

# FRP 布-混凝土界面粘结性能的有限元分析

陆新征<sup>1</sup> 谭壮<sup>2</sup> 叶列平<sup>1</sup> 江见鲸<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>土木工程系, 清华大学, 北京 100084 <sup>2</sup>中冶集团建筑研究总院, 北京, 100088)

**摘要:** FRP 布与混凝土界面的粘结性能是粘贴 FRP 布加固混凝土结构中的关键问题。本文首先讨论了该界面问题有限元分析的难点及建模方法, 根据使用现有有限元程序试算的结果, 讨论了界面问题中混凝土力学行为的特点及对混凝土本构模型的要求; 在此基础上, 提出了适用于分析 FRP 布-混凝土界面问题的混凝土本构模型, 并编制了相应的程序, 对 FRP 布-混凝土面内剪切问题进行了分析。分析结果与试验结果吻合较好, 并给出了混凝土本构模型中相应参数的建议取值。基于数值模拟结果, 对 FRP 布-混凝土界面粘接力学机理进行了初步讨论。

**关键词:** 混凝土与钢筋混凝土结构, 界面粘结, 有限元分析, FRP 布

**中图分类号:** TU352 **文献标识码:** A

## 1 引言

FRP (纤维增强塑料) 布-混凝土间的界面粘结是确保 FRP 布和混凝土共同作用, 充分发挥 FRP 布强度的前提。目前对该问题已经有了大量的试验及理论分析<sup>[1-3]</sup>, 得出 FRP 布-混凝土界面粘结的一般性规律是: ①界面存在多种破坏形式, 以混凝土破坏为主要破坏形式; ②纤维和混凝土之间存在一个有效锚固长度; ③当纤维粘贴长度大于有效锚固长度时, 界面的剥离破坏由加载端向锚固端逐步发展。为了深入了解 FRP 布-混凝土之间粘结的力学机理, 本文用有限元方法对该问题进行了数值模拟和分析。

## 2 有限元分析 FRP 布-混凝土界面粘结问题的难点

由于 FRP 布-混凝土界面问题的特点, 目前利用有限元分析主要存在以下困难:

### 1) 界面参数标定困难

目前各类粘结滑移试验基本都是为工程应用而进行的宏观结构性试验。而对 FRP 布-混凝土界面材性试验的数据还非常少。而且, 由于变形和破坏都集中于 FRP 布以下不足 1mm 的混凝土中, 造成材性试验和分析研究十分困难, 使得有限元分析中的界面本构模型难以确定。

### 2) 单元尺寸差异过于悬殊

FRP 布的厚度往往只有 0.1~0.4mm。混凝土剥

离层的厚度也只有零点几个毫米, 而构件的尺寸却一般都是几百个毫米的量级。给有限元网格划分带来很大困难。

### 3) 裂面行为复杂

在开裂之初, 界面以下混凝土在拉应力和剪应力的复合作用下, 一般形成与混凝土表面成 30~45 度裂缝。而在裂缝产生后, 拉应力迅速减小; 而剪应力由于裂面的摩擦作用, 减小相对较慢, 因此主应力方向发生明显变化, 使得后继裂缝方向随之发生较大变化。同时, 对于较长 FRP 布的锚固问题, 随着剥离退出工作, 有效锚固区的移动, 靠近加载端的混凝土裂缝开展宽度和裂面摩擦滑移长度都较大, 裂面剪力传递系数 (shear retention factor) 也势必要发生较大变化。

### 4) 数值收敛困难

由于界面存在开裂、滑移等多种复杂力学行为, 使得非线性有限元分析时计算收敛相当困难, 特别是对应于有效锚固区移动的计算收敛更是非常困难, 对程序的非线性分析能力提出了很高的要求。

## 3 有限元模型的建立

由于界面粘结问题中单元尺寸差异悬殊, 带来的问题就是是否需要在界面上引入专门的界面单元。如果使用界面单元, 则存在以下问题:

### 1) 界面单元的材性参数设置困难

如果布置界面单元, 有以下几种单元可供选择: (1) 无厚度 Goodman 界面单元<sup>[4]</sup>; (2) 有厚度 Goodman 界面单元; (3) 弹簧单元。这三种单元形

收稿日期: 2003-3-19

基金项目: 国家自然科学基金重点基金 (编号“50238030”) 和国家 863 计划 (项目编号: 2001AA336010) 资助项目

作者简介: 陆新征 (1978.12), 男, 安徽芜湖人, 清华大学土木工程博士研究生; 谭壮 (1977.2), 男, 江苏徐州人, 中冶集团建筑研究总院工程师  
叶列平 (1960.8), 男, 江苏扬州人, 清华大学土木工程教授; 江见鲸 (1938.11), 男, 江苏武进人, 清华大学土木工程教授

式都需要界面的剪切刚度和法向刚度，以及强度和非线性力学关系。这些目前基本上都无法通过试验准确得到，因此，界面单元实用程度受到限制

2) 界面的几何性质同样难于设置

根据试验观察剥离面，其剥离层厚度存在一定程度的变化，从零点到几个毫米都有可能。因此，界面混凝土层的厚度也较难预先给定。同时，纤维应力变化和混凝土微裂缝开展深度有着较明显的关系，这些尺寸都难于在分析前加以界定。

考虑到在施工质量可靠的情况下，剥离破坏主要发生在未浸润的混凝土中，剥离下来的混凝土表面和普通混凝土也没有什么的差别。因此本文不使用界面单元，而通过共用节点的方法，将 FRP 布单元和混凝土实体单元直接连接在一起，通过调整混凝土实体单元的材性系数来模拟剥离的破坏行为。

本文分析中涉及的软件及分析模型较多，几何模型也有所差别，其基本共性为：

- 1) 混凝土使用实体（二维或三维）单元模拟，本构使用混凝土的本构，在接近 FRP 布的部分单元网格划分较细，单元厚度最小在 2mm 左右。
- 2) FRP 布使用链杆或梁单元（对于二维分析）/膜单元或壳单元（对于三维分析）。由于 FRP 布的厚度非常小，有抗弯能力的单元（梁单元或壳单元），和没有抗弯刚度的单元（链杆或膜单元），其精度差别不是很大。但是，在剥离发生后，有抗弯刚度的单元可以显著提高计算的稳定性。以图 1 为例，当纤维下的实体单元开裂后，由实体单元提供的节点 1 的 Y 方向刚度接近于零，如果纤维也不能提供 Y 方向刚度，则收敛性将非常差。因此，本文使用具有抗弯刚度的单元模拟纤维布。
- 3) FRP 布和混凝土之间直接通过共用节点的方法来连接。不再设置界面单元。

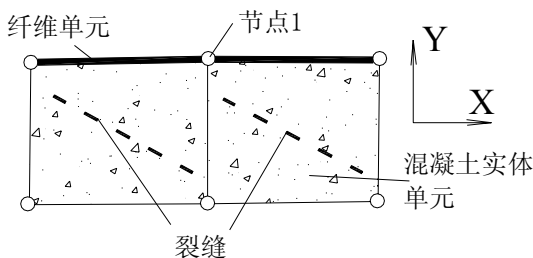


图 1 混凝土实体单元开裂对节点刚度影响  
Fig.1 Influence of cracks in solid concrete element to the node stiffness

## 4 界面问题中混凝土力学行为的特点及对本构模型的要求

根据以上建模原则，作者使用多种现有有限元程序对 FRP 布-混凝土界面问题进行了试算，使用的程序有：ANSYS<sup>[5]</sup>，MSC.MARC<sup>[6,7]</sup>，RCPEFG<sup>[8]</sup>，RCFER2002-FCM<sup>[9]</sup>等，试算结果表明，这些程序都不能很好模拟 FRP 布-混凝土之间的粘结剥离行为，结果的分析讨论参见文献[8]，根据上述分析，得到界面粘结问题对混凝土本构模型的要求有：

- 1) 混凝土开裂模型不能是脆性开裂，需要考虑开裂混凝土的下降段；
- 2) 裂面剪力传递系数不能是一个常数，需要随着裂缝宽度的增加而逐渐降低<sup>[10]</sup>；由于在 FRP 布-混凝土界面剥离问题中，混凝土裂缝表面的骨料咬合、摩擦作用对有效锚固长度和极限承载力影响显著，一般钢筋混凝土有限元分析中近似认为裂面剪力传递系数为一常数的方法在此不再适用。
- 3) 混凝土裂缝方向应随裂缝发展而变化，不应使用固定裂缝模型（FCM），而应考虑使用转动裂缝模型（RCM）<sup>[11]</sup>；RCM 和 FCM 的区别就是，FCM 在裂缝出现后，裂缝的角度就不再变化。而 RCM 中，裂缝的方向始终和最大拉应变方向垂直。由于在界面问题中，开裂混凝土主应力方向变化显著，而 FCM 可能会导致严重的应力锁死问题<sup>[12]</sup>，因此，RCM 在本问题中的表现要优于 FCM。
- 4) 随着剥离破坏的发展，界面以外的混凝土存在卸载状态，要能考虑混凝土的加卸载行为；  
同时，还要求有限元程序具有很强的非线性分析能力，能在复杂应力状态下保证计算收敛。

## 5 RCFER2002-RCM 计算结果

### 5.1 RCFER2002-RCM 的基本情况介绍

RCFER2002 为清华大学土木系开发的钢筋混凝土二维本构程序<sup>[9]</sup>，有固定裂缝模型（FCM）和转动裂缝模型（RCM）两个版本。可以嵌入 MARC 代替 MARC 中的混凝土本构模型。RCFER2002 的基本破坏准则为简化的李一过准则和 Tasuji-Slate-Nilson 准则<sup>[13]</sup>。混凝土受拉开裂前应力应变关系为弹性，混凝土开裂后，其裂面的法向应

力应变关系为<sup>[9]</sup>

$$\sigma_{nn} = f_t e^{-a_1(\epsilon_{nn} - \epsilon_{cr})} \quad (1)$$

其剪力传递系数为<sup>[9]</sup>

$$\beta = (\beta_1 - \beta_2)e^{-a_2(\epsilon_{nn} - \epsilon_{cr})} + \beta_2 \quad (2)$$

$\epsilon_{cr}$  为开裂应变,  $\epsilon_{nn}$  为垂直于裂缝法向的拉应变。

### 5.2 有限元模型

有限元模型如图 2 所示, 为平面模型, 构件尺寸同文献[1], 考虑对称性, 取 1/2 模型。混凝土使用平面应力实体单元, 纤维使用二维梁单元。混凝土本构为 RCFER2002-RCM<sup>[9]</sup>本构, FRP 为线弹性材料, 单层玻璃纤维厚度为 0.169mm, 弹性模量 97GPa。单层碳纤维厚度为 0.111mm, 弹性模量为 235GPa。

### 5.3 参数讨论

在式 (1) 和 (2) 中, 引入了 5 个参数描述开裂后混凝土的裂面行为 ( $f_t, a_1, a_2, \beta_1, \beta_2$ )。由于裂面行为的复杂性, 不同文献中这些参数的取值差异很大。根据文献[10]和文献[14]中的相关资料,  $a_1$  取值在 3000~50000 之间,  $a_2$  在 400~6000 之间,  $\beta_1$  在 0.3~0.9 之间,  $\beta_2$  在 0.0~0.25 之间。

因此, 我们以试件 PG1-1 为例, 对这些参数进行数值试验, 得到不同参数的计算结果 Case01~Case11 如表 1 所示。表中下划线表示与 Case01 不同的参数取值。试验和经验公式的结果见表 2。

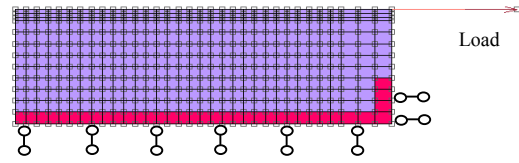


图 2、FEA 模型

Fig.2 FEA model

由于有限元模型为平面模型, 即相当于 FRP 布宽度和混凝土宽度相同。而试验中 FRP 布和混凝土宽度是不同的, PG1-1 混凝土宽度为 100mm, FRP 布为 50mm。PG1-1W 混凝土宽度是 100mm, 而 FRP 布为 75mm。在滕锦光提出的锚固强度公式中通过引入系数  $\beta_w$  考虑了宽度影响。我们用  $\beta_w$  修正试验结果, 得到的在混凝土和纤维等宽度情况下的承载力和平均粘结应力, 如表 2 中括号内数字所示。可见 Case01 的计算结果和试验及经验公式结果符合较好。Case01 中纤维应变发展情况如图 3 所示。

表 1、参数取值和计算结果

Table1 Parameter values and numerical results

	$f_t$ (MPa)	$a_1$	$a_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	纤维最大应力 (MPa)	极限荷载(KN)	有效锚固长度 (mm)	平均粘结应力 (MPa) *
Case01	3	3724	800	0.5	0.001	724	6.12	47.6	2.57
Case02	3	<u>37240</u>	800	0.5	0.001	573	4.84	48.3	2.00
Case03	3	3724	<u>2000</u>	0.5	0.001	644	5.44	38.3	2.84
Case04	3	3724	<u>6000</u>	0.5	0.001	464	3.92	25.9	3.03
Case05	3	<u>50000</u>	800	0.5	0.001	420	3.55	34.7	2.05
Case06	3	3724	800	<u>0.9</u>	0.001	860	7.27	51.3	2.83
Case07	3	3724	800	<u>0.8</u>	0.001	575	4.86	47.6	2.04
Case08	<u>4</u>	3724	800	0.5	0.001	748	6.32	47.6	2.66
Case09	3	3724	<u>400</u>	0.5	0.001	846	7.15	51.9	2.76
Case10	3	3724	800	<u>0.3</u>	0.001	565	4.77	34.6	2.76
Case11	3	3724	800	<u>0.4</u>	0.001	574	4.85	39.0	2.49

表 2 试验及经验公式结果  
Table 2 Test and empirical formula results

	试件 PG1-1 <sup>1</sup>	试件 PG1-1 <sup>2</sup>	试件 PG1-1W <sup>1</sup>	试件 PG1-1W <sup>2</sup>	滕锦光公式 (PG1-1)	滕锦光公式 (PG1-1W)	杨勇新公式
极限荷载(KN)	7.78 (5.50)	9.19 (6.50)	10.11 (5.70)	13.95 (7.85)	8.61 (6.09)	10.29 (6.09)	8.19 (5.79)
有效锚固长度(mm)	45	45	45	40	56.92	56.92	100
平均粘结应力(MPa)*	3.46 (2.45)	4.08 (2.88)	3.00 (2.53)	4.65 (3.92)	3.03 (2.13)	2.41 (2.13)	1.638(1.16)

圆括号内数字为宽度修正后结果; \*平均粘结应力  $\tau_{ave} = \frac{P_u}{L_e b}$  ( $P_u$  极限荷载,  $L_e$  有效锚固长度,  $b$  FRP 布宽度)

用 Case01 的参数取值去计算其他试件, 计算结果和试验结果对比如表 3 所示。可见该参数取值具有较好的通用性。

### 5.4 纤维应变分布

计算得到各试件剥离过程中的纤维应变分布和试验结果对比如图 4 所示 (FEA 结果已作宽度修正), PG1-1L1<sup>1</sup> 和 PG1-1L2<sup>1</sup> 由于胶层施工问题, 发生胶层破坏, 有限元和试验结果差距较大。其他各混凝土破坏的试件的纤维应变分布均与有限元结果吻合良好。说明用本文提出方法可以正确的对 FRP 布-混凝土界面粘结行为进行分析和模拟。

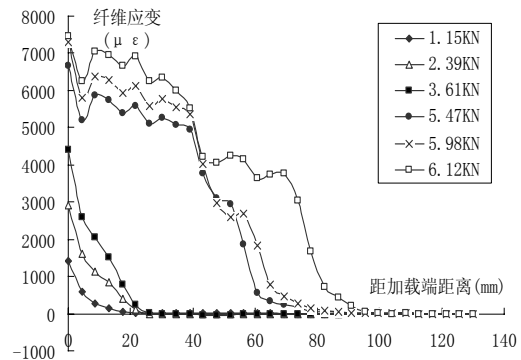


图 3、纤维应变分布变化  
Fig.3 Fiber strain distribution

表 3 试验与计算结果对比  
Table 3 Compare of test and numerical results

试件编号	类型	试验		FEA		滕锦光公式		杨勇新公式	
		极限荷载(KN)	有效锚固长度 (mm)	极限荷载 (KN)	有效锚固长度 (mm)	极限荷载 (KN)	有效锚固长度 (mm)	极限荷载 (KN)	有效锚固长度 (mm)
PG1-1 <sup>1</sup>	一层玻璃纤维,	7.78 (5.50)	45						
PG1-1 <sup>2</sup>	宽 50mm, 长 130mm	9.19 (6.50)	45	6.12	47.6	8.61 (6.09)	56.92	8.19 (5.79)	100
PG1-1W <sup>1</sup>	一层玻璃纤维,	10.11 (5.70)	45						
PG1-1W <sup>2</sup>	宽 75mm, 长 130mm	13.95 (7.85)	40	6.12	47.6	10.29 (6.09)	56.92	8.19 (5.79)	100
PG1-1L1 <sup>1</sup>	一层玻璃纤维,	6.87 (4.86)	45						
PG1-1L1 <sup>2</sup>	宽 50mm, 长 100mm	9.20 (6.51)	40	5.95	43.3	8.61 (6.09)	56.92	8.19 (5.79)	100
PG1-1L2 <sup>1</sup>	一层玻璃纤维,	6.46 (4.56)	35						
PG1-1L2 <sup>2</sup>	宽 50mm, 长 70mm	6.66 (4.71)	30	4.78	39.0	8.61 (6.09)	56.92	5.73 (4.05)	70
PG1-2 <sup>1</sup>	两层玻璃纤维,	10.49 (7.42)	50						
PG1-2 <sup>2</sup>	宽 50mm, 长 130mm	11.43 (8.08)	60	9.73	56.3	12.18 (8.59)	80.5	10.13 (7.16)	100

PC1-1C <sup>1</sup>	一层碳纤维, 宽	7.97 (5.64)	45			8.08	9.13	
	50mm, 长			5.88	56.4		68.9	100
PC1-1C <sup>2</sup>	130mm	9.19 (6.50)	50			(5.71)	(6.46)	

圆括号内数字为宽度修正后结果

5.5 破坏机理分析

为了解 FRP 布-混凝土界面粘结破坏机理, 将加载端部单元分布情况放大如图 5 所示, 并给加载端附近的 9 个混凝土单元编号 1~9。以 PG1-1 为例, 其破坏过程为:

- 1) 在刚刚加上荷载, 端部混凝土尚未开裂前 (荷载 < 0.368KN), 混凝土单元 2 在剪力和拉力共同作用下, 主拉应变方向与水平方向成大约 30 度角度。如图 6(a)所示。第一条裂缝在垂直于该方向上出现。
- 2) 当裂缝一出现, 此时单元 2、5 几乎同时开裂, 裂面方向拉应力迅速退出工作, 这两个单元的应力状态接近纯剪状态: 在水平方向有一个较大的拉应变, 同时在垂直方向有差不多等大的压应变, 如图 6(b)所示。
- 3) 荷载继续增大, 接近 1.2KN 时, 单元 1、4、8、

3 相继开裂, 加载端附近裂缝贯通, 单元 2、5 的剪力显著减小, 此时加载端附近的界面粘结剪应力只能依靠残余的裂面摩擦传递, 如图 6(c)所示。

最后, 在纤维拉力和裂面剪胀效应的共同作用下, 各单元的第二主拉应变陆续超过开裂应变, 单元内出现第二条裂缝, 如图 6(d)所示。整个单元退出工作, 有效约束区向自由段移动。

从图 6(d)中我们还注意到, PG1-1 的单元 1 和单元 2 并没有出现第二条裂缝, 也就是说, 它们并没有完全退出工作, 还可以分担一些 FRP 的拉力。表现在纤维应变分布图上就是此处的纤维应变应该小一些。这正好说明了图 3 中加载端附近纤维应力突变的原因。在实际试验中, 也普遍观察到这一现象。

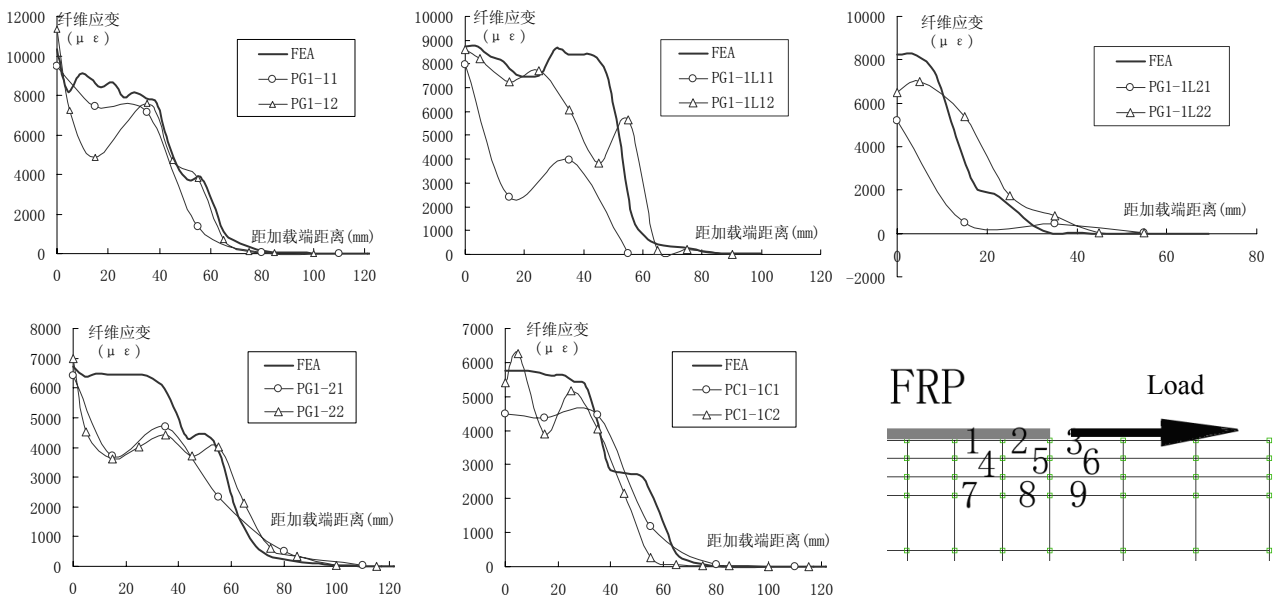


图 4、各组试件的纤维应变分布试验与数值结果比较

Fig.4 Compare of fiber strain distribution between test and FEA results in various specimens

图 5、端部单元编号

Fig.5 Element label near to the loading end

## 6 结论

本文通过大量计算比较,得到了适于分析 FRP 布-混凝土界面粘结性能的有限元模型、混凝土本构和计算参数。编制了相应的混凝土本构程序进行计

算,计算结果与试验结果吻合良好,并根据数值模拟结果分析了 FRP 布-混凝土之间的破坏的过程,说明了一些试验现象的微观机理。

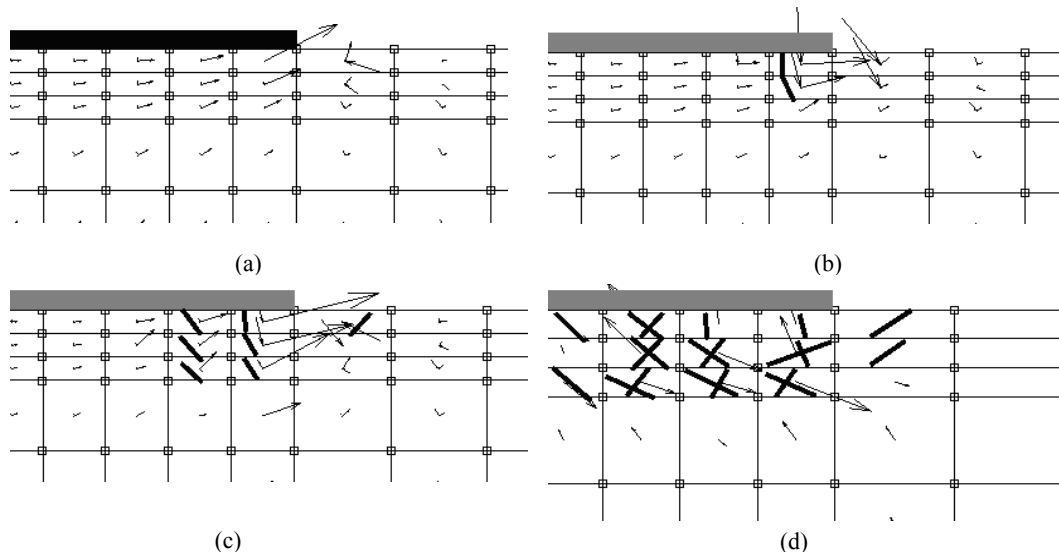


图 6、界面破坏发展过程 (箭头: 主应变; 粗实线: 裂缝)

Fig.6 Damage process in the interface (arrows: principle strain; solid lines: cracks)

### 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], 清华大学硕士学位论文, 2002  
TAN Zhuang, Experimental Research for RC Beam Strengthened with GFRP[D], Master Thesis of Tsinghua University, 2002
- [2] Wu Zhishen, Yin Jun, Fracture behaviors of FRP-strengthened concrete structures[J], *Engrg. Fracture Mechanics*, 70(2003): 1339-1355
- [3] 杨勇新, 岳清瑞, 胡云昌, 碳纤维布与混凝土粘结性能的试验研究, *建筑结构学报*[J], 2001, 22 (3): 36-42.  
YANG Yongxin, YUE Qingrui, HU yunchang, Experimental research on the bonding between CFRP sheet and concrete[J], *Journal of Building Structures*, 2001, 22(3): 36-42
- [4] 江见鲸, 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M], 西安: 陕西科学技术出版社, 1984  
JIANG Jianjing, Nonlinear finite element analysis of RC structures[M], Xian'an, Shanxi Science and Technology Press, 1984
- [5] 陆新征, 江见鲸, 利用 ANSYS Solid65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构[A], 2002ANSYS 用户年会论文集[C], 473-479, 2002  
LU Xinzheng, JIANG Jianjing, Analysis for concrete structure under complex stress condition with Solid 65 FEA element in ANSYS[A], *Proceeding of Annual Users' Meeting of ANSYS*[C], 2002
- [6] MSC.Marc User's Manual, Volume A (Theory and User Information), MSC.Software Corporation, 394-395, 2001
- [7] MSC.Marc User's Manual, Volume D (User Subroutines and Special Routines), MSC.Software Corporation, 135, 2001
- [8] 陆新征, 严吉洁, 韦韩等, FRP 布-混凝土界面有限元分析技术难点讨论[A], 全国土木工程研究生学术论坛论文集[C], 2003, (已录用)  
LU Xinzheng, YAN Jijie, WEI Han. etc. Discussion on the key difficulties of finite element analysis for the interface between FRP sheet and concrete[A], *Proceeding of 1<sup>st</sup> National Civil Engineering Forum of Graduates Students*[C], 2003, (Accepted)

- [9] 陆新征, 江见鲸, 考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型[J], 土木工程学报, (已录用)  
LU Xinzheng, JIANG Jianjing, A concrete constitutive relationship with various damage models [J], China Civil Engineering Journal, (Accepted)
- [10] B. Martin-Perez, S. J. Pantazopoulou, Effect of bond, aggregate interlock and dowel action on the shear strength degradation of reinforced concrete[J], Engineering Structure, 23(2001): 214-227
- [11] Z.P. Bazant, Concrete fracture models: testing and practice[J], Engrg. Fracture Mech. 69(2002): 162-205
- [12] M. Jirasek, T. Zimmermann, Rotating crack model with transition to scalar damage[J], J. Engrg. Mech. Mar.: 277-284, 1998
- [13] 过镇海, 钢筋混凝土原理[M], 北京: 清华大学出版社, 108-109, 1999  
GUO Zhenhai, Principle of reinforced concrete [M], Beijing: Tsinghua University Press, 108-109, 1999
- [14] 康清梁, 钢筋混凝土有限元分析[M], 北京: 中国水利水电出版社, 120-126, 1996  
KANG Qinliang, Finite element analysis for reinforced concrete [M], Beijing: China Water Power Press, 120-126, 1996

## Finite Element Analysis For Debonding in the Interface Between FRP Sheet and Concrete

LU Xinzheng<sup>1</sup> TAN Zhuang<sup>2</sup> YIE Lieping<sup>1</sup> JIANG Jianjing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

<sup>2</sup> Central Research Institute of China Metallurgical Construction (Group) Co., Structure Engineering Branch, Beijing, 100088

**Abstract:** The debonding behavior in the interface between FRP sheet and concrete is a key problem for the application of FRP. The difficulties of finite element analysis for this interface problem are discussed, firstly, and advises are given for the FEA modeling. Then, from the numerical tests with several FEA softwares, the requirements for the constitutive relationship model of concrete in this problem are discussed. Based on former analysis, an improved planar concrete constitutive relationship mode is developed and the interface debonding of FRP sheet and concrete under shear force are simulated with this improved model. The numerical results are consistent with the test results. And the parameter values in this problem are suggested. Based on the numerical results, the mechanism in interface is discussed.

**Keyword:** concrete and reinforced concrete structure, interface bonding, finite element analysis, FRP sheet