

文章编号:1007-9629(2024)06-0496-07

# FRP 箍筋强度保留率分布模型与可靠性分析

江佳斐, 吕佳豪, 薛伟辰\*

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**基于文献数据,采用假设检验法,开展纤维增强复合材料(FRP)箍筋强度保留率分布规律研究.通过 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验对比了 Weibull 分布、正态分布及对数正态分布这 3 种模型对 FRP 箍筋强度保留率的拟合优度.结果表明:当 FRP 箍筋弯折半径( $R$ )与箍筋直径( $D$ )之比( $R/D$ )在常规范范围内(3~5)时,对数正态分布为最优分布模型,据此得到 95% 和 50% 保证率下 FRP 箍筋强度保留率分别不小于 32.46% 和 43.79%;中国、美国、日本和加拿大四国规范保留率预测公式计算结果的保证率仅为 24.1%~40.3%,偏于不安全.根据中国 FRP 纵筋与箍筋的强度保证率要求,当  $R/D=3, 4, 5$  时玻璃纤维增强复合材料(GFRP)箍筋强度保留率不小于 38.86%、35.68%、46.09%.

**关键词:**FRP 箍筋;强度保留率;分布规律;K-S 检验;可靠性

中图分类号:TB332

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.003

## Strength Retention Rate Distribution Model and Reliability Analysis of FRP Stirrups

JIANG Jiafei, LÜ Jiahao, XUE Weichen\*

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** The hypothesis testing approach was applied to treat the experimental data from the open literature for the establishment of the distribution law of the strength retention rate of fiber reinforced plastic (FRP) stirrups. The goodness-of-fit of three distribution models (Weibull distribution, normal distribution, and lognormal distribution) for the FRP stirrups strength retention rate was compared using Kolmogorov-Smirnov (K-S) test. The results show that the lognormal distribution is the optimal distribution model within the rational range (3~5) of internal radius ( $R$ ) to bar diameter ( $D$ ) ratio ( $R/D$ ). It follows that the strength retention rates of 95% and 50% guarantee rates is no less than 32.46% and 43.79%, respectively. Furthermore, the results show that the reliabilities of calculation results from the retention rate formula used in the Chinese, American, Canadian, and Japanese standards are only between 24.1%~40.3%, which is unconservative. According to the strength guarantee rate requirements of FRP longitudinal reinforcement and stirrups in China, the strength retention rates of glass fiber reinforced plastic (GFRP) stirrups with  $R/D$  of 3, 4 and 5 are not less than 38.86%, 35.68% and 46.09%, respectively.

**Key words:** FRP stirrup; strength retention rate; distribution law; K-S test; reliability

纤维增强复合材料(FRP)筋质量轻、强度高、耐腐蚀性优,可用来替代钢筋,解决混凝土结构中的钢筋锈蚀问题<sup>[1-4]</sup>.FRP 筋分为纵筋与箍筋,其中,FRP 箍筋在构件抗剪与抗扭性能中发挥了重要作用,其

强度设计值是 FRP 筋混凝土受剪及受扭构件承载力设计计算中的重要参数之一.FR 箍筋是由树脂和纤维复合而成的各向异性弹性材料<sup>[5]</sup>,其弯折段存在纤维应力分布不均匀的特点,且弯折段在混凝土构

收稿日期:2023-07-06; 修订日期:2023-10-24

基金项目:“十四五”国家重点研究计划项目(2022YFB3706504);非金属材料创新中心创新基金资助项目(2023TDA4-1)

第一作者:江佳斐(1984—),女,江苏常熟人,同济大学研究员,博士生导师,博士.E-mail: jfjiang@tongji.edu.cn

通讯作者:薛伟辰(1970—),男,江苏扬州人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail: xuewc@tongji.edu.cn

件中往往处于拉压双向应力状态,从而导致FRP箍筋在混凝土中的破坏强度(弯拉强度)低于其直线段抗拉强度且离散性大.为此,国内外学者开展了大量FRP箍筋强度保留率(弯拉强度与直线段抗拉强度之比)的试验研究<sup>[6-23]</sup>.结果表明:影响FRP箍筋弯拉强度及强度保留率的因素包括箍筋弯折半径( $R$ )、箍筋直径( $D$ )、箍筋弯折半径与箍筋直径之比( $R/D$ )、箍筋类型、生产工艺及质量控制等;普遍认为 $R/D$ 为主要影响因素,但缺乏基于数据库的相关性分析依据;提出了基于数值回归的强度保留率经验公式,但尚未开展基于强度保留率分布模型的可靠性分析.

鉴于此,本文通过文献调研建立FRP箍筋弯拉强度及强度保留率( $S$ )的数据库,并通过假设检验法确定FRP箍筋强度保留率的最优分布模型.在此基础上进行可靠性分析,并以工程中最为常用的玻璃纤维增强复合材料(GFRP)箍筋为例,提出基于箍筋强度设计要求的箍筋强度保留率的合理取值.

## 1 数据库的建立

### 1.1 数据收集与筛选

国内外学者自21世纪初即开展了众多FRP箍筋强度试验研究.本文在公开发表的论文<sup>[6-23]</sup>中收集整理出159组数据,建立FRP箍筋强度试验数据库,其中试验参数包括:箍筋类型(玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)、玄武岩纤维增强复合材料(BFRP))、箍筋纤维含量、截面形状、箍筋直径( $D$ ,矩形断面厚度,按照文献[10]采用的等效方法换算为等效直径)、箍筋的弯折半径( $R$ )、弯折半径与箍筋直径之比( $R/D$ )、FRP箍筋直线段抗拉强度、箍筋弹性模量及试验方法等.

Imjai等<sup>[8]</sup>在进行FRP箍筋弯拉强度试验时发现,弯折段前端黏结长度较长会产生应力递减,导致破坏位置出现在非弯折段,此时箍筋破坏强度大于弯拉强度.此外,FRP箍筋的尾部锚固长度也是影响破坏模式的重要参数.El-Sayed等<sup>[12]</sup>研究了FRP箍筋尾部锚固长度( $3D$ 、 $6D$ 、 $9D$ 、 $12D$ 、 $15D$ )对破坏模式的影响,得出能充分发挥FRP箍筋弯拉强度的最小尾部锚固长度为 $6D$ .FRP箍筋弯拉强度标准测试方法<sup>[24]</sup>中要求最小尾部锚固长度也为 $6D$ .因此,本研究所建数据库剔除了箍筋弯折段前端有黏结和箍筋尾部锚固长度小于 $6D$ 的数据.此外,部分箍筋试件由于弯折段采用树脂补强措施,其相关数据也被剔除.按照破坏模式一致、试验方法统一和无补强措施的原则,筛选出59组FRP箍筋弯拉强度试验数据,用于分析FRP箍筋强度保留率的分布规律.

### 1.2 多影响因素的相关性分析

由于影响FRP箍筋强度保留率的参数众多,本研究基于Pearson相关性理论,先对FRP箍筋强度保留率与各影响因素之间的相关性进行分析.

Pearson相关系数( $r$ )又称积差相关系数<sup>[25]</sup>,是衡量2个变量集合之间线性相关程度的指标,计算式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: $X_i$ 、 $Y_i$ 分别表示变量 $X$ 和 $Y$ 的每个具体值; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别表示变量 $X$ 、 $Y$ 的所有数据的平均值; $n$ 表示变量 $X$ 与 $Y$ 的数据量.

$r$ 是一个无量纲的统计指标. $r > 0$ 表明变量 $X$ 与 $Y$ 正相关; $r < 0$ 表明变量 $X$ 与 $Y$ 负相关; $r = 0$ 表明变量 $X$ 与 $Y$ 不相关. $|r|$ 越接近1,两变量之间的相关程度就越密切.变量间相关程度与 $r$ 的对应关系如表1所示.

表1 变量间相关程度与Pearson相关系数的对应关系  
Table 1 Relationship between correlation degree and Pearson correlation coefficient<sup>[25]</sup>

Correlation degree	$ r $
Uncorrelation	$[0, 0.3)$
Weak correlation	$[0.3, 0.5)$
Significant correlation	$[0.5, 0.8)$
Strong correlation	$[0.8, 1]$

表2为通过Pearson相关性理论计算得出的FRP箍筋强度保留率与各影响因素间的相关系数.由表2可见, $R/D$ 的 $|r|$ 最高,为0.63,其他参数的 $|r|$ 均小于0.30,与0.63存在明显差距.这表明FRP箍筋强度保留率与 $R/D$ 显著相关,其他影响因素对FRP箍筋强度保留率的影响极小,不足以支撑开展数据间的规律分析,可忽略其相关性.因此,本文以 $R/D$ 作

表2 FRP箍筋强度保留率与各影响因素间的相关性  
Table 2 Relationship between strength retention rate of FRP stirrup and various influencing factors

Factor	$r$
Type of FRP stirrup	0.12
Test method	-0.28
Section shape of stirrup	0.07
Fiber content	0.07
Diameter	-0.24
Bend radius	0.19
$R/D$	0.63
Tensile strength	0.24
Elastic modulus	0.28

为主要变量,进一步分析FRP箍筋强度保留率的分布规律.

### 1.3 箍筋强度保留率数据库的建立

基于试验数据的筛选原则与相关性分析结果,

筛选出的59组数据涵盖了工程中常用的FRP箍筋类型(GFRP、BFRP、CFRP)及箍筋的 $R/D$ 范围(3~5).详细数据来源<sup>[6-8,11-12,21-22]</sup>及FRP箍筋保留率

如表3所示.

表3 FRP箍筋强度保留率数据库  
Table 3 Database of strength retention rate of FRP stirrups

Author	Type of stirrup	Section shape	$D/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$R/D$	Bend strength/ MPa	Tensile strength/MPa	$S/\%$
Li, et al. <sup>[6]</sup>	CFRP	Rectangle	2.0	8	4	1 086	2 480	43.8
Ahmed, et al. <sup>[7]</sup>	GFRP	Circular	9.5-19.1	38-76	4	240-712	533-1 538	32.9-58.3
Imjai, et al. <sup>[8]</sup>	GFRP	Rectangle/circular	3.0-13.5	9-54	3-5	271-464	690-720	36.6-64.4
Shehata, et al. <sup>[11]</sup>	CFRP	Rectangle/circular	5.0-12.0	20-50	4	345-793	713-1 800	44.1-56.1
El-Sayed, et al. <sup>[12]</sup>	CFRP	Circular	9.5-12.7	38-51	4	539-761	1 224-1 328	44.0-57.3
WANG, et al. <sup>[21]</sup>	GFRP	Circular	7.0	20	3	387	1 045	37.0
Lu <sup>[22]</sup>	BFRP	Circular	6.0-8.0	24-32	4	347-594	1 096-1 604	31.6-39.1

## 2 结果与讨论

本文采用Weibull分布、正态分布和对数正态分布3种分布模型,对不同 $R/D$ 情况下FRP箍筋强度保留率数据进行拟合.并通过线性回归分析及Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验确定最优分布模型.

### 2.1 线性回归分析

先将以上3种分布模型的概率累积分布函数表

达式线性变换为 $y=ax+b$ 形式,如表4<sup>[26]</sup>所示;再代入FRP箍筋强度保留率数据,求得相应分布模型中的均值 $\mu$ 、标准差 $\sigma$ 及决定系数 $R^2$ ,并对3种分布模型进行显著性检验,结果见表5.由表5可见:不同 $R/D$ 情况下,3种分布模型的 $R^2$ 均远超工程常用显著性水平 $\alpha=0.01$ 或 $\alpha=0.05$ 时的决定系数临界值.这说明3种分布模型均可表征FRP箍筋强度保留率的分布规律.

表4 3种分布模型的线性变换关系

Table 4 Linear transformation relationship of three distribution models<sup>[26]</sup>

Distribution model	Cumulative distribution function	$y$	$x$	$a$	$b$
Weibull	$F(S) = 1 - e^{-\left(\frac{S}{\mu}\right)^\sigma}$	$\ln \ln \frac{1}{1 - F(S)}$	$\ln S$	$\sigma$	$\sigma \ln \mu$
Normal	$F(S) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^S e^{-\frac{(S-\mu)^2}{2\sigma^2}} dS$	$\Phi^{-1}[F(S)]$	$S$	$\frac{1}{\sigma}$	$-\frac{\mu}{\sigma}$
Lognormal	$F(S) = \frac{1}{\sigma S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^S e^{-\frac{(\ln S - \mu)^2}{2\sigma^2}} dS$	$\Phi^{-1}[F(S)]$	$\ln S$	$\frac{1}{\sigma}$	$-\frac{\mu}{\sigma}$

Note:  $F(S)$  represents the cumulative distribution function of Weibull distribution, normal distribution and lognormal distribution;  $\mu$  and  $\sigma$  are the mean and standard deviation of different distribution models;  $a, b$  represents the slope and intercept of the linear function after linear regression, respectively.

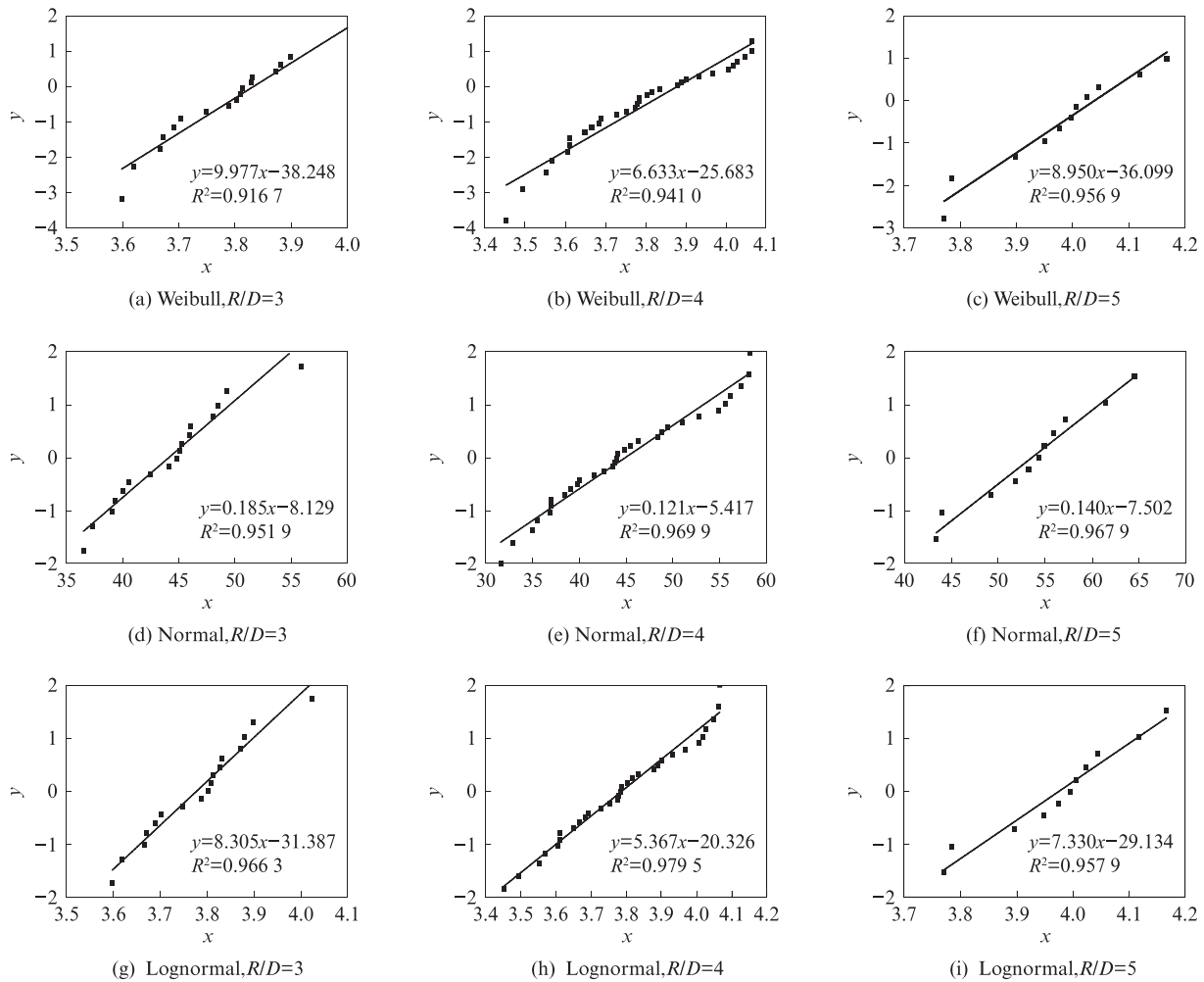
表5 3种分布模型的均值、标准差及显著性检验结果

Table 5 Mean, standard deviation and significance test results of three distribution models

$R/D$	Weibull			Normal			Lognormal			Critical value of significant level	
	$\mu$	$\sigma$	$R^2$	$\mu$	$\sigma$	$R^2$	$\mu$	$\sigma$	$R^2$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$
3	46.22	9.98	0.917	44.04	5.42	0.952	44.11	5.33	0.966	0.575	0.456
4	48.04	6.63	0.941	44.84	8.28	0.970	44.92	8.44	0.980	0.440	0.345
5	56.45	8.95	0.957	53.59	7.14	0.968	53.72	7.36	0.958	0.684	0.553

图1为不同 $R/D$ 情况下3种分布模型的线性回归结果.由图1可见:当 $R/D=3$ 或 $R/D=4$ 时,3种分布模型中 $R^2$ 呈现统一规律,即对数正态分布的 $R^2 >$  正态分布的 $R^2 >$  Weibull分布的 $R^2$ ;当 $R/D=5$

时,3种分布模型中 $R^2$ 值基本相等,这主要跟样本数量有关, $R/D=3$ 数据量17组, $R/D=4$ 数据量31组,而 $R/D=5$ 的数据只有11组,表明当样本数量较小时,3种分布模型的 $R^2$ 值区别不明显.

图1 不同 $R/D$ 情况下3种分布模型的线性回归结果Fig. 1 Linear regression results of three distribution models with different  $R/D$  values

## 2.2 K-S检验

K-S检验<sup>[27]</sup>是用来检验一组数据是否服从某种理论分布的方法.该方法通过对比统计量 $D_N$ 与给定显著性水平 $\alpha$ 下的临界值 $D_{N,\alpha}$ 来确定拟合优度.当 $D_N < D_{N,\alpha}$ 时,分布模型可以表征样本数据的分布规律,且 $D_N$ 越小,分布模型的拟合优度越高. $D_N$ 表达式为:

$$D_N = \max [ |F_j(S_j) - F(S_j)| ], 1 \leq j \leq N \quad (2)$$

式中: $j$ 为按照强度保留率由小到大排序的序号; $S_j$ 为序号为 $j$ 的FRP箍筋强度保留率; $N$ 表示样本数据总量; $F_j(S_j)$ 为由累计分布函数计算得到的强度保留率达到 $S_j$ 时的失效概率理论值; $F(S_j)$ 为通过中位秩法计算所得箍筋强度保留率达到 $S_j$ 时的失效概率, $F(S_j) = (j - 0.3) / (N + 0.4)$ .

选取工程上常用的显著性水平 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ ,进行不同 $R/D$ 情况下K-S检验,结果如表6所示.由表6可知:3种分布模型在不同 $R/D$ 情况下的 $D_N$ 值均小于 $D_{N,\alpha}$ ;对数正态分布模型中的 $D_N$ 值在3种 $R/D$ 情况下最小,为最优分布模型.

表6 K-S检验结果

Table 6 K-S test results

$R/D$	$N$	$D_N$			$D_{N,\alpha}$	
		Weibull	Normal	Lognormal	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$
3	17	0.107	0.086	0.081	0.381	0.318
4	31	0.101	0.070	0.061	0.285	0.240
5	11	0.094	0.097	0.077	0.468	0.391

## 2.3 最优分布模型确定

线性回归分析与K-S检验结果表明:虽然3种分布模型在一定程度上均可表征FRP箍筋强度保留率的分布规律;但3种分布模型的 $R^2$ 和 $D_N$ 值对比分析显示,对数正态分布模型是表征FRP箍筋强度保留率分布规律的最优模型.

## 3 可靠性分析

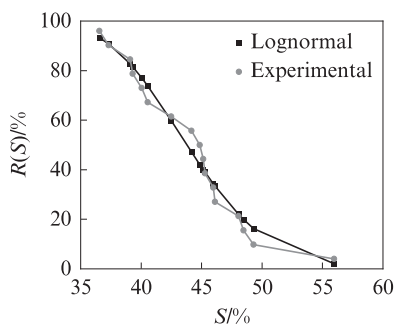
### 3.1 基于对数正态分布模型的可靠性计算

本文基于FRP箍筋强度保留率最优分布模型——对数正态分布模型,采用式(3)计算得到不同 $R/D$ 情

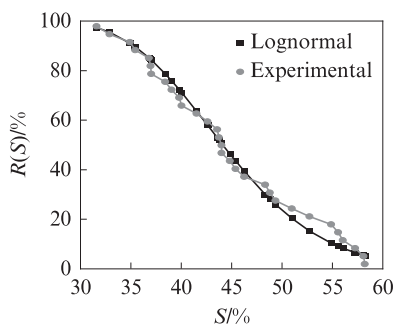


况下FRP箍筋强度的保留率-保证率( $R(S)$ )曲线,如图2所示.

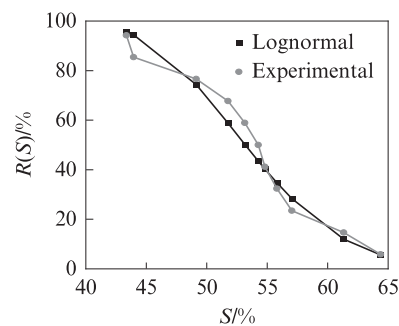
$$R(S) = 1 - F(S) \quad (3)$$



(a)  $R/D=3$



(b)  $R/D=4$



(c)  $R/D=5$

图2 不同 $R/D$ 情况下FRP箍筋强度保留率-保证率曲线

Fig. 2 Strength retention rate-reliability curves of FRP stirrup under different  $R/D$  values

### 3.2 现行规范中强度保留率的可靠性分析

中国<sup>[28]</sup>、美国<sup>[29]</sup>、日本<sup>[30]</sup>和加拿大<sup>[31]</sup>规范中FRP箍筋强度保留率通过式(4)计算得到.

$$\frac{f_{fb}}{f_{fu}} = 0.05 \times \frac{R}{D} + 0.3 \quad (4)$$

式中: $f_{fb}$ 表示FRP箍筋弯拉强度; $f_{fu}$ 表示FRP箍筋直线段抗拉强度.

基于FRP箍筋强度保留率满足对数正态分布规律,本文对各国现行规范中的FRP箍筋强度保留率进行可靠性分析,结果显示:当 $R/D=4$ 时,各国规范中FRP箍筋强度保留率计算值的保证率仅为24.1%;当 $R/D=3,5$ 时,FRP箍筋强度保留率计算值的保证率分别为40.3%、39.5%,均小于50%,总体上偏于不安全.

### 3.3 不同保证率下的FRP箍筋强度保留率

当FRP箍筋强度保留率服从对数正态分布时,在某一保证率下的保留率可按式(5)计算.

$$S = e^{(z\sigma + \mu)} \quad (5)$$

式中: $z$ 为将对数正态分布转换为标准正态分布时对应的参数,可查表确定.

表7列出了3种 $R/D$ 情况下,当保证率为5%、50%和95%时FRP箍筋强度保留率及其均值.由表7可知:(1)在较低的保证率下,FRP箍筋强度保留率随着 $R/D$ 的增加而增大;当保证率不小于50%时,FRP箍筋强度保留率随 $R/D$ 变化的规律相近,即当 $R/D=3,4$ 时强度保留率相近, $R/D=5$ 时强度保留率显著提升.其原因在于,当 $R/D=3,4,5$ 时对数正态分布函数参数不同(表5),从而导致不同保证率下FRP箍筋强度保留率随 $R/D$ 变化趋势也略有不同.(2)50%保证率下FRP箍筋强度保留率与均值接近,

根据试验值,将采用中位秩法得到的保留率-保证率曲线也绘于图2.由图2可见:3种 $R/D$ 情况下,采用这2种方法得到的曲线吻合度较好.

最大绝对偏差仅为0.25%,最大相对偏差仅为0.57%,说明基于试验均值得到的FRP箍筋强度保留率的保证率为50%;95%和50%保证率下,FRP箍筋强度保留率分别不小于32.46%和43.79%.

表7 不同保证率下的FRP箍筋强度保留率

Table 7 Strength retention rate of FRP stirrup under different reliabilities

$R/D$	$\mu$	$\sigma$	$R(S)/\%$	$S/\%$	$\bar{S}/\%$
3	44.11	5.33	95	35.90	44.04
			50	43.79	
			5	53.41	
4	44.92	8.44	95	32.46	44.85
			50	44.15	
			5	60.04	
5	53.72	7.36	95	42.50	53.58
			50	53.22	
			5	66.66	

### 3.4 基于筋材强度设计要求的FRP箍筋强度保留率

本文基于上述提出的FRP箍筋强度保留率分布模型和已有的工程应用最多的GFRP纵筋抗拉强度分布模型<sup>[32-33]</sup>,采用蒙特卡洛法模拟得到GFRP箍筋弯拉强度分布模型.当模拟次数达到100万次时,GFRP箍筋弯拉强度数据点的分布规律趋于稳定,并满足对数正态分布,如图3所示.按照国内规范<sup>[28]</sup>要求,取95%保证率的GFRP箍筋弯拉强度和GFRP纵筋抗拉强度来计算强度保留率,计算结果表明:当 $R/D$ 分别为3、4、5时,GFRP箍筋强度保留率分别为38.86%、35.68%、46.09%,其保留率的保证率分别为85.8%、88.9%、85.4%.

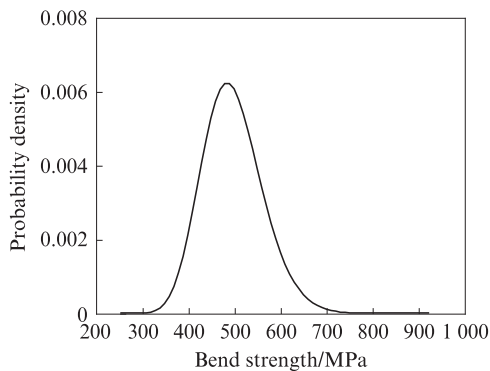


图3 GFRP箍筋弯拉强度分布规律

Fig. 3 Distribution law of bend strength of GFRP stirrups

## 4 结论

(1)在159组影响FRP箍筋强度保留率试验数据的基础上,基于有效数据筛选原则与相关性分析结果,得到由59组数据构成且按弯折半径 $R$ 与箍筋直径 $D$ 之比 $R/D$ 分组的FRP箍筋强度保留率数据库,用于确定分布模型。

(2)综合线性回归分析和K-S检验结果,研究发现Weibull分布、正态分布和对数正态分布模型均可表征FRP箍筋强度保留率的分布规律,且对数正态分布为最优分布模型。

(3)中国、美国、日本和加拿大现行规范中FRP箍筋强度保留率计算值的保证率均小于50%。当 $R/D=3.5$ 时,保证率为40.3%、39.5%;当 $R/D=4$ 时,保证率仅为24.1%,总体上偏不安全。

(4)根据中国FRP纵筋与箍筋的强度设计要求,当 $R/D=3.4.5$ 时GFRP箍筋强度保留率分别为38.86%、35.68%、46.09%。

需要说明的是,本文中FRP箍筋强度保留率的相关结论仅适用于采用连续纤维拉挤工艺生产的FRP箍筋,采用模压工艺成型的FRP箍筋强度保留率的可靠性仍需进一步开展相关研究。

## 参考文献:

[1] 孙亚楠,金祖权,逢博,等.基于DIC的混凝土嵌入式BFRP筋拔出行为及黏结性能研究[J].建筑材料学报,2023,26(1):45-52.  
SUN Yanan, JIN Zuquan, PANG Bo, et al. Pulling-out process and interfacial bonding performance of BFRP bar in concrete based on DIC[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):45-52. (in Chinese)

[2] 李文超,周广发,温福胜,等.混凝土环境中GFRP筋性能衰退的规律及机理[J].建筑材料学报,2023,26(2):156-162.  
LI Wenchao, ZHOU Guangfa, WEN Fusheng, et al. Degradation law and mechanism of GFRP bars in concrete

environment[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 156-162. (in Chinese)

[3] 付凯,薛伟辰.人工海水环境下GFRP筋抗拉性能加速老化试验[J].建筑材料学报,2014,17(1):35-41.  
FU Kai, XUE Weichen. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP bars under artificial seawater environment[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1):35-41. (in Chinese)

[4] 王伟,薛伟辰.碱环境下GFRP筋拉伸性能加速老化试验研究[J].建筑材料学报,2012,15(6):760-766.  
WANG Wei, XUE Weichen. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP rebars exposed to alkaline solution[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 760-766. (in Chinese)

[5] 蔡启明,陆春华,延永东,等.BFRP和GFRP筋剪切性能的温度效应[J].建筑材料学报,2022,25(4):395-400.  
CAI Qiming, LU Chunhua, YAN Yongdong, et al. Temperature effect on shear properties of BFRP and GFRP bar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):395-400. (in Chinese)

[6] 李彪,杨勇新,岳清瑞,等.复合材料箍筋力学性能试验研究[J].施工技术,2018,47(20):4.  
LI Biao, YANG Yongxin, YUE Qingrui, et al. Experimental study on mechanical properties of composite stirrups [J]. Construction Technology, 2018, 47(20):4. (in Chinese)

[7] AHMED E A, EL-SAYED A K, SALAKAWY E, et al. Bend strength of FRP stirrups: Comparison and evaluation of testing methods[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(1):3-10.

[8] IMJAI T, GUADAGNINI M, PILAKOUTAS K, et al. Bend strength of FRP bars: Experimental investigation and bond modeling[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(7):04017024.

[9] SPADEA S, ORR J, NANNI A, et al. Wound FRP shear reinforcement for concrete structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(5):04017026.

[10] LEE C, KO M, LEE Y, et al. Bend strength of complete closed-type carbon fiber-reinforced polymer stirrups with rectangular section[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(1):04013022.

[11] SHEHATA E, MORPHY R, RIZKALLA S, et al. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: Behaviour and design guidelines[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5):859-872.

[12] EL-SAYED A K, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B, et al. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4):352-362.

[13] 原野,王震宇,王代玉,等.配置新型封闭缠绕式GFRP箍筋混凝土梁的受剪性能试验[J].复合材料学报,2022,39(11):5074-5085.  
YUAN Ye, WANG Zhenyu, WANG Daiyu, et al. Experimental study on the shear performance of concrete beams reinforced with new type closed winding GFRP stirrups [J]. Acta Materialiae

- Compositae Sinica, 2022, 39(11):5074-5085.(in Chinese)
- [14] EL-TAHAN M, GALAL K, HOA V S, et al. New thermoplastic CFRP bendable rebars for reinforcing structural concrete elements [J]. Composites: Part B Engineering, 2013, 45(1):1207-1215.
- [15] TAHIR M. 封闭式CFRP条带箍筋约束混凝土柱的受压性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- TAHIR M. Study on the compressive behavior of concrete columns confined with close-type CFRP strip ties [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2021.(in Chinese)
- [16] 林锋. 弯折部位锚固长度对BFRP箍筋抗剪强度影响试验分析[J]. 重庆建筑, 2010, 9(11):26-28.
- LIN Feng. Influence of the anchorage length on folded part to shear strength of the BFRP stirrups[J]. Chongqing Architecture, 2010, 9(11):26-28.(in Chinese)
- [17] 李明, 张黎飞, 李斌, 等. GFRP箍筋弯折强度试验及理论研究[J]. 公路与汽运, 2021(6):131-136.
- LI Ming, ZHANG Lifei, LI Bin, et al. Experimental and theoretical study on bending strength of GFRP stirrup [J]. Chongqing Architecture, 2021(6):131-136.(in Chinese)
- [18] 陈博文. GFRP复合螺旋箍筋约束混凝土柱受压力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- CHEN Bowen. Research on compressive mechanical behavior of concrete columns confined by GFRP composite spiral stirrups [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.(in Chinese)
- [19] 董恒磊. 配置GFRP纵筋与新型箍筋的混凝土墩柱约束机理与抗震性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- DONG Henglei. Confinement mechanism and seismic performance of concrete piers reinforced with GFRP rebars and innovative ties [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2020.(in Chinese)
- [20] 涂雅箴. BFRP箍筋约束混凝土柱轴心受压力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- TU Yazheng. Research on compressive mechanical behavior of concrete columns confined by BFRP stirrups [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.(in Chinese)
- [21] 王川, 欧进萍. 热塑性FRP筋折弯成型工艺及其混凝土拔出试验研究[C]//第六届全国FRP学术交流会论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2009:102-107.
- WANG Chuan, OU Jinping. Study on the bending techniques of fiber reinforced thermoplastic polymer rebar and pulling out experiment of concrete[C]//Proceedings of the Sixth National FRP Academic Exchange Conference. Beijing: Civil Engineering Society, 2009:102-107. (in Chinese)
- [22] 鲁静. 混凝土结构用热塑性FRP筋基本力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- LU Jing. Evaluation of fundamental mechanical properties of thermoplastic FRP bars for concrete structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.(in Chinese)
- [23] BYWALSKI C, DRZAZGA M, KAŻMIEROWSKI M, et al. Shear behavior of concrete beams reinforced with a new type of glass fiber reinforced polymer reinforcement: Experimental study [J]. Materials, 2020, 13(5):1159.
- [24] Canadian Standard Association. Specification for fiber-reinforced polymers: CSA S807-19[S]. Toronto: CSA Group, 2019.
- [25] 吴娜, 刘子晖, 樊淑娴, 等. 基于Pearson相关性的小电阻接地有源配电网接地保护[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4):136-143.
- WU Na, LIU Zihui, FAN Shuxian, et al. Grounding protection of low resistance grounding active distribution network based on Pearson correlation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4):136-143.(in Chinese)
- [26] 赵永翔, 孙亚芳, 高庆, 等. 分析常用7种统计分布的统一线性回归方法[J]. 机械强度, 2001, 23(1):102-106.
- ZHAO Yongxiang, SUN Yafang, GAO Qing, et al. Unified linear regression method for the analysis of seven commonly used statistical distributions[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1):102-106.(in Chinese)
- [27] 李湘郡. 基于复合材料强度分布的结构可靠度评估[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- LI Xiangjun. Assessment of structural reliability based on strength distribution of composite material [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.(in Chinese)
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB 50608—2020 [S]. Beijing: China Standards Press, 2020.(in Chinese)
- [29] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1 R-15[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [30] Japan Society of Civil Engineers. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials: JSCE—1997[S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1997.
- [31] Canadian Standards Association. Canadian Highway Bridge Design Code: CAN/CSA S6-19[S]. Toronto: CSA Group, 2019.
- [32] NEOCLEOUS K, PILAKOUTAS K, WALDRON P, et al. Structural reliability for fiber reinforced polymer reinforced concrete structures[J]. Special Publication, 1999, 188:65-74.
- [33] 薛伟辰, 王圆, 方志庆, 等. 黏砂变形GFRP筋与约束混凝土之间的黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1):6-12.
- XUE Weichen, WANG Yuan, FANG Zhiqing, et al. Bond behavior between sand coated GFRP rebar and confined concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):6-12. (in Chinese)