

高分子抗裂密实剂对混凝土轴压力学性能的影响

Influence of Polymer Anti-cracking Compacting Agent on Axial Compressive Properties of Concrete

王 帅, 丁伟祥, 毕洋洋, 游建华, 杨煜明, 陈建东

(中建三局集团(浙江)有限公司, 杭州 311113)

摘 要: 为评价高分子抗裂密实剂(PCR)对混凝土力学性能的影响, 设置 2 个强度等级的 12 个试验组, 分析 PCR 对混凝土轴压力学性能的影响, 基于试验结果建立 PCR 改性混凝土的本构方程, 并给出了相关参数的计算公式。结果表明: 改性混凝土的轴压破坏特征与普通混凝土基本一致; 低掺量范围内随着 PCR 掺量增加混凝土抗压强度提高 18.8%~28.9%, 弹性模量提高 5.8%~12.4%, 且均近似线性相关; 比例极限提高约 5%~10%, 与掺量大小正相关; 峰值应变略有减小, 与掺量大小负相关; 延性随掺量的增加而减小, 最大降幅为 10.1%, 但仍满足普通混凝土的延性要求; PCR 改性混凝土的应力-应变全曲线与试验结果基本一致; PCR 在微观层面从物理和化学形式上提升了混凝土的密实度和抗裂性能。

关键词: 密实剂; 混凝土; 抗压强度; 应力-应变曲线; 力学性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2025)03-0036-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.007

WANG Shuai, DING Weixiang, BI Yangyang, YOU Jianhua, YANG Yuming, CHEN Jiandong

(China Construction Third Engineering Bureau Group (Zhejiang) Co., Ltd., Hangzhou 311113, China)

Abstract: A new type of high molecular polymer anti-crack densifier (PCR) is used to improve the anti-crack performance of concrete. In order to evaluate its influence on the mechanical properties of concrete, 12 test groups with two strength grades were set up, and the influence of PCR on the axial compressive mechanical properties of concrete was analyzed. Based on the experimental results, the constitutive equation of PCR modified concrete was established, and the calculation formulas for relevant parameters were given. The results show that the axial compressive failure characteristics of modified concrete are basically consistent with those of ordinary concrete; the compressive strength of concrete increases by 18.8%–28.9% and the elastic modulus increases by 5.8%–12.4% within the low dosage range as the dosage of PCR increases, and they are approximately linearly related; the proportional limit increases by about 5%–10% and is positively correlated with the dosage; the peak strain decreases slightly and is negatively correlated with the dosage; the ductility decreases as the dosage increases, with a maximum reduction of 10.1%, but it still meets the ductility requirements of ordinary concrete; the stress-strain response curve of PCR modified concrete is basically consistent with the experimental results; PCR improves the physical and chemical compactness and crack resistance of concrete at the micro level.

Key words: compacting agent; concrete; compressive strength; stress-strain curve; mechanical property

基金项目: 湖北省建设科技计划项目(JK2024003); 中建三局科技研发计划(CSCES3B2024-8)。

作者简介: 王 帅(1998—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 混凝土材料与结构。

收稿日期: 2024-10-31

0 引言

伴随建筑业高质量发展要求，结构抗渗性要求也大幅提高，在地下室底板、楼板等混凝土结构和大体量混凝土结构中，防水要求和裂缝控制要求都很高。混凝土在凝结和硬化过程中产生收缩，往往会导致混凝土成型后产生微裂缝，荷载施加后出现以开裂为主的诸多缺陷^[1-2]。控制混凝土收缩是一种较优的方法，而减少混凝土收缩除了优化配合比外，最常用的方法是添加外加剂^[3-4]。高分子抗裂密实剂（简称 PRC）这种用纳米级活性粉经特殊工艺复合而成的高效能产品应运而生，可根据工程需求调整配方和材料组份，以改善混凝土的自密实性，控制收缩。

目前针对高分子抗裂密实剂对混凝土材料力学性能的影响，已有不少学者开展相关研究。刘改利等^[5]通过试验发现 FS102 防水密实剂会使混凝土的抗压强度、弹性模量、劈拉强度、轴压强度均有不同程度的提高，防渗性能得到改善；王晓英等^[6]通过硫铝酸盐水泥、硬石膏、醇胺类减缩组分复配而成的减缩密实类粉状添加剂，可使混凝土的密实度和体积稳定性得到显著提升；袁雪莲等^[7]通过研究活性粉体与高分散纤维抗裂剂对混凝土抗裂防渗性能的影响，发现该抗裂剂能有效改善混凝土和易性，减少早期裂缝；黄正峰等^[8]通过试验研究发现减缩剂能够有效降低混凝土微观孔隙率；邹小童等^[9]试验发现，缩减剂能够减少水泥砂浆的开裂比例和裂缝大小，在掺量 4% 左右时效果最佳；张佶等^[10]对比分析了添加减缩剂后 90 d 内混凝土的收缩性、抗压强度变化，指出减缩剂会导致混凝土强度降低，在 2% 范围内混凝土的缩减效果与减缩剂用量正相关；左俊卿等^[11]研究发现，缩减剂能够有效减小混凝土试样的干燥收缩率，但效果较为一般；光鉴森等^[12]研究发现减缩剂能够明显降低水泥砂浆的开裂面积、裂缝宽度、水泥水化放热峰值。

针对高分子抗裂密实剂对混凝土的力学性能影响的研究还很少，仍缺少对其力学性能的定量分析和本构模型。通过控制高分子抗裂密实剂的掺量，设置了 2 个强度等级的 12 个实验组，对 PRC 改性混凝土的破坏特征、抗压强度、应力 - 应变全曲线等力学性能典型特征进行了试验研究，并基于试验结

果构建了 PRC 改性混凝土的应力 - 应变本构方程，给出了相关参数取值的计算公式，以期能为 PRC 改性混凝土的工程设计与应用提供参考和指导。

1 试验

1.1 原材料与配合比

水泥采用南方 P · O 42.5 水泥，比表面积为 295 m²/kg，烧失量为 2.3%，主要化学组分见表 1。

Table 1 Main chemical components of cement /%							
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
22.2	3.2	5.7	2.4	3.2	59.9	0.3	0.8

细骨料为水洗中砂，细度模数 2.68，石子粒径在 5~20 mm 之间，拌和用水为自来水，减水剂为聚羧酸减水剂，PRC 密实剂的比表面积测定为 567 m²/kg，混凝土的配合比见表 2。

Table 2 Concrete mix ratio							
强度等级	水胶比	砂率 /%	材料组分质量/ (kg/m ³)				
			水	水泥	粉煤灰	砂	石子 减水剂
C30	0.41	37	137	274	60	655	1 096 10
C50	0.35	37	135	325	60	670	1 128 10

1.2 试验组

在 C30 和 C50 两种强度等级的混凝土中各掺配 6 种不同含量的 PRC 密实剂，以研究 PRC 掺量对混凝土力学性能的影响，试验分组见表 3。每组浇筑 3 个 150 mm × 150 mm × 300 mm 的棱柱体试件和 3 个边长 150 mm 的立方体试件。

Table 3 Test groups %						
编号	CX-0	CX-2	CX-4	CX-6	CX-8	CX-10
PRC 掺量		2	4	6	8	10

注：X 代表混凝土强度等级，取 30 时为 C30，取 50 时为 C50。

1.3 试验测试

试件脱模后在标准试验箱中养护 28 d，相对湿度 > 95%，温度 (20 ± 2)℃。依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能实验方法标准》^[13]开展试验测试，通过位移计与应变片测量试件的竖向位移与应变，利用千斤顶加强装置防止试件脆性破坏，以测量应力 - 应变曲线下降段数据。试验测试时以 0.01 mm/s 的速度加载至峰值荷载的 80% 左右，随后调整速度为 0.002 mm/s，全程采用静态应变仪进行数据采集。

材料科学

1.4 试验破坏形态

混凝土试件单轴受压破坏的形态如图 1 所示,不同掺量的 PRC 改性混凝土与普通混凝土的破坏特征相同。加载前期,试件所受荷载较小,表面未见明显裂缝,加载中后期混凝土试件长轴外边缘部位先产生竖向裂缝并斜向发展,试件破坏伴随劈裂声,沿长轴对角线裂开。

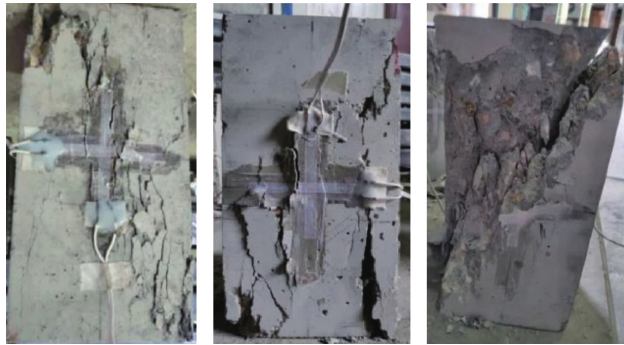


图 1 改性混凝土棱柱体轴压破坏形态

Fig. 1 Axial compression failure mode of modified concrete prisms

2 结果分析

2.1 轴心抗压强度

不同 PRC 掺量的混凝土抗压强度如图 2 所示,在低掺量范围内,PRC 能够有效增加混凝土的抗压强度,随着 PRC 掺量的增加混凝土立方体和棱柱体抗压强度均近似线性增加。强度等级为 C30 的混凝土,PRC 掺量为 10‰时的立方体和棱柱体抗压强度分别为 39.97 和 31.77 MPa,相比未掺 PRC 的混凝土分别增加 24.9% 和 28.9%;强度等级为 C50 的混凝土,PRC 掺量为 10‰的立方体和棱柱体抗压强度分别为 59.56 和 46.57 MPa,相比未掺 PRC 的混凝土分

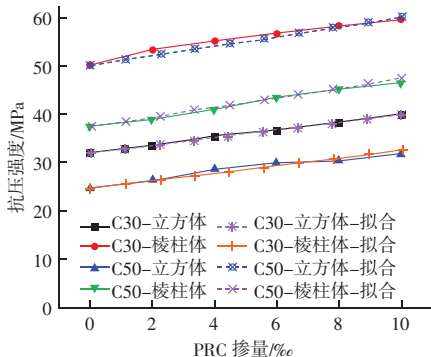


图 2 不同 PRC 掺量的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength at different PRC contents

别增加 18.8% 和 24.7%。

为定量描述轴心抗压强度的增长值与 PRC 掺量的关系,通过对试验结果进行线性拟合,可得到 PRC 改性混凝土的轴心抗压强度表达式为:

$$\begin{cases} f_{cu} = f_{cu0} + aw \\ f_{ck} = f_{ck0} + bw \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{cu} 和 f_{ck} 分别为 PRC 改性混凝土的立方体和棱柱体轴心抗压强度; f_{cu0} 和 f_{ck0} 分别为未掺合 PRC 试剂的立方体和棱柱体轴心抗压强度; a 和 b 分别为 C30 和 C50 等级 PRC 改性混凝土的强度增长系数,通过前文试验数据线性拟合获得, a 取值为 0.78, $R^2 = 0.979$, b 取值为 0.99, $R^2 = 0.991$; w 是 PRC 外加剂的含量,取千分数的基数值。

2.2 弹性模量

不同 PRC 掺量混凝土的弹性模量如图 3 所示,在低掺量范围内,PRC 能够有效增加混凝土的弹性模量,随着 PRC 掺量的增加混凝土弹性模量近似线性增加。强度等级为 C30 的混凝土,PRC 掺量为 10‰时的混凝土弹性模量为 31 441 MPa,相比未掺 PRC 的普通混凝土增加了 12.4%;强度等级为 C50 的混凝土,PRC 掺量为 10‰时混凝土弹性模量为 36 458 MPa,相比未掺 PRC 的普通混凝土增加 5.8%。PCR 掺入后对混凝土弹性模量的影响规律与抗压强度相同,但影响幅度较抗压强度更小。

为定量描述弹性模量的增长值与 PRC 掺量的关系,通过对试验结果进行线性拟合,可得到 PRC 改性混凝土的弹性模量计算表达式为:

$$\begin{cases} E_{c30} = E_{c0} + mw \\ E_{c50} = E_{c0} + nw \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{c30} 、 E_{c50} 和 E_{c0} 分别为 PRC 改性混凝土和普通混凝土的弹性模量; m 和 n 分别为 C30 和 C50 等级 PRC 改性混凝土的弹性模量增长系数,通过试验数据线性拟合获得, m 取值为 292.1, $R^2 = 0.972$, n 取值为 206.4, $R^2 = 0.995$ 。

2.3 比例极限

根据试验数据,绘制 PRC 改性混凝土的比例极限及其与最大应力的占比如图 4 所示,可见其取值范围约为最大应力的 50%~60%,比普通混凝土的比例

极限 40%~50%^[12] 提高了约 5%~10%。由此可见, PRC 改性混凝土凝结后比普通混凝土更加致密, 整体受力性能得到一定程度的改善。

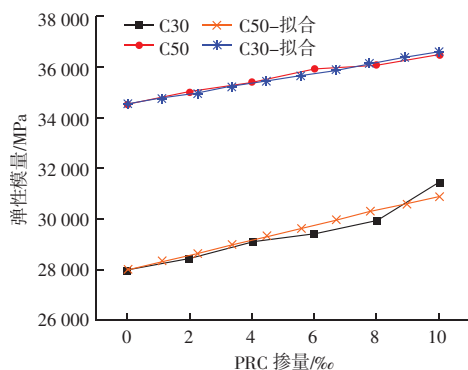


图3 不同 PRC 掺量的弹性模量

Fig. 3 Elastic modulus at different PRC contents

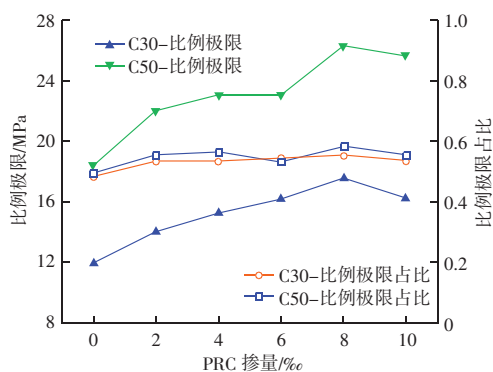


图4 不同 PRC 掺量的比例极限

Fig. 4 Concrete proportion limit at different PRC contents

2.4 峰值应变

根据试验结果, 绘制各组试件峰值应变如图5所示。随 PRC 掺量的增加, 混凝土的峰值应变逐渐降低, 且始终低于未掺 PRC 的普通混凝土的峰值应变。C30 强度等级的 PRC 改性混凝土的峰值应变约为 C30

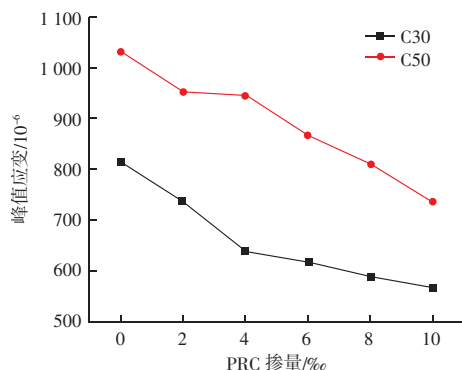


图5 不同 PRC 掺量的峰值应变

Fig. 5 Peak strain at different PRC dosage contents

普通混凝土的 60%~80%, C50 强度等级的 PRC 改性混凝土的峰值应变约为普通混凝土的 70%~90%。

一般情况下混凝土峰值应变随混凝土弹性模量的增高而减小, PRC 改性混凝土亦满足该基本规律。为了清晰地展现不同 PRC 掺量混凝土的峰值应变 - 峰值应力的关系, 将不同强度、PRC 掺量的混凝土试件的峰值应力与峰值应变绘制于图6, 可见二者近似线性相关。通过线性拟合得到两个强度等级 PRC 混凝土的峰值应变计算公式为:

$$\begin{cases} C30: \varepsilon_c = 1641.7 - 34.3f_c \\ C50: \varepsilon_c = 2106.2 - 28.9f_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_c 为峰值应变 (10^{-6}); f_c 为峰值应力。

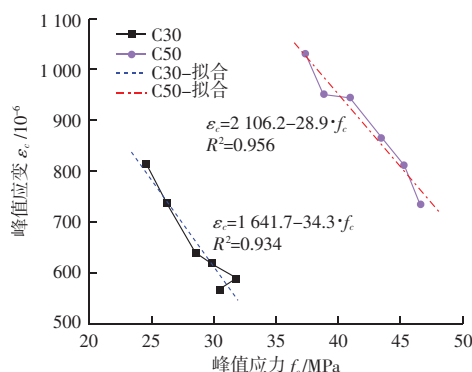


图6 不同 PRC 掺量的峰值应变 - 峰值应力

Fig. 6 Peak strain - peak stress with different PRC content

2.5 延性系数

根据试验结果, 可以发现 PRC 改性混凝土的脆性比普通混凝土更大, 为评价 PRC 对混凝土延性的影响, 引入延性系数, 计算公式为:

$$\mu = \varepsilon_u / \varepsilon_y \quad (4)$$

式中: ε_u 为试件破坏或者峰值应力下降至 85% 时所对应的应变值; ε_y 为假定的破坏应变值, 两者的值通过几何绘图法确定。

根据试验所得的全应力 - 应变曲线, 计算不同 PRC 掺量下 C30 与 C50 两个强度等级混凝土的延性系数, 结果如图7所示。C30 强度等级的混凝土, PRC 掺量在 0~8% 之间时, 其延性系数随掺量的增加而减小, 最大降幅为 10.1%, 当掺量大于 8% 后即使掺量增加延性系数也不再减小; C50 强度等级的混凝土, 在掺量为 0~10% 范围内, 其延性系数随掺量增加而减小, 最大降幅为 8.9%。

材料科学

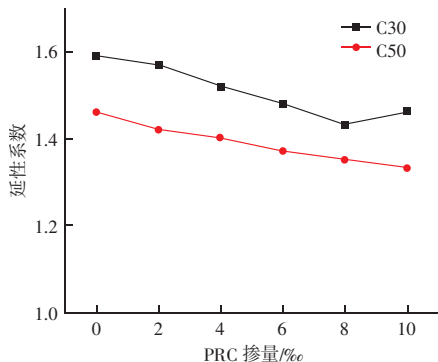


图7 延性系数随 PRC 掺量的变化

Fig. 7 Change of ductility coefficient with PRC contents

3 轴心受压本构方程

3.1 本构方程的建立

混凝土的受压本构方程是研究和分析混凝土结构和构件受力性能的主要依据。将试验测得的应力-应变曲线用无量纲的坐标表示, 即:

$$\begin{cases} x = \varepsilon/\varepsilon_c \\ y = \sigma/f_c \end{cases} \quad (5)$$

PRC 改性混凝土不改变其混凝土的基本特性, 其应力-应变曲线应与普通混凝土相似, 根据前文的结果与分析, 其不同主要体现在上升段与下降段的图线形状, 参照规范中用于非线性分析的应力-应变关系^[14], 提出 PRC 改性混凝土的本构方程表达式为:

$$y = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & 0 < \varepsilon < \varepsilon_c \\ x/[\alpha_d(x - 1)^2 + x] & \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_a 和 α_d 分别为其本构曲线的上升段参数和下降段参数。

3.2 本构方程的参数取值

通过本构方程 (6) 对不同掺合率的 PRC 改性混凝土的应力-应变曲线进行拟合, 分别得到上升段参数 α_a 与下降段参数 α_d , 拟合所得的参数值分别如图 8 所示。

随 PRC 掺合率的增加, 上升段参数 α_a 近似线性减小, 下降段参数 α_d 近似线性增大。上升段参数 α_a 值越小或下降段参数 α_d 值越大, 则应力-应变曲线斜率越大, 斜率越大代表 PRC 改性混凝土具有更高

的弹性变形和更低的残余强度, 其破坏过程会更加迅速, 即脆性更强。

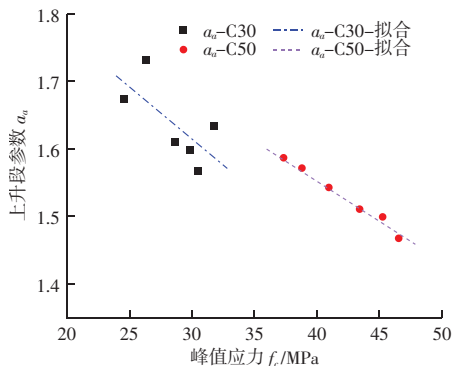
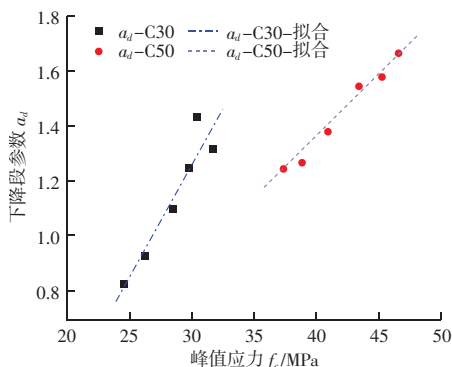
(a) α_a 取值(b) α_d 取值

图8 参数取值

Fig. 8 Parameter values

将两个参数分别与混凝土的峰值应力进行回归拟合, 可得两个强度等级的 PRC 改性混凝土的本构方程的分段计算参数 α_a 与 α_d 的计算式:

$$\text{C30: } \begin{cases} \alpha_a = 2.081 - 0.0155 \cdot f_c \\ \alpha_d = -1.231 + 0.0828 \cdot f_c \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{C50: } \begin{cases} \alpha_a = 2.056 - 0.0125 \cdot f_c \\ \alpha_d = -0.560 + 0.0477 \cdot f_c \end{cases} \quad (8)$$

参照现行规范的方法, 将本构方程的分段计算参数 α_a 与 α_d 取为常数, 即分别取对应参数的平均值为代表值, C30 混凝土的 α_a 值和 α_d 值分别为 1.636 和 1.140, C50 混凝土的 α_a 值和 α_d 值分别为 1.530 和 1.446。C30 及 C50 强度等级下的高分子密实混凝土应力-应变曲线的上升段本构方程参数均小于普通混凝土的上升段参数, 下降段本构方程参数均大于普通混凝土的下降段参数。

将相关参数带回式（6）可以得到 PRC 改性混凝土的本构方程为：

$$\sigma = \begin{cases} \left[\alpha_a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) + (3 - 2\alpha_a) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2 + (\alpha_a - 2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^3 \right] f_c, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_c \\ \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) / a_d \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) \right] f_c, & \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (9)$$

3.3 本构方程的验证

将本构方程的计算结果与试验结果对应分别绘制于图 9~10，T 表示试验值，F 表示计算值。结果表明本构方程的预测结果与试验实测结果总体变化规律一致，在曲线的上升段和下降段，两者均较为吻合且误差较小，最大不超过 5%，这直观地验证了 PRC 改性混凝土的本构方程及其参数取值计算的准确性。

4 影响机理分析

“毛细管应力机理”是一种主流的塑性收缩机理，当自由水被消耗至一定程度后，会导致混凝土内部形成不饱和状态毛细孔，进而发生体积坍塌，引起混凝土收缩裂缝，图 11 显示了毛细管应力的基本受力模式。混凝土初凝后水泥水化形成水化硅酸钙与水化铝酸钙凝胶，导致表观体积减小。

当混凝土掺入 PRC 后，其中的高分子活性物质便进入到了混凝土内部，促使水泥中的矿物析出，水化反应充分度增加，有机活性物质与游离的 Na^+ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等通过化学反应结晶，达到同时增加胶凝物和结晶体的效果。PRC 中的聚硅氧烷能够增大水的接触角，具备反毛细管效应。醇类和胺类有机组分能够降低混凝土中液相的表面张力，减少毛细管收缩压。前述过程会使 PRC 改性混凝土内部凝胶变为比普通混凝土更加致密的簇状结构，毛细通道大幅减少，进而增强了密实度。化学反应形成的结晶体，会填充于混凝土内部的毛细空隙和裂缝中，进一步增加混凝土密实度，达到抗裂防水的效果。此外，PRC 内的有机成分还能与外部腐蚀介质合成

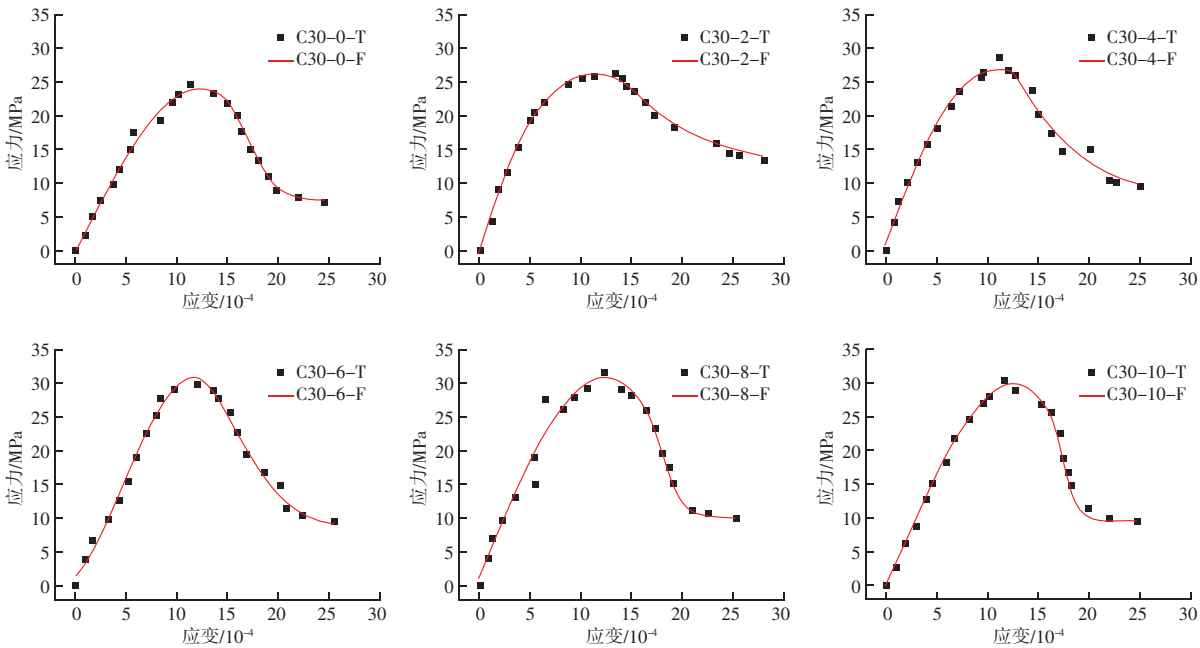


图 9 C30 级 PCR 改性混凝土的应力 - 应变全曲线
Fig. 9 Full stress - strain curve of C30 grade PCR modified concrete

材料科学

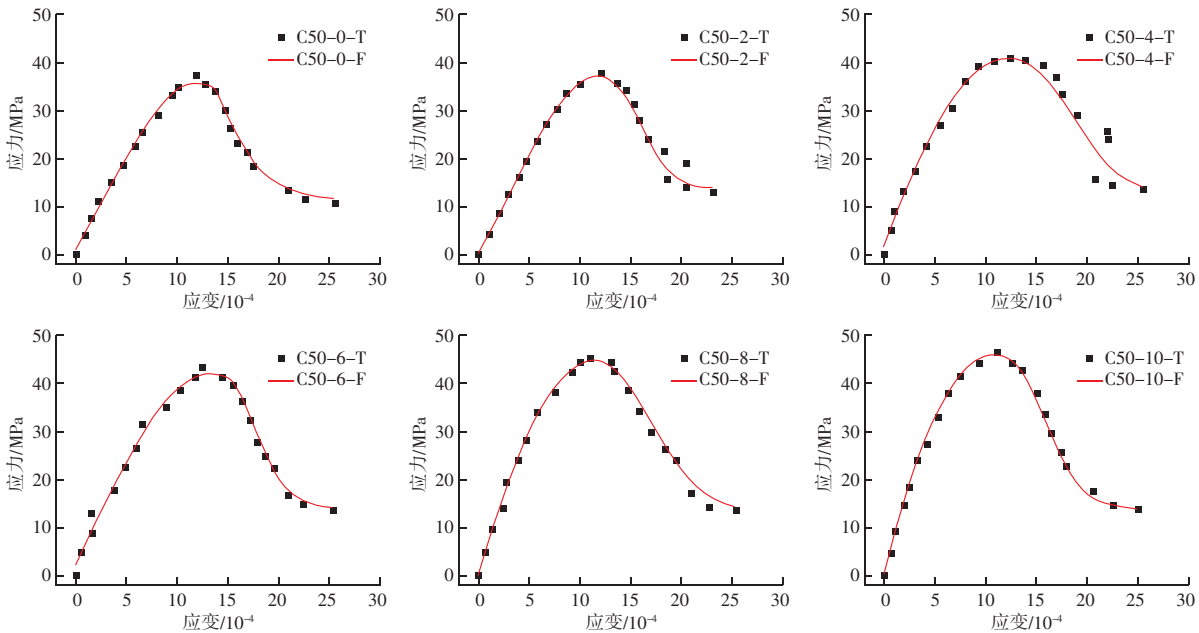


图 10 C50 级 PCR 改性混凝土的应力 - 应变全曲线
Fig. 10 Full stress - strain curve of C50 grade PCR modified concrete

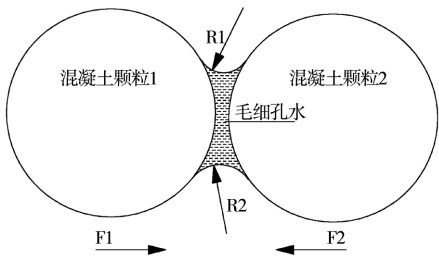


图 11 毛细管压力简图
Fig. 11 Schematic diagram of capillary pressure

不溶性盐类，阻碍侵蚀性物质向混凝土内部扩散。通过以上多种改进效应的叠加，最终促使 PRC 改性混凝土的性能得到明显提高。

5 结论

针对 PRC 改性混凝土的力学性能，进行了 12 组对照试验和分析，主要结论如下：

- (1) PRC 改性混凝土与普通混凝土的破坏特征相同，低掺量范围内随着 PRC 掺量增加，混凝土抗压强度、弹性模量均近似线性增加。
- (2) PRC 改性混凝土的比例极限比普通混凝土提高了约 5%~10% 且与掺量正相关，峰值应变减少量与掺量正相关。
- (3) PRC 改性混凝土延性系数随掺量的增加而减小，最大降幅为 10.1%，但当掺量大于某个阈值

时延性系数不再减小。
(4) 提出的 PRC 改性混凝土的本构方程具有较高的准确性，应力 - 应变全曲线与试验结果基本一致，能够准确反映混凝土的力学行为。
(5) 对混凝土的 PRC 改性包含物理形式和化学形式的改进，能够有效增加混凝土密实度和抗裂性能。

参 考 文 献

[1] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用 [J]. 土木工程学报, 2021, 54 (10): 47-54, 63.
[2] 方周, 余剑英. 高分子减缩密实剂对水泥基材料性能影响研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46 (2): 28-35.
[3] 韩宇栋, 张君, 岳清瑞, 等. 现代混凝土收缩研究评述 [J]. 混凝土, 2019 (2): 1-12, 16.
[4] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (1): 13-28.
[5] 刘改利, 杜红秀, 李倩, 等. FS102 防水密实剂掺量对地库用混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2016, (5): 132-134.
[6] 王晓英, 张亮, 朱洁, 等. 硫铝酸盐基促强减缩剂对水泥性能的影响 [J]. 水泥, 2018, 12 (18): 3-8.
[7] 袁雪莲, 沈露. 活性粉体与高分散纤维抗裂剂对混凝土抗裂防渗性能的影响 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2021, 38 (2): 213-218.
[8] 黄正峰, 欧忠文, 罗伟, 等. 硅灰和减缩剂对混凝土自收缩和孔隙的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (9): 3077-3083.

材料科学

参 考 文 献

[1] 华经产业研究院. 2022-2027 年中国建筑垃圾处理行业市场调研及投资战略规划建议报告 [M]. 华经产业研究院, 2021.

[2] KUMAR S, KUMAR R, BANDOPADHYAY A, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30 (8): 679 -685.

[3] BINICI H, TEMIZ H, MEHMET M, et al. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pμmice [J]. Construction and Building Materials, 2005, 21 (5): 1122 -1128.

[4] MA Z, LI W, WU H, et al. Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 652-663.

[5] SCHACKOW A, STRINGARI D, SENFF L, et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 82-89.

[6] KUZIELOVA E, PACH L, PALOU M. Effect of activated foaming

agent on the foam concrete properties [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 998 -1004.

[7] 张肖明, 黄沛增, 崔庆怡. 建筑垃圾再生微粉泡沫混凝土性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (5): 96-98.

[8] 张松, 李如燕, 董祥, 等. 再生微粉有效代替水泥制备泡沫混凝土 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (9): 2948-2953.

[9] 刘香, 运喜刚, 张君瑞, 等. 再生微粉制备泡沫混凝土的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2016, 43 (3): 77-80.

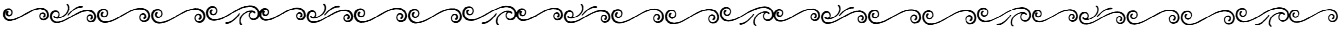
[10] 葛星, 李瑶. 活性砖粉制备泡沫混凝土物理性能研究 [J]. 低温建筑技术, 2021, 43 (6): 1-6.

[11] 罗向东. 再生微粉对混凝土体积稳定性的影响 [J]. 市政技术, 2020, 38 (1): 259-261, 264.

[12] 赵世颖, 李滢, 康晓明, 等. 再生微粉混凝土抗冻性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (11): 112-118, 96.

[13] 李应权, 徐洛屹, 扈士凯, 等. 聚合物水泥泡沫保温材料的研究 [J]. 新型建筑材料, 2010, 37 (2): 29-33.

[14] 林兴胜. 纤维增强泡沫混凝土的研制与性能 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.



(上接第 27 页)

[9] 徐存东, 李智睿, 连海东, 等. 冻融循环下玄武岩纤维混凝土的耐久性寿命预测 [J]. 混凝土, 2022 (1): 1-6.

[10] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究 [J]. 实验力学, 2020, 35 (6): 1060-1070.

[11] 陶友海. 纤维素纤维混凝土抗冻耐久性劣化规律 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (2): 715-720.

[12] 徐存东, 李博飞, 李准, 等. 早期受盐-冻耦合作用下掺玄武岩纤维混凝土耐久性劣化规律 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (3): 816-824.

[13] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (4): 4121-4126.

[14] 徐超. 纤维混杂效应对混凝土复合材料的力学及耐久性能的影响 [J]. 功能材料, 2021, 52 (1): 1202-1207.

[15] 普少昌, 周喻, 张宏博, 等. 含铁尾矿粉和粉煤灰混凝土强度和耐久性研究 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (6): 84-87, 93.

[16] GB/T 50082—2024, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S].

(上接第 42 页)

[9] 邹小童, 武建好, 李星辰, 等. 减缩剂对水泥砂浆及超高性能混凝土收缩性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (6): 18-21, 26.

[10] 张佶, 陈航宇, 王航, 等. 减缩剂在混凝土中的作用效果研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (增刊2): 722-725, 693.

[11] 左俊卿, 房霆宸, 朱敏涛, 等. 裂缝控制材料对混凝土收缩及

微观性能影响 [J]. 混凝土, 2024 (1): 95-100, 106.

[12] 光鉴淼, 邹小童. 减缩剂对水泥砂浆塑性收缩开裂的影响及机理分析 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (9): 57-61.

[13] GB/T 50081—2019. 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.