

文章编号:1673-2049(2006)01-0063-05

FRP 约束混凝土圆柱体轴心抗压强度研究

胡芳芳,刘伯权,王 步

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为确定纤维增强塑料(FRP)约束混凝土圆柱体轴心抗压强度的计算方法,以相关研究成果为基础,对具有代表性的 FRP 约束混凝土强度模型进行了对比分析,并将这些强度模型的计算值与已有的相关试验数据进行了比较,在此基础上,建立了改进的 FRP 约束混凝土圆柱体轴心抗压强度计算的简化模型。改进的 FRP 约束混凝土强度模型计算值与大量试验数据吻合良好,能够反映 FRP 约束混凝土的真实特性,研究成果可作为工程实践的参考依据。

关键词:纤维增强塑料;约束混凝土;约束效果;抗压强度

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

Study of Axial Compression for FRP Confined Concrete Circular Columns

HU Fang-fang, LIU Bo-quan, WANG Bu

(School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to confirm the calculating method of FRP confined concrete circular columns in engineering practice and based on relevant results of studies, authors analyzed the representational FRP confined concrete strength models and compared the value of these models with the data of relevant experiments, and then proposed an improved simplified model for calculating axial compressive strength of FRP confined columns. The value of this model could tally with the experimental results and could show the actual property of FRP confined concrete. The proposed model may be a reference for practical engineering.

Key words: FRP; confined concrete; confined effectiveness; compressive strength

0 引言

FRP 约束的混凝土圆柱体的轴心抗压强度是这种构件的基本力学性能之一,各国学者对其从试验理论模型方面进行了研究^[1-12],由于各公式和模型是基于各自的试验结果分析得到的,形式复杂,在工程应用中也有一定的局限性,因此笔者在前人试验的基础上对各强度模型进行对比分析,提出一个简便的数值计算方法,比较了计算结果与试验结果,所提出的公式计算简单,与试验结果吻合良好,在工程上有一定的实用价值。

1 破坏模型

FRP 约束混凝土主要通过 FRP 套箍对混凝土进行约束,迫使混凝土处于三向受压状态(图 1),从而达到提高混凝土强度的目的。从初始荷载阶段开始,由于 FRP 套箍的刚度、泊松比与混凝土的不同致使两者在环向变形上产生差异,混凝土变形大于 FRP 套箍变形,进而使两者相互挤压,生成约束应力。随着轴向荷载的增大,混凝土开始出现纵向裂缝,侧向应变较前一阶段快,加剧了 FRP 套箍与混凝土的挤压,约束应力逐步加大。当轴向荷载达到

极限荷载时,混凝土圆柱体的可能破坏模式有:FRP 达到极限抗拉强度破坏和核心混凝土达到极限抗压强度被压碎破坏。由于混凝土三向抗压强度较大,为了合理利用材料的性能,理想的且较合理的破坏模式为 FRP 纤维达到极限抗拉强度时,混凝土同时达到其极限抗压强度,最终导致整个构件的破坏。以下讨论基于这种破坏模式。

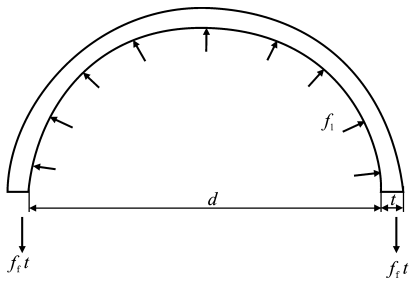


图 1 约束混凝土圆柱轴心受力

Fig. 1 Confined Concrete Circular Columns
Subjected to Axial Load

2 强度模型

目前 FRP 约束混凝土强度模型均由公式(1)推导出^[13]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \tag{1}$$

式中: f'_{cc} 为有侧向压力约束的试件的轴心抗压强度; f'_{co} 为无侧向压力约束的试件的轴心抗压强度; k_1 为侧向应力系数; f_l 为环向约束应力, $f_l = 2f_{it}/d$, f_{it} 为 FRP 极限抗拉强度, t 为 FRP 复合材料壁厚度, d 为 FRP 复合材料外直径。 k_1 反映的是外包纤维对整个混凝土柱的轴向抗压强度的影响程度,各国学者对 k_1 进行了研究。笔者对过去几种具有代表性的 FRP 约束混凝土强度模型进行了归纳,见表 1。

3 试验数据分析

图 2~6 为约束混凝土强度计算模型对比。图 2~6 中曲线以层数为自变量,以根据各种强度模型计算所得的屈服应力为因变量。曲线基本分为 3 簇:Richart、Fardis 为一簇,主要基于静水压力约束混凝土试验结果;Cusson and Paultre、Karbhari 为一簇,主要基于 CFRP(碳纤维)约束混凝土试验结果;Toutanji 为一簇,主要基于 GFRP(玻璃纤维)约束填充混凝土试验结果。另外 Karbhari 计算模型所得结果介于 Richart 簇与 Toutanji 簇间。通过对计算结果和试验结果的比较及图 2~6 中的曲线可知:采用 Toutanji 簇模型计算会导致对约束效果的

过高估计,Richart 簇模型的计算值与大部分试验数

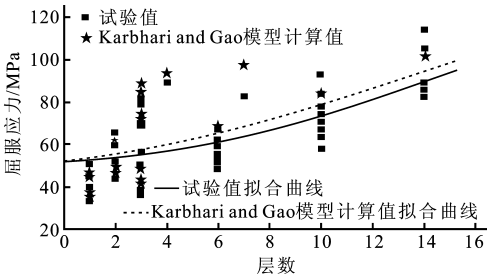


图 2 抗压强度试验值和 Karbhari and Gao 模型
Fig. 2 Test Value of Compressive Strength and
Karbhari and Gao Model

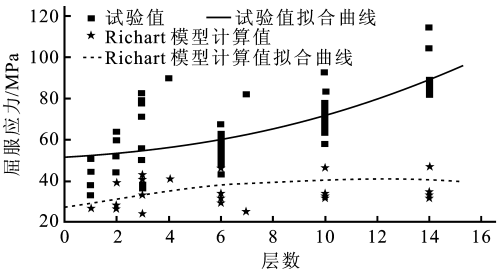


图 3 抗压强度试验值和 Richart 模型
Fig. 3 Test Value of Compressive Strength and
Richart Model

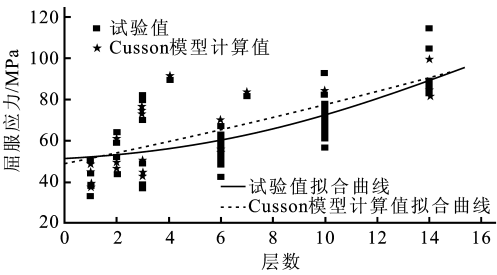


图 4 抗压强度试验值和 Cusson 模型
Fig. 4 Test Value of Compressive Strength and
Cusson Model

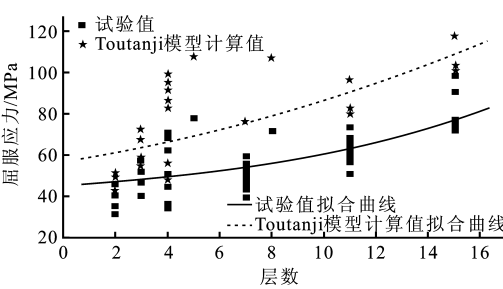


图 5 抗压强度试验值和 Toutanji 模型
Fig. 5 Test Value of Compressive Strength and
Toutanji Model

据相差较大,这 2 种模型在一定程度上存在较大偏差,与实际情况不太相符;Karbhari and Gao 模型的

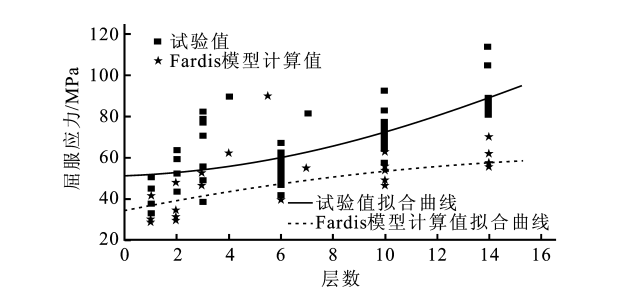


图 6 抗压强度试验值和 Fardis 模型

Fig. 6 Test Value of Compressive Strength and Fardis Model

计算值和试验值相比较其他的模型更为吻合,但是 Karbhari and Gao 模型较为复杂。

4 简化计算模型

从表 2 中可以看出:约束混凝土强度 f'_{cc} 和环向约束应力 f_1 存在一定的线性关系。表 2 中 d 、 f'_{co} 、 t 、 f_t 及 f'_{cc} 为各试验的原始数据,由式(1)得 $k_1 = \frac{f'_{cc}/f'_{co}-1}{f_1/f'_{co}}$,具体计算结果见表 2。

Karbhari and Gao 模型过于复杂,且吻合的程度也不是非常理想。根据数据分析中 k_1 的平均值及以前的研究成果, k_1 取 2.36,即 FRP 约束混凝土圆柱体轴心受压时强度计算模型为

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}=1+2.36 \frac{f_1}{f'_{co}} \tag{2}$$

式(2)计算值和试验值对比情况见图 7。从图 7 中可以看出:利用式(2)计算的约束混凝土圆柱体极限应力强度与试验值吻合良好,且计算简单,概念清楚,适合工程应用。

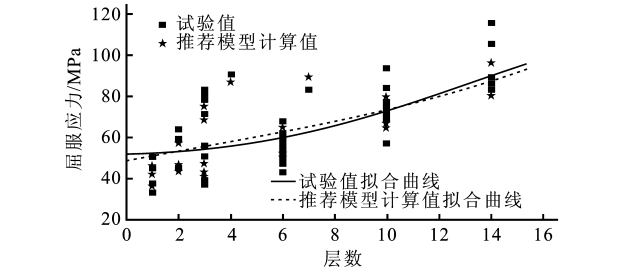


图 7 抗压强度试验值和推荐模型

Fig. 7 Test Value of Compressive Strength and Suggested Model

表 1 FRP 约束混凝土强度模型

模型	Karbhari and Gao ^[14]	Toutanji ^[15]	Richart ^[16]	Fardis ^[17]	Cusson and Paultre ^[18]
k_1	$2.1(f_1/f'_{co})^{-0.13}$	$3.5(f_1/f'_{co})^{-0.15}$	4.1	$4.1f_1/(2f'_{co})$	$2.1(f_1/f'_{co})^{0.7}$

表 2 FRP 约束混凝土试验数据

层数	d/mm	f'_{co}/MPa	t/mm	f_t/MPa	f'_{cc}/MPa	$f_1 \cdot f'_{co}{}^{-1}$	$f'_{cc} \cdot f'_{co}{}^{-1}$	k_1	数据来源
1	152	38.38	0.330	795.00	44.870	0.09	1.17	1.88	Karbhari and Gao 模型
2	152	38.38	0.660	1 047.43	59.680	0.24	1.55	2.34	
3	152	38.38	0.990	1 105.25	77.680	0.38	2.02	2.73	
4	152	38.38	1.320	1 351.59	89.480	0.61	2.33	2.18	
3	152	18.01	1.550	1 353.40	82.230	1.53	4.57	2.33	
3	152	18.01	2.060	1 126.50	70.580	1.70	3.92	1.72	
7	152	18.01	5.310	513.10	82.250	1.99	4.57	1.79	
3	152	18.01	2.260	978.00	79.490	1.61	4.41	2.11	Mirmiran 模型
6	152	30.90	1.450	524.00	53.660	0.32	1.74	2.28	
6	152	30.90	1.450	524.00	56.500	0.32	1.83	2.57	
10	152	30.90	2.210	579.00	72.920	0.54	2.36	2.50	
10	152	30.90	2.210	579.00	65.670	0.54	2.13	2.07	
10	152	30.90	2.210	579.00	77.990	0.54	2.52	2.81	
14	152	30.90	2.970	641.00	87.200	0.81	2.82	2.25	
14	152	30.90	2.970	641.00	86.760	0.81	2.81	2.24	
6	152	30.90	1.450	524.00	67.120	0.32	2.17	3.63	
6	152	29.60	1.450	524.00	55.290	0.34	1.87	2.58	
6	152	29.60	1.450	524.00	60.230	0.34	2.03	3.07	
10	152	29.60	2.210	579.00	74.560	0.57	2.52	2.68	
10	152	29.60	2.210	579.00	93.020	0.57	3.14	3.78	

续表 2

层数	d/mm	$f'_{\text{co}}/\text{MPa}$	t/mm	f_i/MPa	$f'_{\text{ce}}/\text{MPa}$	$f_l \cdot f_{\text{co}}'^{-1}$	$f'_{\text{ce}} \cdot f_{\text{co}}'^{-1}$	k_1	数据来源
10	152	29.60	2.210	579.00	71.740	0.57	2.42	2.51	Mirmiran 模型
14	152	29.60	2.970	641.00	86.220	0.84	2.91	2.27	
14	152	29.60	2.970	641.00	114.660	0.84	3.87	3.41	
14	152	29.60	2.970	641.00	87.440	0.84	2.95	2.32	
6	152	32.00	1.450	524.00	59.060	0.31	1.85	2.72	
6	152	32.00	1.450	524.00	60.790	0.31	1.90	2.89	
10	152	32.00	2.210	579.00	77.350	0.52	2.42	2.70	
10	152	32.00	2.210	579.00	77.080	0.52	2.41	2.69	
14	152	32.00	2.970	641.00	86.110	0.78	2.69	2.17	
14	152	32.00	2.970	641.00	83.990	0.78	2.62	2.08	
6	152	44.80	1.450	524.00	63.020	0.22	1.41	1.83	
6	152	44.80	1.450	524.00	57.020	0.22	1.27	1.23	
10	152	44.80	2.210	579.00	83.220	0.37	1.86	2.29	
10	152	44.80	2.210	579.00	75.360	0.37	1.68	1.82	
14	152	44.80	2.970	641.00	104.530	0.56	2.33	2.39	
14	152	44.80	2.970	641.00	89.010	0.56	1.99	1.77	
6	152	44.80	1.450	524.00	51.570	0.22	1.15	0.68	
6	152	44.80	1.450	524.00	48.890	0.22	1.09	0.41	
10	152	44.80	2.210	579.00	69.640	0.37	1.55	1.48	
10	152	44.80	2.210	579.00	67.430	0.37	1.51	1.35	
14	152	44.80	2.970	641.00	84.390	0.56	1.88	1.59	
14	152	44.80	2.970	641.00	85.020	0.56	1.90	1.61	
6	152	44.80	1.450	524.00	52.750	0.22	1.18	0.80	
10	152	44.80	2.210	579.00	64.610	0.37	1.44	1.18	
10	152	44.80	2.210	579.00	63.230	0.37	1.41	1.10	
14	152	44.80	2.970	641.00	88.810	0.56	1.98	1.76	
14	152	44.80	2.970	641.00	89.220	0.56	1.99	1.78	
6	152	44.80	1.450	524.00	47.780	0.22	1.07	0.30	
6	152	44.80	1.450	524.00	52.400	0.22	1.17	0.76	
10	152	44.80	2.210	579.00	65.230	0.37	1.46	1.22	
10	152	44.80	2.210	579.00	57.230	0.37	1.28	0.74	
14	152	44.80	2.970	641.00	82.260	0.56	1.84	1.50	
14	152	44.80	2.970	641.00	84.460	0.56	1.89	1.59	
2	76	31.80	0.240	1 518.00	60.280	0.30	1.90	2.97	Toutanji 模型
1	76	31.80	0.220	3 485.00	95.020	0.63	2.99	3.13	
3	76	31.80	0.330	2 940.00	94.010	0.80	2.96	2.44	
1	152	26.20	1.000	330.00	33.500	0.17	1.28	1.68	Harries 模型
2	152	26.20	2.000	330.00	44.500	0.33	1.70	2.11	
1	152	26.20	1.000	383.00	38.400	0.19	1.47	2.42	
2	152	26.20	2.000	383.00	52.500	0.38	2.00	2.61	
1	152	26.20	1.000	580.00	50.600	0.29	1.93	3.20	
2	152	26.20	2.000	580.00	64.000	0.58	2.44	2.48	
3	508	32.80	3.000	330.00	36.900	0.12	1.13	1.05	
3	508	32.80	3.000	383.00	38.900	0.14	1.19	1.35	
3	508	32.80	3.000	580.00	50.000	0.21	1.52	2.51	
3	152	39.70	0.900	1 266.00	55.977	0.38	1.41	1.09	Picher 模型
1	200	39.00	0.338	2 810.00	70.100	0.24	1.80	3.27	Kawashima 模型

5 结 语

对 FRP 约束混凝土圆柱体轴心抗压强度作了全面研究,总结了 FRP 约束混凝土圆柱体强度计算模型,并对各模型进行分析,与所收集的试验数据进行比较,基于对试验结果的分析,提出了约束混凝土圆柱体轴心抗压强度计算的简单模型。该模型计算简单,在工程实际中应用方便,可供工程技术人员参考。本文中的研究成果也为进一步研究 FRP 约束混凝土梁柱的力学性能和承载力创造了条件。

参考文献:

References:

- [1] 张月弦,薛元德. FRP 约束混凝土的基本力学性能[J]. 玻璃钢/复合材料,1999,26(6):21-27.
ZHANG Yue-xian, XUE Yuan-de. Basic Mechanical Performance of FRP Confined Concrete[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,1999,26(6):21-27.
- [2] 于 清. 轴心受压 FRP 约束混凝土的应力-应变关系研究[J]. 工业建筑,2001,31(4):5-8.
YU Qing. Stress-Strain Relationship of FRP-Confined Concrete Subjected to Axial Compression[J]. Industrial Construction,2001,31(4):5-8.
- [3] 肖 岩,吴 徽,陈宝春. 碳纤维套箍约束混凝土的应力-应变关系[J]. 工程力学,2002,19(2):154-159.
XIAO Yan, WU Hui, CHEN Bao-chun. Compressive Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Jackets[J]. Engineering Mechanics,2002,19(2):154-159.
- [4] 于 清. FRP 约束混凝土柱强度承载力计算[J]. 工业建筑,2000,30(10):31-34.
YU Qing. Calculation of Bearing Capacity and Strength of FRP-Confined Concrete Columns[J]. Industrial Construction,2000,30(10):31-34.
- [5] 贾明英,程 华. 不同 FRP 约束混凝土圆柱轴心受压性能试验研究[J]. 工业建筑,2002,32(5):65-67.
JIA Ming-ying, CHENG Hua. Experimental Research of Properties of Circular-Columns in Different FRP Shells Under Axial Compression[J]. Industrial Construction,2002,32(5):65-67.
- [6] XIAO Y, WU H. Compressive Behavior of Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Composite Jackets[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2000,12(2):139-146.
- [7] MARIJN R, GIORGIO M. FRP-Confined Concrete Model[J]. Journal of Composites for Construction,1999,3(3):143-150.
- [8] AMIR M, MOHSEN S, MICHEL S, et al. Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete[J]. Journal of Composites for Construction,1998,2(4):175-185.
- [9] LAM L, TENG J G. Strength Models for Fiber-Reinforced Plastic-Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(5):612-623.
- [10] 贺拴海,任 伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(3):20-24.
HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Reinforced Concrete Structure with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(3):20-24.
- [11] 周天华,何保康,周绪红,等. 高强冷弯薄壁型钢轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(3):36-44.
ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of High-Strength Cold-Formed Steel Stub Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(3):36-44.
- [12] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):1-5.
LU Zhi-tao. Application of High Performance FRP and Innovations of Structure Engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(1):1-5.
- [13] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1988,114(8):1804-1826.
- [14] KARBHARI V M, GAO Yan-qing. Composite Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression of Simple Design Equation[J]. Journal of Material in Civil Engineering,1997,9(4):185-193.
- [15] TOUTANJI H A. Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets[J]. ACI Materials Journal,1999,96(3):397-404.
- [16] STEPHEN P, HARRIES K A, KESTNER J T, et al. Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets[J]. Journal of Composites for Construction,2001,5(4):237-245.
- [17] FARDIS M N, KHALILI H. FRP-Encased Concrete as a Structural Material[J]. Magazine of Concrete Research,1982,34(12):191-202.
- [18] CUSSON D, PAULTRE P. Stress-Strain Model for Confined High Strength Concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(3):468-477.