

CFRP 约束混凝土圆柱轴心受压力学性能分析

梁 猛,董 伟,易富民,吴智敏

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116023)

摘 要:采用基于非相关联流动法则的混凝土 Drucker-Prager 模型,对碳纤维增强复合材料(CFRP)约束混凝土圆柱的轴压受力性能进行了非线性有限元计算,分析了 CFRP 厚度、CFRP 缠绕角度和混凝土强度 3 种因素对柱轴压力学性能的影响。结果表明:采用非相关联流动法则计算得到的数值结果与试验结果吻合良好;随 CFRP 厚度增加,柱的极限压应力和压应变均增大;CFRP 环向缠绕比成角度缠绕的混凝土柱能获得更大的极限压应力;混凝土强度越低,CFRP 的约束效率越高。

关键词:CFRP;混凝土;圆柱;非相关联流动法则;Drucker-Prager 模型;力学性能

中图分类号:TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0036-06

Mechanical Properties of Concrete Cylinders Confined with CFRP Sheets Subjected to Axial Compression

LIANG Meng, DONG Wei, Yi Fu-min, WU Zhi-min

(The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, P. R. China)

Abstract: Based on Drucker-Prager criterion with non-associated flow rule, numerical analysis of mechanical properties of concrete cylinders were carried out by using non-linear finite element method. The effect caused by various parameters such as wrap thickness, fiber orientation and concrete strength on axial mechanical properties of concrete cylinders is discussed. The results show that the results calculated by non-associated flow rule conform to that in the test. It is demonstrated that there is significant enhancement both in compressive strength and ductility of cylinders with the increase of wrap thickness. Moreover, the gain in axial compressive strength is observed to be higher for lower strength concrete and be highest in the cylinders wrapped with the hoop orientation.

Key words: CFRP; concrete; cylinders; non-associated flow rule; Drucker-Prager model; mechanical property

近年来,纤维增强复合材料(简称 FRP)因其高比强度、良好的耐腐蚀性和施工简便等优点已被广泛应用于既有混凝土结构的加固和修复工程中。其中,碳纤维材料(CFRP)是修复工程中常用的复合材料,而利用 CFRP 包裹混凝土柱以提高柱轴向承载力是较广泛的一种应用。

目前,已对 CFRP 约束混凝土柱轴压力学性能进行了大量的试验研究^[1-9,11,17,22],也有学者基于

Drucker-Prager 模型(以下简称 D-P 模型)进行了数值分析^[5-11]。采用 D-P 模型进行数值计算过程中,不同学者分别采用相关联流动法则和非相关联流动法则来描述混凝土的塑性流动状态。Yeh 等^[5-6]采用了基于相关联流动法则的 D-P 模型,但只考虑了 CFRP 环向包裹的情况。章文皇^[7]、杨诗蔚^[8]和杨婉倩^[9]等也采用了相关联流动法则的 D-P 模型,从 3 位学者的数值计算结果来看,虽然混凝土柱的抗

收稿日期:2010-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(50578025)

作者简介:梁猛(1978-),男,博士生,主要从事混凝土结构加固研究,(E-mail) liangmeng78@yahoo.com.cn。

压强度计算值与各自的试验值差别不大,但轴向应变明显偏大,对混凝土柱的轴向变形情况模拟不够准确。Mirmiran等^[10]和Sadeghian等^[11]均基于非相关联流动法则的D-P模型,对CFRP约束混凝土柱轴压力学性能进行了数值计算,但在模型中将混凝土参数剪胀角均取为0,这与约束混凝土的膨胀特性有一定程度的不符,因为混凝土柱受不同厚度CFRP约束时的剪胀程度是不同的,剪胀角均取值为0说明不同约束程度却导致混凝土相同的剪胀性是不合理的。

采用非相关联流动法则来描述混凝土的塑性流动状态。根据塑性势理论,相关联流动法则认为混凝土的屈服面和塑性势面重合,而非相关联流动法则是把混凝土的屈服函数和塑性势函数分开考虑,认为混凝土的塑性流动不沿着加载面的法向方向。由塑性势理论和部分学者的数值研究工作^[5-9]可知,应用相关联流动法则一般是出于数值计算简化的考虑,而非相关联流动法则能够更好地描述混凝土的受力和变形状态。为了更准确和全面地模拟CFRP约束混凝土圆柱的轴压力学性能,该文应用ABAQUS有限元软件中的混凝土扩展线性D-P模型^[12]和非相关联流动法则,对CFRP约束混凝土圆柱进行了非线性有限元分析,并与试验结果^[13]做了对比验证。在此基础上,基于该文建立的数值模型,讨论了外包CFRP厚度、缠绕角度和混凝土强度3种因素对CFRP约束混凝土圆柱轴压力学性能的影响。

1 材料本构模型

1.1 混凝土屈服准则(扩展线性D-P模型)

扩展线性D-P模型^[12]在子午面上的屈服轨迹见图1.2节中的图1,屈服准则表达式为

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

式中, p 为等效压应力, $p = -\text{trace}(\sigma)/3$; β 为线性屈服轨迹在 $p-t$ 平面上的倾角,通常指材料的摩擦角; d 为材料的粘聚力,其值与混凝土单轴压缩硬化参数 σ_c 有关, $d = [1 - (\frac{1}{3})\tan \beta]\sigma_c$; t 为偏应力参数,定义见式(2):

$$t = \frac{1}{2}q[1 + \frac{1}{K} - (1 - \frac{1}{K})(\frac{r}{q})^3] \quad (2)$$

式中, q 为Mises等效应力, $q = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}S_{ij}}$, $r = q \cdot (\cos 3\theta)^{\frac{1}{3}} = [\frac{9}{2}S_{ij}S_{jk}S_{ki}]^{\frac{1}{3}}$, θ 为 π 平面上的罗德角, S_{ij} 为偏应力张量。

1.2 非相关联流动法则

在扩展线性D-P模型中,塑性流动势函数表达式为^[12]

$$G = t - p \tan \psi \quad (3)$$

式中, ψ 为 $p-t$ 平面上的剪胀角。

为较准确地描述约束混凝土在多轴受力状态下的轴压受力性能,采用非相关联流动法则,则塑性应变增量矢量的方向与屈服面的法向方向不一致,即屈服面与塑性势面不重合,或屈服函数 F 与塑性势函数 G 不相等^[24],在ABAQUS程序计算中表现为内摩擦角 β 不等于剪胀角 ψ (2种角度取值详见3.1节),数学表达式见式(4),在 $p-t$ 平面上的几何描述如图1所示。

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \neq d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

式中, $d\lambda$ 是一个非负的比例系数。

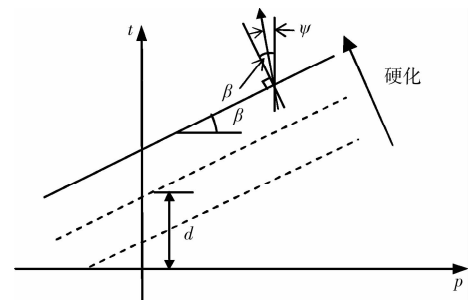


图1 线性D-P模型在 $p-t$ 平面上强化和流动的几何描述

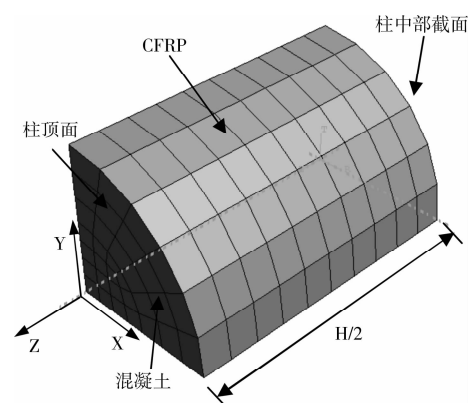


图2 有限元计算模型

1.3 CFRP的应力应变关系

该文采用的CFRP是单向纤维,为正交各向异性材料,沿纤维方向的应力-应变关系为线弹性关系。纤维方向和垂直纤维方向的弹性模量均取自文献^[13]中的试验数据。

2 有限元模型

根据对称性,取圆柱的上部 1/8 柱体建立模型,如图 2 所示,在对称面上加载边界对称条件:YZ 平面 $u = 0$,XZ 平面 $v = 0$,柱中部截面 $w = 0$;柱的上表面 XY 面,在 X 和 Y 方向进行约束 $u = v = 0$,允许 Z 方向位移自由。将柱上表面所有节点设置成一个集合统一加载,加载方式采用位移控制。

为了更准确地模拟 CFRP 的平面受力的状态,CFRP 采用 4 节点减缩积分的四边形膜单元 (M3D4R)。混凝土采用 8 节点减缩积分的六面体一次单元 (C3D8R)。假设混凝土和 CFRP 之间粘结良好^[14-15],程序中使用 tie 命令将混凝土单元和 CFRP 单元的节点整合。

3 数值算例验证

3.1 算例模型

采用上述建立的有限元模型,对文献[13]中关于 CFRP 约束混凝土圆柱轴压力学性能研究的试验结果进行数值验证。计算中采用的混凝土圆柱尺寸为 152.5 mm×305 mm(直径 D ×柱高 H),圆柱体抗压强度 f'_c 为 19.4 MPa,外包 CFRP 的弹模 E_{cfRP} 为 82.7 GPa,极限拉应变 ϵ_{cfRP} 为 0.027 5。由于圆柱外包的 CFRP 处于弯曲状态,且沿柱环向和轴向同

时承受荷载,CFRP 的环向极限拉应变比单轴受拉时有所降低,所以需要 CFRP 极限拉应变进行折减,根据 Teng 等^[16-17]的研究结果,CFRP 的极限拉应变可取为 $0.586 \epsilon_{\text{cfRP}} = 0.0161$ 。数值分析中,将上述折减后的 CFRP 极限拉应变作为计算的结束点。

ABAQUS 有限元计算中用到内摩擦角 β 和剪胀角 ψ 2 个混凝土参数。关于内摩擦角 β 和剪胀角 ψ 的取值该文采用 Eid 等^[18-19]建议的公式:

$$\beta = 50^\circ - 90\rho_{\text{evf}} \geq 32^\circ \quad (5)$$

$$\rho_{\text{evf}} = \frac{(f_{\text{rup}} t_{\text{frp}})}{(f_{\text{co}} r_c)} \quad (6)$$

$$\Psi = 30^\circ - 500 m_{\text{fl}} \geq -20^\circ \quad (7)$$

$$m_{\text{fl}} = \frac{(E_{\text{frp}} t_{\text{frp}})}{(E_c r_c)} \quad (8)$$

式中, ρ_{evf} 和 m_{fl} 分别为 CFRP 约束混凝土柱的侧向约束比和侧向刚度比, t_{frp} 、 E_{frp} 和 f_{rup} 分别为 CFRP 的厚度、弹模和极限拉应力, r_c 、 E_c 和 f_{co} 分别为混凝土圆柱的半径、弹模和未约束混凝土的抗压强度。

由式(5)–(8)可以看出,内摩擦角 β 和剪胀角 ψ 均与混凝土受到的约束强弱有关,式(7)和(8)说明混凝土的塑性流动能力随约束的增强而减弱。通过式(5)–(8)的计算可得:当 CFRP 层数为 1~5 层时,该文的混凝土内摩擦角 β 均取 32° ,剪胀角 ψ 随 CFRP 层数增加分别取 18° 、 10.5° 、 3° 、 -4° 和 -11.5° 。

表 1 材料参数和柱轴向极限压应力计算结果

混凝土 材料参数	CFRP 层数	CFRP 厚度/ mm	轴向极限压应力 f_{cc} / MPa			误差 / %	
			试验	相关联	非相关联	相关联	非相关联
152.5 mm×305 mm (直径 D ×柱高 H) $f'_c = 19.4$ MPa $E_c = 16.4$ GPa	1	0.360	33.8	32.9	33.5	2.7	0.9
	2	0.584	46.4	49.6	44.7	6.9	3.7
	3	0.813	62.6	53.2	55.8	15.0	6.1
	4	1.028	75.7	63.2	69.8	16.5	7.8
	5	1.250	80.2	73.4	80.6	8.5	0.5

注:粘贴多层 CFRP 时,层间的和 CFRP 纤维中的部分浸渍胶会被挤出,所以多层 CFRP 厚度并不是单层厚度乘以层数。

3.2 计算结果与分析

CFRP 约束混凝土圆柱数值计算结果与试验结果对比见表 1 和表 2。由表 1 可知,采用相关联和非相关联流动法则计算得出的柱轴向极限压应力,对于不同层数 CFRP 的约束柱,计算值与试验值比较得到的误差(以下简称误差)最大分别为 16.5% 和 7.8%。由表 2 可见,采用非相关联流动法则计算的柱轴向极限压应变,误差最大为 11.9%,而相关联流动法则的误差范围在 40%~70%之间。显然,采用非相关联流动法则计算得到的圆柱轴向极限压应力和压应变更接近试验值,计算的结果更准确。

图 3 为混凝土圆柱外包 $n = 1 \sim 5$ 层 CFRP 的有限元计算与试验得到的轴向和侧向应力-应变关系曲线,其中有限元计算采用了相关联和非相关联两种流动法则(图 3 中分别简称为“关联”和“非关联”)。虽然由相关联和非相关联流动法则分别计算的侧向极限应变比试验结果略大,但由非相关联流动法则计算得到的轴向极限应力和应变与试验值吻合得更好。因此,该文采用的基于非联合流动法则的扩展线性 D-P 模型可以较好地模拟 CFRP 约束混凝土圆柱的轴心受压性能。

表 2 材料参数和柱轴向极限压应变计算结果

混凝土材料参数	CFRP 层数	CFRP 厚度 / mm	轴向极限压应变 ϵ_{cc}			误差 / %	
			试验	相关联	非相关联	相关联	非相关联
152.5 mm × 305 mm (D × H) $f'_c = 19.4$ MPa $E_c = 16.4$ GPa	1	0.360	0.017 5	0.009 7	0.017 1	44.6	2.3
	2	0.584	0.024 7	0.012 9	0.022 1	47.8	10.5
	3	0.813	0.029 3	0.011 3	0.025 8	61.4	11.9
	4	1.028	0.040 0	0.011 9	0.035 6	70.2	11.0
	5	1.250	0.034 5	0.012 6	0.034 2	63.5	0.9

注:多层 CFRP 厚度见表 1 注释。

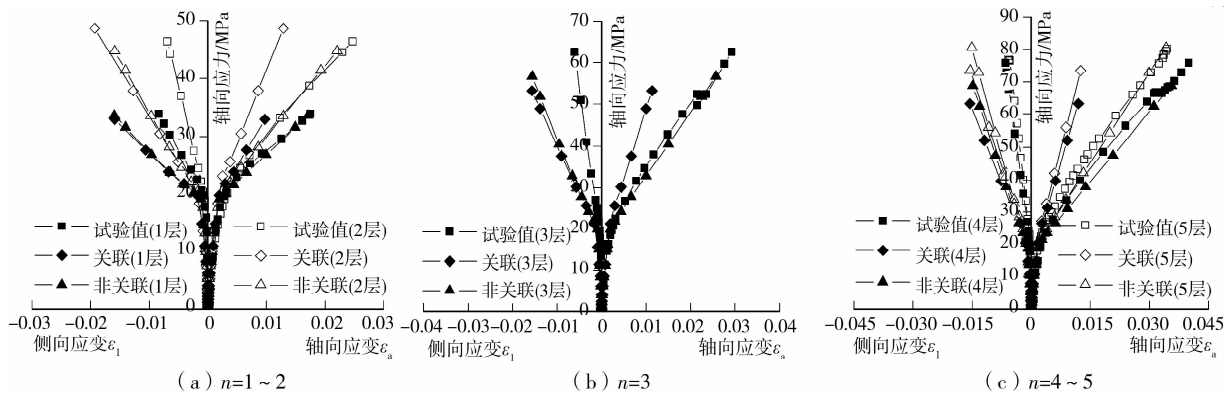


图 3 外包 n=1~5 层 CFRP 柱应力-应变曲线

4 约束混凝土参数研究

采用扩展线性 D-P 模型和非相关联流动法则,分析 CFRP 厚度、CFRP 缠绕角度和混凝土强度等 3 种因素对柱轴压力学性能的影响。其中,混凝土圆柱尺寸及各种材料参数与 3.1 节相同。

4.1 CFRP 厚度

采用 CFRP 的层数分别取 1~5 层,不同层的厚度见表 1,环向包裹,数值模拟结果见图 4。由图 4 可知,随 CFRP 层数的增加,圆柱的轴向极限应力和应变均提高,而侧向极限应变变化不大。

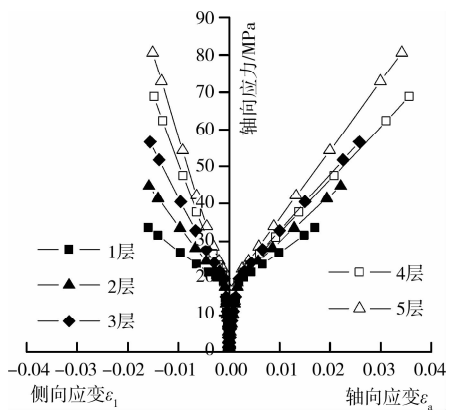


图 4 外包 n=1~5 层 CFRP 柱应力应变曲线计算结果

4.2 CFRP 缠绕角度

关于 CFRP 缠绕角度对混凝土圆柱轴压力学性

能的影响,Parvin 等^[20-21]采用基于 Mohr-Coulomb 破坏准则的有限元方法研究了玻璃纤维(GFRP)不同缠绕角度对混凝土柱轴压力学性能的影响,但 Parvin 等^[20]仅研究了 0°和 45°2 种缠绕角度,Parvin 等^[21]仅研究了 0°和 15°2 种缠绕角度。Sadeghian 等^[22]用试验方法研究了碳纤维(CFRP)不同角度缠绕的影响,试验中取了 0°、45°和 90°3 种角度。该文采用混凝土扩展线性 D-P 屈服准则和非相关联流动法则研究了碳纤维(CFRP)不同缠绕方向对 C20 混凝土圆柱轴压力学性能的影响。其中,包裹 CFRP 均为 2 层,CFRP 缠绕方向为 0°/0°、15°/-15°、30°/-30°和 45°/-45°4 种方向。由图 5 可知,环向(0°/0°)

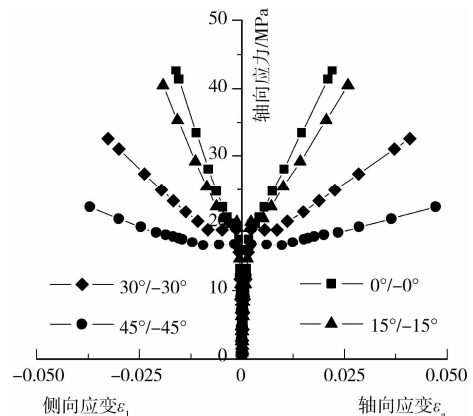


图 5 CFRP 不同方向缠绕柱应力应变关系

缠绕 CFRP 柱的极限压应力最大,而 $45^\circ/-45^\circ$ 方向缠绕柱的极限压应变最大,即延性最好。

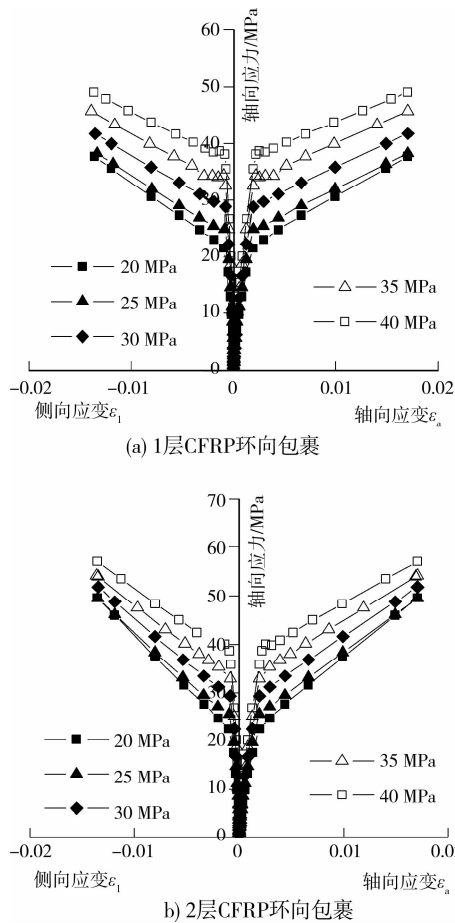


图 6 1 层和 2 层 CFRP 约束 $f'_c = 20 \sim 40$ MPa 混凝土柱的应力应变关系

4.3 混凝土强度

选择圆柱体抗压强度 $f'_c = 20$ MPa、25 MPa、30 MPa、35 MPa 和 40 MPa 共 5 种强度的混凝土进行研究,初始弹性模量按美国混凝土协会规程 ACI Committee 318(ACI 318-2005)确定,即:

$$E_{ci} = 4730 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

受压混凝土本构关系采用 Carreira 和 Chu^[23] 的计算模型,表达式如下:

$$\sigma_c = \frac{[f'_c \gamma (\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c})]}{[\gamma - 1 + (\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c})^\gamma]} \quad (10)$$

式中, γ 是与初始弹模 E_{ci} 有关的函数, $\gamma = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{\epsilon'_c E_{ci}}}$, ϵ'_c 为峰值应力 f'_c 时的应变。

混凝土柱外包的复合材料为 CFRP,其材料参数与 3.1 节相同,层数为 1 层和 2 层,均为环向缠绕,模拟得到的应力-应变关系如图 6 所示。由图可

知,侧向约束相同的情况下,柱的应力-应变曲线第 2 段的斜率随混凝土强度的增加而减小,即混凝土强度越低,CFRP 约束混凝土柱的极限应力和应变提高的程度越高,柱刚度提高的程度越大。

5 结论

基于非相关塑性流动法则的混凝土扩展线性 D-P 模型,对 CFRP 约束混凝土圆柱的轴压受力性能进行了非线性有限元分析,并与试验结果进行对比验证,可得出以下结论:

1) 由非相关流动法则计算得到的结果与试验结果吻合良好。因此,采用非相关流动法则可较准确地分析 CFRP 约束混凝土圆柱的轴心受压力学性能。

2) 随 CFRP 厚度增加,混凝土圆柱的轴向极限应力和应变均增大,延性得到很大改善,而侧向极限应变变化不大。

3) CFRP 成角度缠绕对柱轴压力学性能有影响,环向($0^\circ/0^\circ$)缠绕 CFRP 柱的极限压应力最大,而 $45^\circ/-45^\circ$ 方向缠绕柱的极限压应力最小,但极限压应变最大,即延性最好。

4) 侧向约束相同的情况下,随混凝土强度降低,CFRP 约束效率反而提高,即 CFRP 约束混凝土柱的极限应力和应变提高的程度增加。

参考文献:

- [1] TOUTANJI H. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96 (3): 397-404.
- [2] XIAO Y, WU H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12 (2): 139-146.
- [3] 滕锦光, 陈建飞, ST 史密斯, 等. FRP 加固混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [4] 岳清瑞, 杨勇新. 复合材料在建筑加固、修复中的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] YEH F Y, CHANG K C. Confinement efficiency and size effect of FRP confined circular concrete columns [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 26 (2): 1-24.
- [6] 叶芳耀. 碳纤维束混凝土柱轴压强度与极限应变之影响因素研究[D]. 台北: 国立台湾大学土木工程学研究所, 2004.
- [7] 章文皇. 钢筋混凝土三轴拱围束效应用于补强柱受轴向及挠曲变形之探讨[D]. 台北: 国立中央大学土木工程

- 程学研究所, 2004.
- [8] 杨诗蔚. 碳纤维加劲复合材料管补强混凝土柱受轴压之非线性分析[D]. 台北:国立成功大学土木工程学研究所, 2007.
- [9] 杨婉倩. 复合材料围束混凝土柱受轴压之非线性行为分析[D]. 台北:国立成功大学土木工程学研究所, 2008.
- [10] MIRMIRAN A, ZAGERS K, YUAN W Q. Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2000 35(1): 79-96.
- [11] SADEGHIAN P, RAHAI A R. Numerical modeling of concrete cylinders confined with CFRP composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, 27(12): 1309-1321.
- [12] ABAQUS, ABAQUS/Standard User's Manual [M]. ABAQUS Inc; 2003.
- [13] SHAHAWY M, MIRMIRAN A, BEITELMAN T. Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2000, 31(6/7): 471-480.
- [14] 代兵, 侯景军. 外包纤维布加固混凝土轴心受压柱力学性能分析[J]. *工业建筑*, 2006, 36(S): 1028-1031.
DAI BING, HOU JING-JUN. The analysis of mechanics performance of strengthened concrete columns wrapped with FRP under axial compression [J]. *Industrial Construction*, 2006, 36(S): 1028-1031.
- [15] 黄艳, 亓路宽. FRP布约束混凝土圆柱轴心受压性能非线性有限元分析[J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(1): 46-50.
HUANG YAN, QI LU-KUAN. Nonlinear FEM analysis of circular concrete column confined with FRP under axial compression [J]. *China Railway Science*, 2008, 29(1): 46-50.
- [16] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6/7): 471-489.
- [17] LAM L, TENG J G. Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(6): 539-548.
- [18] EID R, PAULTRE P. Plasticity-based model for circular columns confined with fiber-composite sheets [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(12): 3301-3311.
- [19] EID R, DANCYGIER A N, PAULTRE P. Elastoplastic confinement model for circular concrete columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(12): 1821-1831.
- [20] PARVIN A, JAMWAL A S. Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders [J]. *Composite Structures*, 2005, 67(4): 437-442.
- [21] PARVIN A, JAMWAL A S. Performance of externally FRP reinforced columns for changes in angle and thickness of the wrap and concrete strength [J]. *Composite Structures*, 2006, 73(4): 451 - 457.
- [22] SADEGHIAN P, RAHAI A R, EHSANI M R. Effect of fiber orientation on compressive behavior of CFRP-confined concrete columns [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29(9): 1335-1346.
- [23] CARREIRA D J, CHU K H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression [J]. *ACI Journal*, 1985, 82(6): 797-804.
- [24] CHEN W F. *Plasticity in reinforced concrete* [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1982.

(编辑 胡 玲)