

基于 ANFIS 的 RPC 中钢筋搭接性能预测

陈潇, 方志, 陈佳醒

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为明确活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,简称RPC)中钢筋搭接连接性能,以搭接长度、RPC强度和配箍率为试验参数,对13个RPC中钢筋搭接连接试件进行了对拉试验,获得了各试件的搭接应力—滑移曲线。将10个试件的试验结果进行样本训练,建立基于ANFIS且考虑搭接长度、RPC强度和配箍率影响的搭接应力—滑移曲线模型。并利用其他3个试件的试验结果对ANFIS模型进行检验。结果表明:ANFIS模型具有较好的适用性。利用得到的ANFIS模型对不同参数下各试件的RPC中钢筋搭接试件的试验结果进行预测,并分析各参数对搭接性能的影响。结果表明:搭接强度随RPC强度、配箍率的增加而增加,随搭接长度的增加而降低。

关键词:活性粉末混凝土;钢筋;搭接性能;搭接应力—滑移曲线;ANFIS

1 前言

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,简称RPC)系基于最大密实度原理配制的一种超高性能混凝土,通过提高其组分的细度与活性、减少内部缺陷,以获得由其组分材料所决定的最大承载力及优异的耐久性。与普通混凝土相比,RPC具有超高的抗压强度和较高的抗拉强度、良好的韧性、优异的耐久性、热养护后基本无收缩且徐变大幅降低等特征,RPC也由此被归于超高性能混凝土范畴并被视为新一代水泥基材料,在土木工程中具有良好的应用前景。有关RPC材料的国家标准GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》已颁布实施,但目前中国国内尚无相应结构设计方面的国家规范。

配筋混凝土结构中钢筋的连接接长不可避免,一般有搭接、焊接和机械连接等连接方式,且以搭接连接最为简便。搭接连接通过搭接区域的混凝土来实现钢筋之间的应力传递。目前对于普通混凝土中钢筋搭接连接性能的研究较为充分。徐有邻等通过32个钢筋搭接对拉试验和8个钢筋搭接梁受弯试验,研究了搭接力性能及其影响因素,提出了搭接强度和钢筋搭接长度计算公式,并被现行的GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》所采用;赵培完成了123个约束浆锚搭接连接试件的对拉试验,获得了螺旋箍筋配箍率对

钢筋搭接长度的影响规律;Mehmet Karatas等通过不同硅灰含量自密实混凝土梁和普通混凝土梁的受弯试验,研究了硅灰含量对搭接性能的影响。

国内外对RPC中钢筋搭接连接性能的研究尚才开始。Lee基于10个采用搭接钢筋配筋的超高强度混凝土梁的受弯试验,研究了不同搭接长度对搭接性能的影响,结果显示:在钢纤维体积掺量为2%、强度等级为130 MPa的超高强度混凝土中,130 mm搭接长度对于13 mm直径钢筋的搭接连接足够可靠;Choi等完成了12个复合纤维增强超高性能混凝土中钢筋搭接对拉试验,结果表明:在强度等级为100 MPa的超高性能混凝土中,140 mm搭接长度可为直径为16 mm钢筋提供可靠的传力搭接。

总之,目前国内外有关RPC中钢筋搭接连接性能的研究才刚起步,RPC强度和配箍率等参数对搭接性能影响规律的研究尚未涉及,限制了RPC这种超高性能水泥基材料的工程应用。

自适应神经模糊推理系统(Adaptive Network based Fuzzy Inference System,简称ANFIS),是模糊推理系统与神经网络相结合的产物,既继承了传统神经网络自适应性以及学习能力强等方面的优点,又克服了传统神经网络存在的局部极小值等缺陷,因而在土木工程中得到了较为广泛的应用。

搭接应力—滑移曲线是对搭接连接性能的综合反映。为了确定RPC中搭接钢筋在对拉荷载下的连接

性能,该文以搭接长度、RPC 强度和配箍率为试验参数,对 13 个 RPC 中钢筋搭接连接试件进行对拉试验,得到各试件的搭接应力—滑移曲线,并以试验结果为样本,建立基于 ANFIS 的 RPC 中钢筋搭接应力—滑移曲线模型。以期通过该模型预测不同搭接长度、RPC 强度和配箍率下 RPC 中钢筋搭接试件的搭接应力—滑移曲线,为 RPC 中钢筋搭接的有限元分析和工程设计提供依据。

2 试验概况

2.1 试件设计

设计制作了 13 个 RPC 中的钢筋搭接试件,试验的主要参数为搭接长度、RPC 强度和配箍率。试件 RPC 块体部分的截面尺寸为 150 mm×150 mm,长度即为搭接长度,分别取 100、150 和 200 mm;RPC 强度分别为 100、120 和 150 MPa;搭接钢筋采用强度等级为 HRB400、直径为 20 mm 的带肋钢筋;箍筋采用强

度等级为 HRB335、直径分别为 6、4 mm 的带肋钢筋,对所有配箍试件,箍筋间距均保持为 50 mm,搭接长度 100、150 和 200 mm 试件内的箍筋个数分别为 2、3 和 4 个,同一搭接长度试件内的配箍率分别为 0、0.34%和 0.75%;试件内的架立筋采用强度等级为 HRB335、直径为 6 mm 的带肋钢筋。试件尺寸及配筋构造见图 1。

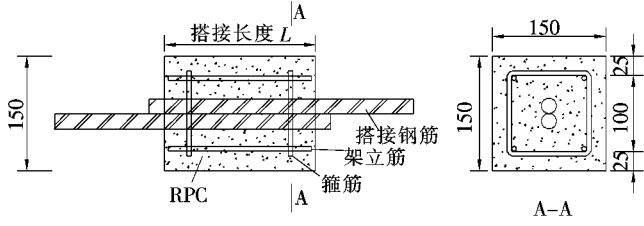


图 1 试件尺寸及配筋构造(单位:mm)

试件编号及主要参数见表 1。编号中 L、R 和 S 及其后的数字分别表示搭接长度、RPC 强度和配箍率,如试件编号 L100—R100—S34 表示试件的搭接长度为 100 mm、RPC 强度为 100 MPa、配箍率为 0.34%。

表 1 试件参数及主要试验结果

| 试件编号 | L/mm | f_{cu}/MPa | $\rho_v/\%$ | F_u/kN | τ_u/MPa | 破坏模式 | 用途 | τ_{au}/MPa | $\frac{\tau_{au}}{\tau_u}$ |
|---------------|---------------|---------------------|-------------|-----------------|---------------------|------|----|------------------------|----------------------------|
| L100—R100—S0 | 100 | 106.7 | 0 | 100.4 | 15.98 | P | 学习 | 15.56 | 0.974 |
| L100—R100—S34 | 100 | 106.7 | 0.34 | 107.9 | 17.17 | P | 学习 | 16.88 | 0.983 |
| L100—R100—S75 | 100 | 106.7 | 0.75 | 111.2 | 17.70 | P | 学习 | 17.37 | 0.981 |
| L100—R120—S0 | 100 | 130.4 | 0 | 114.6 | 18.24 | P | 学习 | 18.21 | 0.998 |
| L100—R120—S34 | 100 | 130.4 | 0.34 | 118.1 | 18.80 | P | 检验 | 18.60 | 0.989 |
| L100—R120—S75 | 100 | 130.4 | 0.75 | 125.0 | 19.89 | P | 检验 | 19.25 | 0.968 |
| L100—R150—S0 | 100 | 157.1 | 0 | 124.4 | 19.80 | P | 学习 | 19.54 | 0.987 |
| L100—R150—S34 | 100 | 157.1 | 0.34 | 133.9 | 21.31 | P | 学习 | 21.07 | 0.989 |
| L100—R150—S75 | 100 | 157.1 | 0.75 | 137.5 | 21.88 | P,Y | 学习 | 21.39 | 0.978 |
| L150—R100—S34 | 150 | 106.7 | 0.34 | 154.3 | 16.37 | P,Y | 检验 | 16.61 | 1.015 |
| L150—R120—S34 | 150 | 130.4 | 0.34 | 176.2 | 18.70 | P,Y | 学习 | 18.65 | 0.997 |
| L200—R100—S34 | 200 | 106.7 | 0.34 | 181.9 | >14.48 | B | 学习 | — | — |
| L200—R120—S34 | 200 | 130.4 | 0.34 | 182.5 | >14.52 | B | 学习 | — | — |

注:表中 L 为搭接长度; f_{cu} 为 RPC 立方体抗压强度; ρ_v 为配箍率; F_u 为极限荷载; τ_u 为与 F_u 对应的搭接应力; τ_{au} 为 ANFIS 模型得到的搭接强度;破坏模式中:P 为钢筋拔出破坏,B 为钢筋拉断破坏,Y 表示钢筋屈服。

2.2 材料力学性能

所用钢筋力学性能的测试结果如表 2 所示。

RPC 的配合比(质量比)及实测强度见表 3,其中钢纤维体积掺量为 2%,RPC 的强度为边长 100 mm 立方体 28 d 的实测抗压强度。

2.3 加载方式与测点布置

采用单向拉伸的方法进行钢筋搭接性能试验,加载在专门加工制作的反力架上进行,加载设备采用 500 kN 穿心式液压千斤顶。采用压力传感器控制荷载大小,主要测点布置如图 2 所示。在两根搭接钢筋

表 2 钢筋力学性能

| 钢筋型号 | 直径/ mm | 屈服 强度/ MPa | 极限 强度/ MPa | 屈服 荷载/ kN | 极限 荷载/ kN |
|--------|-----------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| HRB400 | 20 | 433.0 | 577.0 | 136.0 | 181.3 |
| HRB335 | 6 | 357.8 | 469.9 | 10.1 | 13.3 |
| HRB335 | 4 | 364.7 | 481.3 | 4.6 | 6.0 |

表 3 RPC 配合比及抗压强度

| RPC 类型 | 配比 | | | | | 水胶 比 | 实测抗 压强 度/MPa |
|-----------|----|------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 水泥 | 硅灰 | 石英 粉 | 石英 砂 | 减水 剂 | | |
| R100 | 1 | 0.25 | 0.25 | 1.1 | 0.02 | 0.22 | 106.7 |
| R120 | 1 | 0.25 | 0.25 | 1.1 | 0.02 | 0.20 | 130.4 |
| R150 | 1 | 0.25 | 0.25 | 1.1 | 0.02 | 0.16 | 157.1 |

的加载端和自由端均布置百分表,用于测量搭接钢筋滑移量,获取搭接应力—滑移曲线。

试验采用分级加载。极限荷载前采用力控制,每级荷载增量约为 10 kN,达到极限荷载后采用位移控制,每级位移增量根据滑移发展情况取 0.5~1 mm,直至加载钢筋自由端位移超过 15 mm 左右为止。

3 试验结果

定义试件受力过程中经历的最大荷载为极限荷载,与极限荷载对应的加载钢筋自由端滑移为极限滑移。根据试验量测的荷载值 F 及搭接长度 L ,采用式(1)计算搭接区钢筋表面的平均黏结应力(或称搭接应力)。

$$\tau = \frac{F}{\pi d L} \tag{1}$$

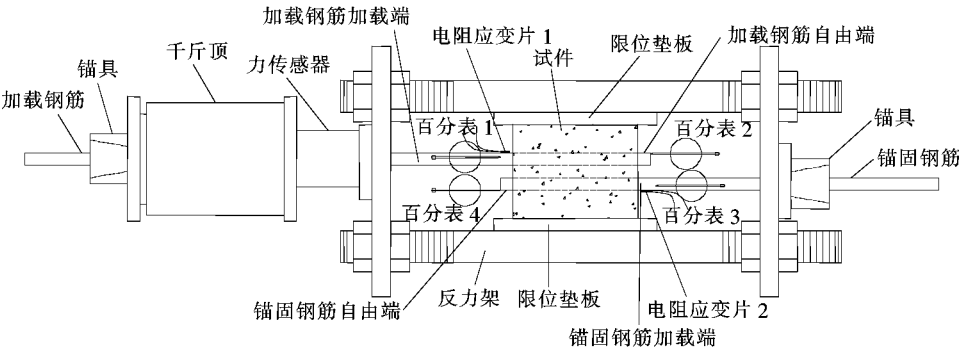


图 2 加载装置及测点布置

式中: F 为对拉荷载; d 为钢筋直径; L 为搭接长度。

主要试验结果见表 1,RPC 中钢筋的搭接强度为 15.56~21.39 MPa。

试验中出现了搭接钢筋拔出破坏和拉断两种破坏模式。

搭接长度为 100、150 mm 的试件均发生钢筋拔出破坏,其搭接应力—滑移曲线如图 3 所示。

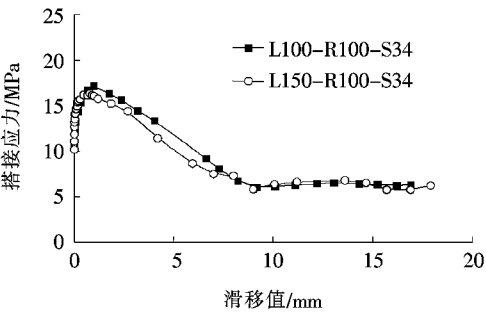


图 3 钢筋拔出破坏试件的搭接应力—滑移曲线

由图 3 可知:发生钢筋拔出破坏试件的搭接应力—滑移曲线包含上升段、下降段和残余段。上升段表明:加载之初搭接钢筋与 RPC 的胶结破坏和滑脱尚未渗透到搭接全长,相对滑移 S 很小,随着荷载的增大,搭接钢筋与 RPC 的胶结面被破坏,荷载由摩阻和咬合承担,滑移增长加快,曲线呈现非线性特征;下降段表明:承载力达到峰值后,迅速减小,滑移大幅度增长;残余段表明:滑移发展至一个横肋间距时(直径为 20 mm 的带肋钢筋横肋间距为 10 mm)进入残余段,承载力由 RPC 与钢筋的摩阻力维持。搭接长度为 100 mm 与搭接长度为 150 mm 试件的搭接应力—滑移曲线上段基本一致,残余段接近平行,形态相近。

搭接长度为 200 mm 的试件均发生钢筋拉断破坏。试件发生钢筋拉断破坏时搭接钢筋自由端滑移值较小,搭接应力—滑移曲线如图 4 所示,仅包含上升段。

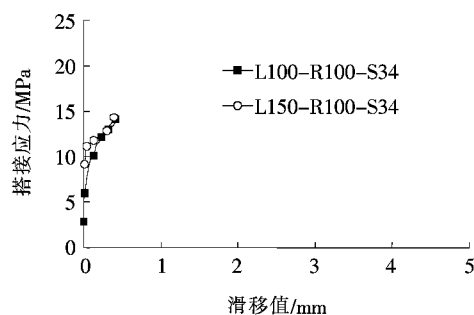


图 4 钢筋拉断破坏试件的搭接应力—滑移曲线

由图 4 可知:加载初期 RPC 与钢筋表面的胶结力尚未破坏时,钢筋未发生明显滑移;随着荷载的增大,滑移缓慢增加,直至钢筋被拉断。极限荷载由钢筋的抗拉强度所决定。

4 ANFIS 基本原理及结构

自适应网络模糊推理系统,也称为基于网络的自适应模糊推理系统(Adaptive Network-based Fuzzy Inference System,简称 ANFIS)。ANFIS 是将神经网络与模糊推理系统结合在一起,并基于自适应的建模方法建立起来的模糊推理系统。

ANFIS 结构有 5 层,如图 5 所示,为简单起见,假定所考虑的模糊推理系统有两个输入 x 和 y ,输出为 f ,用 $O_{i,j}$ 表示第 i 层第 j 个节点的输出值。各层的功能如下:

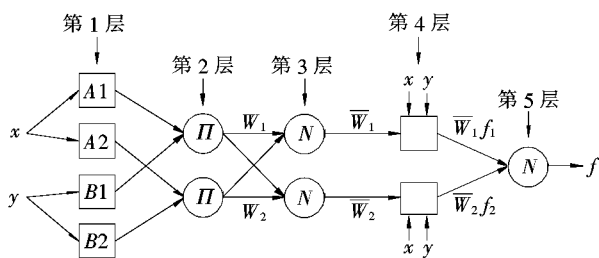


图 5 ANFIS 结构图

第 1 层为输入层:

$$\begin{aligned} O_{1,j} &= u_{A_j}(x), j=1,2 \\ O_{1,j} &= u_{B_j}(y), j=3,4 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $O_{1,j}$ 表示第 1 层第 j 个节点的输出; x, y 为各节点的输入; u_{A_j}, u_{B_j} 分别为描述输入量 x, y 的隶属度函数。

第 2 层的每个结点为以 Π 表示的固定结点,将本层输入信号相乘并输出:

$$O_{2,j} = w_j = u_{A_j}(x) \times u_{B_j}(y), j=1,2 \quad (3)$$

第 3 层的每个结点为以 N 表示的固定结点,其输出为第 j 条输入与本层所有输入之和的比值:

$$O_{3,j} = \bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2}, j=1,2 \quad (4)$$

第 4 层中的每个结点均是一个有结点函数的自适应结点:

$$O_{4,i} = \bar{w}_j f_j, j=1,2 \quad (5)$$

式中: \bar{w}_j 为第 3 层第 j 个结点的输出值; f_j 为输出变量的隶属度函数。

第 5 层为标以 Σ 的固定单结点,其功能在于将本层输入求和并输出:

$$O_{5,j} = \sum \bar{w}_j f_j = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} \quad (6)$$

5 基于 ANFIS 的搭接应力—滑移曲线模型

5.1 ANFIS 模型的建立

通过 Matlab 中模糊逻辑工具箱完成 RPC 中钢筋搭接应力—滑移曲线建模。考虑搭接长度、RPC 强度和配箍率 3 个参数对 RPC 中钢筋搭接应力—滑移曲线的影响。因此模型的输入变量有 4 个:搭接长度、RPC 强度、配箍率和滑移值。模型的训练结构为网格分类法,输入变量搭接长度、RPC 强度、配箍率和滑移值分别赋予 2、2、3、5 个隶属度函数,其类型均为双 S 型,输出搭接应力的函数类型设置为线性函数;模型的学习算法设置为混合学习算法。具体结构见图 6。

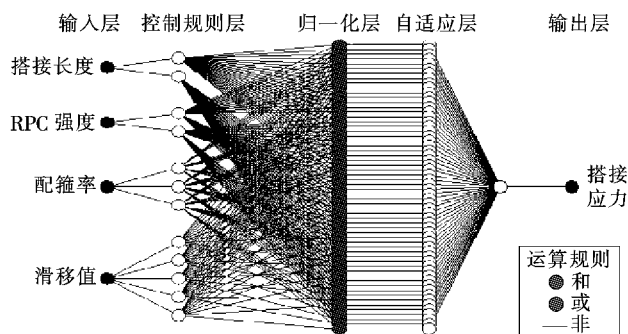


图 6 搭接应力—滑移曲线模型的 ANFIS 结构图

5.2 ANFIS 模型与试验结果对比

将 10 个试件的试验数据进行模型训练,在模型训练完成后,对其余 3 个试件 L100-R120-S34、L100-R120-S75 和 L150-100-S34 的搭接应力—滑移曲线进行检验,并与试验结果对比,以验证模型的适用性。模型的训练和对比情况如表 1 和图 7 所示。

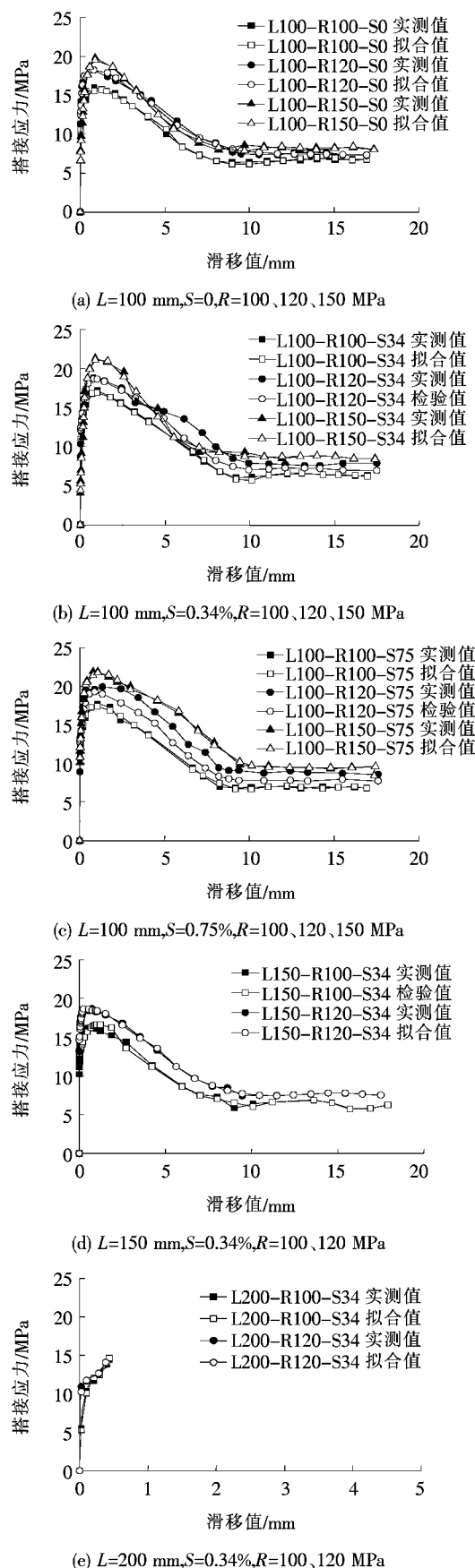


图7 ANFIS模型结果与试验结果对比

由表1及图7可知:① RPC中钢筋搭接应力—滑移曲线模型对不同参数下各试件的搭接强度拟合和预测效果良好。② RPC中钢筋搭接应力—滑移曲线模型对不同参数下各试件的搭接应力—滑移曲线拟合效果良好。经检验, RPC中钢筋搭接应力—滑移曲线模型对试件 L100—R120—S34、L100—R120—S75 和 L150—R100—S34 搭接应力—滑移曲线预测较准确, 即该文所提出的基于 ANFIS 的 RPC 中钢筋搭接应力—滑移曲线模型可以较好地描述 RPC 中钢筋的搭接性能。

5.3 搭接性能的参数分析

利用得到的 ANFIS 模型对不同搭接长度、RPC 强度和配箍率下 RPC 中钢筋搭接试件的试验结果进行预测, 并分析各参数对搭接性能的影响。

5.3.1 搭接长度的影响

ANFIS 模型预测的不同搭接长度对搭接应力—滑移曲线的影响如图8所示。

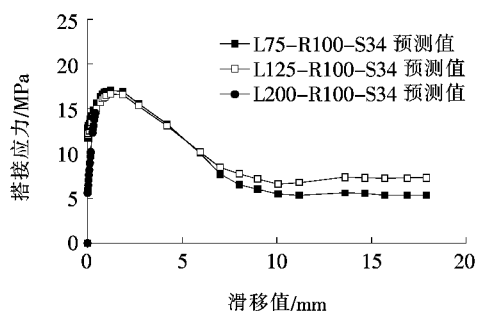


图8 不同搭接长度试件的搭接应力—滑移曲线

由图8可知:试件 L75—R100—S34、L125—R100—S34 发生钢筋拔出破坏, 而试件 L200—R100—S34 发生钢筋拉断破坏。对于发生拔出破坏的试件, 当搭接长度由 75 mm 增加至 125 mm 时, 搭接强度降低 3.6%。

5.3.2 RPC 强度的影响

ANFIS 模型预测的不同 RPC 强度对搭接应力—滑移曲线的影响如图9所示。

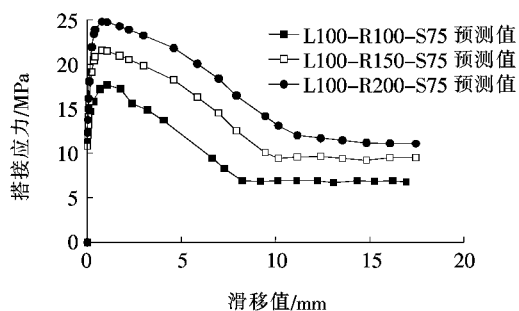


图9 不同 RPC 强度试件的搭接应力—滑移曲线

由图 9 可知:与 RPC 强度为 100 MPa 的试件相比,强度为 150 MPa 和 200 MPa 试件的极限搭接强度分别提高 24.1%和 42.7%。

5.3.3 配箍率的影响

ANFIS 模型预测的不同配箍率对搭接应力—滑移曲线的影响如图 10 所示。L100—R100—S0、L100—R100—S50 和 L100—R100—S100 分别表示配箍率为 0%、0.5%和 1%且搭接长度为 100 mm、RPC 强度为 100 MPa 的试件。由图 10 可知:与配箍率为 0 的试件相比,配箍率为 0.5%和 1%试件的极限荷载和搭接强度分别提高 5.2%和 8.3%。

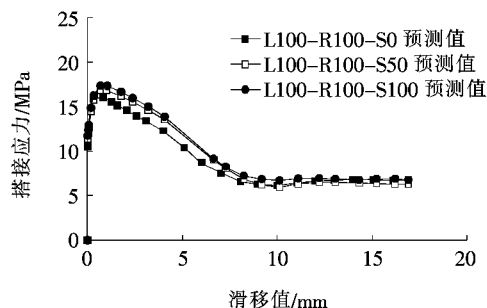


图 10 不同配箍率试件的搭接应力—滑移曲线

6 结论

(1) 通过对 13 个 RPC 中钢筋搭接连接试件进行对拉试验,结果表明:在对拉荷载下,RPC 中钢筋搭接连接分别出现钢筋拔出和拉断两种破坏模式;RPC 中钢筋的搭接强度为 15.56~21.39 MPa。

(2) 通过试验所得的搭接应力—滑移曲线,建立了基于 ANFIS 的 RPC 中钢筋搭接应力—滑移曲线模型,该模型综合考虑了搭接长度、RPC 强度和配箍率对搭接性能的影响。通过所得模型拟合和检验的搭接应力滑移曲线与试验结果对比,结果表明:该文所提出的基于 ANFIS 的 RPC 中钢筋搭接应力—滑移曲线模型可以较好地描述 RPC 中钢筋的搭接性能。

(3) 利用得到的 ANFIS 模型对不同搭接长度、RPC 强度和配箍率下 RPC 中钢筋搭接试件的试验结果进行预测,并分析各参数对搭接性能的影响。结果表明:搭接强度随 RPC 强度、配箍率的增加而增加,随搭接长度的增加而降低。

(4) 根据试验结果和 ANFIS 预测模型可知,在强

度等级为 100 MPa、配箍率为 0.34%的 RPC 中,直径为 20 mm 带肋钢筋的临界搭接长度约为 10 倍钢筋直径。

参考文献:

- [1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7): 1 501—1 511.
- [2] Richard P, Cheyrezy M. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200—800 MPa Compressive Strength [J]. ACI Special Publication, 1994, 114(24): 507—518.
- [3] Bonneau O, Poulin C, Dugat J, et al. Reactive Powder Concretes: from Theory to Practice[J]. Concrete International, 1996, 18(4): 47—49.
- [4] 郑文忠, 吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015(10).
- [5] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S].
- [6] 徐有邻, 汪洪, 沈文都. 钢筋搭接传力性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1993(3).
- [7] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [8] 赵培. 约束浆锚钢筋搭接连接试验研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2011.
- [9] Mehmet K, Kazim T, Zulfu C. Investigation of Bond between Lap—Spliced Steel Bar and Self—Compacting Concrete: The Role of Silica Fume[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37(3): 420—428.
- [10] Lee J K. Bonding Behavior of Lap—Spliced Reinforcing Bars Embedded in Ultra—High Strength Concrete with Steel Fibers[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(1): 273—281.
- [11] Choi W C, Jang S J, Yun H D. Bond and Cracking Behavior of Lap—Spliced Reinforcing Bars Embedded in Hybrid Fiber Reinforced Strain—Hardening Cementitious Composite (SHCC)[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 108: 35—44.
- [12] Jang J R. ANFIS: Adaptive—Network—Based Fuzzy Inference System[J]. IEEE Transaction on Systems, 1993, 23(3): 665—685.
- [13] 薛新华, 魏永幸. 基于 ANFIS 的 CFG 桩复合地基承载力预测研究[J]. 铁道工程学报, 2010(6).
- [14] 杨则英, 黄承逵, 曲建波. 基于自适应神经—模糊推理系统和遗传算法的桥梁耐久性评估[J]. 土木工程学报, 2006(2).