

外加剂对聚丙烯喷射混凝土强度的影响

王连广,王迎港,李 雪,陈 曦

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要 目的 研究高效外加剂对聚丙烯喷射混凝土工作性能和力学性能的影响。方法 通过拌合物性能测试和力学试验,分析速凝剂、减水剂和膨胀剂对混凝土坍落度和强度的影响。利用多项式拟合的方法,预测速凝剂和减水剂掺量对混凝土 28d 抗拉和抗压强度的影响规律。结果 4% 的速凝剂可以提高混凝土早期强度 78%; 0.5% 的聚羧酸减水剂,相比 0.3% 和 0.7% 的掺量可以提高 9% 的抗压强度和 29% 的抗拉强度,且具有良好的和易性;6% 的 CSA 膨胀剂,可以提高混凝土 28d 抗压强度 10%。拟合曲线的决定系数均高于 0.975。外加剂的最佳掺量为 0.5% 的聚羧酸减水剂、4% 的速凝剂和 6% 的 CSA 膨胀剂。结论 多项式拟合曲线的预测结果和试验结果较吻合。掺入适量外加剂的聚丙烯喷射混凝土具有良好的流动性和较高的早期强度,且后期强度损失较小。

关键词 聚丙烯喷射混凝土;外加剂;工作性能;力学性能

中图分类号 TU528.41

文献标志码 A

Effects of Admixtures on the Strength of Polypropylene Sprayed Concrete

WANG Liangguang, WANG Yinggang, LI Xue, CHEN Xi

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China 110819)

Abstract: To study the effect of high-efficiency admixtures on polypropylene sprayed concrete, experimental study for its slump and strength had been taken. The admixtures contain accelerator, plasticizer and expansion agent. Polynomial fitting was used to predict the strength of sprayed concrete at the age of 28 days, influenced by the dosage of accelerator and plasticizer. The results show that the early strength of concrete increases by 78% when the dosage of accelerator is 4%. Comparing with 0.3% and 0.7%, 0.5% of polycarboxylate superplasticizer increases the compressive strength of concrete by 9% and the tensile strength by 29%, while having good workability. 6% of CSA expansion agent increases the 28d compressive strength of concrete by 10%. The determination coefficients of fitting curves are higher than 0.975. The optimal dosages of accelerator, plasticizer and expansion agent are 4%, 0.5% and 6%, respectively. The predicted

收稿日期:2020-11-13

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808100);辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0004);辽宁省自然科学基金项目(20170540303)

作者简介:王连广(1964—),男,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构与预应力结构方面研究。

results of polynomial fitting curves are in good agreement with the test results. Polypropylene sprayed concrete with appropriate amount of admixtures has good workability and higher early strength, while having less later strength loss.

Key words: polypropylene sprayed concrete; admixture; working performance; mechanical properties

纤维混凝土能够克服传统混凝土抗拉强度低、延性差、易开裂等缺点。在众多纤维中,聚丙烯纤维(PPF)具有延性好、成本低、化学性质稳定等优点^[1]。PPF 的长度、长径比和掺量等均存在合适范围,超出合适范围后会造成强度损失^[2-3]。PPF 的掺入提高了混凝土构件的能量吸收能力,使构件拥有更好的动力性能^[4]。此外,聚丙烯纤维混凝土耐腐蚀性强,可降低离子渗透程度,腐蚀环境下强度劣化缓慢,并且可以减少冻融循环等非荷载因素对结构的影响,从而提高其耐久性^[5-7]。由于 PPF 可制成多种复合材料^[8],且能与其他纤维协同作用,目前在制备再生混凝土^[9-10]、轻质混凝土^[11-12]以及混杂纤维混凝土^[13]等方面也有良好的应用。

目前,国内外许多专家、学者们聚丙烯喷射混凝土的骨料级配、纤维长度、养护时间、纤维分散程度和水灰比等^[14-15]进行了大量

的研究,但对高效外加剂对其性能影响的研究较少。笔者以减水剂、速凝剂和膨胀剂的掺量为变量,通过比较混凝土的坍落度和强度,得到外加剂的合理取值,使混凝土在整个使用周期内具有较高的强度和和易性。通过多项式拟合预测速凝剂和减水剂掺量对聚丙烯喷射混凝土强度的影响规律。

1 试 验

1.1 原材料及配合比

聚丙烯纤维为单丝纤维,主要性能如表 1 所示。水泥为普通硅酸盐水泥,粉煤灰为 I 级粉煤灰,胶凝材料主要成分如表 2 所示。粗骨料为碎石,粒径 5 ~ 12 mm。水为自来水。细骨料采用 II 区洁净中砂,细度模数 2.4。外加剂使用粉末低碱速凝剂、硫铝酸钙类(CSA)膨胀剂、减水率为 30% 的聚羧酸减水剂以及混凝土憎水剂。

表 1 聚丙烯纤维主要性能

Table 1 Main properties of polypropylene fiber

| 长/mm | 密度/(kg·m ⁻³) | 直径/μm | 断裂延伸率/% | 断裂强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|------|--------------------------|-------|---------|----------|----------|
| 19 | 910 | 26 | 30 | 280 | 3.8~4.2 |

表 2 胶凝材料主要成分

Table 2 Main composition of binder materials

| 名 称 | w(SiO ₂) | w(Al ₂ O ₃) | w(CaO) | w(Fe ₂ O ₃) | 烧失量 |
|---------------|-----------------------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|------|
| P. O. 42.5 水泥 | 21.68 | 5.34 | 64.98 | 3.47 | 2.68 |
| 粉煤灰 | 53.82 | 24.72 | 7.25 | 6.53 | 1.89 |

1.2 试验配合比设计

每种外加剂共设置 4 个梯度变量。速凝剂分别为胶凝材料质量的 0、2%、4%、6% ; 减水剂分别为胶凝材料质量的 0、0.3%、0.5%、0.7% ; 膨胀剂分别为胶凝材料质量的 0、4%、6%、8% ; 憎水剂用量为 2%。混凝土

配合比为:砂 880 kg,石 720 kg,水泥 427 kg,水 230 kg,粉煤灰 72 kg。单掺聚丙烯细纤维掺量超过 0.9 kg/m³,不大于 1.1 kg/m³ 时,纤维提供的抗拉强度增长率最大,每立方米混凝土放入 1 kg 聚丙烯纤维^[14]。

1.3 试验内容

先按配合比称重,再将胶凝材料和骨料放入搅拌机,进行干拌,倒入外加剂和水,搅拌2 min,最后加入PPF。搅拌直至PPF无聚团现象,均匀散布在拌合物之中,停止搅拌,浇入模具,振捣密实。3 h后拆模养护,做好标识。所有混凝土试件为边长100 mm的正方体,每次抗压和抗拉试验使用3块,共计270块。坍落度和强度试验,分别参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准(GB/T

50080—2016)》和《普通混凝土力学性能试验方法标准(GB/T 50081—2016)》进行。

2 结果与分析

2.1 试验结果

不同减水剂和速凝剂掺量下,聚丙烯喷射混凝土的抗拉强度和抗压强度试验结果如表3所示。存在减水剂、速凝剂的环境下,加入膨胀剂,聚丙烯喷射混凝土的抗拉强度和抗压强度试验结果如表4所示。

表3 减水剂和速凝剂对强度的影响

| Table 3 Influence of water reducing agent and accelerating agent on strength | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|------------|----------|-------|-------|-------|----------|------|------|------|
| 编号 | 速凝剂 掺量/% | 减水剂 掺量/% | 坍落 度/mm | 抗压强度/MPa | | | | 抗拉强度/MPa | | | |
| | | | | 1 d | 3 d | 7 d | 28 d | 1 d | 3 d | 7 d | 28 d |
| SJ1 | 0 | 0 | 170 | 4 | 12.64 | 20.72 | 30.7 | 0.67 | 1.48 | 2.89 | 3.34 |
| SJ2 | 0 | 0.5 | 200 | 3.09 | 11.72 | 22.21 | 31.69 | 0.55 | 1.27 | 2.61 | 3.08 |
| SJ3 | 2 | 0.5 | 200 | 3.66 | 10.97 | 19.07 | 28.54 | 0.56 | 1.58 | 2.39 | 2.97 |
| SJ4 | 4 | 0.5 | 200 | 5.54 | 12.2 | 19.41 | 27.85 | 0.98 | 1.54 | 2.28 | 2.89 |
| SJ5 | 6 | 0.5 | 200 | 3.71 | 8.77 | 14.45 | 23.26 | 0.7 | 1.49 | 2.06 | 2.8 |
| SJ6 | 4 | 0 | 175 | 5.72 | 9.17 | 18.04 | 29.01 | 0.96 | 1.69 | 2.04 | 3 |
| SJ7 | 4 | 0.3 | 190 | 4.58 | 10.69 | 17.5 | 25.53 | 0.76 | 1.43 | 1.92 | 2.23 |
| SJ8 | 4 | 0.7 | 225 | 2.56 | 10.07 | 16.3 | 26.33 | 0.52 | 1.46 | 1.98 | 2.2 |

表4 膨胀剂对强度的影响

| Table 4 Influence of expansion agent on strength | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|--------|----------|-------|----------|------|
| 编号 | 速凝剂 掺量/% | 减水剂 掺量/% | 膨胀剂 掺量/% | 坍落度/mm | 抗压强度/MPa | | 抗拉强度/MPa | |
| | | | | | 7 d | 28 d | 7 d | 28 d |
| P1 | 4 | 0.5 | 0 | 200 | 19.4 | 27.86 | 2.28 | 2.89 |
| P2 | 4 | 0.5 | 4 | 195 | 20.19 | 28.28 | 2 | 3.06 |
| P3 | 4 | 0.5 | 6 | 190 | 20.74 | 30.69 | 2.27 | 2.98 |
| P4 | 4 | 0.5 | 8 | 170 | 21.77 | 30.43 | 2.42 | 3.04 |
| P5 | 4 | 0 | 6 | 180 | 21.61 | 30.88 | 1.97 | 3.14 |
| P6 | 0 | 0.5 | 6 | 190 | 21.51 | 32.81 | 1.95 | 3.44 |

2.2 试验结果分析

2.2.1 速凝剂的影响

对比试件SJ2、SJ3、SJ4和SJ5,保持减水剂掺量不变,速凝剂掺量分别为0、2%、4%

和6%的情况下,聚丙烯喷射混凝土坍落度无明显改变。各组混凝土试件的强度变化如图1所示。

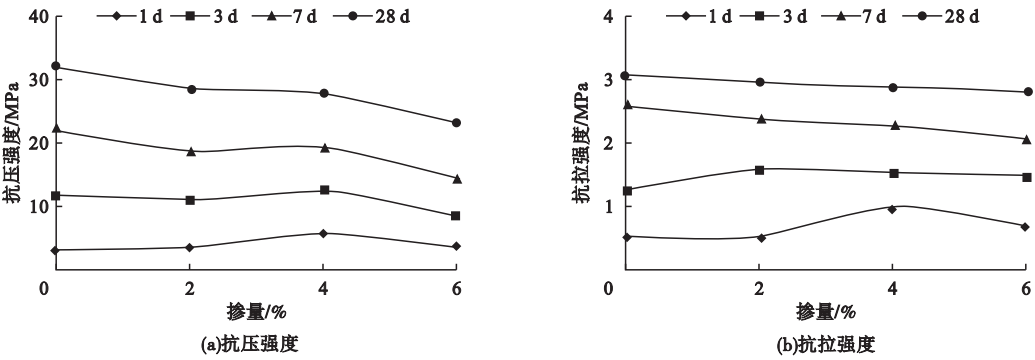


图1 速凝剂对聚丙烯喷射混凝土强度的影响

Fig. 1 Influence of accelerator on the strength of polypropylene sprayed concrete

由图1可以看出,随着速凝剂掺量的增加,早期强度值明显上升,这是由于水化产物水化硫铝酸钙黏结在一起形成了空间网状结构,提高了结构的强度;超过一定掺量后,强度出现下降,这是由于混凝土凝结过快,使内部孔隙变多,密实度下降。养护龄期1 d时,SJ2的抗压强度、抗拉强度分别为4 MPa和0.67 MPa。相比SJ2的抗压强度和抗拉强度,SJ3的强度分别提高18%、2%,SJ4强度分别提高79%、78%,SJ5强度分别提高20%、27%。可以看出,速凝剂的掺量为4%时,混凝土的早期强度最高,增加了80%左右。

混凝土的后期强度随速凝剂掺量的增加逐渐下降。28 d时,对比SJ2的抗压强度、抗拉强度,SJ3的强度分别下降9%、4%,SJ4强度分别下降12%、6%,SJ5强度分别下降

27%、8%。可见速凝剂的掺量为4%时,混凝土后期强度较高,仅下降10%左右,满足使用要求。

为了保证施工安全,同时具有较高的早期强度和后期强度,聚丙烯喷射混凝土中速凝剂的最佳掺量为4%。

2.2.2 减水剂的影响

由表3可知,随着减水剂掺量的增加,坍落度从175 mm增大至225 mm,《喷射混凝土应用技术规程》(JGJ/T372—2016)要求喷射混凝土坍落度为80~200 mm。在掺入0.7%减水剂时坍落度达到了225 mm,有少量水泌出。其他掺量情况下,混凝土均拥有很好的和易性。对比SJ4、SJ6、SJ7和SJ8,保持速凝剂掺量不变,减水剂掺量分别取0、2%、4%和6%,不同龄期聚丙烯喷射混凝土的强度变化规律如图2所示。

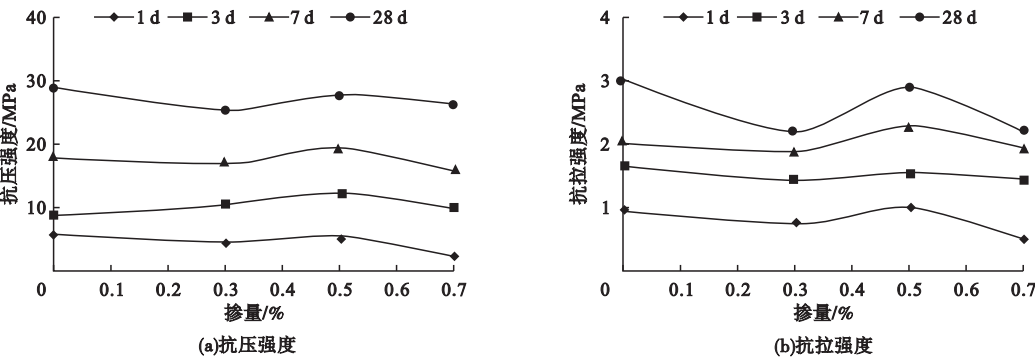


图2 减水剂对聚丙烯喷射混凝土强度的影响

Fig. 2 Influence of water reducer on the strength of polypropylene sprayed concrete

由图 2(a)可以看出,速凝剂掺量不变,减水剂掺量分别为 0、0.3%、0.5%、0.7% 时,混凝土抗压强度呈先减小后增大再减小的趋势。当减水剂掺量较小时,由于达不到改性效果,各龄期混凝土强度明显降低;合适掺量的聚羧酸减水剂会产生静电排斥作用和空间位阻效应,防止颗粒聚团,促进了水泥的水化反应,改善了孔隙结构,使微颗粒空间排列紧凑,提高了混凝土的抗压强度^[15-17];当掺量过大时,减水剂破坏了内部水泥颗粒和骨料之间的联系,使新拌混凝土出现离析,挟裹着砂的水泥浆液流出,致使粗细骨料之间不能协调作用,导致强度出现一定程度的下降。

由图 2(b)可以看出,抗拉强度也出现先增后减的趋势。1 d 时,与 SJ4 抗拉强度相比,SJ7 和 SJ8 分别减小了 22%、47%;28 d

时,SJ7 和 SJ8 分别下降 23%、24%。
为保证有较好流动性,且具有较高早期、后期强度,聚丙烯纤维喷射混凝土宜选用 0.5% 掺量的减水剂。

2.2.3 膨胀剂的影响

通过对比 P1 (SJ4)、P3、SJ6 和 P5 的强度发现,在只有减水剂的环境中,添加膨胀剂,可使混凝土 28 d 抗拉强度和抗压强度分别提高 12% 和 4%。在只有速凝剂的环境中,添加膨胀剂,可使混凝土 28 d 抗拉强度和抗压强度均有小幅度提高,约为 5%。可见,膨胀剂可以与速凝剂、减水剂共同作用。随着膨胀剂的掺入,喷射混凝土坍落度有所降低,但仍满足工作要求。因此,减水剂和速凝剂的最优用量分别为 0.5% 和 4%。在此条件下,更改膨胀剂用量,检测观察试件强度变化,试验结果如图 3 所示。

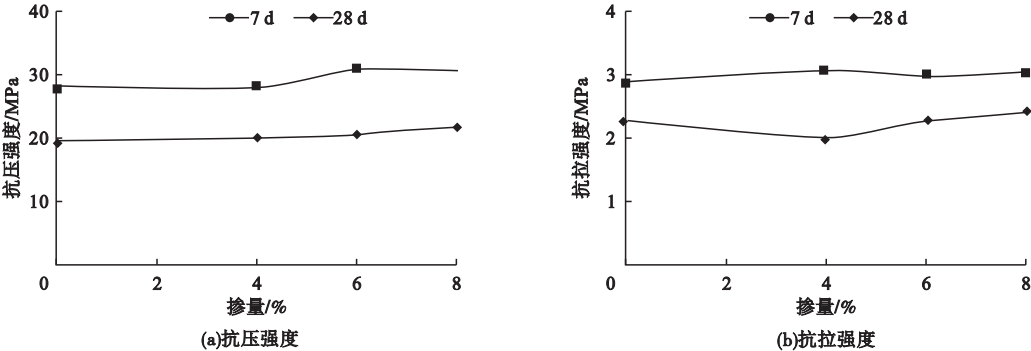


图 3 膨胀剂对聚丙烯喷射混凝土强度的影响

Fig. 3 Influence of expansive agent on the strength of polypropylene sprayed concrete

由图 3(a)可知,随着膨胀剂用量的增加,混凝土抗压强度有明显变化,呈缓慢上升的趋势。这是由于膨胀剂的化学成分参与到水化反应当中,生成了钙矾石晶体。这些晶体在混凝土内部相互关联,使结构更加密实。此外,这些晶体附着在纤维表面,增强了纤维附着力,提高了纤维的抗拔出能力,并抵消了部分收缩应力,使微观结构的空隙减少,从而提高了抗压强度^[18]。以 P1 的抗压强度为基准,在 7 d 时, P2、P3 和 P4 分别增长了 4%、7% 和 12%;在 28 d 时分别增长了 2%、10% 和 9%。由图 3(b)可见,对于 28 d 的抗拉强

度,膨胀剂提高的不是很明显,最多提高不超过 0.2 MPa。

过量的膨胀剂不会使抗压强度继续上升,反而呈下降的趋势。这是因为,随着膨胀程度的增大,混凝土内部会有微裂缝产生,反而减低了强度^[19]。因此,为了拥有较高的前期和后期抗压抗拉强度,CSA 膨胀剂的推荐掺量为 6%。

3 喷射混凝土强度的预测模型

3.1 喷射混凝土强度的预测方法

王家滨等^[20]利用最小二乘法,以水灰

比、纤维掺量和粉煤灰掺量为变量,建立了喷射混凝土强度预测模型,通过拟合的方法确定未知参数,具有较好的强度预测功能。在此方法基础上,笔者采用麦夸特法。为了减少局部误差引起的预测结果失真,迭代过程中结合通用全局优化法,对模型进行优化处理。在纤维用量、骨料级配以及粉煤灰掺量等其他影响因素不变情况下,改变速凝剂和减水剂掺量,将表3中速凝剂、减水剂掺量和28 d抗压强度值输入多元非线性曲线拟合软件1stOpt进行拟合。在拟合过程中有600多组函数参与,拟合后根据各函数特性和试验数据特性,从中挑选最为合适的曲线。为保证拟合函数拐点数目与试验结果图像相同,宜选用多项式函数。当选用高次方拟合时,会出现效果图尖锐,自变量对结果影响过大,不符合实际情况,可信度低;当选用3次方拟合时,满足要求。选择3次方的多项式函

数进行拟合,收敛判断次数为15次。

3.2 拟合式参数含义

由图1和图2可以看出,28 d时抗压强度与抗拉强度变化规律相似,因此两者采用相同的拟合方法。

喷射混凝土28d抗压强度拟合式为

$$Z = P_1 + P_2 \cdot x + P_3 \cdot x^2 + P_4 \cdot x^3 + P_5 \cdot y + P_6 \cdot y^2 + P_7 \cdot y^3. \tag{1}$$

喷射混凝土28 d抗拉强度拟合式为

$$Z' = P'_1 + P'_2 \cdot x + P'_3 \cdot x^2 + P'_4 \cdot x^3 + P'_5 \cdot y + P'_6 \cdot y^2 + P'_7 \cdot y^3. \tag{2}$$

式中:Z和Z'分别为28 d抗压强度和抗拉强度标准值,MPa;x和y分别为速凝剂和减水剂掺量,%;P_i和P'_i为待求系数。

将表3中速凝剂、减水剂的掺量和28 d抗压强度值代入式(1)和式(2),待求系数计算结果如表5所示。混凝土强度预测结果如表6所示。

表5 待求系数计算结果

Table 5 Calculation results of coefficients

| 拟合函数 Z | | | | | | | 拟合函数 Z' | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | P ₇ | P' ₁ | P' ₂ | P' ₃ | P' ₄ | P' ₅ | P' ₆ | P' ₇ |
| 30.7 | -3.130 56 | 1.281 667 | -0.162 36 | -48.427 5 | 179.881 | -163.865 | 3.34 | -0.077 5 | -0.003 75 | 0.001 25 | -12.030 1 | 42.642 86 | -38.845 2 |

表6 混凝土强度预测结果

Table 6 Prediction results of the strength of concrete

| 试件编号 | x/% | y/% | 28 d 抗压强度 | | 28 d 抗拉强度 | |
|------|-----|-----|-----------|-------|-----------|------|
| | | | 试验值 | 预测值 | 试验值 | 预测值 |
| SJ1 | 0 | 0 | 30.7 | 30.7 | 3.34 | 3.34 |
| SJ2 | 0 | 0.5 | 31.69 | 31.15 | 3.08 | 3.13 |
| SJ3 | 2 | 0.5 | 28.54 | 28.54 | 2.97 | 2.97 |
| SJ4 | 4 | 0.5 | 27.85 | 28.39 | 2.89 | 2.84 |
| SJ5 | 6 | 0.5 | 23.26 | 23.26 | 2.8 | 2.8 |
| SJ6 | 4 | 0 | 29.01 | 28.47 | 3 | 3.05 |
| SJ7 | 4 | 0.3 | 25.53 | 25.53 | 2.23 | 2.23 |
| SJ8 | 4 | 0.7 | 26.33 | 26.33 | 2.2 | 2.2 |

3.3 拟合结果分析

图4为拟合函数的三维图像,图中x轴

为速凝剂掺量,y轴为减水剂掺量,z轴为28 d抗压强度。

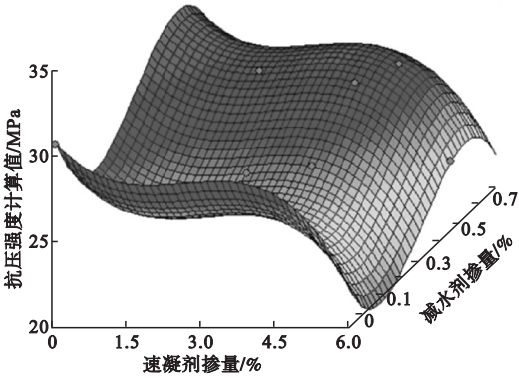


图4 抗压强度拟合结果

Fig. 4 Numerical fitting results of compressive strength

分析拟合函数 Z 的待求系数, P_6 和 P_7 的数量级相对于 P_3 和 P_4 较大,这是因为减水剂和速凝剂的掺量相差近 10 倍,属于正常现象。分析 Z' 的未知数结果,可以看出 P'_2 、 P'_3 和 P'_4 数量级远小于 P'_5 、 P'_6 和 P'_7 ,说明速凝剂对于 28 d 抗拉强度影响较小,且 P'_3 和 P'_4 趋近于 0,说明随着速凝剂掺量的增加,28 d 抗拉强度具有单调递减的趋势。拟合曲线趋势与试验的数值趋势相符合。

根据函数 Z 的所有试验值与预测值作差的平方和,求出均方根误差 $RMSE = 0.38$, 决定系数 $DC = 0.978$ 。同理可以求出,函数 Z' 的 $RMSE = 0.26$, $DC = 0.995$ 。函数 Z 和 Z' 拟合曲线的决定系数均高于 0.975,各点误差较小,拟合结果与实际数据较吻合,可以较好地预测聚丙烯喷射混凝土的力学性能,具有较强的指导意义。

根据 28 d 抗压强度的预测函数 Z , 求出 Z 最大时, x 值为 3.51, y 值为 0.55,即预测出速凝剂最优用量为 3.51%,试验获得最优用量为 4%,相差 0.49%;预测减水剂的最优用量为 0.55%,试验获得最优用量为 0.5%,相差 0.05%。根据 28 d 抗拉强度拟合曲线 Z' 的表达式,可知不添加速凝剂和减水剂的情况下,抗拉强度最高。在使用减少剂的情况下,求出 Z' 最大时, y 值为 0.54,即预测减水剂的最优用量为 0.54%,试验获得最优用

量为 0.5%,相差 0.04%。速凝剂和减水剂的预测最优掺量与实测最优掺量非常接近,实测最优掺量的可靠性较高。

4 工程应用

在辽宁省本溪市高速公路某隧道边墙处,由于二衬砌背后有水侵入,且防排水措施失效,出现施工缝漏水和路面结冰。在夏季,进行开槽处理,重新修建防排水措施后,采用聚丙烯喷射混凝土进行修复,配合比参照本试验,掺入了 0.5% 聚羧酸减水剂、4% 速凝剂和 6% 的 CSA 膨胀剂。施工过程中,喷射聚丙烯混凝土工作性良好,喷层与初期支护混凝土密贴。后期检测混凝土 28 d 抗压强度可达到 28.3 MPa 以上,无脱落渗水现象,符合工程修复要求。

5 结 论

(1) 随着速凝剂掺量的增加,混凝土的早期强度呈先增长后降低的趋势,而后期强度缓慢下降。低碱粉末状速凝剂的适宜掺量为 4%,可提高混凝土早期强度 80% 左右,后期强度可达到空白样的 87.5% 以上。

(2) 随着减水剂掺量的增加,混凝土的早期强度和后期强度均呈先下降后增加再下降的趋势。聚羧酸减水剂的适宜掺量为 0.5%,相比 0.3% 和 0.7% 的掺量可以提高 9% 的抗压强度和 29% 的抗拉强度,且具有良好的和易性。

(3) 随着膨胀剂掺量的增加,混凝土抗压强度呈缓慢上升的趋势,而抗拉强度提升不明显。膨胀剂适宜掺量为 6% 时,可提高混凝土后期抗压强度约 2.8 MPa。

(4) 在纤维用量、骨料级配以及粉煤灰掺量等其他影响因素不变情况下,仅对速凝剂和减水剂掺量进行改变,混凝土 28 d 强度可采用多项式曲线预测,且合适次数为三次。该函数可以较好地预测聚丙烯喷射混凝土的力学性能,并对速凝剂和减水剂的掺量有指

导意义。

参考文献

- [1] KAKOOEI S, AKIL H M, JAMSHIDI M, et al. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures [J]. Construction and building materials, 2011, 27(1): 73 - 77.
- [2] ROSTAMI R, ZARREBINI M, SANGINABADI K, et al. An investigation into influence of physical and chemical surface modification of macro-polypropylene fibers on properties of cementitious composites [J]. Construction and building materials, 2020, 244: 118340.
- [3] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1935 - 1948.
(LUO Honglin, YANG Dingyi, ZHOU Xingyu, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios [J]. Acta materiae compositae sinica, 2019, 36(8): 1935 - 1948.)
- [4] LEE J H, CHO B, CHOI E, et al. Experimental study of the reinforcement effect of macro-type high strength polypropylene on the flexural capacity of concrete [J]. Construction and building materials, 2016, 126: 967 - 975.
- [5] 俞家欢, 丛广智, 董金鑫. 磷酸镁混凝土的耐腐蚀性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 1059 - 1066.
(YU Jiahuan, CONG Guangzhi, DONG Jinxin. Research on corrosion resistance of magnesium phosphate concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(6): 1059 - 1066.)
- [6] EIDAN J, RASOOLAN I, REZAEIAN A, et al. Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating [J]. Construction and building materials, 2019, 198: 195 - 206.
- [7] BEHFARNIA K, BEHRAVAN A. Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels [J]. Materials and design, 2014, 55: 274 - 279.
- [8] KAZI M K, ELJACK F, MAHDI E. Optimal filler content for cotton fiber/PP composite based on mechanical properties using artificial neural network [J]. Composite structures, 2020, 251: 112654.
- [9] BIDABADI M S, AKBARI M, PANAH O. Optimum mix design of recycled concrete based on the fresh and hardened properties of concrete [J]. Journal of building engineering, 2020, 32: 101483.
- [10] AHMED T W, ALI A A M, ZIDAN R S. Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate [J]. Construction and building materials, 2020, 241: 118010.
- [11] AMRAN Y M, ALYOUSEF R, ALABDULJABBAR H, et al. Performance properties of structural fibred-foamed concrete [J]. Results in engineering, 2020, 5: 100092.
- [12] WANG Y J, ZHENG T D, ZHENG X F, et al. Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers [J]. Construction and building materials, 2020, 251: 118960.
- [13] 林增华, 王凤池. 组合纤维沥青混凝土的抗裂性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 500 - 506.
(LIN Zenghua, WANG Fengchi. The crack resistance experiment of composite fiber asphalt concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 500 - 506.)
- [14] LIU G M, CHENG W M, CHEN L J. Investigating and optimizing the mix proportion of pumping wet-mix shotcrete with polypropylene fiber [J]. Construction and building materials, 2017, 150: 14 - 23.
- [15] MASSONE L M, NAZAR F. Analytical and experimental evaluation of the use of fibers as partial reinforcement in shotcrete for tunnels in Chile [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2018, 77: 13 - 25.
- [16] ZHANG K, PAN L S, LI J C, et al. How does adsorption behavior of polycarboxylate superplasticizer effect rheology and flowability of cement paste with polypropylene fiber [J]. Cement and concrete composites, 2019, 95: 228 - 236.
- [17] HUANG H L, QIAN C X, ZHAO F, et al. Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete [J]. Construction and building materials, 2016, 110: 293 - 299.
- [18] CORINALDESI V, NARDINOCCHI A, DONNINI J. The influence of expansive agent on the performance of fiber reinforced cement-based composites [J]. Construction and building materials, 2015, 91: 171 - 179.
- [19] CARBALLOSA P, GARCÍA C J L, REVUELTA D. Influence of expansive calcium sulfoaluminate agent dosage on properties and microstructure of expansive self-compacting concretes [J]. Cement and concrete composites, 2020, 107: 103464.
- [20] 王家滨, 牛获涛. 喷射混凝土力学性能试验研究及预测模型建立[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 125 - 131.
(WANG Jiabin, NIU Ditao. Study on mechanical properties and prediction model establishing of dry-mix shotcrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic, 2019, 38(1): 125 - 131.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)