复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 22 卷 第 4 期 8 月 2005 年
Vol. 22 No. 4 August 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 04-0156-09

CFRP 纤维布加固 RC 柱的有限元分析模型

张大长[1,*], 吴智深[2]
(1. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009; 2. 日本茨城大学 工学院, 日本日立 316-8511)

摘 要: 为了建立统一的碳纤维(CFRP)布加固钢筋混凝土(RC)柱的抗震性能的评价手段, 基于二维有限元分析研究探讨分析模型; 对 3 个 CFRP 布加固 RC 柱进行了 2D-FEA 参数模拟分析, 考察了现存的裂缝模型、材料本构关系、混凝土的压缩模型对分析结果的影响。通过分析比较得出, 混凝土使用 Darwin-Pecknold 的等价一轴应变模型能很好地模拟 CFRP 布加固的 RC 柱的非线性特性及其强度; 而且修正 Kent-Park 模型能够较好地模拟箍筋、CFRP 布对混凝土的横向约束作用, 同时 Darwin 的破坏准则可以较好地评价二轴应力下混凝土的破坏过程。通过考察 CFRP 布加固的 RC 柱的荷载-变形关系、柱子反弯点和柱脚处混凝土、钢筋和 CFRP 的应力-应变的发展, 进一步证实了 CFRP 布对 RC 柱的抗震加固十分有效。

关键词: CFRP 布; 二维有限元分析; RC 柱; 抗震性能; 分析模型; 等价一轴应变; 约束作用; 破坏准则
中图分类号: TB330.1; TU37 **文献标识码**: A

FINITE ELEMENT ANALYTICAL MODELS FOR REINFORCED CONCRETE COLUMNS REINFORCED WITH CFRP SHEETS

ZHANG Dachang[1,*], WU Zhishen[2]
(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;
2. Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan)

Abstract: In order to build a uniform evaluating means of seismic retrofitting performance of reinforced concrete columns with CFRP sheets, analytical models are studied through two-dimensional finite element analysis (2D-FEA). Based on the parametric simulation of three RC columns strengthened with CFRP sheets, the applicability and availability of crack models, constitutive relationships on cracks and concrete compressive models are investigated. The results show that Darwin-Pecknold's equivalent uniaxial strain model can be used to simulate the nonlinear behavior and strengthen effect of RC columns through comparing with test results. The modified Kent-Park's confinement model can be used to evaluate the influences on capacity of confinement effects from hoop steels and CFRP sheets, and Darwin's failure criteria can be used to evaluate the concrete failure in a biaxial stress state. Seismic retrofitting performances of RC columns strengthened with CFRP sheets are verified by analyzing load-deformation relations and the processes of stress-strain at the inflection point and the foot of the columns.

Keywords: CFRP sheets; two-dimensional finite element analysis; RC column; seismic performance; analytical models; equivalent uniaxial strain; confinement effect; failure criteria

对建筑物平均寿命的要求随着建筑物数量的增加不断提高, 建筑物使用寿命和使用性能的维护变得不可缺少。结构体外粘贴的纤维材料 FRP(Fiber reinforced polymer)作为损伤结构或者原有承载力不足结构加固改造的有效技术已被广泛应用。与传统的钢筋和钢板相比, FRP 具有强度重量比高、耐腐蚀性和施工性极好等特性。所以, 在改善结构承载力或进行加固时, 主要对结构表面作一些处理, FRP 就很容易粘贴到结构表面, 使 FRP 加固结构的耐久性和可靠性得到保证。

在近年的大地震中(1995 年的阪神地震、2003 年的土耳其地震等), RC 柱的抗剪破坏是一种典型的破坏形式。通过研究已开发出多种使用连续纤维(布、带、绞线等)的剪切加固方法。在美国和日

收稿日期: 2004-09-07; **收修改稿日期**: 2005-03-09
通讯作者: 张大长, 副教授, 研究方向为结构工程、复合材料加固 E-mail: dczhang@njut.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本通过提高结构承载力、变形能力等来改善结构延性，抵抗下次大地震荷载，许多工程已经使用 FRP 布进行加固。虽然 FRP 加固柱的效果十分明显，但是 FRP 加固柱的力学机理、共同工作规律还没有完全被理解和掌握。而且，加固后的构件比加固前具有更复杂的非线性特性，如混凝土的开裂、FRP 的破断、构件的破坏模式等；拉压剪的复杂应力状态下混凝土的非线性特性和 FRP 的破断过程对加固柱的承载力、变形性能有很大的影响。所以，为了合理应用 FRP 进行 RC 柱的抗震加固，必须解决加固后 RC 柱的抗剪承载力、变形能力、FRP 加固量和抗震性能评价。正确评价 FRP 加固 RC 柱的承载力、变形能力，必须合理选择各种材料本构关系和模型。

本文作者通过二维有限元分析(2D-FEA)以开发应用 CFRP 布对 RC 柱的抗震加固性能评价的分析模型为目的。进行了 3 个 CFRP 布加固的 RC 柱的 2D-FEA 参数分析，探讨了混凝土裂缝模型的适用性和有效性、本构关系以及抗压模型。所验证的模型包括旋转裂缝模型及固定裂缝模型、Darwin，Pecknold[1]等价一轴应变模型的本构关系、Vecchio 和 Collions[2]全应变模型、Sargin[3]和 Seanz[4]的压缩模型、Shirai[5]的抗拉软化模型、修正 Kent-Park 的横向约束模型、二轴应力状态下 Darwin 的破坏准则。同时，通过分析柱子的荷载-变形关系、柱子跨中反弯点处和柱脚的应力-应变关系的发展规律，对 CFRP 布实行 RC 柱抗震的加固性能进行了探讨。最后，提出了 CFRP 布加固 RC 柱的抗震性能评价建议。

1 混凝土、钢筋和 CFRP 的材料模型

1.1 混凝土的材料模型

1.1.1 裂缝模型

通常，开裂、软化、破坏的连续模型被用来模拟混凝土的非线性特性。在以往的研究中，分布裂缝模型(Smeared crack)是从连续应变的概念出发，既可代表独立的局部裂缝的宽度也可代表钢筋混凝土分布裂缝的平均裂缝应变，并且将应变分解成一部分属于裂缝、一部分属于裂缝两侧的混凝土材料。连续模型的优点是混凝土的开裂、弹性软化特性以及破坏可以用高弹模型来描述。另外，分布裂缝的固定、旋转裂缝模型被建议用来描述由于变荷载或周期加载时多向反复应力下的裂缝特性。一般地，固定裂缝模型结合裂缝面的剪切残余系数(即为常数或是裂缝宽度的函数)和裂缝面的滑移一起使用。如果多条裂缝的开裂准则能够较好地被定义且描述裂缝面的行为，固定裂缝模型与实际结构裂缝的产生发展的属性就有很好的一致性，并且能够模拟混凝土结构的非线性行为[6]。但是，由于混凝土的开裂及裂缝的行为与材料组成、裂缝宽度、裂缝面的滑移等因素有关，定义开裂准则和裂缝的行为不太容易。

旋转裂缝模型是用连续公式来定义裂缝的行为，并且象 Rots[7]和 Willam[8]叙述的那样有一个隐含的裂缝剪切软化特性。由于塑性变形的裂缝模型与旋转裂缝模型的差别较小，所以，旋转裂缝模型可以简单地用来模拟混凝土的开裂行为，尤其是单调加载情况。

1.1.2 基于裂缝模型的混凝土本构关系

多向应力状态下混凝土的非线性特性对 RC 结构的非线性性能影响较大，所以，在以往的研究中提出了许多混凝土的非线性本构关系。

(1) Darwin，Pecknold 的等价一轴应变模型[1]

Darwin，Pecknold 的等价一轴应变模型一般用于强度理论，混凝土的一轴应力-应变关系中的应变为等价一轴应变，是通过增量本构关系计算的；通过等价一轴应变应用二轴应力或多向应力状态下混凝土的开裂、破坏准则。等价一轴应变就是沿荷载路径对等价一轴应变的增量积分来得到

$$\varepsilon_{iu} = \int \frac{d\sigma}{E_i} \qquad (1)$$

(i 表示主轴，其中 $i = 1, 2$)

(2) Vecchio，Collions 的全应变模型[2]

在通用有限元程序 DIANA 应用 Vecchio，Collions 提出的基于全应变模型的本构关系。它能较好地应用于使用极限状态(Serviceability limit state，SLS)和极限状态(Ultimate limit state，ULS)的分析，这时结构的承载力和性能主要由材料的开裂、压碎控制，并基于全应变的裂缝模型在裂缝方向上估算应力。

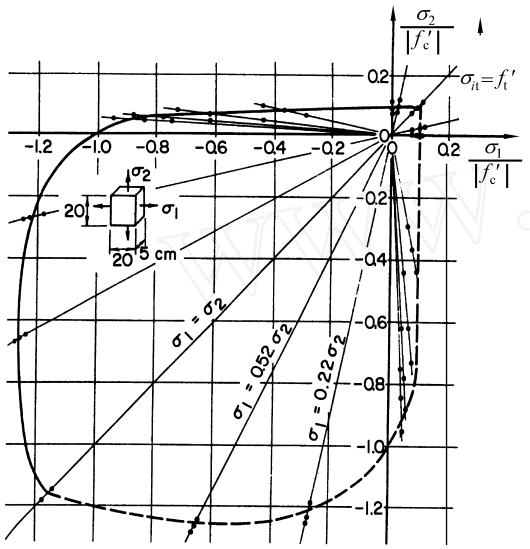
1.1.3 二轴应力状态下混凝土的破坏准则

多向应力状态下混凝土的破坏准则不同于一轴应力状态，有压-压、拉-压和拉-拉三种应力状态；由于混凝土的破坏准则是通过不同应力状态的强度实验得到的，因此在某种程度上与试件的尺寸有关(即尺寸效应)。一般来说，应用破坏准则可确定多

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向应力状态下的混凝土的实际强度，判断其开裂、破坏的状态。在全应变模型中，建议考虑破坏准则并作了一些这方面的尝试，但是在断裂模型里考虑混凝土的破坏准则仍然困难。

本文中应用如图 1 所示基于 Kupfer 破坏准则的 Darwin 的模型[9]作为二轴应力状态下混凝土的破坏准则，它较好地考虑了二轴压缩时混凝土实际强度的增大和一轴拉、一轴压时的混凝土实际强度的降低。



$$\sigma_{2c}=\frac{1+3.65\alpha}{(1+\alpha)^2}f'_c \leqslant 0.65 f'_c, \qquad \alpha=\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

$$\sigma_{1c}=\alpha\sigma_{2c}$$

图 1　二轴应力状态下 Darwin 的破坏模型

Fig. 1　Darwin's failure model in biaxial stress

1. 1. 4　单轴应力下混凝土的压缩模型

在以往的研究中提出了许多种混凝土的单轴压缩模型，比如双曲线模型、抛物线模型、指数模型等，代表性且通用的模型如下：

Saenz 模型[4] (如图 2(a))

$$\sigma_i = \frac{E_0\varepsilon_{iu}}{1+\left(\frac{E_0}{E_s}-2\right)\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}+\left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^2} \qquad (2)$$

Sargin 模型[3] (如图 2(b))

$$\sigma/\sigma_c = [A(\varepsilon/\varepsilon_c) + (D-1)(\varepsilon/\varepsilon_c)^2]/[1+(A-2)(\varepsilon/\varepsilon_c)+(\varepsilon/\varepsilon_c)^2] \qquad (3)$$

如果系数 $D=0$、$A=2$，这个模型即成为文献[10]所示的混凝土模型(如图 2(c))

$$\sigma = k_1\sigma_c(\varepsilon/\varepsilon_c)[2-\varepsilon/\varepsilon_c] \qquad (4)$$

双曲线模型(如图 2(d))

该模型基于通过单元的裂缝带宽度定义的断裂能量。在 DIANA 程序里假定与单元面积的平方根有关，所以某些情况下指定裂缝带宽度十分有用。

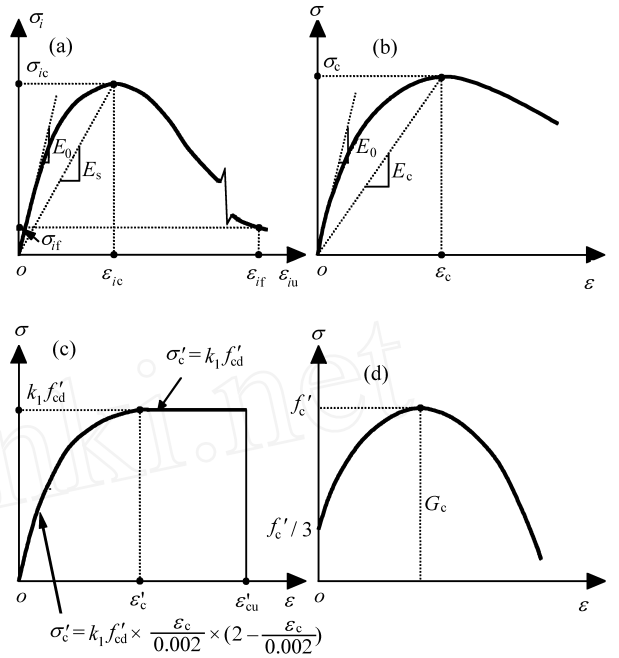


图 2　混凝土的单轴压缩模型

Fig. 2　Compressive models of concrete in uniaxial stress

1. 1. 5　混凝土的抗拉模型

混凝土的抗拉模型对 RC 结构的承载力影响并不太大。所以，在二维有限元分析中，受拉模型的选择并不如压缩模型重要。

白井模型[5] (图 3(a))

$$\sigma_{t,eq} = (a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3) f_t \qquad (5)$$

其中：$X=(\varepsilon_{av}-\varepsilon_{cr})/(\varepsilon_{bu}-\varepsilon_{cr})$，$f_t$ 为混凝土的抗拉强度，ε_{av} 为平均拉应变，ε_{cr} 为开裂应变，ε_{bu} 为钢

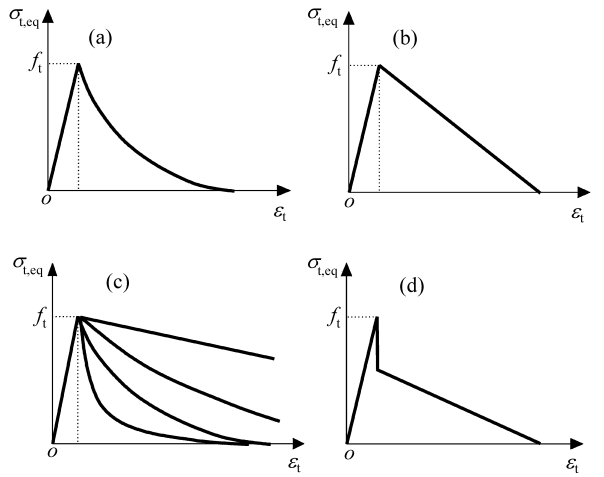


图 3　混凝土的单轴受拉模型

Fig. 3　Tensile models of concrete in uniaxial stress

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

筋与混凝土的粘结滑移应变的最大值，a_0、a_1、a_2、a_3 是常数（根据实验分别可取 1.0、-2.748、2.654、-0.906）。

线性软化模型（图 3(b)）

基于断裂能的受拉软化模型（图 3(c)）

图示曲线在最大承载力后均有一个光滑的下降段，在拉应变足够大时消失；应力-应变曲线根据不同的断裂能量 G_f 得到。

多折线软化模型（图 3(d)）

1.1.6 横向约束作用和开裂后抗压强度的降低

(1) 混凝土的横向约束作用

由于横向箍筋、外围混凝土以及 CFRP 布对核心区的混凝土有一个阻止其横向变形的横向约束作用，使混凝土的实际强度有所提高。在正确评价 RC 结构承载力时必须合理考虑对混凝土的横向约束作用。基于以往的研究[6]，修正 Kent-Park 模型[11]能够较好地考虑横向钢筋的约束作用，特别是混凝土的最大承载力、最大强度过后的下降段。研究中同样采用修正 Kent-Park 模型来模拟箍筋、CFRP 布对混凝土的横向约束作用。

(2) 开裂后混凝土抗压强度的降低

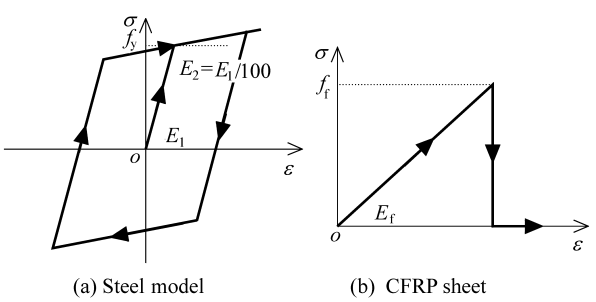
对于二轴或三轴应力状态下的拉压时，混凝土的抗压强度在一定程度上发生降低。研究中应用野口-浜田[12]的模型来模拟混凝土由于垂直方向开裂而引起抗压强度的降低

$$\lambda = \frac{1}{0.27 + 0.96(\varepsilon_{1u}/\varepsilon_0)^{0.167}} \qquad (6)$$

其中：ε_{1u} 为垂直裂缝方向的平均拉应变（即等价一轴应变拉应变），ε_0 为一轴受拉时的开裂应变。

1.2 钢筋的材料模型

如图 4(a) 所示，钢筋采用较简单的二折线模型，其中第 2 刚度 $E_2 = E_1/100$，E_1 是钢筋的弹性模量。另外，在本研究中钢筋和混凝土间的粘结假定为完全粘结；箍筋采用积层单元并遵守 Von-Mises 屈服准则。



(a) Steel model (b) CFRP sheet

图 4 CFRP 的材料模型

Fig. 4 CFRP sheet

1.3 CFRP 布的材料模型

根据以往的研究，CFRP 布与混凝土的粘结层的强度与 CFRP 相比很小可以忽略不计，尽管粘结作用对 CFRP 布与混凝土的共同工作非常重要，特别对于受弯构件。研究中假定剪切加固用 CFRP 布与混凝土有良好的粘结；CFRP 布是各向异性且不能承担压力、弯矩的材料，只能承担纵向拉力。在 CFRP 布破断之前是完全弹性，其力学模型如图 4(b) 所示。根据实验，CFRP 布的极限拉伸量为 5%，并且破断后其强度完全消失。

2 RC 柱的实验概要及分析模型

2.1 RC 柱及其实验

研究中将日本石渡-市川的 CFRP 布加固 RC 柱作为验证对象，实验旨在研究 CFRP 布的抗震加固性能[13]。进行了一个 RC 柱、两个外贴 CFRP 布加固的 RC 柱（表 1）的纯剪实验。RC 柱的详细尺寸、配筋及 CFRP 布加固形式如图 5 所示。混凝土的抗压强度为 25.5 MPa，最大强度时的压应变为 0.231，弹性模量为 2.733×10^4 MPa。钢筋 $D10$、$D22$ 的屈服强度分别为 307.0、390.0 MPa，弹性模量分别为 1.76×10^5、2.01×10^5 MPa。

表 1 试件特性

Table 1 Characteristics of specimens

Specimen	Main bars	Hoop steels	CFRP sheets	
			Layers	Ratio (%)
A				
B	12-Φ22	Φ10 @200	One	0.07
C			Two	0.13

Section: 500 mm ×500 mm; Height of columns: 1500 mm; Shear span ratio: 1.50; Axial force ratio: $\frac{N}{f_c bh}=0.2$; @: Inter-distance.

层间变形角 1/400 时柱 A 出现剪切裂缝；层间变形角 1/200 时达到其最大承载力，并且对角线方向的剪切裂缝发展并展开，柱子突然发生破坏，柱 A 的主筋没有屈服。柱 B、柱 C 的 CFRP 布在整个加载过程中没有发生破断现象，最后由于柱脚混凝土受压崩裂而破坏。柱 A、柱 B、柱 C 的荷载-变形特性如图 6 所示，最大承载力分别为 624、800、836 kN。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

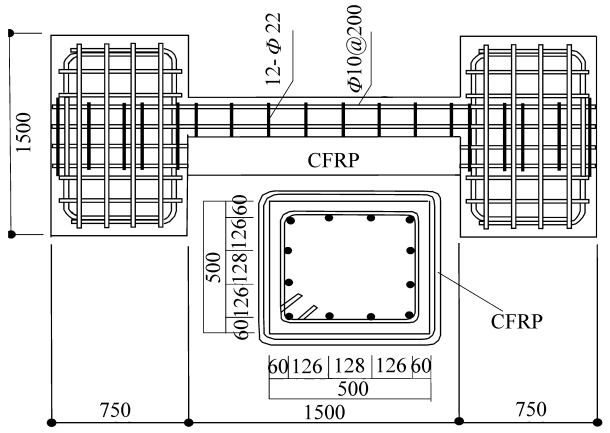


图 5　试件尺寸、配筋及加固形式（单位：mm）

Fig. 5　The detail of specimens (Unit: mm)

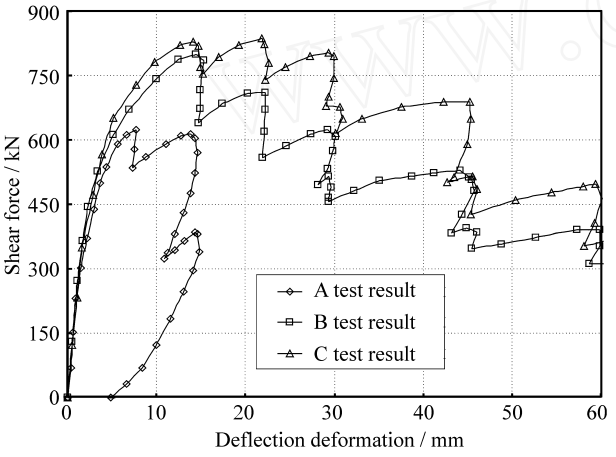


图 6　实验结果

Fig. 6　Test results

2.2　有限元分析模型

混凝土采用平面应力单元来模拟，主筋采用桁架单元、箍筋与 CFRP 布采用积层单元，假定钢筋与混凝土完全粘结而不考虑与混凝土间的粘结滑移。试件的要素划分、边界条件和加力方法见图 7。柱底部用 y 反方向的定向支座约束，柱头用 x 方向的定向支座约束。二维有限元分析中采用单调加载，即在 x 方向加单调水平荷载直到破坏。

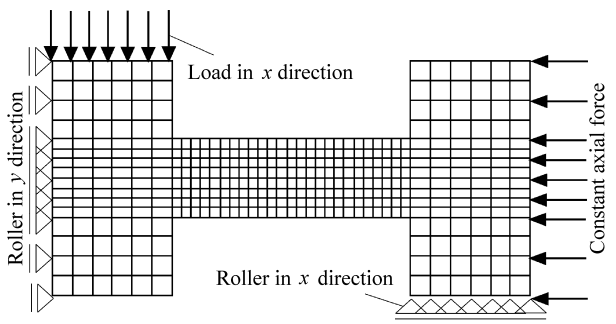


图 7　单元划分及边界条件

Fig. 7　Mesh and boundary condition

3　分析结果及讨论

为了分析和验证上述混凝土、钢筋以及 CFRP 布的本构关系和材料模型，对 3 个 RC 柱进行了二维有限元参数分析，其分析参数如表 2 所示。

表 2　二维有限元分析中应用的混凝土模型

Table 2　Concrete models applied in 2D-FEA

Items	Constitutive model	Compressive model	Failure criteria	Decrease of strength	Crack model
Crack model	Vecchio, Collions total strain model	Parabola model (G_f = 50 kNm)	No	No	Rotating
			No	No	Fixed
Constitutive model and compressive model	Darwin, Pecknold's equivalent uniaxial strain model	Saenz equation	Yes	Yes	Rotating
	Vecchio, Collions' total strain model	1. Saenz equation 2. Parabola model (G_f = 50 kNm) 3. JSCE equation	No	No	Rotating

3.1　荷载-变形关系

3.1.1　裂缝模型和破坏准则对分析结果的影响

如图 8 所示，分别表示采用旋转裂缝模型、固定裂缝模型以及混凝土压缩时采用 Vecchio，Collions 的全应变模型、Saenz 模型时，柱 A、柱 B、柱 C 的荷载-变形的分析结果，且采用固定裂缝模型时开裂后剪切模量的残余系数取 1 %。与实验值比较可知：(1) 在混凝土采用相同的压缩模型时，旋转、固定裂缝模型对柱的最大承载力影响较小；由于最大承载力后裂缝开展更加显著，使不同裂缝属性对承载力降低的影响更加明显，从而导致在下降段出现不同的特性。(2) 应用两种压缩模型，除了无加固的 RC 柱 A 外柱 B、柱 C 承载力的分析值与实验值的误差较大，特别是应用 Saenz 模型的情况。(3) 在应用全应变模型时，无加固的 RC 柱在最大承载力后与实验结果相差较大，经研究分析认为是采用分布裂缝模型，使得裂缝在单元内分布趋于均匀，无法再现混凝土局部裂缝展开后迅速失效的特性所致。

由于没有考虑箍筋、CFRP 布的横向约束作用，柱的最大承载力与实验值存在一定的差异，特别是有CFRP布加固对混凝土的横向约束的差异

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

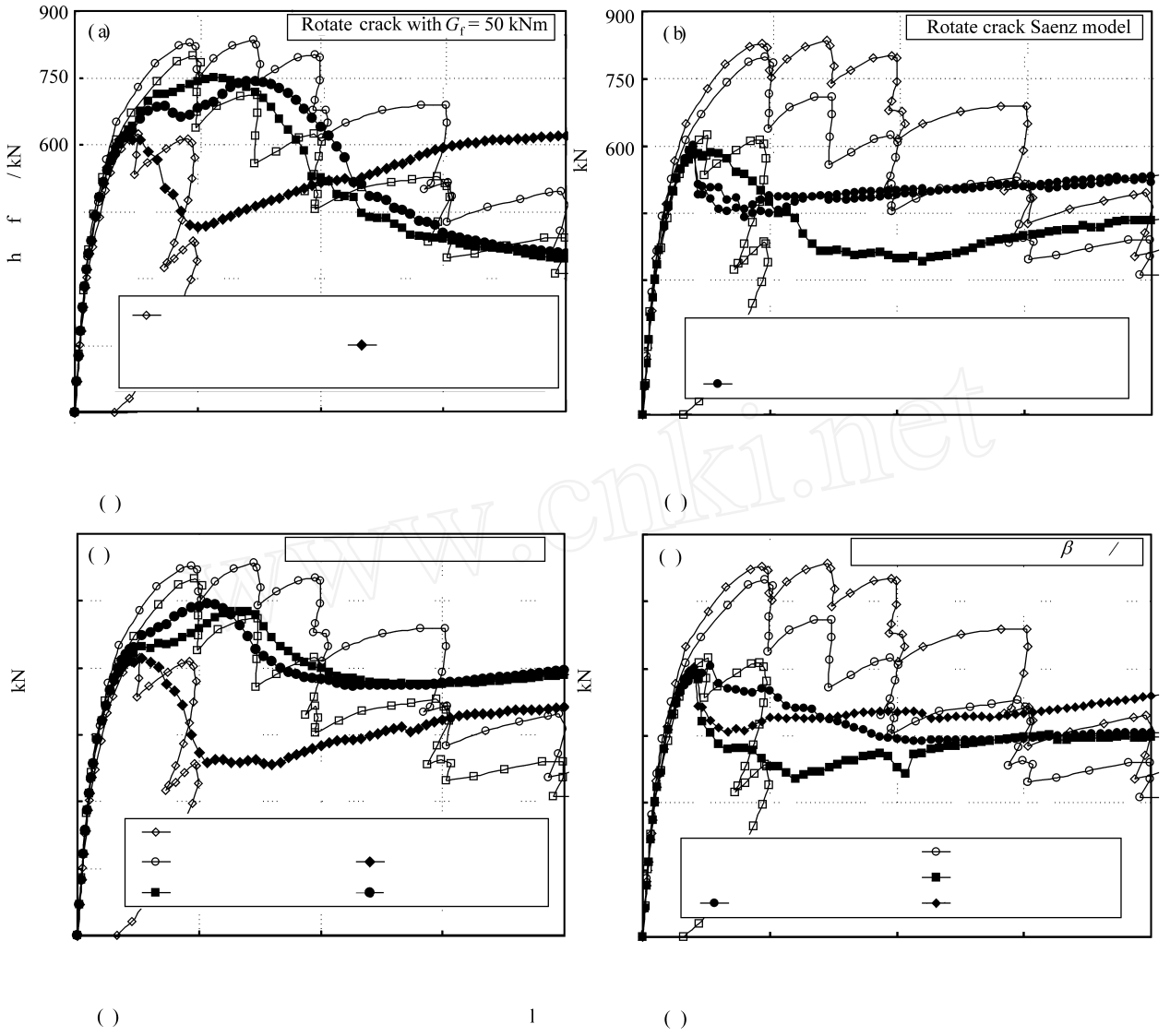


图 8　裂缝模型和本构模型的考察

Fig. 8　Investigations on crack models and constitutive models

较大。所以，承载力分析中必须考虑横向约束对承载力和延性的影响，而裂缝模型对最大承载力的影响不是特别明显。

3.1.2　本构关系对分析结果的影响

采用全应变本构模型和 Sargin 压缩模型且系数 $D=0$、$A=2$ 即 JCSE 模型所得的荷载-变形关系如图 9 所示，无加固 RC 柱 A 最大承载力的分析结果与实验值符合较好，但是在水平位移大于 30 mm 后，承载力的降低有一定的回复现象。CFRP 布加固的柱 B、柱 C 的最大承载力基本上没有差别，并且最大承载力后没有出现承载力降低现象；只在最大承载力达到之前，柱 B 的承载力的分析值出现一些波动。

采用 Darwin-Pecknold 等价一轴应变模型和 Seanz 压缩模型时的分析结果如图 10 所示。3 个柱子的最大承载力、延性的变化情况与实验值符合较好。

将图 8、图 9、图 10 所示结果与实验结果相比较，可以得出采用 Darwin-Pecknold 等价一轴应变模型且考虑箍筋、CFRP 布的横向约束作用时，分析结果能较好地模拟和再现 RC 柱、CFRP 布抗震加固 RC 柱的荷载-变形关系。

3.2　抗震加固性能的探讨

为了比较和评价 CFRP 布的抗震加固性能，基于实验研究和有限元分析，本文作者对加固前后 RC 柱的承载力、变形和破坏特性进行了探讨。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

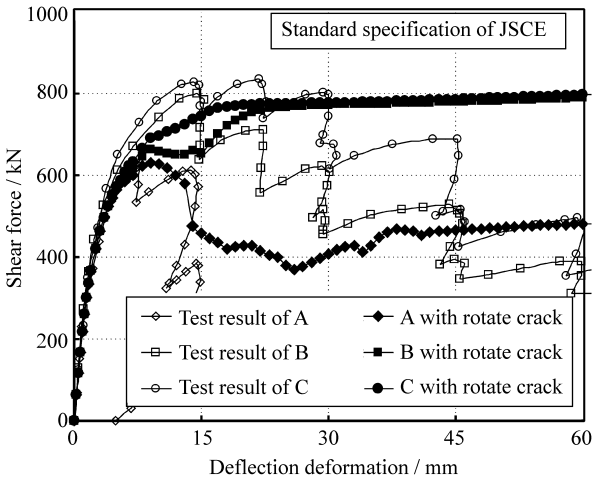


图 9　JSCE 模型的分析结果

Fig. 9　Results using JSCE model

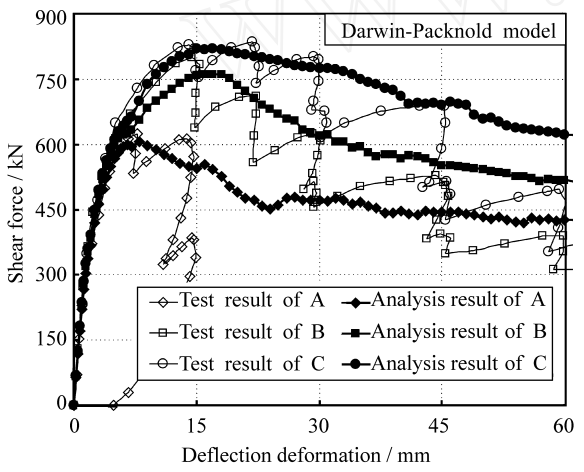


图 10　JSCE 模型的分析结果

Fig. 10　Results using Darwin-Pecknold model

3.2.1　荷载-水平变形的关系

柱 A、柱 B、柱 C 的最大承载力的实验值分别为 624、800、836 kN，而有限元分析得到的最大承载力(图 10)分别为 606.25、761.65、812.3 kN，分析结果与实验结果符合较好；而且 CFRP 布加固后 RC 柱的最大承载力、延性得到较大地改善，所以，CFRP 布对 RC 柱的抗震加固十分有效。

3.2.2　RC 柱的变形特点

根据实验结果，CFRP 布加固后柱破坏模式由柱 A 的剪切破坏变成柱 B、柱 C 的弯曲破坏，而且 RC 柱的承载力得到较大提高。为了探讨 RC 柱的破坏模式，对 3 个柱子的变形特点、主压应力和主拉应变的分布及发展情况进行了研究，见图 11。其中 Disp. 1、Disp. 3 和 Disp. 4 分别表示柱 A 最大强度时的层间位移、柱子的层间位移 30.0 mm 和 50.0 mm，Disp. 2 表示柱 B 和柱 C 最大强度时的层间位移，图中 RC 柱的变形比例是 15。在承载力增大过程中，很明显柱 A 主要是剪切变形，而柱 B、柱 C 主要以弯曲变形为主，这些与实验中 RC 柱及 CFRP 布加固 RC 柱的破坏模式相符。

从图 11(a)可知，加载过程中 3 个柱的右上到左下对角线方向形成压应力流，即称混凝土压杆。在层间位移到达 Disp. 3 之前，柱 A 的主压应力在对角线方向形成；但是，当层间位移得到约 Disp. 4 时，对角线方向的混凝土在拉、压、剪的复杂状态下发生抗压破坏并逐步劣化，从而随着压应力向量的减小，对角线方向的混凝土压杆变弱。与柱 A 相比，在整个加载过程中，柱 B、柱 C 对

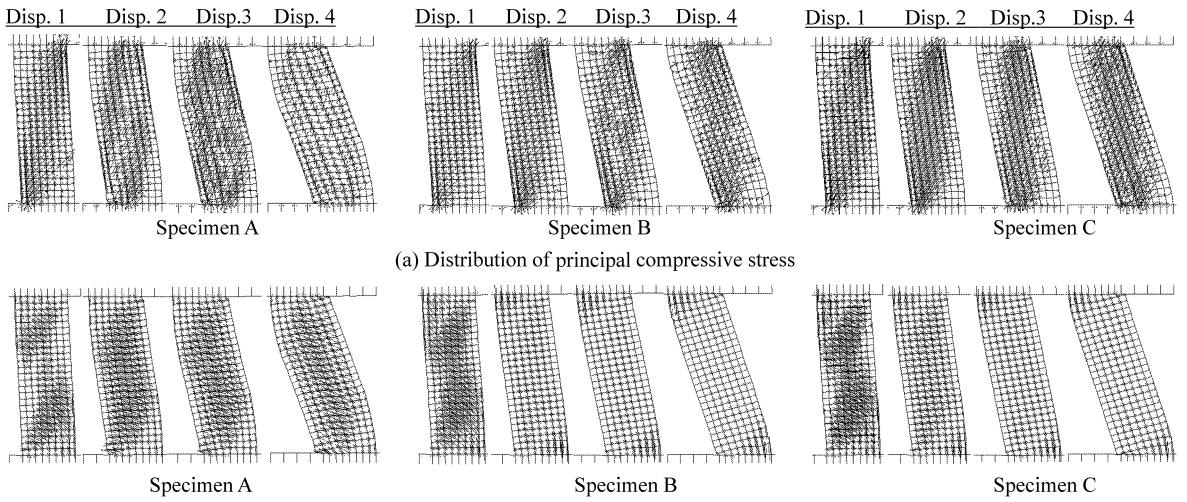


图 11　不同水平变形时 RC 柱的变形特点

Fig. 11　Deformation of columns in different lateral deflections

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

角线上的压应力流发展较好，并基本上没有发生压坏的现象，所以混凝土压杆一直保持到加载结束；且从柱 B、柱 C 的压应力分布比较可知，柱 C 比柱 B 均一，所以柱 C 的承载力降低得比柱 B 缓慢。

从图 11(b) 可知，随着层间位移的增加，3 个柱的左上到右下对角线方向的主拉应变分布也随着变化。在层间平位移达到 Disp. 1 前，最大拉应变出现沿对角线上 45°方向；而且，在应用 CFRP 布加固后的柱主拉应变的发展发生变化。柱 A 的主拉应变一直是沿着对角线方向发展，柱 B、柱 C 的主拉应变开始是沿着对角线方向，并随着层间位移的增加，主拉应变逐渐变小，但是柱端部受拉区的主拉应变则增大较快并远远大于柱 A 端部的主拉应变；最后，柱 A 的变形为集中在柱的对角线方向的拉压剪变形，而柱 B、柱 C 的变形为集中在柱端的拉应变与压应变(发生塑性铰转动)。

基于以上对柱子变形特性、主压应力和主拉应变的特性，可以得出柱 A 为剪切破坏，而 CFRP 布加固的柱 B、柱 C 为弯曲破坏。

3.2.3 应力-应变的发展过程

为了对 CFRP 布抗震加固的有效性进行定量的评价，有必要对加固前后柱反弯点、端部的受压区和受拉区的应力-应变的发展过程进行考察。

(1) RC 柱反弯点处应力-应变的发展

如图 12 所示，随着层间位移的增加，柱 A 反弯点中心处剪应变 γ_{xy} 不断发展并且最大达到 0.024。而柱 B、柱 C 剪应变的发展在加载初期与柱 A 相同；当层间位移达到 10 mm 后，柱 B、柱 C 的剪应变发展非常缓慢；而且当层间位移达到 20 mm后，进一步几乎不变，其最大剪应变为 0.00523、0.00428，分别是柱A的21.8%、17.8%；

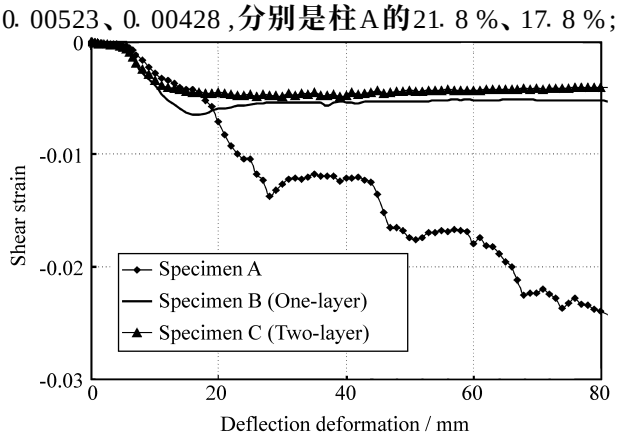


图 12 反弯点处剪应变的发展

Fig. 12 Processes of shear strains in inflection point

同时也可知柱 B 的剪应变略大于柱 C。所以，CFRP 布能够有效地抑制反弯点处剪应变的发展，并且与 CFRP 布的加固量相对应。

根据本文中分析模型，箍筋与 CFRP 布与混凝土是完全粘结的，所以反弯点处 x 方向的应变可以认为与箍筋及 CFRP 布的拉应变是一致的。如图 13 所示。随着层间位移的增加，柱 A 反弯点处的拉应变增加较快，达到 0.04 并超过箍筋的极限拉应变，这与实验中斜向裂缝出现、变宽并发生剪切破坏的现象相符。但柱 B、柱 C 的最大拉应变却只达到 0.00802、0.00567，所以 CFRP 布的拉应变远小于其破断应变 0.015，与实验中纤维没有破断相符。

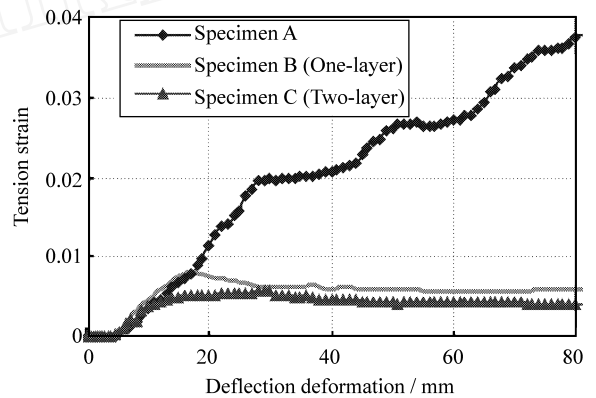


图 13 反弯点处拉应变的发展

Fig. 13 Processes of tensile strains in inflection point

(2) RC 柱脚受压区应力-应变的发展

在验证分析中，假定主筋与混凝土完全粘结，y 方向的压应变可认为是主筋的压应变。从图 14 可知，混凝土和主筋的压应变随着荷载的增加而增加；由于横向约束减小，与剪应变的发展相似因而柱 A 压应变的发展比柱 B、柱 C 快，并且柱 B 的压应变发展比柱 C 快。

如图 15 所示，最大承载力后柱 A 受压区的横向拉应变发展较快。在使用 CFRP 布加固后，混凝土的横向应变被抑制，在整个加载过程中变得很小并且几乎是常数。由图中可知柱 B、柱 C 的 CFRP 布的最大拉应变分别为 0.0051、0.0037，小于其极限破断应变。这也与实验中受压区纤维布没有破断相符。

(3) RC 柱脚受拉区拉应变的发展

根据 2D-FEA 可知，达到最大承载力之前柱 A 受拉区的主筋的拉应变发展缓慢，并且在整个加载

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

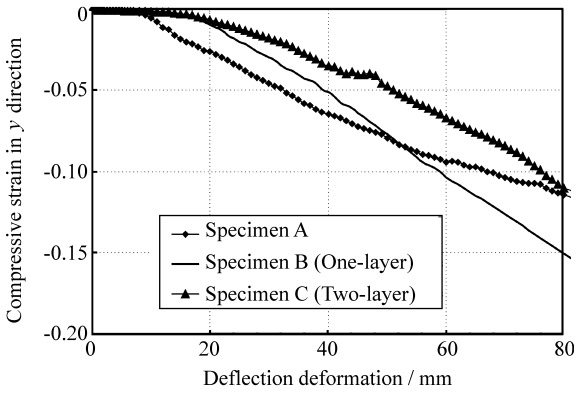


图 14　受压区压应变的发展

Fig. 14　Processes of tensile strains in compressive zone

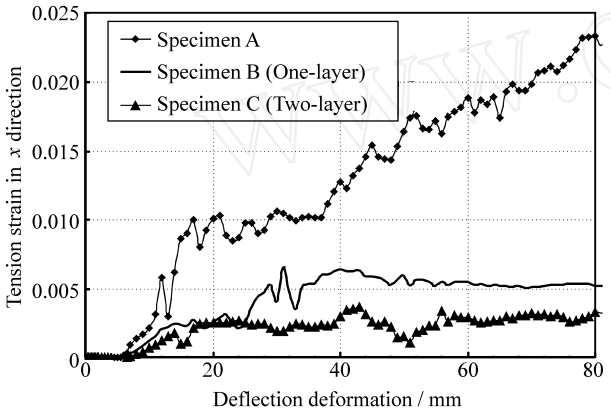


图 15　受压区拉应变的发展

Fig. 15　Processes of compressive strains in compressive zone

过程中均小于其屈服应变；最大承载力后拉应变的发展更慢并几乎保持不变。但是，柱 B、柱 C 主筋的拉应变在层间位移达到 16 mm 后发展较快并大于柱 A 的拉应变，最后发生受拉屈服。

4　结　论

基于上述对 CFRP 布进行 RC 柱抗震加固的定量分析及分析模型的探讨，可以得出以下结论：

(1) 当合理选择材料的本构模型时，二维非线性有限元分析得到的层间剪力-位移曲线与实验结构符合较好；同时，RC 柱的抗震抗压性能通过二维有限元来模拟。

(2) Darwin，Pecknold 的等价一轴应变模型能够较好地模拟 RC 柱的非线性特性。

(3) 为了更加精确地模拟 RC 柱及 CFRP 布加固 RC 柱的非线性特性，有必要考虑二轴应力下的破坏准则、箍筋及 CFRP 布的横向约束和开裂后混凝土抗压强度的降低。

(4) 实验和理论分析均验证 CFRP 布进行 RC 抗震加固是十分有效的，既可以提高柱子的抗剪承载力，同时使 RC 柱的破坏模式由柱 A 的剪切破坏转变为柱 B、柱 C 的弯曲破坏。

参考文献：

[1] Darwin D, Pecknold D A W. Inelastic model for cyclic biaxial loading of reinforced concrete [R]. The NSF, University of Illinois, 1974.

[2] DIANA User's Manual: Nonlinear Analysis [M]. Release 7. Delf: TNO Building Construction Research, 1999. 327 - 343.

[3] Sargin M. Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections [R]. Ontario: University of Waterloo, 1971.

[4] Saenz L P. Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete [J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1964, 61(9), 1229 - 1235.

[5] Sato T, Shirai N. A study on the elastic and inelastic performance of RC seismic wall [A]. In: Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure Ⅱ [C]. Kinki: Architechural Institute of Japan, 1978. 576 - 577.

[6] Zhang D C. Finite element analysis on shear performance of reinforced concrete structure subjected to the seismic loads [D]. Japan: Chiba University, 2003.

[7] Rots J G. Computational modeling of concrete fracture [D]. Delf: Delft University of Technology, 1988.

[8] Willam K J, Pramomno E, Sture S. Fundamental issues of smeared crack models [A]. In: Shah S P, Swartz S C, eds. Proc SEM/RILEM Int Conf Fracture of Concrete and Rocks [C]. New York: Springer Verlag, 1987. 141 - 157.

[9] Kupfer H B, Hilsdorf H K, Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1969, 66(8): 656 - 666.

[10] Japan Society of Civil Engineering. Standard Specification for Concrete Structure —2002 [S]. Japan, 2002.

[11] Park R, Nigel Priestley M J, Gill W D. Ductility of square-confined concrete columns [J]. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1982, 108(ST4): 929 - 950.

[12] Hamada S, Noguchi H. Basic experiment about compressive characteristic damage of cracked concrete [A]. In: Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure Ⅱ [C]. Kanto: Arohitechtural Institute of Japan, 1988. 397 - 399.

[13] Ishiwatari K, Itikawa K, Nakashima E, *et al*. Experimental study on seismic strengthening of RC columns strengthened with GFRP and CFRP sheets [A]. In: Proceedings of Japan Concrete Institutie (Vol 21, No 3) [C]. Sendai: Japan Concrete Institute, 1999. 1405 - 1410.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net