

DOI:10.11918/201902085

FRP 约束损伤混凝土环向应变-轴向应变关系

曹玉贵¹, 张 扬¹, 侯 灿¹, 赵 刚¹, 尹亚运²

(1. 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室(武汉理工大学), 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘 要: 为分析混凝土损伤对 FRP 约束混凝土的影响,通过收集已有文献的 264 个试验数据,建立一个包含混凝土试件截面形状、损伤种类和损伤程度,以及 FRP 约束刚度大型数据库。基于数据库对现有环向应变-轴向应变关系模型进行评估,并在 Jiang 等模型的基础上,建立 FRP 约束损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系模型,采用数据库对新提出模型的准确性进行验证。计算结果表明:Jiang 等模型可以准确描述 FRP 约束未损伤混凝土圆柱的环向应变-轴向应变关系,但是现有的 FRP 约束未损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系模型不适用于 FRP 约束损伤混凝土柱;并且随着混凝土损伤程度的增加,现有模型的计算值与试验值的偏差也在增加。新提出的模型能够准确描述 FRP 约束损伤混凝土的环向应变-轴向应变关系,模型可推广应用于 FRP 约束高温损伤混凝土柱。新模型既可以同时适用于 FRP 约束预损伤圆形、正方形、长方形截面混凝土柱,也可以计算 FRP 约束预加载混凝土圆柱与方柱。

关键词: FRP 约束混凝土;预损伤;预加载;环向应变-轴向应变关系;损伤程度

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)09-0085-07

Lateral strain-axial strain relationship of FRP confined damage concrete

CAO Yugui¹, ZHANG Yang¹, HOU Can¹, ZHAO Gang¹, YIN Yayun²

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering (Wuhan University of Technology), Wuhan 430070, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To analyze the influence of concrete damage on FRP confined concrete, 264 test data was collected from published literature, and a large database was established, which contains cross-sectional shapes, damage types, and damage levels of specimens, and FRP confined stiffness. Based on the database, the existing lateral strain-axial strain relationship models were evaluated, and a new lateral strain-axial strain relationship model of FRP confined pre-damage concrete columns was established by modifying Jiang's model. Results show that Jiang's model could accurately describe the lateral strain-axial strain behavior of FRP confined undamaged circular concrete columns, but the existing models were not suitable for FRP confined damage concrete columns. With the increase of concrete damage level, the deviation between the calculated value and the test value of the existing models increased. The proposed model was verified by database and could predict the lateral strain-axial strain behavior of FRP confined damage concrete column with good accuracy, which can be applied to FRP confined high temperature damage concrete columns. The model in this paper can be used for FRP confined pre-damage circular, square, and rectangular concrete columns as well as for the calculation of FRP confined preloading concrete columns and square columns.

Keywords: FRP confined concrete; pre-damage; preloading; lateral strain-axial strain relationship; damage level

混凝土建筑物的大部分构件在服役年限内大都会出现不同程度的损伤,这直接影响了建筑的承载能力和变形能力。在最近几十年里,纤维增强复合材料(简称 FRP)已被证明其能够有效提高混凝土结构的承载能力、变形能力和抗震性能^[1-3]。然而,目前关于 FRP 加固混凝土结构,尤其是加固混凝土

柱的研究主要侧重于加固未损伤混凝土^[4-7],而大部分混凝土构件在修复加固的过程中都是持载荷的或者有一定的损伤程度的。现有的试验结果表明,FRP 约束已损伤混凝土柱和 FRP 约束未损伤混凝土柱的力学性能是不同的^[8-11]。FRP 修复损伤混凝土柱的机理是 FRP 环向约束抑制了混凝土柱的环向膨胀变形,从而提高了混凝土柱的强度和延性。因此,确定 FRP 约束损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系是研究 FRP 修复损伤混凝土柱机理的基础。目前已有大量关于 FRP 约束混凝土环向应变-轴向应变关系模型^[12-15],但只适应于 FRP 约束未

收稿日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(51808419);中国博士后科学基金面上资助(2017M622540);武汉理工大学自主创新研究基金(2018IVA008,2019IVB064)

作者简介: 曹玉贵(1984—),男,博士,副研究员

通信作者: 曹玉贵, yuguicao@whut.edu.cn

损伤混凝土或者带载混凝土(混凝土承受荷载未超过其承载能力),尚未有 FRP 约束预损伤混凝土的环向应变-轴向应变关系模型. 文献[12]通过大量试验数据与理论分析,推导出了 FRP 约束未损伤混凝土的环向应变-轴向应变关系模型. 文献[15]基于建立的数据库,验证了文献[12]提出模型的准确性,也提出了 FRP 约束混凝土环向应变-轴向应变的关系模型. 文献[16]在文献[12]模型的基础上引入极限膨胀比因子得到 FRP 约束损伤程度较小混凝土的环向应变-轴向应变关系模型.

鉴于现有 FRP 约束混凝土柱环向应变-轴向应变关系模型的局限性,本文首先建立数据库,对现有 FRP 约束混凝土的环向应变-轴向应变关系模型进行评估;然后基于 Jiang 等模型^[12],提出了 FRP 约束损伤混凝土的环向应变-轴向应变关系模型,该模型考虑了混凝土的截面形状与抗压强度、混凝土的损伤类型与损伤程度、FRP 约束层数等参数;最

后通过数据库验证了新提出模型的准确性.

1 数据库建立

本文从文献[8-9,11-12,16-22]中收集了 264 条试验曲线. 收集到的试件截面形状包括圆形、正方形和长方形截面,其中正方形边长在 100~200 mm 之间,长方形截面尺寸为 200 mm×400 mm,方形倒角半径在 15~45 mm 之间. 进行预加载或者预损伤试验的 FRP 材料包括碳纤维增强复合材料(CFRP)、玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)和玻璃纤维增强复合材料(GFRP),其中 CFRP 弹性模量 E_{frp} 在 105~273 GPa 之间,BFRP 弹性模量 E_{frp} 为 87 GPa,GFRP 弹性模量 E_{frp} 为 22 GPa. FRP 厚度 t_{frp} 在 0.111~2.54 mm 之间. 混凝土有普通混凝土和高强度混凝土两种,混凝土强度 f_{co} 在 16.47~70.2 MPa 之间. 相应的轴向应变峰值 ε_{co} 也在 0.1%~0.33% 之间,具体参数见表 1.

表 1 数据库参数

Tab.1 Parameters of database

数据来源	截面形状	FRP 类型	E_{frp}/GPa	t_{frp}/mm	f_{co}/MPa	$\varepsilon_{co}/\%$
文献[17]	圆形	CFRP	105	0.381~1.143	33.68~55.21	0.231~0.286
文献[12]	圆形	CFRP	251	0.165~0.495	34.3~38.5	0.188~0.223
		GFRP	22	1.270~2.540	34.3~38.5	0.188~0.223
文献[11]	圆形	CFRP	235	0.167~0.334	29.3~53.6	0.1~0.33
文献[22]	圆形	CFRP	219	0.167~0.501	34.2~70.2	0.2~0.26
文献[8]	正方形	CFRP	273	0.334~0.501	39.63	0.12~0.25
文献[9]	正方形	BFRP	87	0.414~0.167	30.88	0.20
		CFRP	213	0.414~0.167	30.88	0.20
文献[18-19]	正方形、长方形	CFRP	230	0.498	17.90~22.00	0.20~0.27
文献[20-21]	圆形、正方形	CFRP	236	0.111~0.222	16.47~23.38	0.13~0.16
文献[16]	圆形	CFRP	240	0.111	32.82~42.02	0.23~0.25

2 损伤的定义与不同截面换算

2.1 混凝土损伤的定义

现有关于 FRP 约束损伤混凝土分为两种类型:(I) FRP 约束预损伤混凝土^[8,11],是采用加载设备对混凝土试件加载至预定数值,然后卸载至零,再进行 FRP 的包裹;(II) FRP 约束预加载混凝土^[16,20-21],是采用加载设备对混凝土试件加载至预先设定值,然后保持荷载不变,再进行 FRP 的包裹. FRP 约束两种损伤类型的典型应力-应变关系曲线如图 1 所示.

混凝土损伤程度被用来计算不同混凝土损伤类型的损伤. 文献[11]提出了损伤类型(I)中混凝土的损伤程度 δ_1 计算公式为

$$\delta_1 = \frac{f_{co} - f_{cd}}{f_{co}}, \tag{1}$$

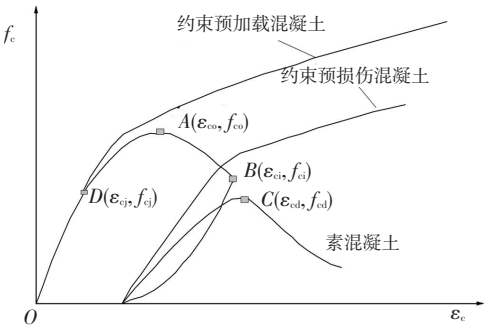


图 1 应力-应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain curves

本文同样采用式(1)计算混凝土的损伤程度 δ_1 . 当 $\varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{co}$ 时, $f_{cd}/f_{co} = 1 - 0.028\ 5m$; 当 $\varepsilon_{ci} > \varepsilon_{co}$ 时, $f_{cd}/f_{co} = 0.64\ (2 - m)^2 - 2.72(2 - m) + 3.1$. 其中: f_{cd} 为混凝土的残余强度; f_{ci} 为卸载时混凝土承

受的应力 f_{ci} 在应力-应变关系曲线上上升段卸载为正值,在应力-应变关系曲线下降段卸载为负值; ε_{ci} 为卸载时的混凝土轴向应变; f_{co} 为混凝土的强度; m 为混凝土柱的卸载水平, $m = f_{ci}/f_{co}$,以百分数表示。

对于混凝土损伤类型(II),文献[16]认为影响环向应变-轴向应变的关系的参数包括带载应力水平 p 、FRP 约束应力 f_1 和混凝土强度 f_{co} ,所以本文拟建立混凝土损伤类型(II)的损伤函数 φ 的计算公式为

$$\varphi = a_1 \frac{p^{a_2}}{(f_1/f_{co})^{a_3}}, \tag{2}$$
$$p = \frac{f_{cj}}{f_{co}},$$
$$f_1 = \frac{2E_{frp}t_{frp}\varepsilon_f}{b}.$$

式中: a_1, a_2, a_3 为待确定的常数; b 为圆形截面的直径,或者正方形截面的边长,或者长方形截面的短边长度; f_{cj} 为带载包裹 FRP 时混凝土承受的应力; p 为带载水平,以百分数表示; ε_f 为 FRP 的极限应变。

2.2 不同混凝土截面形状的转换关系

为了方便计算 FRP 约束不同截面混凝土柱的力学性能,文献[23]基于 FRP 约束不同截面的混凝土的试验数据,提出用倒角半径比例系数 ρ 来转换正方形和圆形截面之间的几何关系,文献[24]用长宽比系数 k_a 进一步扩展了正方形和长方形截面之间的几何关系。3 种截面形状的转换关系:当 $\rho = 0$ 、 $k_a = 1$ 时,混凝土截面为正方形;当 $\rho = 1$ 、 $k_a = 1$,混凝土截面为圆形;当 $k_a \neq 1$ 时,混凝土截面为长方形。不同截面形状的转换如图 2 所示。本文也采用倒角半径比例系数 ρ 和长宽比系数 k_a 表述这 3 种不同截面的转化关系。

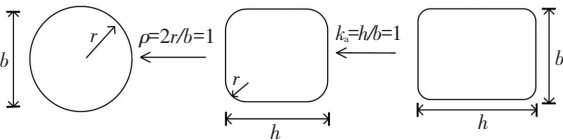


图 2 不同截面转换

Fig.2 Conversion of different cross sections

3 现有模型评估

3.1 典型环向应变-轴向应变模型

为了评估现有环向应变-轴向应变关系模型是否适用于 FRP 约束损伤混凝土柱。本文选取了几个典型模型进行评估。

3.1.1 Jiang 等模型

文献[12]通过对 48 个 FRP 约束混凝土圆柱进行分析,得到了 FRP 约束未损伤混凝土圆柱的环向

应变-轴向应变关系模型。计算公式为

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} = 0.85 \left(1 + 8 \frac{\sigma_1}{f_{co}} \right) \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right]^{0.7} - \exp \left[-7 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right] \right\}. \tag{3}$$

式中: ε_c 为 FRP 约束混凝土柱轴向应变, ε_1 为 FRP 约束混凝土柱环向应变, σ_1 为 FRP 的应变为 ε_1 时对应的环向约束应力。

3.1.2 Lim 等模型

文献[15]基于 2 038 个试验数据,提出了 FRP 约束未损伤混凝土圆柱的环向应变-轴向应变关系模型,计算公式为

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_1}{v_i \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_1}{v_i \varepsilon_{co}} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} + 0.04 \varepsilon_1^{0.7} \left[1 + 21 \left(\frac{\sigma_1}{f_{co}} \right)^{0.8} \right]. \tag{4}$$

式中: v_i 为混凝土的初始泊松比, n 为控制曲线过渡段的形状参数。

3.1.3 何政等模型

文献[16]通过对 29 个混凝土圆柱进行预加载试验,提出了预加载作用下 FRP 约束混凝土圆柱的环向应变-轴向应变的发展趋势。该模型在 Jiang 等模型基础上,考虑了带载应力水平,引入极限膨胀比影响因子,得到

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} = 0.85 \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right]^{0.7} - \exp \left[-7 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right] \right\} \left(1 + 8 \frac{\sigma_1}{f_{co}} \right) \frac{1}{\xi}. \tag{5}$$

式中 ξ 为带载约束混凝土极限膨胀比的影响因子。

3.2 现有模型评价

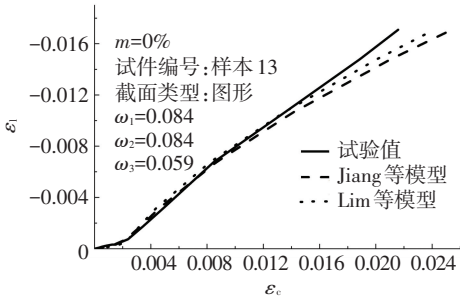
基于表 1 中的试验数据,对以上 3 个典型模型的准确性进行评估,评估结果见图 3。其中,图 3(a)为 FRP 约束未损伤混凝土,图 3(b)~3(f)为 FRP 约束预损伤混凝土曲线,图 3(g)~3(h)为 FRP 约束预加载混凝土曲线。

图 3(c)、3(d)、3(f)中的试件编号依次为混凝土强度、包裹 FRP 层数和卸载水平。例如 30-1L-90,代表 C30 的混凝土强度,包裹层数为 1 层,卸载水平 $m = -90\%$ 的混凝土试件。图 3 中其他图表的试件编号采用参考文献中的编号。

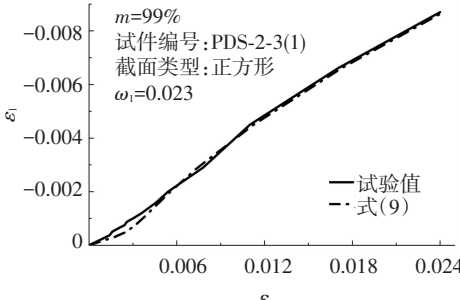
从图 3(a)可以看出,Jiang 等模型和 Lim 等模型均可以准确计算 FRP 约束未损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系;随着损伤程度 δ_1 的逐渐增大,现有模型的计算值与试验值的偏离水平也逐渐增大,如图 3(b)~3(f)所示。由图 3(g)~3(h)可

知,现有的模型不能准确计算 FRP 约束预加载混凝土柱的环向应变-轴向应变关系,其原因在于 Jiang 等模型和 Lim 等模型均是基于 FRP 约束未损伤混凝土试验数据提出的,随着混凝土损伤程度的增大,混凝土内部已经产生了裂缝,虽然包裹了 FRP,损伤混凝土在轴向荷载作用下的环向变形与未损伤混凝土的环向变形仍然不同. 文献[21]认为 Jiang 等模型可以用于 FRP 约束预加载圆形和矩形混凝土柱的环向应变-轴向应变关系. 从图 3(g)、3(h)可以

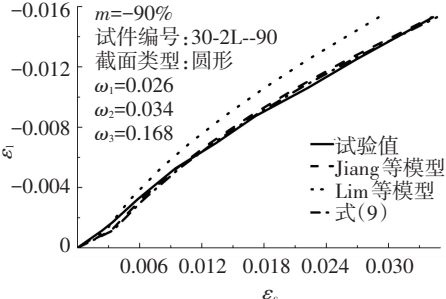
看出 Jiang 等模型在预测 FRP 约束预加载正方形混凝土柱的环向应变-轴向应变关系时,存在一定误差. 此外,从图 3(b)、3(e)、3(h)可以看出,混凝土柱的截面类型对环向应变-轴向应变的关系影响也非常显著. 此外,混凝土方柱作为建筑结构中一种常见的截面形式也需要进行分析. 因此,需要建立一个考虑混凝土截面形状、混凝土损伤程度和损伤类型的模型,以便更加准确地预测 FRP 约束损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系.



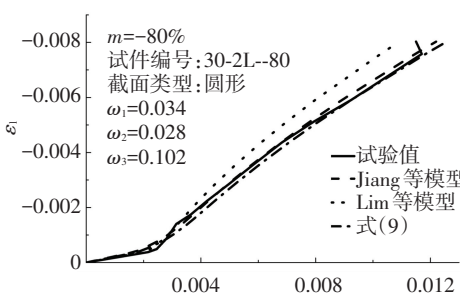
(a) 样本 13 试验数据^[12]



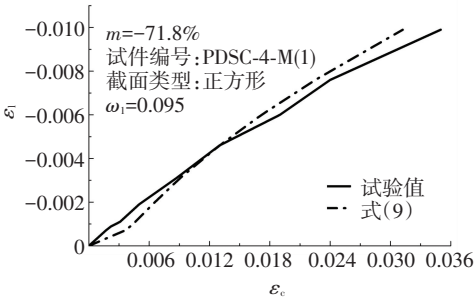
(b) PDS-2-3(1) 试验数据^[18]



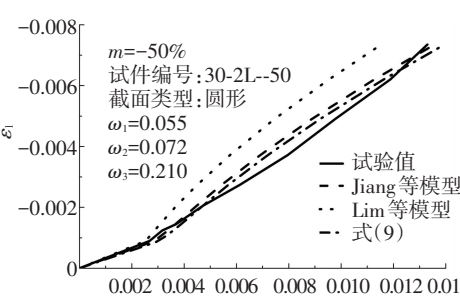
(c) 30-2L--90 试验数据^[11]



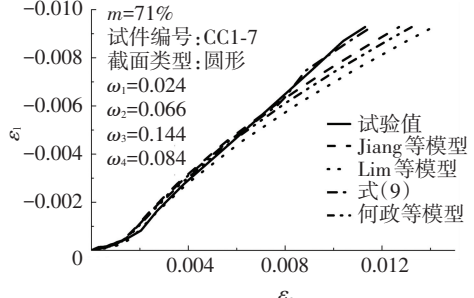
(d) 50-2L--80 试验数据^[11]



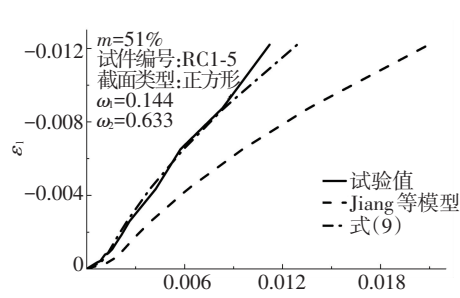
(e) PDSC-4-M(1) 试验数据^[19]



(f) 30-2L--50 试验数据^[11]



(g) CC1-7 试验数据^[21]



(h) RC1-5 试验数据^[21]

图 3 模型评价

Fig.3 Evaluation of lateral strain-axial strain models

4 新模型的建立

4.1 模型推导

现有文献[15,21]和本文评估结果均表明 Jiang 等模型能够准确地预测 FRP 约束未损伤混凝土环向应变-轴向应变关系,但是该模型预测 FRP 约束损伤混凝土的环向应变-轴向应变关系存在误差.因此本文在 Jiang 等模型基础上,考虑截面形状系数(ρ, k_a)、混凝土损伤 φ , 建立能够适用于 FRP 约束不同截面损伤混凝土的环向应变-轴向应变的关系模型,计算公式为

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} = 0.85 \left[1 + 8 \frac{\sigma_1}{f_{co}} + d\varphi^e \left(\frac{2r}{b} \right)^f \left(\frac{h}{b} \right)^g \right] \times \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right]^{0.7} - \exp \left[-7 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

式中: r 为倒角半径, d, e, f, g 为待确定的系数, φ 为与混凝土损伤有关的函数.

对于损伤类型(I)的混凝土试件, 损伤函数 φ 为 δ_1 . 根据表1中的 FRP 约束预损伤方柱与圆柱的数据, 对式(6)进行非线性回归分析得到 d, e, f, g 的值分别为 0.053、0.10、-1.072、-9.703, 然后根据 FRP 约束预加载方柱与圆柱的数据, 对式(2)非线性回归分析得到 a_1, a_2, a_3 分别为 0.11、0.21、1.99, 所以式(2)可写为

$$\varphi = 0.11 \frac{p^{0.21}}{(f_i/f_{co})^{1.99}}. \quad (7)$$

将两种不同损伤类型的损伤函数进行汇总, 得

$$\varphi = \begin{cases} \delta_1, & \text{适用混凝土损伤类型(I);} \\ 0.11 \frac{p^{0.21}}{(f_i/f_{co})^{1.99}}, & \text{适用混凝土损伤类型(II).} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)和系数 d, e, f, g 的值代入式(6), 即可得到 FRP 约束不同截面损伤混凝土的环向应变-轴向应变的关系表达式为

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} = 0.85 \left[1 + 8 \frac{\sigma_1}{f_{co}} + 0.053\varphi^{0.10} \left(\frac{2r}{b} \right)^{-1.072} \left(\frac{h}{b} \right)^{-9.703} \right] \times \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right]^{0.7} - \exp \left[-7 \left(\frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}} \right) \right] \right\}. \quad (9)$$

式中: σ_1 为 FRP 约束不同截面混凝土柱的约束应力, $\sigma_1 = 2E_{frp}\varepsilon_{tfrp}/b$, 其中 E_{frp} 为 FRP 的弹性模量, t_{frp} 为加固混凝土的 FRP 厚度, 其数值为单层 FRP 厚度与 FRP 层数的乘积.

当 $\varphi \neq 0, 2r/b = 1, h/b = 1$ 时, 式(9)适用于 FRP 约束圆形损伤混凝土柱; 当 $\varphi \neq 0, 2r/b \neq 1,$

$h/b = 1$ 时, 式(9)适用于 FRP 约束正方形损伤混凝土柱; 当 $\varphi \neq 0, 2r/b \neq 1, h/b \neq 1$ 时, 式(9)适用于 FRP 约束长方形损伤混凝土柱; 当参数 $\varphi = 0$ 时, 表示混凝土没有损伤, 此时式(9)转化为 Jiang 等模型. 因此, 式(9)是合理的, 能够计算 FRP 约束不同截面、不同损伤类型混凝土柱的环向应变-轴向应变关系曲线.

4.2 模型评价

4.2.1 模型应于 FRP 约束损伤混凝土柱

根据表1中收集的数据对新提出的模型, 即式(9)进行评价, 评价结果如图3所示. 图3中评估系数 ω 用来量化不同模型的准确性:

$$\omega = \frac{\sum_1^{n_1} |\text{Expe}_i - \text{Theo}_i|}{\sum_1^{n_1} |\text{Expe}_i|}. \quad (10)$$

式中 $\text{Theo}_i, \text{Expe}_i$ 和 n_1 分别为第 i 个点的理论值、试验值和试验值的数量.

在图3中的试验曲线上等间距取20点, 计算系数 ω 值. 当 ω 接近0时, 说明理论值接近实验值. 其中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 分别用来表示式(9)、Jiang 等模型、Lim 等模型和何政等模型与试验值的相关性.

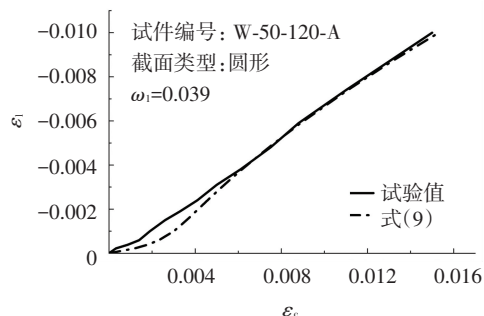
由图3(a)、3(c)、3(f)可知, 系数 ω_1 均比 $\omega_2, \omega_3, \omega_4$ 小. 图3(d)中, 系数 ω_1 也相对较小. 说明式(9)能够比 Jiang 等模型和 Lim 等模型更准确地预测 FRP 约束不同卸载水平混凝土圆柱的环向应变-轴向应变关系曲线. 由图3(b)、3(e)可知, 式(9)也可准确预测 FRP 约束预损伤混凝土方柱的环向应变-轴向应变关系. 由图3(g)、3(h)可知, 系数 ω_1 均比相应的 $\omega_2, \omega_3, \omega_4$ 小, 说明式(9)比 Jiang 等模型、Lim 等模型和何政等模型可以更准确地描述 FRP 约束预加载混凝土柱的环向应变-轴向应变关系. 综上所述, 相比现有的其他模型, 本文新模型可以准确预测 FRP 约束不同损伤类型、不同损伤程度和不同截面类型的混凝土柱的环向应变-轴向应变关系, 其原因是本文模型同时考虑了混凝土的损伤程度和截面类型.

4.2.2 模型应于 FRP 约束高温损伤混凝土柱

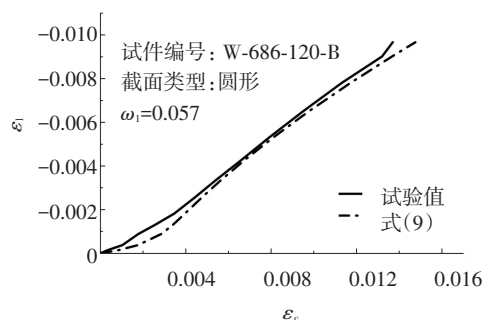
现有文献[25-27]表明: 混凝土柱的高温损伤也是一种混凝土损伤类型, 高温作用对混凝土应力-应变关系曲线的形状基本没有影响, 只是改变了峰值应变、峰值应力及弹性模量. 该结果与预加载、预损伤对混凝土的影响效果相同. 文献[26]在 FRP 约束未损伤混凝土抗压强度模型基础上引入与本文相同的混凝土残余强度 f_{cd} , 提出了 FRP 约束高温损伤混凝土柱抗压强度模型, 这从另一角度说明高温损伤混凝土和预损伤、预加载损伤混凝土的损伤效果

相同。因此,可以用 FRP 约束高温损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系试验曲线,验证本文提出的模型,即式(9)的准确性。式(9)与 FRP 约束高温损伤混凝土柱的数据^[27]对比结果如图 4 所示。

由图 4 可知,式(9)的预测结果与试验值较吻合,系数 ω_1 为 0.039 和 0.057,这进一步验证了式(9)的准确性。因此,式(9)不仅可以用于预测 FRP 约束损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系,也可以用于预测 FRP 约束高温损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系。



(a) W-500-120-A 试验数据^[27]



(b) W-686-120-B 试验数据^[27]

图 4 模型预测高温损伤混凝土

Fig.4 Model prediction of high temperature damage concrete columns

5 结 论

1) 现有的 FRP 约束未损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系模型不适用于 FRP 约束损伤混凝土。随着混凝土损伤程度的增加,现有模型的计算值与试验值的偏差增加。

2) 在 Jiang 等模型的基础上,基于 FRP 约束两种损伤类型、3 种混凝土截面的 264 条环向应变-轴向应变关系,对 FRP 约束不同截面、不同损伤类型混凝土的环向应变-轴向应变关系模型进行推导,建立了 FRP 约束不同损伤混凝土柱的环向应变-轴向应变关系新模型,该模型既可以同时适用于 FRP 约束预损伤圆形、正方形、长方形截面混凝土柱,也可以计算 FRP 约束预加载混凝土圆柱与正方形柱。通过比较发现,该模型的预测曲线与试验曲线吻合

度较高。

3) 现有文献中关于 FRP 约束损伤混凝土应力-应变关系试验曲线均具有强化特征,所以新模型只适用于具有应变强化特征的 FRP 约束损伤混凝土环向应变-轴向应变关系。

4) 在建立的数据库中,FRP 约束长方形损伤混凝土柱的试验曲线较少,为进一步提高预测 FRP 约束长方形损伤混凝土环向应变-轴向应变关系的准确性,还需要进行大量的试验。

参考文献

- [1] CAO Y G, JIANG C, WU Y F. Cross-sectional unification on the stress-strain model of concrete subjected to high passive confinement by fiber-reinforced polymer[J]. *Polymers*, 2016, 8(5): 186. DOI: 10.3390/polym8050186
- [2] CAO Y G, WU Y F, LI X Q. Unified model for evaluating ultimate strain of FRP confined concrete based on energy method[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 103: 23. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.042
- [3] ZHOU Y, LI M, SUI L, et al. Effect of sulfate attack on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 110: 235. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.038
- [4] WU Y F, CAO Y. Energy balance method for modeling ultimate strain of confined concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2017, 114(2): 373. DOI: 10.14359/51689429
- [5] WU Y F, CAO Y G. Effect of load path on behavior of FRP-confined concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(4): 04017014. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000799
- [6] WU Y F, JIANG C. Quantification of bond-slip relationship for externally bonded FRP-to-concrete joints[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(5): 673. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000375
- [7] WU Y F, WEI Y. General stress-strain model for steel-and FRP-confined concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(4): 04014069. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000511
- [8] LI P D, SUI L, XING F, et al. Stress-strain relation of FRP-confined predamaged concrete prisms with square sections of different corner radii subjected to monotonic axial compression[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(2): 04019001. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000921
- [9] MA G, LI H, DUAN Z. Repair effects and acoustic emission technique-based fracture evaluation for predamaged concrete columns confined with fiber-reinforced polymers[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(6): 626. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000309
- [10] MA G, LI H, YAN L, et al. Testing and analysis of basalt FRP-confined damaged concrete cylinders under axial compression loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169: 762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.172
- [11] WU Y F, YUN Y, WEI Y, et al. Effect of predamage on the stress-strain relationship of confined concrete under monotonic loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(12): 04014093. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001015

[12]JIANG T, TENG J. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete[J]. Engineering Structures,2007,29(11):2968. DOI:10.1016/j.engstruct.2007.01.010

[13]OZBAKKALOGLU T, LIM J C, VINCENT T. FRP-confined concrete in circular sections: review and assessment of stress-strain models[J]. Engineering Structures,2013,49:1068.DOI:10.1016/j.engstruct.2012.06.010

[14]KWAN A K H, DONG C X, HO J C M. Axial and lateral stress-strain model for FRP confined concrete[J]. Engineering Structures, 2015, 99: 285. DOI: 10.1016/j. engstruct.2015.04.046

[15]LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Lateral strain-to-axial strain relationship of confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 141(5): 04014141. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001094

[16]何政,金建平,宋继广.带载状态下 CFRP 约束混凝土圆柱膨胀比试验研究[J].工程力学,2009,26(9):145

HE Zheng, JIN Jianping, SONG Jiguang. Experimental study on CFRP confined cylindrical expansion ratio under load [J]. Engineering Mechanics,2009,26(9):145

[17]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. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139)

[18]DALGIC K D, ISPIR M, BINBIR E, et al. Effects of pre-damage on axial behavior of CFRP jacketed non-circular members [C]// Proceedings of the Conference on Civil Engineering Infrastructure based on Polymer Composites. Krakow, Poland; CECOM, 2012

[19]DALGIC K D, ISPIR M, ILKI A. Cyclic and monotonic compression behavior of CFRP-jacketed damaged noncircular concrete prisms [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(1): 04015040.DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000603

[20]PAN Y, GUO R, LI H, et al. Analysis-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete with preload[J]. Composite Structures, 2017, 166: 57. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.01.007

[21]PAN Y, GUO R, LI H, et al. Study on stress-strain relation of concrete confined by CFRP under preload[J]. Engineering Structures, 2017, 143: 52. DOI: 10.1016/j. engstruct.2017.04.004

[22]GUO Y, XIE J, XIE Z, et al. Experimental study on compressive behavior of damaged normal- and high-strength concrete confined with CFRP laminates[J]. Construction & Building Materials, 2016, 107: 411. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.010

[23]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.DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:3(253)

[24]WU Y F, WEI Y Y. Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns[J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 32. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.08.012

[25]吴波,马忠诚,欧进萍.高温后混凝土在重复荷载作用下的应力-应变关系[J].地震工程与工程振动,1997,17(3):36

WU Bo, MA Zhongcheng, OU Jinping. Stress-strain relations for concrete under cyclic loading after high temperature up to 800 ℃ [J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 1997, 17(3):36

[26]欧阳利军,许峰,高婉扬,等.玄武岩纤维布约束高温损伤混凝土方柱轴压力学性能试验[J].复合材料学报,2019,36(2):469

OUYANG Lijun, XU Feng, GAO Wanyang, et al. Axial compressive behavior of post-heated square concrete columns wrapped by BFRP sheets: an experimental investigation [J]. AMCS, 2019, 36(2):469.DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20180611.001

[27]BISBY L A, CHEN J F, LI S Q, et al. Strengthening fire-damaged concrete by confinement with fibre-reinforced polymer wraps [J]. Engineering Structures,2011,33(12):3381.DOI:10.1016/j.engstruct.2011.07.002

(编辑 魏希柱)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“补偿阳极位置对舰船腐蚀电场防护效果的影响”,图片包含了潜艇模型网格剖分、仿真的潜艇表面电位分布、电场平面分布、潜艇周围电场流线以及腐蚀电场防护原理图.为消除舰船腐蚀电场,首先利用 Solidworks 建立包括壳体、螺旋桨、舵和指挥台的潜艇三维几何模型,然后采用 COMSOL 仿真软件中电流分布(边界元)接口建立潜艇腐蚀电场边界元模型,破损区域和螺旋桨的边界条件分别设置为 921A 钢和 B10 铜合金的非线性极化曲线,补偿阳极为恒电流边界,分析补偿阳极纵向位置和周向位置对腐蚀电场防护效果的影响,结果表明补偿阳极的周向位置对电场防护效果影响较小,而纵向位置对电场防护效果具有显著的影响.最后,结合电偶极子模型理论给出了合理的舰船腐蚀电场防护方法.通过合理地布置补偿阳极位置,可以大幅度地减小舰船腐蚀电场强度,从而实现舰船电场隐身、阴极保护优化设计以及减少舰船腐蚀电场对船上电磁通信设备干扰的目的.

(图文提供:徐庆林,王向军,张建春,刘德红.海军工程大学电气工程学院)