

文章编号: 1000-4750(2006)05-0074-09

FRP 片材与混凝土粘结性能的精细有限元分析

陆新征^{1,2}, *叶列平^{1,2}, 滕锦光³, 庄江波^{1,2}, 江见鲸¹

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 香港理工大学土木系, 香港)

摘 要: FRP-混凝土界面粘结性能是外贴 FRP 片材加固混凝土结构技术的关键问题。基于 FRP 与混凝土界面内剪切试验, 采用精细单元有限元模型对其界面粘结性能进行了研究。在该模型中, 混凝土和 FRP 片材都使用非常小的单元加以模拟, 通过调整混凝土材料的本构模型来考虑单元尺寸的影响。FRP 单元和混凝土单元直接连接, 通过混凝土单元的断裂破坏来模拟 FRP 和混凝土界面的宏观剥离破坏过程。通过与大量面内剪切试验结果对比, 验证了该精细有限元模型的正确性, 并基于精细有限元分析结果, 对界面剥离破坏机理进行了讨论。

关键词: 纤维增强复合材料(FRP); 混凝土; 加固; 粘结; 剥离; 有限元分析

中图分类号: TU352; TU37 **文献标识码:** A

MESO-SCALE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FRP-TO-CONCRETE BOND BEHAVIOR

LU Xin-zheng^{1,2}, *YE Lie-ping^{1,2}, TENG Jin-guang³, ZHUANG Jiang-bo^{1,2}, JIANG Jian-jing¹

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

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

3. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, PR China)

Abstract: The interfacial behaviour between FRP and concrete is the key problem for the application of FRP to strengthen concrete structures. In this paper, a finite element (FE) model is presented for the debonding in FRP-concrete interface. In this model, concrete elements are connected with FRP elements directly without additional interface elements, so the debonding is modeled with fracture of concrete elements. Very small elements (0.25mm to 0.5mm in size, referred as meso-scale model) are used to simulate the crack propagation in the concrete layer adjacent to FRP. The effect of element size is considered in modeling the behavior of cracked concrete. Comparisons between the predictions of this model and test results are presented to demonstrate the capability and accuracy of this FE model. The debonding mechanism is also examined using results obtained with the FE model.

Key words: FRP; concrete; strengthen; bond; debonding; finite element analysis

外贴 FRP(Fiber reinforced Polymer, 纤维增强复合材料)片材加固混凝土结构技术近年来发展非

常迅速。在这种加固方式中, FRP 和混凝土的界面粘结性能是保证二者共同工作的重要条件。很多

收稿日期: 2004-07-12; 修改日期: 2004-11-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50238030); 国家 863 计划资助项目(2001AA336010); 香港理工大学 ASD 计划项目

作者简介: 陆新征(1978), 男, 安徽芜湖人, 博士生, 从事非线性计算, FRP 加固混凝土结构研究(E-mail: luxinzheng@263.net);

*叶列平(1960), 男, 浙江温州人, 教授, 博导, 从事混凝土、抗震、FRP 研究;

滕锦光(1964), 男, 浙江温州人, 教授, 博士, 从事 FRP、钢结构研究;

庄江波(1982), 男, 湖北当阳人, 硕士, 从事 FRP 抗弯加固研究;

江见鲸(1938), 男, 江苏武进人, 教授, 博士, 从事非线性有限元, 防灾减灾研究。

FRP 加固混凝土构件都是因为界面剥离而破坏^[1]。因此,为了安全而经济的使用这项加固技术,必须对界面粘结性能进行深入的研究。

在各种界面粘结破坏形式中,面内剪切试验(图 1(a))中的应力状态最具有代表性,成为研究 FRP 与混凝土界面粘结性能的基本试验,国内外对此进行了大量的试验和理论研究^[1]。现有研究发现,在胶层施工合适的情况下,面内剪切剥离最常见的破坏形式是:在胶层以下几毫米厚的混凝土内,出现一条与 FRP-混凝土界面平行的裂缝,裂缝从加载端向自由端发展,最后导致整个 FRP 片材从混凝土上剥离下来(图 1(a)虚线所示)^[2]。极限剥离强度与混凝土强度,以及 FRP 与混凝土的宽度比有关。FRP 与混凝土界面破坏的一个特点是:存在一个有效锚固长度,当粘结长度大于有效锚固长度时,增加粘结长度不能继续提高界面剥离强度。

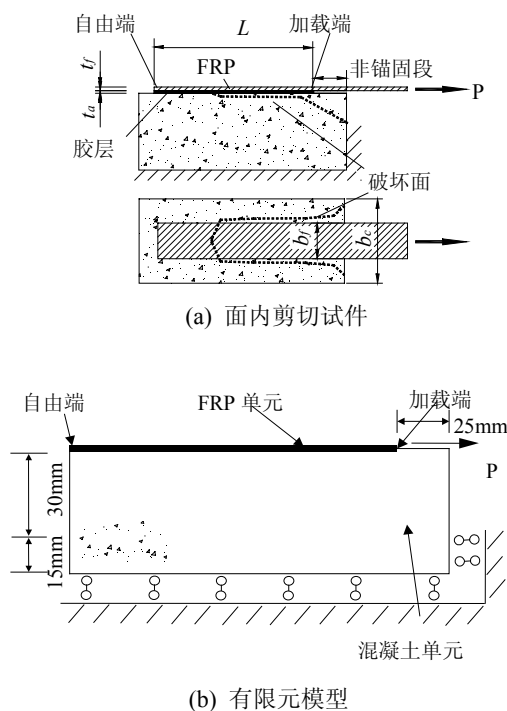


图 1 面内剪切试验和有限元模型

Fig.1 Pull-test and finite element model

由于 FRP-混凝土的界面剥离往往发生在界面以下几毫米的混凝土中,且断裂及破坏非常复杂,因此很难直接测量界面行为。而通过 FRP 应变分布估算界面应力和滑移又往往因为局部裂缝和骨料影响而存在很大偏差。因此,目前还很难直接通过试验对界面剥离进行深入研究及机理讨论。同样的,由于混凝土材性的复杂性,也很难得到考虑非

线性的界面行为的解析模型。

除了试验和理论研究,有限元法是最常用来研究 FRP-混凝土界面行为的方法。早期的界面粘结性能研究多是基于线弹性模型,主要通过有限元模型了解界面的弹性应力分布及应力集中情况^[3]。在后续的研究中,有限元模型开始考虑 FRP-混凝土界面的非线性力学行为,希望通过有限元模拟再现界面破坏的整个过程。这些非线性分析一般可以根据是否引入界面单元分为两大类。一类在 FRP 单元和混凝土单元界面中引入界面单元,通过设定这些界面单元的粘结-滑移行为和剥离强度来模拟界面的受力行为^[4,5]。如果界面单元的粘结滑移关系设置合适,当然可以较好地模拟界面的剥离行为。但由于现在对界面的粘结滑移关系的研究还远远不够,因而事实上也难以建立一个普遍适用的界面有限元模型。另一类是将 FRP 单元和混凝土单元直接连接在一起,通过混凝土单元的断裂来模拟界面剥离^[6-8]。这样,不需要事先设定界面行为,界面的粘结滑移关系可以与混凝土本构直接联系在一起。而且,还可以得到很多试验中难以观测的破坏过程细节。

后一种研究方法理论上虽然有其合理性,但是由于在混凝土有限元分析中,模拟裂面受剪行为存在很大困难,而现有的各种通用有限元软件中集成的混凝土模型也都难以对这种界面剥离行为进行准确模拟。在文献[7,8]等的研究工作中,提出了一种基于非共轴转动裂缝模型的混凝土本构模型,对面内剪切问题成功地进行了模拟。但是,该模型的缺点是:使用了大量的参数来描述裂面行为,而这些参数缺少物理意义,难于用试验标定。因此,本文提出了采用一种基于固定裂缝模型的精细单元混凝土模型,其参数容易通过试验加以标定,参数的物理意义也更加明确。这里,所谓精细单元的意思是:混凝土单元尺寸比界面剥离下来的混凝土(一般 2mm~5mm)小一个数量级。这样,在模拟剥离过程时,可以有足够的单元来模拟界面下裂缝的发生和扩展过程。

1 精细单元有限元模型

1.1 概述

如前所述,本文使用的混凝土单元尺寸非常小(0.25mm~0.5mm),为减小计算工作量,将面内剪切试件简化为平面应力问题。由于 FRP 宽度和混凝土宽度可能不一样,因此本文使用文献[2]建议的宽度

修正系数来考虑宽度差异的影响。

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}} \quad (1)$$

式中, b_f 和 b_c 为FRP和混凝土试件的宽度。

有限元模型如图1(b)所示, FRP和混凝土都采用平面四节点单元, 并通过位移控制加载, 得到有限元分析的软化段。

1.2 FRP片材模型

实际工程中, FRP一般大多采用现场粘贴方式, 其胶层和纤维之间很难清晰加以区分^[1]。因此, 本文使用了以下三种方式来模拟FRP片材: (a) 使用纤维的名义厚度和弹性模量建立有限元模型, 不区分纤维和胶层, 相当于不考虑胶层作用; (b) 使用片材的实际厚度和等效的弹性模量建立有限元模型, 也不区分纤维和胶层, 相当于将纤维均布在整个片材内; (c) 使用片材的实际厚度建立有限元模型, 认为纤维分布在片材中心, 其厚度是纤维的名义厚度, 其余部分是胶层。通过对比这三种情况的分析结果, 发现相互之间差异很小, 而第二种方式由于非线性收敛性较好, 且建模简单, 因此在后续分析中, 使用第二种方式来建立FRP有限元模型。FRP片材厚度不同试验有所差异, 本文采用其平均厚度, 即每层纤维厚1mm。

1.3 混凝土模型

由于本文分析中使用的混凝土单元非常小, 比混凝土的骨料粒径还要小很多, 因此真正的细观力学模型需要考虑混凝土中骨料和水泥浆体之间的差异, 以及二者之间的相互作用^[9,10]。但是, 本文使用的精细单元模型并没有考虑这一问题, 这主要基于以下两点考虑: (1) 本文分析的平面模型是实际空间三维试件进行平均化后的结果, 也就是说, 这个平面模型不是一个截面的行为, 而是一个空间的整体平均行为, 因此可以把混凝土视为均匀材料, (2) 本文使用微小单元的目的是为了跟踪剥离破坏中裂缝的发展过程, 骨料与水泥浆间的差异并不是关心的重点。因此, 本次研究中的混凝土材料模型仍然采用均匀材料模型。

由于混凝土单元尺寸非常小, 单元尺寸效应不可忽略, 计算中损伤局部化会严重降低构件的强度, 特别是使用最大拉应力准则作为开裂判据时。因此, 需要对混凝土的本构模型加以调整, 以考虑尺寸效应的影响。

1.3.1 混凝土受压行为

本文分析认为混凝土受压行为与单元尺寸关系不大^[9], 混凝土受压行为使用弹塑性模型, 采用Buyukozutrk建议的屈服面模型^[11]。混凝土的受压等效单轴应力应变关系采用Hognestad建议的曲线^[12]。

1.3.2 混凝土受拉行为

由于混凝土受拉开裂和单元尺寸大小关系明显, 因此本文采用Bazant等提出的裂缝带模型^[9]来考虑混凝土的单元尺寸效应。在有限元分析中, 对于平面应力问题, 当混凝土单元的一个高斯点上出现两条裂缝时, 在开裂方向其增量形式的应力应变关系为:

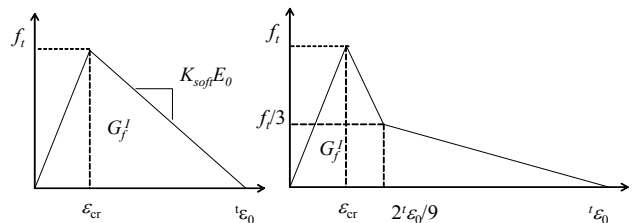
$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{nn} \\ \Delta\sigma_{tt} \\ \Delta\sigma_{nt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\text{soft},1}E_0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\text{soft},2}E_0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta G_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_{nn} \\ \Delta\varepsilon_{tt} \\ \Delta\varepsilon_{nt} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中, σ_{nn} 和 ε_{nn} 为裂缝1的正应力和正应变, σ_{tt} 和 ε_{tt} 为裂缝2的正应力和正应变, σ_{nt} 和 ε_{nt} 为剪应变和剪应力。 E_0 和 G_0 为混凝土的初始弹性模量和剪切模量。 $k_{\text{soft},1}$ 和 $k_{\text{soft},2}$ 为裂缝1、2的混凝土开裂受拉软化系数, β 为剪力传递系数, 反映裂缝表面混凝土之间的相互咬合作用。

根据Kwak和Filippou的研究^[13], 当单元尺寸小于三倍最大骨料粒径时, 开裂应变可以视为在单元内均匀分布的, 此时混凝土的断裂能为:

$$G_f^I = b_{cr} \int \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

式中, b_{cr} 为裂缝带宽度, 它等于在裂缝张开方向的单元长度。为了比较不同混凝土软化模型的影响, 本文使用了两种应用最为广泛的混凝土受拉软化模型来进行对比分析(图2): 一个为线性软化模型, 另一个为双线性软化模型^[12]。根据欧洲模式规范MC90^[14], 混凝土的断裂能为:



(a) 线性 (b) 双线性

图2 两种受拉软化模型

Fig.2 Softening models for tensile cracks:

$$G_f^I = \alpha \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0.7} \quad (4)$$

式中, α 为系数, 对于普通粒径混凝土, $\alpha = 0.03$,

f_c /MPa 为混凝土抗压强度。当混凝土的受拉软化曲线、抗压强度、抗拉强度以及单元尺寸确定后,考虑单元尺寸的受拉软化应力应变曲线也就可以确定了。

1.3.3 开裂混凝土的剪切行为

开裂混凝土的裂面剪切行为同样对计算结果影响显著,且与单元尺寸大小关系密切。常用的恒定剪力传递系数模型显然不再适用,因此本文选取了以下 5 个不同的裂面剪力模型并对其计算结果进行了比较:

(1) 恒定剪力传递系数模型^[12]

$$G' = \beta G_0 \quad (5a)$$

(2) Rots 模型^[15]

$$G' = \beta G_0 = G_0 / (1 + 4447 \varepsilon_{nn}^{cr}) \quad (5b)$$

其中, ε_{nn}^{cr} 为开裂正应变。

(3) ABAQUS 模型^[16]

$$G' = \beta G_0 = \beta_0 (1 - \varepsilon_{nn}^{cr} / \varepsilon_{nn}^0) G_0 \quad (5c)$$

其中, β_0 和 ε_{nn}^0 为系数。

(4) Al-Mahaidi 模型^[17]

$$G' = \beta G_0 = \frac{0.4}{\varepsilon_{nn}^{cr} / \varepsilon_{nn}^1} G_0 \quad (5d)$$

其中, ε_{nn}^1 为系数。

(5) 大连理工大学模型^[18]

$$\tau_{cr} = (0.543w^{-0.585} + 0.199)\sqrt{f_c} \Delta^{0.72} \quad (5e)$$

其中, w /mm 为裂缝跨度, Δ /mm 为裂面剪切错动, τ_{cr} /MPa 为裂面剪力。基于裂缝带理论,当开裂应变在单元内为均匀分布时,上式可改写为:

$$\tau_{cr} = (0.543(\varepsilon_{nn}^{cr} b_{cr})^{-0.585} + 0.199)\sqrt{f_c} (\varepsilon_{nn}^{cr} b_{cr})^{0.72} \quad (5f)$$

1.3.4 混凝土单元尺寸

为了验证本文的分析结果和单元尺寸无关,本文选择了两种不同的单元尺寸(0.25mm 和 0.5mm)进行对比。

2 有限元模型中的参数

2.1 分析试件

以上混凝土模型通过通用有限元软件 MSC.MARC^[19]的用户自定义子程序功能嵌入到 MARC 中。为了验证本文提到的精细单元模型的合理性,先对模型进行了一系列的试算分析。试算内容包括:裂面剪力模型影响;开裂软化效果影响和单元尺寸影响。由于实际试验结果往往受到种种偶然因素影响,本文同时还使用 Chen & Teng 建议的

面内剪切承载力经验公式^[2]的结果作为参照。在表 1 所有试验数据中, Wu-2 试件^[20]和 B-2 试件^[21]由于试验得到的剥离承载力和经验公式最为接近,且文献中提供了 FRP 的应变分布和发展,因此本文选取这两个试件进行讨论。

表 1 面内剪切试件参数

Table 1 Details of pull test Specimens

序号	试件名称	FRP 片材				混凝土		P_u /kN	宽度系数 β_w
		厚度/mm	宽度/mm	粘结长度/mm	弹性模量/GPa	f_{cu} /Mpa	宽度/mm		
1	Wu-1	0.22	40	250	230	72.0	100	14.1	1.069
2	Wu-2	0.501	40	250	390	72.0	100	23.5	1.069
3	B-2	0.33	100	200	230	57.4	500	38	1.225
4	Tan-1	0.167	50	130	97	37.6	100	7.78	1
5	Tan-2	0.167	50	130	97	37.6	100	9.19	1
6	Tan-3	0.33	50	130	97	37.6	100	10.49	1
7	Tan-4	0.33	50	130	97	37.6	100	11.43	1
8	Tan-5	0.111	50	130	235	37.6	100	7.97	1
9	Tan-6	0.111	50	130	235	37.6	100	9.19	1
10	Yuan	0.165	25	190	265	29.7	150	5.74	1.254

资料来源: 1~2: 文献[20]; 3: 文献[21]; 4~9: 文献[22];

10: 文献[23]

2.2 裂面剪力模型的影响

前面提到的混凝土开裂后的 5 种剪力传递系数模型中,模型 1、3、4 中还有一些参数未定。因此,首先需要对这些模型进行试算,以确定其参数。经大量参数试算后发现,当对于模型 1, $\beta = 0.035$; 对于模型 2, $\beta_0 = 0.4$ 且 $\varepsilon_{nn}^0 = 0.015$; 对于模型 3, $\varepsilon_{nn}^1 = 200\mu\varepsilon$ 时,计算得到的剥离承载力和试验结果吻合最好。

由剥离承载力确定好模型参数后,就将试验得到的 FRP 应变和计算得到的 FRP 应变进行了对比。

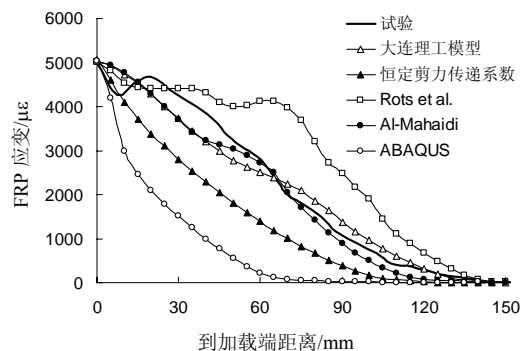


图 3 B-2 试件不同裂面剪力模型得到的 FRP 应变

Fig.3 Comparison of strains in FRP plate with different shear retention models for Specimen B-2

通过对比表明,模型 5 的 FRP 应变与试验结果吻合最好,以 B-2 试件为例,对比如图 3 所示。因此,在后续分析中,本文使用模型 5 来模拟界面受剪行为。

2.3 混凝土受拉软化模型的影响

图 4 为 B-2 试件在采用不同混凝土开裂受拉软化模型得到的计算结果。可以看出,在剥离破坏发生前,二者几乎没有区别;在剥离破坏发生后,由于界面剥离裂缝出现的随机性,二者有一点差异,但这个差异对于最终计算结果影响很小,因此本文认为这两种受拉软化模型在本研究中差别很小。为了简化起见,在后续分析中都使用线性软化模型。

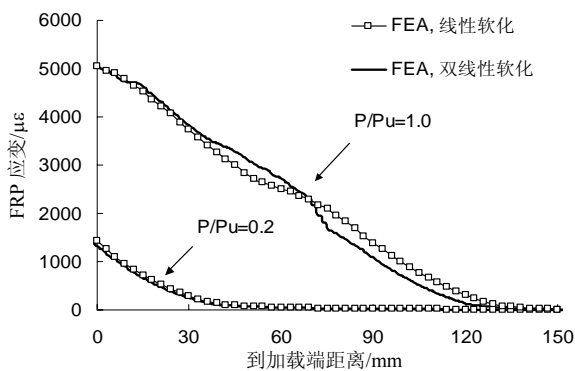


图 4 不同受拉软化模型

Figure 4 Comparison of different tensile softening models for cracked concrete

2.4 混凝土单元尺寸的影响

单元大小不同的两个模型(0.25mm 和 0.5mm)的计算结果对比如图 5 所示。可见二者之间 FRP 应变差异并不显著。开裂应变云图的对比如图 6 所示。可见二者的分析结果同样非常相似,但较小单元(0.25mm)的裂缝分布更加清晰一些。为减少计算工作量,在后续模型验证分析中,本文都使用较大的单元(0.5mm)进行分析。而在讨论剥离机理时,

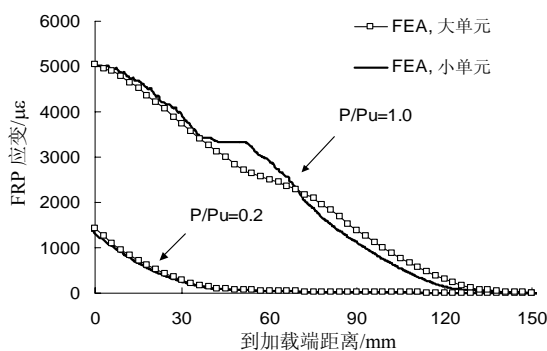


图 5 不同单元尺寸比较

Figure 5 Comparison of various element sizes under different load

使用较小的单元(0.25mm)来进行分析,以更好了解界面的破坏过程。

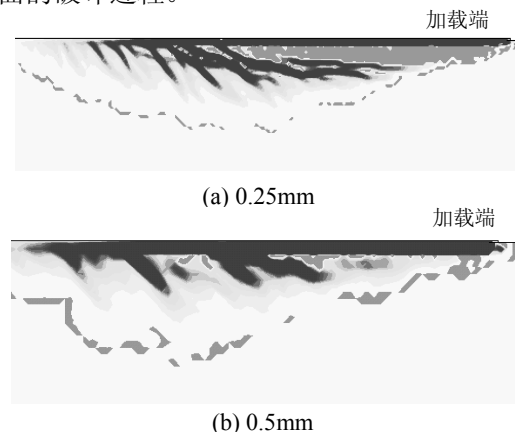


图 6 不同单元尺寸应力云图比较($P/P_u=1.0$)

Fig.6 Comparison of crack patterns for different element sizes($P/P_u=1.0$)

3 对有限元模型的验证

为了进一步验证本文提出的模型,对表 1 所列的试件^[20-23]逐个进行了计算,计算结果与试验及经验公式对比如表 2 及图 7 所示。从对比中可以看出,计算结果和试验结果及经验公式还是吻合得很好的,说明本文模型可以较好地模拟界面剥离破坏过程。需要说明的是,由于试验的有效锚固长度是根据实测的 FRP 应变得到的,由于应变片布置间距和局部裂缝的影响,实测 FRP 应变很难给出一个精确的有效锚固长度数值。因此,表 2 用一个范围表示有效锚固长度实测结果。

表 2 计算结果与试验结果对比

Table 2 Comparison between FE and test results

试件名称	试验		FEA		经验公式 ^[2]	
	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
Wu-1	14.1	61~90	13.8	76.8	11.44	81.5
Wu-2	23.5	120~165	24.7	146.0	22.35	159.0
B-2	38.0	115~140	38.3	125.0	37.74	105.2
Tan-1	7.78	45~65	6.49	45.5	6.4	54.6
Tan-2	9.19	45~65	9.37	63.6	9.05	77.3
Tan-3	10.49	50~70	8.44	46.3	8.08	68.9
Tan-4	11.43	60~80	5.82	85.0	6.07	93.1
Tan-5	7.97	45~65				
Tan-6	9.19	50~70				
Yuan	5.74	70~85				

另外,还需要说明的是,FRP 片材在受拉的同时,由于局部弯曲作用,其顶部和中部应变是有所

不同的,如图 7(a)所示,在界面下混凝土存在较多裂缝的区域,FRP 顶部和中部的应变的差别更大一些。但是,在试验量测中,虽然量测的都是 FRP 片材顶部的应变,但由于应变片的标距限制,一般很难准确测量出这种局部弯曲的影响。同时,计算得

到的 FRP 片材中部应变由于没有局部弯曲的影响,更能体现出 FRP 受拉应变的变化特征,因此在图 7(b)(c)(d)中,都使用的是计算得到的 FRP 片材中部应变。

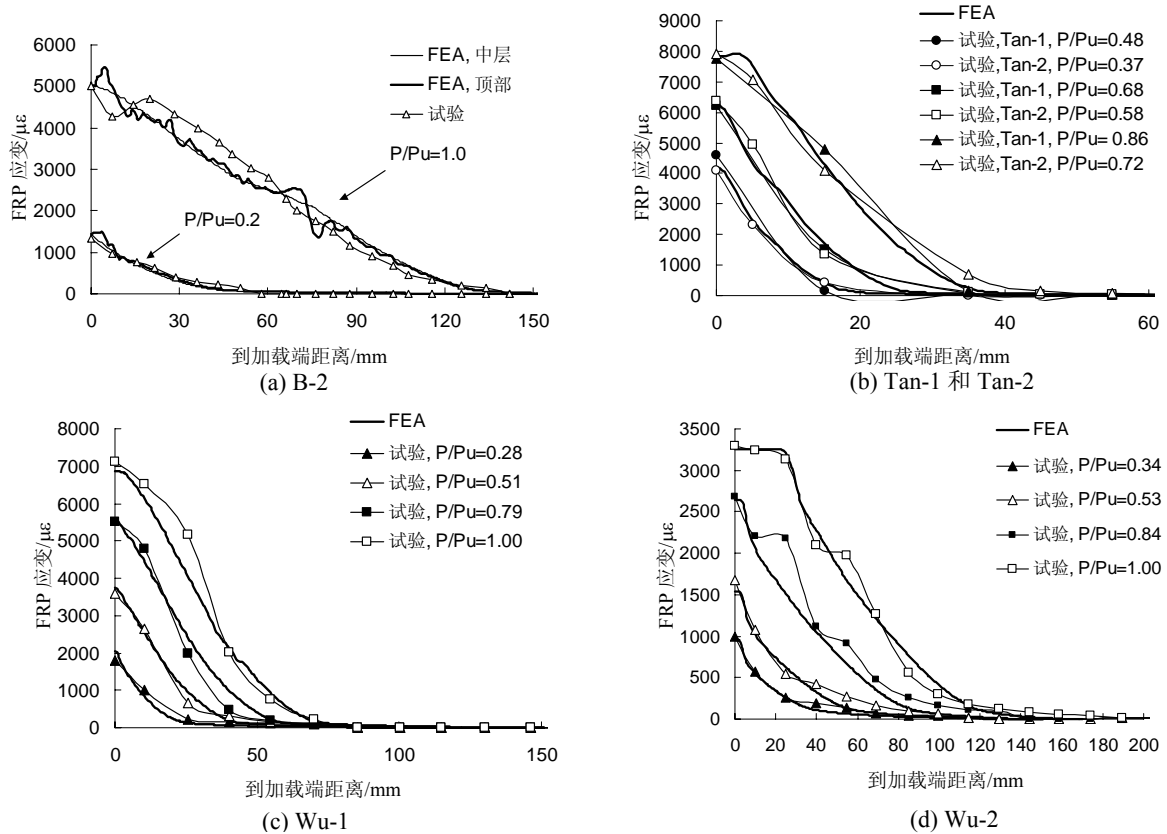


图 7 试件有限元模型和试验结果对比

Fig.7 Comparison for Strain in FRP plates

4 界面剥离破坏过程

试验中很难对界面剥离破坏过程进行精确的观测,而有限元计算结果却可以得到剥离过程的种种细节。当然,实际的混凝土由于存在着骨料和水泥浆体等差异,破坏过程比有限元结果要更加复杂。尽管如此,有限元结果仍然为研究界面剥离破坏过程提供了一个很好的手段。

以 Wu-1 试件为例,有限元得到的荷载-滑移曲线如图 8 所示,为了说明整个破坏过程,在图 8 上选取了 6 个代表点,记为 Point A~F。各点对应的裂缝云图如图 9 所示。

根据有限元得到的 FRP 应变分布,可以差分得到界面粘结应力:

$$\tau = \frac{d\sigma_f}{dx} t_f \quad (6)$$

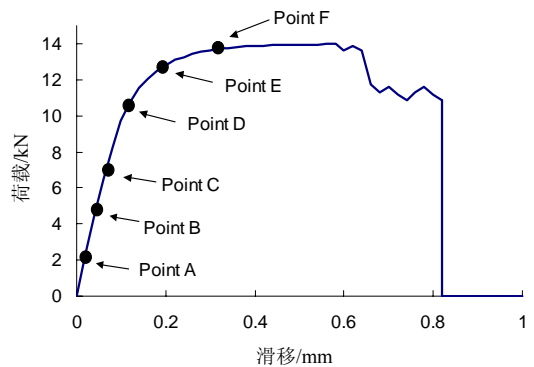


图 8 Wu-2 试件荷载位移曲线

Fig.8 Load-slip curve for Specimen Wu-1 from FE model 其中, σ_f 为 FRP 轴向应力, t_f 为 FRP 片材厚度。

由式(6)计算得到 Point A~F 的界面粘结应力分布如图 10 所示(记为“原始差分结果”)。由于界面存在大量的局部裂缝,加上差分计算会放大误差,因此原始差分结果波动得非常厉害。为了去除这些局部

波动,对原始差分结果用 5mm 的快速傅立叶变换 (FFT)进行了数值平滑。数值平滑结果清晰显示出不同荷载等级下有效锚固区的分布。

同荷载等级下有效锚固区的分布。

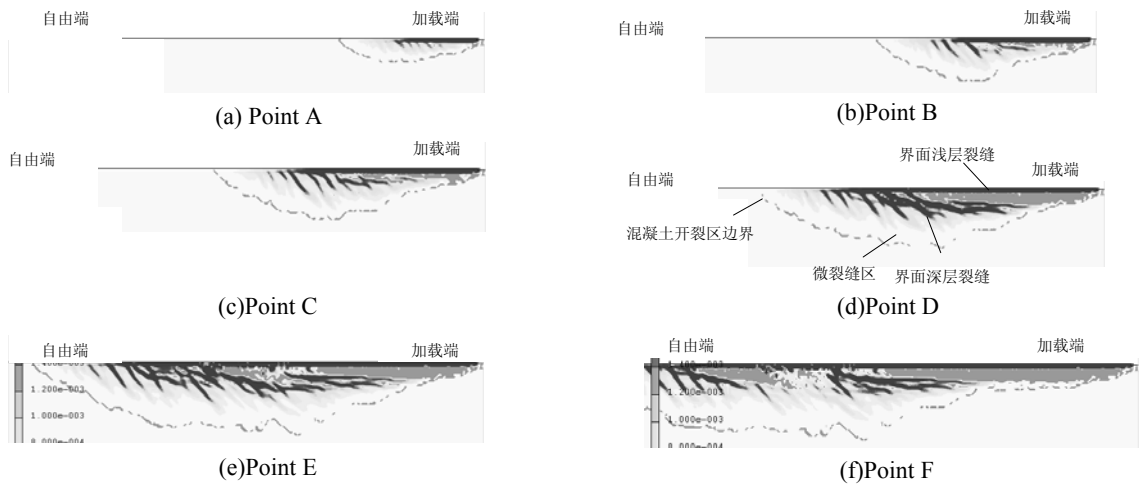


图 9 Wu-1 界面混凝土裂缝发展

Fig.9 Propagation of cracks in the concrete for Wu-1

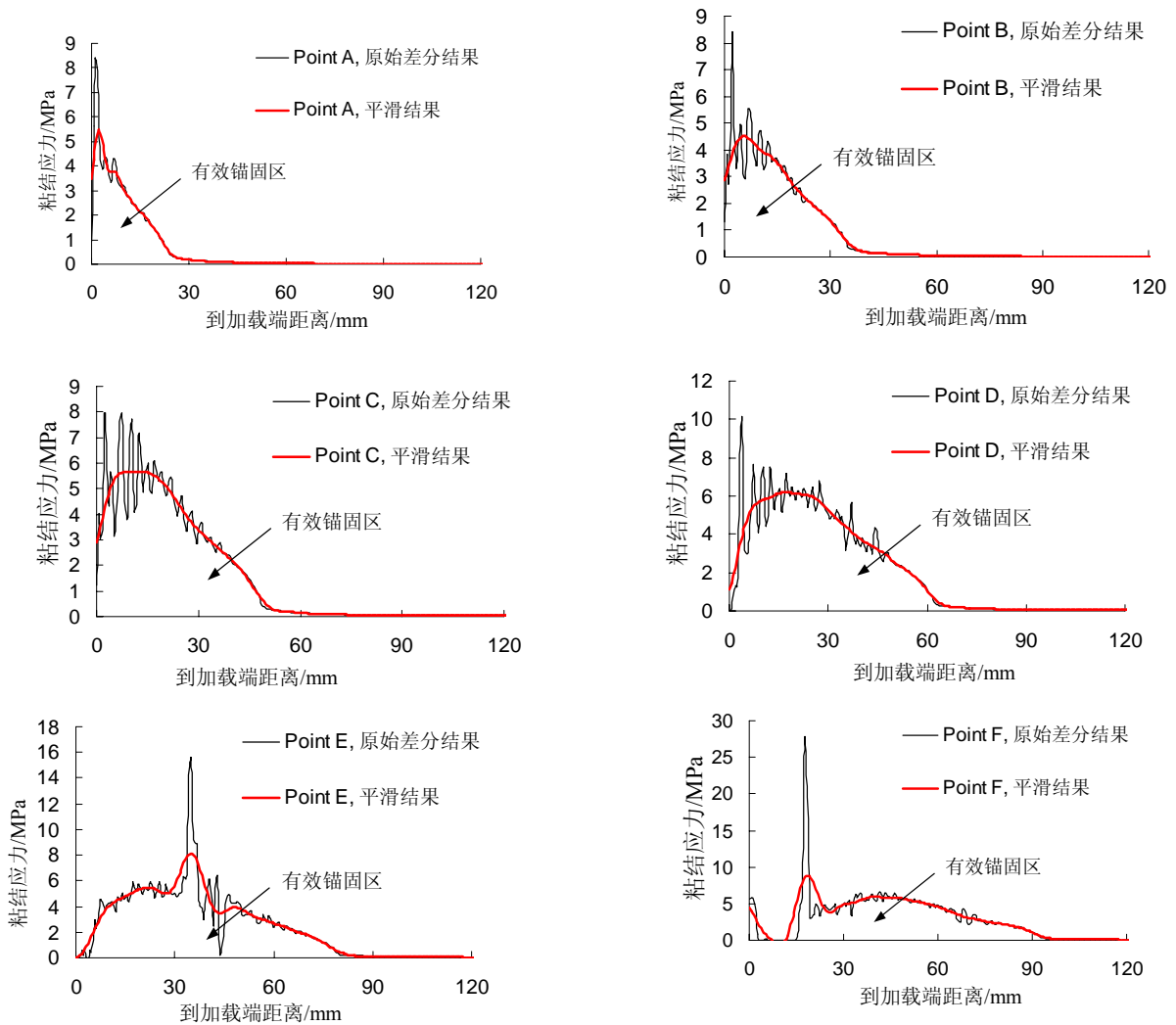


图 10 界面粘结应力发展

Fig.10 Bond stress distribution

图 9(a)是荷载相当于 19%极限荷载时界面下混凝土开裂应变分布。混凝土内的这些裂缝可以分成 3 类: (a) 界面浅层裂缝; (b) 界面深层裂缝; (c) 微裂缝区。这三种裂缝同样在图 9(b)~(f)中存在。界面浅层裂缝的深度一般是在胶层-混凝土界面以下 0.5mm~1mm 区域, 这些裂缝相对较小且均匀。它们的成因是因为此处直接承受来自 FRP 片材的剪力和拉力。界面深层裂缝一般是在胶层-混凝土界面以下 2mm~5mm 深处, 其宽度一般较大, 它们主要是由界面剪力引起, 并最终控制界面的粘结强度和滑移量。混凝土微裂缝区深度在 5mm~15mm 之间, 它们主要是由界面剪力引起, 部分微裂缝将随着剥离的发展而演变成界面深层裂缝。

基于有限元分析结果, 整个界面破坏过程可以解释如下:

在较低的荷载水平下, 界面下的混凝土被界面浅层裂缝分割为一系列非常小的悬臂柱, 称之为微观悬臂柱。这些悬臂柱和界面所成的角度大约是 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。随着荷载的增加, 这些悬臂柱将变长形成界面深层裂缝。作用在悬臂柱顶端的剪力 F 可以分解为一个压力和一个弯曲剪力, 如图 11 所示。其中, 压力可以导致悬臂柱发生压碎破坏, 称之为“压碎剥离”, 而弯曲剪力可以导致悬臂柱根部的弯曲破坏, 称之为“弯曲剥离”。根据有限元分析结果以及试验观测, 绝大部分的悬臂柱是根部弯曲破坏, 只有靠近加载端局部的悬臂柱是由于压碎剥离破坏。

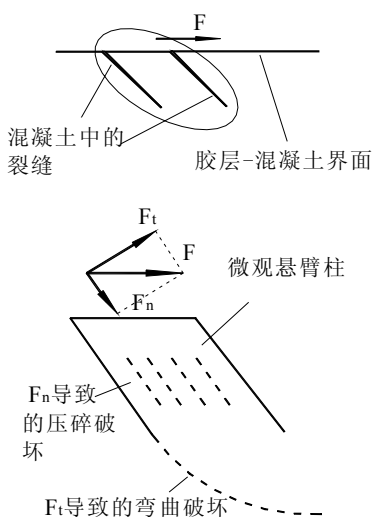


图 11 微观悬臂柱破坏机理

Fig.11 Micro-cantilever column and its failure mode

在加载早期, 粘结应力集中在加载端附近, 如

图 10(a)所示。随着荷载增加, 有效锚固区变长, 粘结应力也有所增加(图 10(b))。当最大粘结应力达到粘结强度, 界面受力进入软化段, 加载端附近的粘结应力减小(图 10(c)和 10(d)), 而有效锚固区继续向自由段扩展。最后, 当界面完全剥离时(图 10(e))加载端附近的粘结应力变得非常的小, 此处的界面下混凝土已经形成了一条宏观的剥离裂缝, 也就是试验中观测到的界面剥离裂缝, 在此阶段, 荷载-滑移曲线已经进入严重的非线性阶段, 且宏观剥离裂缝将逐步从加载端向锚固端扩展, 荷载增加将非常缓慢。最后, 到 Point F 时, 加载端附近的混凝土基本上已经完全剥离下来了, 有效锚固区向自由段移动。

5 结论

本文提出了一个基于通用有限元程序 MSC.MARC 的精细单元有限元模型, 并用该模型对 FRP-混凝土面内剪切试验进行了分析。在该模型中, 混凝土被划分成非常小的单元(0.25mm 到 0.5mm), 并根据单元尺寸对混凝土的受拉、受剪行为加以调整, 进行了较细致的参数讨论。分析结果表明, 该有限元模型和大量试验结果吻合较好。本文也根据有限元结果对界面剥离机理和过程进行了解释。

参考文献

- [1] Teng JG, Chen JF, Simth ST, Lam L. FRP-strengthened RC structures [M]. UK:John Wiley & Sons, 2002.
 - [2] Chen JF, Teng JG. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(7): 784~791.
 - [3] Chen JF, Yang ZJ, Holt GD. FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: effect of test methods on experimental bond strength [J]. Steel and Composite Structures, 2001, 1(2): 231~244.
 - [4] Wong RSY, Vecchio FJ. Towards modeling of reinforced concrete members with externally bonded fiber-reinforced polymer composite [J]. ACI Structural Journal. 2003, 100(1): 47~55.
 - [5] Wu ZS. Element-level study on stress transfer based on local bond properties [R]. Technical Report of JCI Technical Committee on Retrofit Technology, 2003. 44~56.
 - [6] 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, 2003, 36(11): 70~74.
- Lu Xinzhen, Jiang Jianjing. A concrete constitutive relationship with various damage models [J]. China Civil

- Engineering Journal, 2003, 36(11): 70~74. (in Chinese)
- [7] 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 Lieping, Jiang Jianjing. Finite element analysis for debonding in the interface between FRP sheet and concrete [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 45~50. (in Chinese)
- [8] Lu XZ, Teng JG, Ye LP, Jiang JJ. Bond-slip models for FRP sheet/plate-to-concrete interfaces [A]. Proc. 2nd International Conference of advanced polymer composites for structural applications in construction (ACIC2004) [C]. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2004. 152~161.
- [9] Bazant ZP, Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials [M]. Boca Baton: CRC Press, 1997.
- [10] Zhu WC, Teng JG, Tang CA. Mesomechanical model for concrete-Part I: Model development [J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56(6): 313~330.
- [11] Buyukozturk O. Nonlinear analysis of reinforced concrete structures [J]. Computers and Structures, 1977, 7: 149~156.
- [12] 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, 1994.
Jiang Jianjing, Nonlinear finite element analysis of RC structure[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [13] Kwak HG, Filippou FC. Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic load [R]. Research report of Department of Civil Engineering, U.C. Berkeley, No. UCB/SEMM-90/14, 1990, 33~39.
- [14] CEB-FIP. Model Code 90 [S]. Lausanne; 1993.
- [15] Rots JG, Kusters GMA, Nauta P. Variable reduction factor for the shear resistance of cracked concrete [R]. TNO-report BI-84-33/68.8.2001, Rijswijk, the Netherlands, 1984.
- [16] ABAQUS. User's manual [M]. HKS Corporation, 2001.
- [17] Walraven JB, Reinhardt HW. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subject to shear load [R]. HERON, 1981, 26(1A).
- [18] 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, 1996. 120~126.
Kang Qingliang. Finite element analysis for reinforced concrete [M]. Beijing: China Water Power Press, 1996, 120~126. (in Chinese)
- [19] MSC. MARC. User's Manual [M]. MSC. Software Corporation, 2003.
- [20] Wu ZS, Yuan H, Yoshizawa H, Kanakubo T. Experimental/analytical study on interfacial fracture energy and fracture propagation along FRP-concrete interface [C]. ACI International SP-201-8, 2001, 133~152.
- [21] Ueda T, Sato Y, Asano Y. Experimental study on bond strength of continuous carbon fiber sheet [C]. Proceedings of 4th Int. Sym. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structure, 1999. 407~416.
- [22] 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 Zhuang. Experimental research for RC beam strengthened with GFRP [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [23] Yuan H, Teng JG, Seracino R, Wu ZS, Yao J. Full range behavior of FRP-to-concrete bonded joints [J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 553~564.