta_1 \beta_w \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c'}}{t_f}} \end{cases}, \quad \beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f / (s_f \sin \beta)}{1 + w_f / (s_f \sin \beta)}}, \quad \beta_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda \geq 1 \\ \sin \frac{\pi \lambda}{2} & \text{if } \lambda < 1 \end{cases},$$

$$L_{\max} = \begin{cases} \frac{h_{fe}}{\sin \beta} & \text{for U-jackets} \\ \frac{h_{fe}}{2 \sin \beta} & \text{for side plates} \end{cases}, \quad \lambda = \frac{L_{\max}}{L_e}, \quad L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c'}}}, \quad D_f = \begin{cases} \frac{2}{\pi \lambda} \frac{1 - \cos \frac{\pi \lambda}{2}}{\sin \frac{\pi \lambda}{2}} & \text{if } \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} & \text{if } \lambda > 1 \end{cases}.$$

## 2.8 谭壮公式<sup>[1]</sup>

谭壮根据试验结果拟合, 建议的受剪承载力公式如下:

$$V_f = R_d b h \rho_f E_f \varepsilon_{fu} \quad (8a)$$

$$R_d = 883(\lambda + 8.16)(\lambda_e \eta)^{-0.3} / \varepsilon_{fu} \quad (8b)$$

式中,  $\lambda$  为剪跨比,  $\lambda_e = \rho_f \frac{E_f}{f_t}$ ,  $\eta = \frac{w_f}{w_f + s_f}$ 。

谭壮建议公式主要针对 U 型加固。

## 2.9 张-叶公式<sup>[8]</sup>

张-叶首先对谭壮<sup>[1]</sup>的试验进行数值模拟, 而又进行相关参数讨论, 最后根据有限元计算结果, 建议的受剪承载力公式为

$$V_f = 2k_f \tau_{\max} A_{fb} \quad (9a)$$

式中,  $A_{fb}$  为 FRP 粘贴面积;  $\tau_{\max}$  为粘结应力, 建议取为 1.84MPa;  $k_f$  为待定系数。

# 3 与试验结果对比

## 3.1 U 型粘贴抗剪加固试验资料

从现有文献中, 共收集到 35 根外贴 U 型箍加固且最终剥离破坏的试件<sup>[1,9~18]</sup>。由于 Chen & Teng 公式需要考虑斜裂缝的角度, 而文献[18]并未给出斜裂缝角度, 因此, 把这些试验记录分为两组。A 组为所有试件 (共 35 个)。B 组为除文献[18]外提供了斜裂缝角度的试件 (共 29 个)。这些试验数据覆盖了一个较大的模型参数范围, 以此为基础, 与各个模型计算结果对比有着较好的代表性。

另外, 本文收集的试验都有未加固的参考梁试件作为对照, 由此可以得到各个试件的 FRP 抗剪贡献  $V_f = V_{u,\text{test}} - V_{u,\text{ref}}$ 。其中  $V_{u,\text{test}}$  为试件抗剪强度,  $V_{u,\text{ref}}$  为未加固梁的极限抗剪强度。尽管有研究指出<sup>[19]</sup>, 钢筋混凝土和 FRP 抗剪承载力并不是同时达到最大, 这样的叠加处理可能会有一定的误差。但出于工程研究

的考虑，这种误差是可以接受的，且当前也没有更好的方法来得到 FRP 抗剪贡献量。因此，本文仍然采用叠加原理来计算试验 FRP 抗剪承载力。

## 2.2 侧面粘贴抗剪加固试验资料

在目前的研究结果中，共收集到 38 根侧面粘贴 FRP 并最终由剥离导致破坏的 RC 梁试验记录<sup>[11~13, 20~24]</sup>，用于与现有的设计公式进行对比。同样基于叠加原理得到 FRP 抗剪承载力。

## 2.3 U 型加固计算值与试验值对比

上述各模型和试验结果对比如表 1 所示。计算时未考虑各规范模型中的分项系数。对于未给出斜裂缝角度的构件，均假设其斜裂缝角度为 45 度。另外，由于张-叶的公式<sup>[8]</sup>中缺少一些系数取值，因此，本文对该公式进行了一些修改：

$$V_f = k_f \tau_{\max} w_f \frac{h_{fe}^2}{s_f} \quad (9b)$$

根据试验结果拟合， $k_f$  取 0.45 时和试验结果最为接近。

从对比结果中可以看出，大部分模型的相关系数都大于零，说明这些模型都基本上可以把握剥离破坏的内在机理。在这些模型中，Chen & Teng 模型的预测结果和试验结果吻合最好，而张-叶的公式在很简单的公式形式下，也获得了较好的结果（其相关系数仅次于 Chen & Teng 模型，在这 8 个模型中位于第二位）。

表 1 不同模型计算值与试验值对比

	计算值/试验值		变异系数		相关系数	
	A 组	B 组	A 组	B 组	A 组	B 组
ACI <sup>[2]</sup>	0.43	0.47	0.54	0.49	0.38	0.30
Canada ISIS <sup>[5]</sup>	0.37	0.38	0.41	0.42	0.49	0.44
fib <sup>[3]</sup>	0.92	0.93	0.31	0.32	0.21	0.10
JSCE <sup>[6]</sup>	0.63	0.66	0.87	0.88	0.31	0.21
UK Concrete Society <sup>[4]</sup>	0.52	0.57	0.56	0.49	0.35	0.27
谭壮 <sup>[1]</sup>	0.68	0.72	0.40	0.39	0.12	-0.06
张-叶 <sup>[8]</sup>	1.00	0.99	0.33	0.36	0.49	0.46
Chen & Teng <sup>[7]</sup>	0.87	0.93	0.26	0.21	0.74	0.72

## 2.4 侧面粘贴加固计算值与试验值对比

各公式计算得到的侧面粘贴 FRP 抗剪贡献  $V_f$  与试验值对比如表 2 所示，其中，张-叶模型参数取值与前一章相同。从对比中可以看出，与上节的结论相似，Chen & Teng 的公式与试验值吻合得最好，张-叶公式形式简单且结果也较好。

表 2 侧面粘贴  $V_f$  不同公式计算值和试验值对比

	计算值/试验值	变异系数	相关系数
ACI <sup>[2]</sup>	0.33	1.10	0.89
Canada ISIS <sup>[5]</sup>	0.23	1.18	0.91
fib <sup>[3]</sup>	1.30	0.60	0.82
JSCE <sup>[6]</sup>	1.14	0.54	0.88
UK Concrete Society <sup>[4]</sup>	0.25	1.27	0.88
谭壮 <sup>[1]</sup>	1.18	0.73	-0.14
张-叶 <sup>[8]</sup>	1.10	0.58	0.87
Chen & Teng <sup>[7]</sup>	1.03	0.30	0.92

## 2.5 抗剪加固剥离机理分析

文献[1]试验研究表明：(1)外贴 FRP 进行抗剪加固时，从加载早期到斜裂缝出现，FRP 的应变很低，对抗剪承载力贡献很小；(2)斜裂缝出现后，与裂缝相交的 FRP 应变明显增加，FRP 作用逐渐明显；(3)箍外贴 FRP 抗剪加固剥离破坏设计公式综述—陆新征、庄江波、叶列平等

筋屈服后, FRP 应变继续增加, 达到剥离荷载时, 从斜裂缝两侧开始, FRP 逐步从混凝土上剥离下来, 最终导致破坏。与斜裂缝相交的 FRP 应变并非均匀分布, 由于裂缝两侧 FRP 的总滑移量等于裂缝的宽度, 所以 FRP 的应变也随着斜裂缝各处宽度不同而有所变化。

因此研究 FRP 抗剪承载力贡献, 有两个核心问题: (1)FRP 应力分布; (2)FRP-混凝土界面粘结性能。前者主要和粘贴方式以及斜裂缝开展宽度有关, 后者主要和有效锚固长度以及混凝土强度有关。对这两个问题认识程度的深浅将决定计算公式的精度高低。

从界面行为来看, 在现有公式中, Chen & Teng 公式明确给出了 FRP 抗剪承载力和界面剥离模型之间的关系。根据文献[25]的讨论, Chen & Teng 建议的剥离承载力模型和试验结果吻合得也是比较好的, 因此该模型对界面粘结性能的认识也比较清晰。而其他公式多是基于参数回归间接给出了抗剪承载力和混凝土强度以及有效锚固长度的关系, 并没有说明其内在机理。

而从 FRP 应力分布来看, ACI、加拿大和英国的公式都认为, 如果锚固长度小于有效锚固长度的化, 这部分 FRP 将不再能提供剥离承载力 (图 4), 如前所述, 这种 FRP 应力分布模型是错误的。其他公式更没有明确给出 FRP 应力分布的模型, 而只是通过试验回归间接给出了各个参数的影响。Chen & Teng 公式假设所有 FRP 同时达到剥离强度, 进而得到 FRP 应力分布系数, 这个方法虽然有些问题, 但是对破坏机理的认识上毕竟进步了一些。

由上述讨论可以看出, 公式预测结果的好坏和对剥离机理认识深度密切相关。虽然 Chen & Teng 公式比起其他公式有了较大进展, 但是如果把 Chen & Teng 公式预测的 U 型箍加固 FRP 应变分布和文献[1]试验及文献[16]实测的 FRP 应变分布对比, 如图 6 所示, 就可以明显看出, Chen & Teng 公式预测的 FRP 应变在梁底差异很大。这是因为 Chen & Teng 公式存在以下问题:

- (1) 该公式认为在剥离破坏时, 所有的 FRP 都达到它们的剥离强度, 这是不合理的, 因为 FRP 的剥离破坏往往有比较大的脆性, 所有 FRP 同时达到它们的剥离强度是不可能的;
- (2) 该公式认为 U 型箍加固达到最大剥离承载力时, 梁侧面底部位置 FRP 的应变最大, 这也是有待商榷的。因为与斜裂缝相交的 FRP 应力取决与此处斜裂缝的宽度。如果纵筋较多, 加上底部 U 型箍的包裹作用, 底部斜裂缝的宽度往往是小于梁中部的。相应的此处 FRP 的应变往往比中部的要小 (图 6)。

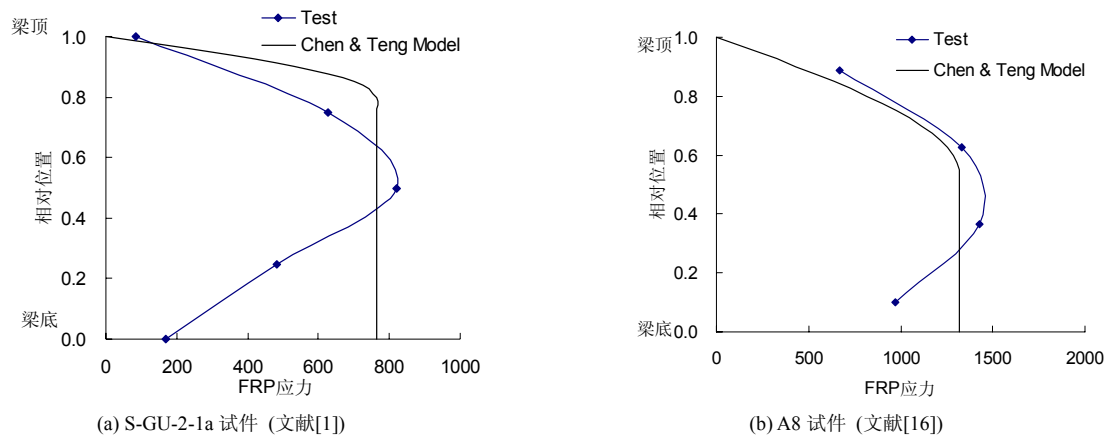


图 6 Chen & Teng 模型预测 FRP 剥离应变分布与试验值对比

## 4 结论

大量试验结果表明, 外贴 FRP 抗剪加固中剥离破坏控制着整体加固效果。本文收集了 8 个不同国家和地区学者对于外贴 FRP 进行抗剪加固剥离承载力的设计公式, 系统的阐述了目前各国学者对于外贴 FRP 进行抗剪加固剥离问题的研究状况和成果, 并且与试验结果进行对比。通过对比分析, 可以发现:

- (1) 抗剪加固承载力计算公式的关键是了解斜裂缝上 FRP 应力分布以及 FRP-混凝土界面粘结性能, 现有模型对这些问题都有所认识, 但是程度深浅不一;
- (2) 在现有抗剪加固承载力计算模型中, Chen & Teng 基于界面剥离承载力模型提出的抗剪加固公式效果最好, 但是由于该模型对界面粘结滑移本构关系认识不足, 因此也存在一定问题;

(3) 为了更好了解受剪剥离破坏的机理,有必要根据 FRP-混凝土界面粘结滑移关系,对不同斜裂缝宽度分布规律进行讨论,得到不同斜裂缝宽度分布下 FRP 应力规律,进而提出更加合理的设计公式。

### 参考文献

1. 谭壮, GFRP 布加固混凝土梁受力性能的试验研究, 北京: 清华大学硕士学位论文, 2002
2. Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute. 440.2R-02. 2002. 26-27.
3. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. fib. Bulletin 2001. 14: 62-64.
4. Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials. Concrete Society Committee Technical Report No. 55. Century House, Telford Avenue, Crowthorne, Berkshire RG45 6YS, UK. 2000. 40-42
5. Strengthening reinforced concrete structures with externally-bonded fiber reinforced polymers. Design Manual No. 4. 227 Engineering Building, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, R3T 5V6, ISIS Canada. 2001. 4.33-38.
6. Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets. JSCE. 2000
7. Chen, J.F., Teng, J.G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding, Construction and Building Materials, 2003.17, 27-41.
8. 张子潇, 叶列平, U 型 FRP 加固钢筋混凝土梁受剪剥离性能的有限元分析, 工程力学, 录用.
9. Hutchinson RL, Rizkalla SH. Shear strengthening of AASHTO bridge girders using carbon fibre reinforced polymer sheets. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforcement Concrete Structures. ACI Publications SP-188, 1999. 945-56.
10. Kage T, Abe M, Lee HS, Tomosawa F. Effect of CFRP sheets on shear strengthening of RC beams damaged by corrosion of stirrup. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Sapporo, Japan. 1997. 443-50.
11. Khallifa A, Nanni A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. Cem Concr Compos 2000. 22:165-74.
12. Khalifa A, Tumialan G, Nanni A, Belarbi A. Shear strengthening of continuous reinforced concrete beams using externally bonded carbon fibre reinforced polymer sheets. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforcement Concrete Structures. ACI Publications SP-188, 1999. 995-1008.
13. Sato Y, Ueda T, Kakuta Y, Tanaka T. Shear reinforcing effect of carbon fibre sheet attached to side of reinforced concrete beams. In: El-Badry MM, editor. Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. 1996. 621-7.
14. Sato Y, Ueda T, Kakuta Y, Ono S. Ultimate shear capacity of reinforced concrete beams with carbon fibre sheet. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium, vol. 1, Japan, 1997:499-505.
15. Taerwe L, Khalil H, Matthys S. Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets. 1997: 483-90.
16. 郝震, 曹双寅, 翟瑞兴, 方志保, 外贴 CFRP 加固梁斜截面受力性能的分析 and 计算, 工业建筑, 2004, 34(2): 82-84
17. 吴刚, 安琳, 吕志涛, 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗剪加固的试验研究, 建筑结构, 2000, 30(7): 16-20.
18. 任海东, 黄承逵, 于建, 玻璃纤维布用于加固钢筋混凝土梁抗剪性能研究, 混凝土, 2003(5): 35-37
19. Ye LP, Yue QR, Zhao SH, Li QW, Shear strength of reinforced concrete columns strengthened with carbon-fiber-reinforced plastic sheet, Journal Of Structural Engineering, ASCE. 2002.128 (12): 1527-1534.
20. Al-Sulaimani GJ, Sharif AM, Basunbul IA, Baluch MH, Ghaleb BN. Shear repair for reinforced concrete by fibreglass plate bonding. ACI Struct J 1994. 91(3):458-64.
21. Chaallal O, Nollet MJ, Perraton D. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fibre-reinforced-plastic plates: design guidelines for shear and flexure. Can J Civil Eng 1998. 25(4):692-704.
22. Kachlakev DI, Barnes WA. Flexural and shear performance of concrete beams strengthened with fibre reinforced polymer laminates. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforcement Concrete Structures. ACI Publications SP-188, 1999. 959-71.
23. Mitsui Y, Murakami K, Takeda K, Sakai H. A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fibre sheets. Compos Interfaces 1998. 5(4):285-95.
24. Triantafillou TC, Plevris N. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. Mater Struct 1992. 25:201-11.
25. 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 庄江波, FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型, 建筑结构学报, 审稿中