

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.032



# 纤维布加固混凝土方柱的改进约束强度模型

翟科杰<sup>a</sup>, 方圣恩<sup>a,b</sup>

(福州大学 a. 土木工程学院; b. 土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心, 福州 350116)

**摘要:**为研究不同类型纤维布约束对混凝土方截面柱力学性能和破坏模式的影响,针对混凝土约束效应区域,提出采用 1/4 圆弧替代传统二次抛物线划分有效约束区和弱约束区,基于此改进并统一了形状系数,实现对既有约束强度模型的改进。采用 138 组不同纤维布包裹柱试验数据对比了 5 种不同约束强度计算模型改进前后的效果,发现改进后模型计算值与试验数据吻合更好。为了拓展改进模型的应用范围,进一步通过 8 根 BFRP 布包裹柱试验,验证了所提出改进模型在 BFRP 加固混凝土柱承载力预测上的可行性。

**关键词:**纤维布;混凝土方柱;约束区域;形状系数;强度模型;模型评价

**中图分类号:**TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0079-07

## Improved confinement strength models of FRP-strengthened concrete square columns

Zhai Kejie<sup>a</sup>, Fang Shengen<sup>a,b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. National and Local United Research Center for Seismic and Disaster Informatization of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the strengthening effects of different types of FRP sheets on the mechanical properties and failure modes of square concrete columns, 1/4 arc was adopted to replace the traditional second-degree parabola to distinguish the effective confinement area from weak area. Then the shape coefficients were improved and unified into one for purpose of engineering application. The performance of the five strength models after improvement was evaluated based on the analysis of 138 experimental columns strengthened by different types of FRP sheets. Satisfactory agreements between the improved models and the experiments were found. In order to extend the application range of the improved models, 8 BFRP jacketed concrete columns were further tested. Result shows the improved models is capable of predicting the bearing capacity of BFRP jacketed concrete column in predicting the load capacities of such columns was confirmed.

**Keywords:** FRP sheets; concrete square columns; confinement area; shape coefficients; strength model; model evaluation

**收稿日期:**2018-07-14

**基金项目:**国家自然科学基金(51578158);福州大学"旗山学者"奖励支持计划(GXRC-1688)

**作者简介:**翟科杰(1991-),男,主要从事土木结构加固研究,E-mail:957480808@qq.com。

方圣恩(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:shengen.fang@fzu.edu.cn。

**Received:**2018-07-14

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51578158); Qishan Scholar Program of Fuzhou University (No. GXRC-1688)

**Author brief:** Zhai Kejie (1991-), main research interest: strengthening of civil structures, E-mail: 957480808@qq.com.

Fang Shengen(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn.

既有工程结构由于设计、施工、材料质量等问题,以及新的荷载需求等原因,可能需要对结构进行加固。当前比较成熟的加固方法中,纤维增强复合材料法(Fiber Reinforced Polymer, FRP)具有轻质高强、不增加构件截面尺寸等优越性能,在土木工程结构加固中得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

素混凝土结构中无筋或不配受力钢筋,一般用于结构基础、重力坝、支墩、挡土墙等承力结构,对结构的整体安全性要求更高。目前,对 FRP 约束素混凝土柱的相关研究较多<sup>[5-6]</sup>,建立了各种约束混凝土强度计算模型。最初针对的是圆形截面柱<sup>[7-8]</sup>,此类柱在 FRP 环向约束后受力均匀,被约束混凝土的强度得到大幅提高。但现有建筑物中混凝土方形或矩形截面柱占绝大多数,受到 FRP 约束时,受力比圆截面柱复杂得多,特别是纤维布因在柱角部受力集中而可能早于其他部位发生破坏,使得约束作用大为降低。为此,加固时需将方柱四角进行倒角打磨处理,并对 FRP 约束区进行强弱约束区域进行划分<sup>[5]</sup>,然后在试验数据基础上结合理论推导,得到此类柱在 FRP 约束下的混凝土强度计算模型或公式。

值得注意的是,作为强度计算模型中最关键的参数,已有的各种强度计算模型在形状系数的选取上尚未统一,不利于加固设计 and 应用。同时,大多数强度计算模型仅局限于少量试验数据,有待进一步改进和完善。为此,本文根据试验柱的破坏模式,提出将方形柱强度计算模型中的有效约束区域和弱约束区域分割线重新定义为 1/4 圆弧,通过比较改进前后分割曲线在顶点处斜率变化率大小,统一了所选取约束强度模型的形状系数;然后,通过对比强度模型计算值与大量试验值之间的差异,评价改进后约束强度模型的准确性;最后,通过 10 根轴压素混凝土短柱试验,验证了改进模型对 BFRP 布加固柱的适用性。试验采用素混凝土柱,是为了避免配筋(特别是箍筋)对约束效果分析的影响。

## 1 混凝土约束强度模型

### 1.1 不同强度模型概述

FRP 约束混凝土强度模型较多<sup>[9-13]</sup>,适用于 FRP 约束方形截面素混凝土柱的模型有以下几种。其中,式(1)、式(3)均相同,主要区别在于公式中的系数表达式(2),特别是本文研究对象“形状系数”。

#### 1) Lam & Teng 模型<sup>[5]</sup>

$$f'_{cc} = f'_{co}(1 + k_1 k_s f_1) \quad (1)$$

$$k_s = \left(\frac{b}{h}\right)^2 \left\{ 1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r)^2\right]}{3A_g(1-\rho_s)} \right\} \quad (2)$$

$$f_1 = 2 \frac{E_f t_f \epsilon_f}{D} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (4)$$

式中: $h$ 、 $b$ 为柱截面边长(方形截面 $b=h$ ); $f'_{co}$ 、 $f'_{cc}$ 分别为约束前后混凝土强度; $k_1$ 为有效约束系数,文献[5]建议取 3.3; $k_s$ 表示形状系数; $f_1$ 为有效约束应力; $E_f$ 代表纤维布抗拉弹性模量; $t_f$ 为纤维布厚度; $\epsilon_f$ 为纤维布有效拉应变,取 $0.586\epsilon_{FRP}$ ( $\epsilon_{FRP}$ 为纤维布极限应变); $D$ 为等效圆的直径(图 1); $r$ 为倒角半径; $\rho_s$ 表示配筋率; $A_g$ 为被约束混凝土面积。

#### 2) Al-Salloum 模型<sup>[14]</sup>

$$k_s = \left(\frac{b}{D}\right) \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left[ \frac{(1-2r/b)^2}{1-(4-\pi)(r/b)^2} \right] \right\} \quad (5)$$

$$D = \sqrt{2}b - 2r(\sqrt{2} - 1) \quad (6)$$

文献中有效约束系数 $k_1$ 取为 3.14,纤维布有效拉应变 $\epsilon_f$ 取为 $\epsilon_{FRP}$ 。

#### 3) Ilki 模型<sup>[15]</sup>

$$k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-\rho_s)} \quad (7)$$

$$D = \frac{2[bh - (4-\pi)r^2]}{b+h} \quad (8)$$

文献中 $k_1 = 2.54$ , $\epsilon_f = 0.85\epsilon_{FRP}$ 。

#### 4) 中国规范(GB 50367—2013)模型<sup>[16]</sup>

$$k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_{cor}(1-\rho_s)} \quad (9)$$

$$D = \frac{2[bh - (4-\pi)r^2]}{b+h} \quad (10)$$

规范中 $k_1 = 4$ , $\epsilon_f = 0.0035$ ;  $A_{cor}$ 为被约束混凝土总面积。

#### 5) ACI440.2R-08 模型<sup>[17]</sup>

$$k_s = \left(\frac{b}{h}\right)^2 \left\{ 1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r)^2\right]}{3A_g(1-\rho_s)} \right\} \quad (11)$$

$$D = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (12)$$

规范中 $k_1 = 3.3 \times \psi_f$ ,其中 $\psi_f$ 为折减系数,取为 0.95; $\epsilon_f = 0.55\epsilon_{FRP}$ 。

### 1.2 各强度模型区别

上述 5 种模型的核心计算式(1)、式(3)完全相同,均由 FRP 约束圆截面混凝土柱的强度计算模型演化而来,主要差别在于 $k_s$ 、 $k_1$ 、 $D$ 、 $\epsilon_f$ ,其中,最关键参数为 $k_s$ 。

在 $k_1$ 的取值上,文献[5]模型基于试验取为

3.3;美国规范<sup>[17]</sup>模型在文献[5]基础上考虑折减系数 $\psi_f$ ,更为保守;文献[14]将 $k_1$ 取为文献[5]3.3和文献[18]2.98的均值;文献[15]根据试验结果取 $k_1 = 2.54$ ;中国规范[16]直接取 $k_1 = 4$ 。

在 $D$ 的取值上,文献[5]与美国规范<sup>[17]</sup>均将矩形截面对角线看作等效圆直径;文献[14]为了使等效圆直径更加接近倒圆角后的真实值,在矩形截面对角线长度基础上减掉了倒圆角所减少的长度;文献[15]与中国规范<sup>[16]</sup>模型将 $D$ 值取为被约束混凝土面积与矩形截面 $1/4$ 周长的比值。

纤维布有效拉应变 $\epsilon_f$ 的取值在各强度模型中也不尽相同。文献[5]基于试验将 $\epsilon_f$ 定义为 $0.586$ 倍的纤维布极限拉应变;美国规范<sup>[17]</sup>则取为 $0.55$ 倍;文献[15]根据试验取为 $0.85$ 倍;文献[14]则直接定义为极限拉应变;中国规范<sup>[16]</sup>中取值 $0.0035$ ,对一般构件取 $0.0045$ 。

在关键的形状系数 $k_s$ 取值上,5种模型均在二次抛物线分割的有效约束区与弱约束区基础上进行计算。文献[5]考虑到矩形截面长宽比对约束效应的影响,加入了系数 $(b/h)^2$ ,美国规范<sup>[17]</sup>对 $k_s$ 的取值参照了文献[5];文献[14]考虑到约束力分布的不均匀性,加入了系数 $b/D$ ;而文献[15]和中国规范<sup>[16]</sup>中的形状系数均未考虑截面形状及其他因素的影响。由此可见,各强度模型的 $k_s$ 差异较大。

总体上,各强度模型中的 $k_1$ 、 $\epsilon_f$ 是在试验基础上得到, $D$ 与柱截面尺寸相关,三者取值都相对客观。而 $k_s$ 的取值均基于二次抛物线分割,合理性值得探讨。同时, $k_s$ 的表达式不同,也影响到实际工程应用时的便捷性。为此,先对 $k_s$ 进行了改进和统一,在保证约束混凝土强度计算精度的同时,工程应用上更加便捷。

## 2 改进约束强度模型

既有约束强度模型主要参照箍筋对混凝土的约束作用,将有效约束区域与弱约束区域采用4条二次抛物线分割开(图1)<sup>[5,14]</sup>,抛物线两端点处切线与柱截面边长成 $45^\circ$ 角。而箍筋在混凝土中一般间隔分布,其约束效应与FRP存在明显区别。

本文结合文献[9]试验和文献[19]的模拟结果,针对有效约束区与弱约束区的分割曲线,提出采用4个 $1/4$ 圆弧进行分割,同样地,圆弧在两端点切线方向与方柱截面边长成 $45^\circ$ 角,如图2所示。

图1中二次抛物线定义为

$$y = -\frac{1}{b-2r}x^2 + \frac{b-2r}{4} \quad (13)$$

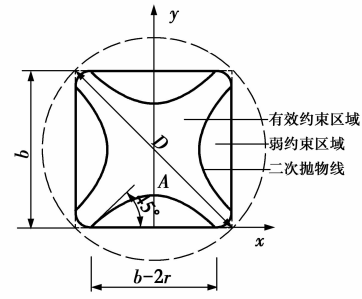


图1 改进前模型有效约束区域<sup>[5,14]</sup>

Fig. 1 Effective confinement areas before improvement

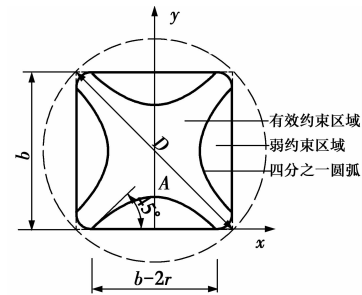


图2 改进后模型有效约束区域

Fig. 2 Effective confinement areas after improvement

相应的一阶和二阶导数为

$$y' = -\frac{2}{b-2r}x \quad (14)$$

$$y'' = -\frac{2}{b-2r} \quad (15)$$

由此可得抛物线在A点处(图1)曲率半径:

$$\rho_1 = \left| \frac{(1+y'^2)^{3/2}}{y''} \right| = \frac{b-2r}{2} \quad (16)$$

而改进后A点(图2)曲率半径为

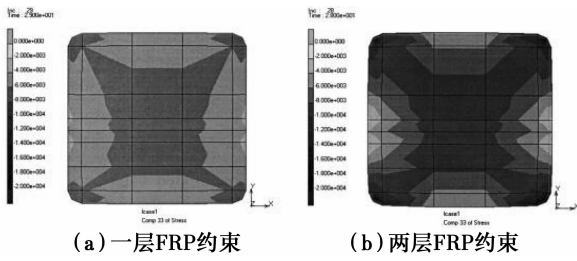
$$\rho_2 = (b-2r)/\sqrt{2} \quad (17)$$

对比式(16)、式(17)可知, $\rho_2 > \rho_1$ ,因此,改进模型曲线上A点及其临近弧线段的曲率小于改进前,与文献[19]中模拟结果(图3)及文献[9]试验结果(图4)更吻合,即有效约束区与弱约束区分界线在A点曲率很小(图3、图4中箭头指向处曲率),可以认为,采用圆弧分割比二次抛物线分割更合理,因此,本文将有效约束区与弱约束区分割线定义为 $1/4$ 圆弧。

改进前,抛物线与正方形一边所围面积为

$$S_1 = \int_{-(b-2r)/2}^{(b-2r)/2} \left( -\frac{x^2}{b-2r} + \frac{b-2r}{4} \right) dx = \left( -\frac{1}{3} \frac{x^3}{b-2r} + \frac{b-2r}{4} x \right) \Big|_{-(b-2r)/2}^{(b-2r)/2} = \frac{(b-2r)^2}{6}$$

改进后,圆弧与正方形一边所围面积为



(a) 一层FRP约束 (b) 两层FRP约束  
图 3 有效约束区与弱约束区模拟<sup>[19]</sup>

Fig. 3 The Figure of effective confinement area and weak confinement area based on simulation

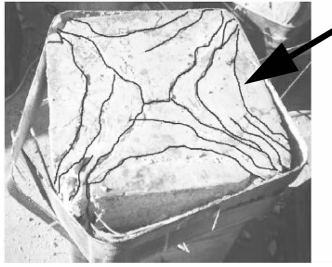


图 4 有效约束区与弱约束区试验图<sup>[9]</sup>

Fig. 4 The Figure of effective confinement area and weak confinement area based on test

$$S_2 = \frac{1}{4}\pi\left(\frac{b-2r}{\sqrt{2}}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{b-2r}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{\pi-2}{8}(b-2r)^2$$

由于

$$S_1 - S_2 = \left(\frac{1}{6} - \frac{\pi-2}{8}\right)(b-2r)^2 = \left(\frac{10-3\pi}{24}\right)(b-2r)^2 > 0$$

因此,采用新的切割方法后,混凝土弱约束面积变小,而有效约束面积变大。

经过上述改进后,本文将 1.1 节中 5 种强度模型的形状系数统一表示为

$$k_s = 1 - \frac{\left(\frac{\pi}{2} - 1\right)\left[\frac{(b-2r)^2}{2} + \frac{(h-2r)^2}{2}\right]}{bh - (4-\pi)r^2} \quad (18)$$

该形状系数更方便工程设计和应用,且对文献[5]、文献[15]中国规范<sup>[16]</sup>及美国规范<sup>[17]</sup>中强度模型的影响较小,因为相对于方柱而言,改进模型的有效约束区域面积与原模型相差不大,且统一后的 $k_s$ 仍表示为有效约束面积与被约束混凝土总面积之比。但改进模型与文献[14]模型的形状系数相差较大,因为前者未考虑系数 $b/D$ ,但这种差异可通过修正系数 $k_1$ 对模型进行校正。

改进 $k_s$ 后,利用文献[20]搜集的 138 条 FRP 约束方形截面混凝土柱试验数据即可直接评价文献

[5]、美国规范<sup>[17]</sup>、中国规范<sup>[16]</sup>模型。此外,由于文献[14]中 $k_s$ 改进前后差异大,文献[15]模型基于中低强度混凝土试验数据建立,因此,本文修正了 Al-Salloum 和 Ilki 模型的 $k_1$ ,即根据文献[20]的试验数据,通过拟合的方式,取 $k_1 = 2$ ,同时,可以进行修正前后试验数据与理论计算的对比,若结果良好,则说明修正是正确的。

### 3 改进约束强度模型评价

文献[21]提出采用误差平方和 $\sum Q$ 评价约束强度模型的精确性。

$$\sum Q = \sum \left[ \frac{\text{EXP}(f'_{cc})}{\text{EXP}(f'_{co})} - \frac{\text{CAL}(f'_{cc})}{\text{EXP}(f'_{co})} \right]^2 \quad (19)$$

式中:EXP 和 CAL 分别表示试验值和计算值。可见 $\sum Q$ 越小,说明强度模型的误差越小,模型越精确。

根据文献[20]搜集的 138 条 FRP 约束方形截面混凝土柱试验数据(纤维布种类包括芳纶纤维、碳纤维、玻璃纤维),对模型改进前后的强度模型进行评价,结果列于表 1。由表 1 可见,改进模型的计算值更接近试验值(误差平方和 $\sum Q$ 降低),特别是对文献[15]的 Ilki 模型而言,改进后的效果最明显,因为原模型只适用于中低强度混凝土,而改进后更适用于不同强度的混凝土,进一步说明了本文改进模型的必要性与合理性。值得一提的是,原 Ilki 模型计算值基本上大于试验值(图 5),偏不安全,不利于工程设计;而采用改进统一后的形状系数所得到的计算值,不仅更接近试验值,而且近一半试件的计算值小于试验值,偏安全。

表 1 强度模型改进前后误差平方和

Table 1 Error sum squares of strength models before and after improvement

模型	原模型 $\sum Q$	改进后 $\sum Q$
文献[5]	11.036	10.058
文献[14]	9.804	7.574
文献[15]	17.972	9.050
中国规范 <sup>[16]</sup>	26.965	24.620
美国规范 <sup>[17]</sup>	14.660	13.030

## 4 试验验证

### 4.1 试验概况

工程加固中目前广泛使用的是碳纤维布,但其高价格也提高了施工成本。玄武岩纤维(Basalt

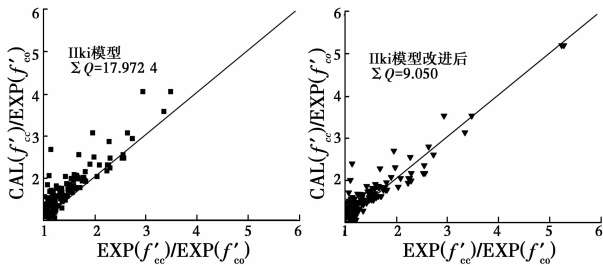


图 5 Ilki 模型改进前后对比

Fig. 5 Comparison of Ilki model before and after improvement

调分级加载模式,每级 15 kN,持载 3 min,达到预估破坏值附近时,减小荷载步至 5 kN。

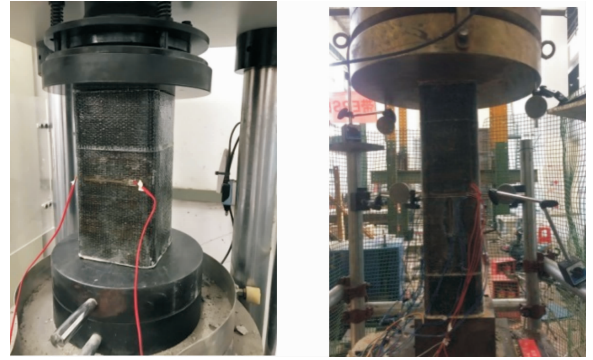


图 6 试件加载装置

Fig. 6 Loading devices for experimental specimens

Fiber Reinforced Polymer, BFRP) 原材料为玄武岩,属于无机硅酸盐类,与混凝土组成材料水泥相同,二者相容性好。同时,玄武岩纤维绿色环保,耐久性、高温性能优于普通碳纤维,抗拉强度和弹性模量等材料参数也足够加固使用,更重要的是价格低很多,有利于工程推广应用。此外,文献[20]采用的 138 条数据未涉及 BFRP 约束加固的比较,有鉴于此,为了进一步验证改进模型对 BFRP 约束情况的适用性,进行了 10 根方形截面素混凝土柱轴心受压试验,其中,两根为未加固对比柱,8 根为 BFRP 加固柱,后者倒角半径 15 mm。5 根方柱尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm,另 5 根为 150 mm × 150 mm × 600 mm。实测混凝土立方体强度 48 MPa,采用 BFRP 布全包裹方式加固,条布接头处搭接长度 100 mm。BFRP 布抗拉强度 2 100 MPa,弹性模量 105 GPa,厚度为 0.107 mm。试件编号及加固情况列于表 2。

表 2 试验混凝土柱

Table 2 Experimental concrete columns

编号	柱高/mm	加固方式
Z-2-0	300	对比柱(未加固)
Z-2-1A	300	1 层 BFRP
Z-2-1B	300	1 层 BFRP
Z-2-2	300	2 层 BFRP
Z-2-3	300	3 层 BFRP
Z-4-0	600	对比柱(未加固)
Z-4-1A	600	1 层 BFRP
Z-4-1B	600	1 层 BFRP
Z-4-2	600	2 层 BFRP
Z-4-3	600	3 层 BFRP

#### 4.2 试件破坏现象

未加固对比柱:两根对比柱在加载前期均无明显破坏现象,直至柱身出现沿柱对角线方向的裂缝,然后突然破坏,破坏前无明显征兆,呈脆性破坏形态(图 7)。

加固柱:所有加固柱破坏现象类似,在加载前期均无明显破坏现象。当外荷载增大至极限荷载附近时,纤维布发出噼啪断裂声,紧接着 BFRP 布突然爆裂,破坏前无明显征兆,呈脆性破坏形态(图 6)。

破坏后试件关键截面照片如图 8 所示,可与图 4 进行对比。



(a) 300 mm 高度柱



(b) 600 mm 高度柱

图 7 试件破坏情况

Fig. 7 Failure patterns of specimens

#### 4.3 试验结果分析

试验试件承载力实测及理论计算结果列于表 3。鉴于中国规范模型<sup>[16]</sup>给出了构件承载力计算方

高度 300 mm 的柱试件试验在液压试验机上进行,采用 0.2 MPa/s 速率匀速缓慢加载;高度 600 mm 试件使用 500 t 油泵千斤顶加载(图 6),采用单



图 8 破坏后试件截面

Fig. 8 Specimen cross section after failure

法,本文承载力计算公式亦参考规范计算公式。

$$N = N_0 + A_{cor} \times 4k_s f_1 \quad (20)$$

式中:  $N_0$  为未约束柱的承载力;  $k_s$  为改进后形状系数。然后,将改进系数带入式(20),并与 10 根柱的试验结果进行对比。

试验中,试件截面形状为边长等于 150 mm 的正方形( $b=h=150$  mm),倒角半径  $r=10$  mm。可计算得到改进前有效约束面积  $S_y=11\ 147.5$  mm<sup>2</sup>,改进后  $S_y'=12\ 767.7$  mm<sup>2</sup>,  $S_y < S_y'$ 。改进后  $k_s=0.57$ ,从表 3 数据来看更接近试验值,且偏于安全。

表 3 改进模型与试验结果对比

Table 3 Comparison between improved model and experiments

编号	模型计算值 $N_1/kN$	试验值 $N_2/kN$	$N_1/N_2$
Z-2-0		890	
Z-2-1A	919.8		
Z-2-1B	919.8	931	0.99
Z-2-2	949.6	958	0.99
Z-2-3	979.4	973	1.00
Z-4-0		810	
Z-4-1A	839.8	840	1.00
Z-4-1B	839.8	850	0.99
Z-4-2	869.6	860	1.01
Z-4-3	899.4	900	1.00

注:Z-2-1A 加载过程中出现问题,故未得到试验承载力。

出于设计安全考虑,规范模型中对计算所得承载力乘了折减系数 0.9,但本文出于试验验证的目的,考虑的是试件的极限承载力,因此,计算时暂不考虑折减。由表 3 可见,改进模型与试验结果吻合

良好,说明改进强度模型对 BFRP 布约束素混凝土柱也具有较好的适用性和可靠性。

## 5 结论

对 FRP 布约束方形截面混凝土柱的有效约束区与弱约束区分割提出了新的定义方法,采用 1/4 圆弧分割替代传统的二次抛物线分割方法,通过结合既有数值模拟和试验试件的破坏形态,阐述了新分割方式的合理性。然后,进一步提出了约束混凝土形状系数的统一表达式,有利于工程实际应用。最后,基于文献[20]的 138 条试验数据和本文 8 根 BFRP 布包裹柱试验,验证了所提出改进约束强度模型对各种纤维布约束的适用性。通过理论和试验研究,得到以下结论:

1) 本文 8 根 FRP 包裹柱试验结果表明,采用 1/4 圆弧替代二次抛物线划分受约束矩形截面混凝土更接近实际破坏情况,得到的有效约束区域更大。

2) 总体上,在改进文献[5]、文献[14]、文献[15]、中国规范<sup>[16]</sup>、美国规范<sup>[17]</sup>中  $k_s$  及文献[14]、文献[15]中  $k_1$  后,约束强度模型精确度变得更高,对包裹柱的承载力估计更偏于安全。

3) 利用既有大量试验和本文试验数据,验证了改进约束强度模型不仅适用于碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维,也适用于 BFRP 布约束。

## 参考文献:

- [1] PAN Y, GUO R, LI H, et al. Analysis-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete with preload [J]. Composite Structures, 2017, 166(3): 57-67.
- [2] LI P D, WU Y F. Stress-strain model of FRP confined concrete under cyclic loading [J]. Composite Structures, 2015, 134:60-71.
- [3] LIN G, YU T, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for concrete under combined FRP-steel confinement [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(4):04015084.
- [4] PAN Y, RUI G, LI H, et al. Study on stress-strain relation of concrete confined by CFRP under preload [J]. Engineering Structures, 2017, 143:52-63.
- [5] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 22(13): 1149-1186.
- [6] ZHOU Y W, LI M L, SUI L L, et al. Effect of sulfate attack on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete [J]. Construction & Building Materials,

- 2016,110:235-250.
- [7] 熊海贝,李奔奔,江佳斐. FRP约束混凝土圆柱应力-应变模型的适用性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(12): 2363-2375.  
XIONG H B, LI B B, JIANG J F. Applicability of FRP confined concrete column stress-strain model [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49 (12): 2363-2375. (in Chinese)
- [8] 梁猛,李明海,王伟,等. FRP约束混凝土圆柱应力-应变关系模型[J]. 建筑结构, 2016, 46(Sup1): 934-940.  
LIANG M, LI M H, WANG W, et al. Stress-strain relationship model of FRP confined concrete [J]. Building Structure, 2016, 46 (Sup1): 934-940. (in Chinese)
- [9] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites [J]. Composites Part B Engineering, 2007, 38(5/6):614-628.
- [10] MIRMIRAN A, SHAHAWY M, SAMAAAN M, et al. Effect of column parameters on FRP-confined concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2 (4):175-185.
- [11] SHEHATA I A E M, CARNEIRO L A V, SHEHATA L C D. Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets [J]. Materials & Structures, 2002, 35(1):50-58.
- [12] KUMUTHA R, VAIDYANATHAN R, PALANICHAMY M S. Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP [J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(8): 609-615.
- [13] 卢亦焱,史健勇,赵国藩. 碳纤维布约束轴心受压混凝土方形柱承载力计算研究[J]. 工程力学, 2004, 21 (4):22-27.  
LU Y Y, SHI J Y, ZHAO G F. Calculation of bearing capacity of concrete columns with confined axial compression of carbon fiber cloth [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21 (4): 22-27. (in Chinese)
- [14] AL-SALLOUM Y A. Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates [J]. Composites Part B, 2007, 38(5/6):640-650.
- [15] LLKI A, PEKER O, KARAMUK E, et al. FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(2):169-188.
- [16] 部门四川省住房和城乡建设厅. 混凝土结构加固设计规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban and Rural Construction department of Sichuan Province. Code for design of reinforced concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [17] SOUDKI K, ALKHRDAJI T. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440. 2R-08) [C]// Structures Congress, New York USA, 2005.
- [18] MIYAUCHI K, INOUE S, KURODA T, et al. Strengthening effects of concrete column with carbon fiber sheet [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 2000, 21:143-150.
- [19] PARVIN A, WANG W. Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(3):146-152.
- [20] 徐竞雄. FRP加固矩形混凝土柱研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.  
XU J X. Study on FRP Reinforced rectangular concrete columns [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [21] WU Y F, WANG L M. Unified strength model for square and circular concrete columns confined by external jacket [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(3):253-261.

(编辑 胡玲)