第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190808

高吸水树脂吸液特性对混凝土性能的影响

张守祺[1,2]，路振宝[2]，昂　源[2]，辛鹏浩[2]

(1. 交通运输部公路科学研究院，北京 100088；
2. 中路高科交通检测检验认证有限公司，交通基础设施智能制造技术交通运输行业研发中心，北京 100088)

摘　要：提出了高吸水树脂(SAP)吸水率比指标，研究了吸水率比对 SAP 在水泥浆体离心液中的吸水动力学及内养护混凝土流变性能、抗压强度、收缩性能的影响。结果表明：SAP 在水泥离心液中吸水率呈迅速增加、逐渐降低和最后稳定的规律；当 SAP 吸水率比增大时，吸水率峰值增大、释水时间延长。伴随 SAP 吸水率比逐渐增大，内养护混凝土拌合物屈服应力逐渐增大、塑性黏度逐渐降低。SAP 可降低混凝土早期强度，对后期强度影响较小，且可明显降低混凝土收缩。在吸水率比为 1.94~6.16 范围内，SAP 对混凝土抗压强度和收缩性能的作用规律一致。

关键词：高吸水树脂；吸水动力学；吸水率比；流变性能；收缩特性
中图分类号：TU59　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1278–07
网络出版时间：2020–06–03



Effect of Super-absorbent Polymer Water Absorption Characteristics on Performance of Concrete

ZHANG Shouqi[1,2], *LU Zhenbao*[2], *ANG Yuan*[2], *XIN Penghao*[2]

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
2. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure Ministry of Transport, PRC, China-road Transportation Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd, Beijing 100088, China)

Abstract: An indicator named as water absorption ratio of super-absorbent polymer (SAP) was proposed. The effect of SAP water absorption ratio on the absorption kinetics of SAP in centrifugal liquid from cement slurry (CLCS), rheological property of fresh concrete with internal curing, compressive strength and shrinkage of hardened concrete with internal curing was investigated. The results indicate that the absorption of SAP in CLCS exhibits a law of rapid increase, gradual decrease and final stability. The peak value of absorption and the release time increase, the yield stress of fresh concrete gradually increases and the plastic viscosity gradually decreases as the SAP water absorption ratio increases. SAP reduces the early strength and shrinkage of concrete significantly, and has little impact on the long-term strength. SAP also has no impact on the compressive strength and shrinkage of hardened concrete evolved with curing time when the water absorption ratio is 1.94–6.16.

Keywords: super-absorbent polymer; absorption kinetics; water absorption ratio; rheological properties; shrinkage properties

随超高层建筑和大跨径桥梁的日益增多，高强混凝土的工程应用日趋广泛。高强混凝土配合比特点之一是水胶比较低，常小于 0.40[1]。根据 T.C Powers 水泥水化模型[2–4]，水胶比低于 0.42 时，混凝土内水分无法满足水泥完全水化需求。在此条件下，随着水泥水化反应持续进行，导致高强混凝土内部湿度逐渐降低，产生自干燥效应而生成内应力，其逐渐累积可引起结构开裂。因此，湿养护对抑制高强混凝土收缩尤为重要。目前常用的养护技术主要为外养护。由于高强混凝土水胶比低且掺加活性掺合料(如磨细矿渣粉、硅灰等细颗粒)，具有低渗透性特点，导致外养护水难以进入混凝土内部，养护作用效果不佳。

针对外养护对高强混凝土的适用性问题，以高

收稿日期：2019–12–13。　修订日期：2020–01–13。
基金项目：交通运输部应用基础研究项目(2014319223070)。
第一作者：张守祺(1984—)，男，博士研究生，副研究员。

Received date: 2019–12–13.　**Revised date:** 2020–01–13.
First author: ZHANG Shouqi (1984—), male, Doctoral candidate, Associate Research Fellow.
E-mail: zhang-shouqi@163.com

吸水树脂(SAP)为功能材料，实现高强混凝土内养护，成为重要解决途径。高吸水树脂具备高分子聚合交联三维网络结构[5]，含强亲水基团，渗透压和离子静电斥力可使其溶胀吸水，吸水能力可达自身质量百倍以上。SAP 的这种特性使其成为一种有效的可应用于混凝土的内养护材料[6–7]。自 1999 年丹麦首次提出 SAP 内养护技术，大量研究表明 SAP 可显著降低混凝土收缩[8–10]。2003 年 RILEM TC-ICC 成立了专业技术委员会，肯定了混凝土内养护技术应用前景，推动了高吸水性树脂型混凝土内养护技术发展。

高吸水树脂吸水–释水规律成为研究方向之一[11–12]。由于无法实时跟踪水泥混凝土内部 SAP 吸水–释水变化规律，文献[13]研究了 SAP 在水泥离心液中的吸水动力学。结果表明：SAP 在水泥离心液中吸水率在 0~10 min 迅速增加，10~60 min 逐渐降低，60~180 min 逐渐稳定。SAP 吸水率受溶液中离子种类和浓度的影响明显。新拌混凝土中离子浓度随水化时间延长(0~120 min)逐渐增加[14]。因此，SAP 吸水与水泥浆体中离子浓度变化 2 个动态过程发生重叠，推测混凝土中 SAP 吸水率随时间变化如图 1 所示。

当 SAP 加入混凝土中迅速吸水(图 1 中 *OA* 段)，到达峰值(图 1 中 *A* 点)后，吸水率逐渐降低(图 1 中 *AB* 段)并趋于平衡(图 1 中 *BC* 段)。随着水泥水化继续进行，水泥孔隙中的湿度开始降低后，SAP 逐渐释水(图 1 中 *CD* 段)。国内外已有研究多集中于 *B-C-D* 段，即以 *BC* 段吸水率计算 SAP 用量，继而分析 *CD* 段内养护作用效果。值得注意，*O-A-B* 段揭示了 SAP 在水泥水化过程中的吸水特性，加之 *O-A-B* 段处于混凝土塑性阶段，其变化规律对 SAP 型内养护混凝土拌合物的流变性能有影响。

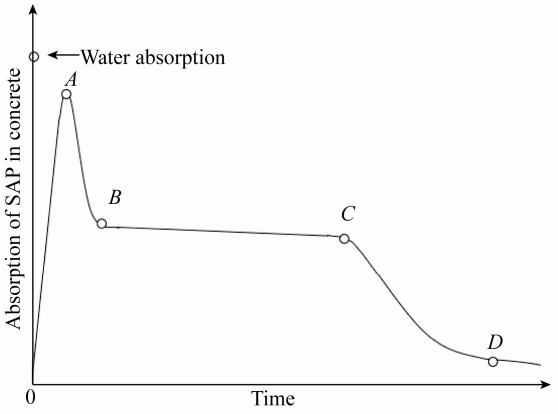


图 1　混凝土中 SAP 吸水率随时间变化

Fig. 1　Absorption of super-absorbent polymer (SAP) during hydration time of concrete

以去离子水中 SAP 吸水率类比 *A* 点，提出 SAP 吸水特性指标—吸水率比，即其在去离子水中稳定吸水率与在水泥浆体离心液中稳定吸水率(*B-C* 段)的比值。在此基础上，研究了 3 种吸水率比 SAP 在水泥浆体离心液中吸水动力学，以及 3 种吸水率比 SAP 对混凝土流变性能、力学性能和收缩性能的影响作用。

1　实验

1.1　原材料

水泥为 P·I 型基准水泥，其矿物组成、化学组成及物理性能分别见表 1~表 3。粉煤灰为唐山陡河 I 级粉煤灰。粗骨料为 5~20 mm 连续级配碎石。细骨料采用Ⅱ区中砂，细度模数为 2.5。减水剂为北京金隅节能科技有限公司生产的聚羧酸系高性能减水剂。SAP 为实验室自制，性能指标见表 4。

内养护混凝土配合比见表 5 所示。

表 1　基准水泥熟料矿物组成

Table 1　Mineral composition of cement　　*w*/%

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	Total
56.54	20.87	6.22	10.31	93.94

w is mass fraction.

表 2　基准水泥化学组成

Table 2　Chemical composition of cement　　*w*/%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2Oeq	Loss	f-CaO	Cl^-
21.980	4.470	3.550	62.450	2.400	2.450	0.502	1.220	0.900	0.010

表 3　基准水泥物理性能

Table 3　Main performance indexes of cement

Density/(kg·m^{-3})	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
	Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
3 150	128	200	6.0	7.8	26.8	49.8

表 4　SAP 性能指标

Table 4　Characteristics of SAP

Sample No.	Absorption in distilled water/bwos*	Absorption in CLCS/bwos	Water absorption ratio	Diameter/μm
S1	48.46	24.98	1.94	80–100
S2	76.90	25.13	3.06	80–100
S3	145.01	23.54	6.16	80–100

*: bwos is short for by mass of SAP.

表 5 试验用混凝土配合比

Table 5 Mix proportions of concrete kg/m^3

Sample No.	Cement	Fly ash	Sand	Stone	Water	SAP			Super-plasticizer
						S1	S2	S3	
A0	391	128	621	1155	144.9				5.0
A1	391	128	621	1155	167.7	0.91			5.0
A2	391	128	621	1155	167.7		0.91		5.0
A3	391	128	621	1155	167.7			0.97	5.0

1.2 方法

(1) SAP 吸水率测试

水泥浆体离心液制备方法。基于试验用混凝土配合比，剔除粗、细骨料，制备水泥净浆，静置 20 min 后，利用离心机中速(转速 6 000 r/min)离心 20min，制取一次离心液。利用离心机高速(15 000 r/min)离心为 30 min，制取二次离心液。二次离心液即为试验用水泥浆体离心液。

SAP 吸水率测试过程。在去离子水和水泥离心液中，SAP 吸水率均采取滤袋法测试。①滤袋材料吸水率(K_1)测试。称取滤袋质量(m_1)，浸泡于去离子水或水泥离心液中，待吸水稳定后悬空静置 5 min 至无液体下滴，称取湿滤袋质量(m_2)。滤袋材料的吸水率按公式(1)计算，试验结果取 3 次测试值的算术平均值。②SAP 吸水率测试。将 SAP 粉体于(50±5) ℃烘箱中烘干至恒重。称量滤袋质量(m_3)，将约 1 g SAP 粉体(m_4)置于滤袋内。将装有 SAP 粉体的滤袋浸泡于去离子水或离心液中，浸泡期间用玻璃棒轻度拍打滤袋以保证 SAP 均匀吸水。在设定时间称量吸水 SAP 和滤袋的总质量(m_5)，称重前需将滤袋悬空静置 5 min 至无液体浸出。SAP 吸水率(K_2)按公式(2)计算，试验结果取 3 次测试值的算术平均值。

$$K_1=\frac{m_2-m_1}{m_1} \tag{1}$$

式中：K_1 为滤袋材料吸水率；m_1 为干滤袋质量，g；m_2 为湿滤袋质量，g。

$$K_2=\frac{m_5-m_4-m_3\cdot K_1}{m_4} \tag{2}$$

式中：K_2 为 SAP 吸水率；m_3 为盛样干滤袋质量，g；m_4 为干燥恒重处理后 SAP 粉体质量，g；m_5 为吸水后 SAP 和滤袋总质量，g。

(2) 混凝土流变性能测试方法

采用 Schleibinger eBT2 型自动混凝土流变仪，测试 10、30 min 和 60 min 内混凝土拌合物屈服应力和塑性黏度。

(3) 混凝土抗压强度测试方法

采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体标准试件，参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)执行。

(4) 混凝土收缩测试方法

混凝土自收缩和干燥收缩均采用非接触法和接触法相结合的测试方法，并同条件测试初凝时间。

①非接触法自收缩试件制作。在《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)试验要求基础上，于试模内预先平整铺设双层塑料薄膜，浇筑混凝土后将同块薄膜剩余部分翻转覆盖试件顶面。测试标靶需穿过塑料薄膜，但穿孔边缘需用凡士林密封，保证无水分散失。

②接触法(立式)自收缩试件制作。试件在标准养护室[相对湿度不低于 95%，温度(20±2) ℃]内浇筑成型，成型后立即用双层塑料薄膜密封，以防止塑性阶段水分散失。标准养护 24 h 后脱模，立即用铝箔防水卷材包裹，并移入混凝土收缩试验室养护待测。

③非接触法自收缩测试。参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)相关要求开展试验。自收缩试验以同条件测试的初凝时间为起始时间(即 0 点)，当各试验混凝土到达初凝时间时，同步启动混凝土非接触式收缩测试仪。非接触式自收缩测试周期为 0~48 h，结果取 3 个试件测试值的算术平均值。

④接触法(立式)自收缩测试。参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)相关要求开展试验。以非接触法测试周期终点为起始点，测试周期为 48 h~180 d，结果取 3 个试件测试值的算术平均值。

⑤自收缩值计算。将非接触法自收缩测试值(ε_{a1})和接触法(立式)自收缩测试值(ε_{a2})相加(见公式 3)，加和值作为 0~180 d 自收缩测试结果。

$$\varepsilon_a=\varepsilon_{a1}+\varepsilon_{a2} \tag{3}$$

式中：ε_a 为自收缩；ε_{a1} 为非接触法自收缩测试值；ε_{a2} 为接触法(立式)自收缩测试值。

混凝土干缩和自收缩在试件成型、测试方法、参考依据等方面基本相同，主要区别是干缩试件未用塑料薄膜、铝箔防水卷材包覆，其测试条件参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)执行。

2　结果与讨论

2.1　SAP 在水泥浆体离心液中吸水动力学

图 2 为 SAP 在水泥浆体离心液中吸水率随时间变化规律。由图 2 可见：在 0~10 min 时，SAP 吸水率迅速增大；在 10 min 时达到最大值，并随 SAP 吸水率比的增大而增大；在 10~180 min 时，SAP 吸水率逐渐降低，最后趋于稳定。吸水率比为 1.94 和 3.06 时，吸水率在 30 min 时达到稳定；吸水率比为 6.16 时，吸水率在 60 min 时达到稳定。

SAP 在水泥浆体离心液中吸水率随时间延长，呈先增大、后降低、最后趋于稳定的趋势，该研究结论与文献[13]研究结果一致。其原因是 SAP 在水泥浆体离心液中吸水时，离心液中水分子快速吸入 SAP 聚合物内部，而高价离子逐渐吸入。随高价离子浓度在 SAP 中逐渐累积，增加其内部分子交联作用，降低了吸水溶胀能力，导致吸水量呈现先增后减的规律[5, 11, 13, 15–16]。

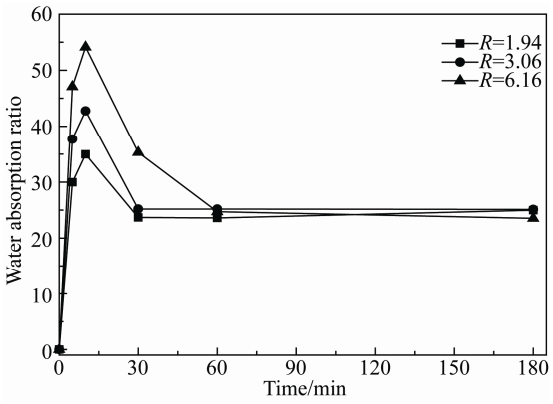


图 2　SAP 在水泥浆体离心液中(CLCS)吸水动力学曲线

Fig. 2　Water absorption kinetics curves of SAP in centrifugal liquid from cement slurry (CLCS)

2.2　吸水率比对混凝土拌合物流变性的影响作用

SAP 吸水率比对混凝土拌合物屈服应力影响规律见图 3。由图 3a 可见：在 10、30 min 和 60 min 时，内养护混凝土的屈服应力随吸水率比增大逐渐增大；在 10 min 时，掺加吸水率比为 1.94 的 SAP，内养护混凝土屈服应力与空白混凝土基本一致；掺加吸水率比为 3.06 和 6.16 的 SAP，内养护混凝土屈服应力均高于空白混凝土。在 30 min 时，掺加吸水率比为 1.94 和 3.06 的 SAP 时，内养护混凝土屈服应力均低于空白混凝土，掺加吸水率比为 6.16 的 SAP 时，内养护混凝土屈服应力高于空白混凝土。在 60 min 时，掺加吸水率比为 1.94、3.06 和 6.16 的 SAP，内养护混凝土屈服应力全部低于空白混凝土。由图 3b 可见：空白混凝土屈服应力随时间增大显著增大；掺加吸水率比为 6.16 的 SAP，内养护混凝土屈服应力随时间增大明显减小；掺加吸水率比为 1.94 和 3.06 的 SAP，内养护混凝土屈服应力呈先降低后增大的趋势。

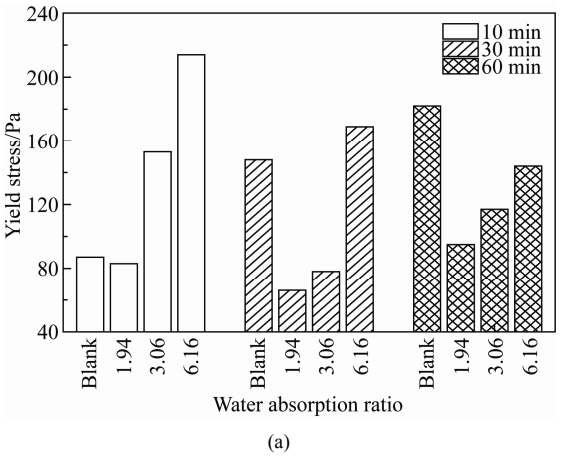
如图 1 所示，SAP 掺入混凝土需经历“吸水—释水—平衡—释水”的过程。早期吸水—释水过程的主要原因：一是 SAP 在水泥浆体中呈先吸水后释水过程；二是水泥浆体中离子浓度随时间逐渐增大[14]。

内养护 SAP 用量的计算依据是其在水泥浆体离心液中稳定吸水率。结合 2.1 节研究结果可推断，在 10 min 时，混凝土中 SAP 处于吸水率最大时刻，此时吸水率大于稳定吸水率，即此时刻的实际吸水量高于计算所得内养护水用量，造成内养护混凝土中自由水含量低于空白混凝土，增大了内养护混凝土的屈服应力。此外，SAP 对自由水的超额吸收量与吸水率比成正比，表现为内养护混凝土屈服应力随 SAP 吸水率比增大逐渐增加(见图 3a)。

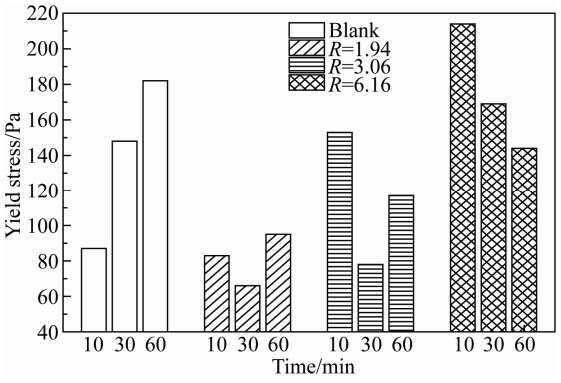
在 10~60 min 时，水泥水化程度逐渐增加，混凝土中 SAP 处于吸水率降低阶段(释水过程)，屈服应力由水泥水化导致的提高作用和 SAP 释水引起的降低作用共同决定。空白混凝土未掺加 SAP，仅水泥水化起提高作用，导致屈服应力逐渐增大(如图 3b 所示)。在 10~60 min 时，掺加吸水率比为 6.16 的 SAP，内养护混凝土屈服应力逐渐降低，表明 SAP 释水对屈服应力的降低作用大于水泥水化对屈服应力的增加作用。该现象与图 2 中 SAP(吸水率比为 6.16)吸水规律一致，即 10~0 min 时，SAP 始终处于释水阶段。在 10~60 min 时，掺加吸水率比为 1.94 和 3.06 的 SAP，屈服应力先降低后增加。表明 10~30 min 时，SAP 释水对屈服应力的降低作用占主导；30~60 min 时，水泥水化对屈服应力的增加作用占主导。该现象与图 2 中 SAP(吸水率比为 1.94 和 3.06)在水泥浆体离心液中吸水率规律一致，即 10~30 min 时，SAP 在水泥浆体离心液中处于释水过程，此时 SAP 释水可起主导作用；30~60 min 时，SAP 吸水率基本不变，但水泥水化持续进行，其作用占主导。

屈服应力反映混凝土组成材料之间的附着力和内摩擦力。在 30 min 或 60 min 时，混凝土中 SAP 已处于吸水稳定状态，在不考虑水泥水化区别的条件下，内养护混凝土屈服应力应与空白混凝土相同，但是出现图 3a 所示内养护混凝土屈服应力低于空白混凝土的现象。原因是 SAP 吸水形成水凝

胶弹性体，增加了黏性悬浮液(水泥浆体)对刚性分散相(粗骨料和细骨料)的“润滑作用”，可降低刚性分散相之间内摩擦力，其微观机制与作用程度有待深入研究。



(a)



(b)

图 3 吸水率比对内养护混凝土屈服应力的影响

Fig. 3 Effect of water absorption ratio (*R*) on yield stress of ICC (inner curing concrete)

图 4 给出了吸水率比对混凝土拌合物塑性黏度的影响作用规律。由图 4 可见，在 10~60 min 内，掺加 SAP 降低混凝土拌合物塑性黏度，并随吸水率比增大，降低作用更加明显。

塑性黏度反映流体平流层之间与流动方向反向的黏滞阻力，SAP 降低混凝土拌合物塑性黏度，其可能原因如下：1) SAP 以稳定吸水率作为计算依据，受离子浓度和吸入过程影响，SAP 初期吸水量高于稳定吸水量，吸水率比越大则越为明显，可降低基本混凝土水胶比，导致屈服应力增大；2) 相比空白混凝土，加入 SAP 和内养护水后，单位体积混凝土拌合物中的粗骨料体积含量降低、砂率增加(吸水 SAP 类比为细砂)。增加砂率对塑性黏度呈先降后增趋势，影响较为明显[17]。吸水率比越高，表明吸水 SAP 体积更大，降低塑性黏度作用越为显著。3) SAP 吸水后形成水凝胶弹性体，具有挤压可变形性，并对刚性骨料有“润滑作用”，可降低塑性黏度。

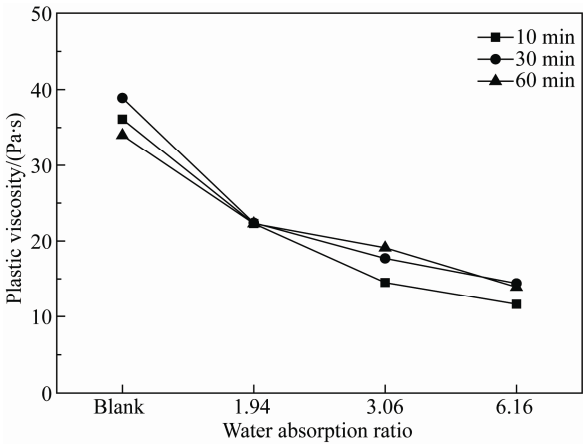


图 4 吸水率比对内养护混凝土塑性黏度的影响

Fig. 4 Effect of water absorption ratio (*R*) on plastic viscosity of ICC

根据屈服应力与塑性黏度的定义和影响因素分析，塑性黏度主要受原因(1)~(3)影响，而屈服应力主要受原因(1)和(3)影响，因此 SAP 内养护对二者表现出不同的影响规律，其微观机制与作用程度有待深入研究。此外，文献[11]有相似研究结论。

2.3 吸水率比对混凝土抗压强度的影响作用

SAP 对混凝土 3~180 d 抗压强度的影响作用规律见图 5。随龄期延长，空白混凝土和内养护混凝土抗压强度逐步增长。空白混凝土在 3~28 d 增长速率高，28 d 后增长速率逐步减缓。内养护混凝土在 3~90 d 增长速率高，90 d 后增长速率逐步减缓。在 3~6 d 内，空白混凝土抗压强度高于内养护混凝土，90 d 后，空白混凝土抗压强度与内养护混凝土抗压强度趋于一致，表明掺加 SAP 主要降低混凝土中早期强度(60 d 前)，对后期强度影响相对较小。

SAP 内养护对混凝土抗压强度的影响主要由硬化混凝土孔结构和胶凝材料水化程度共同决定。SAP 可增加混凝土气孔率，导致密实度下降、抗压强度降低[18]。在胶凝材料持续水化过程中，饱水 SAP 缓慢释水使其水化程度提高，增强作用逐步抵消气孔率的降低作用。SAP 对抗压强度的影响与其吸水率比无明显的相关性。可能与本研究中 SAP 对水泥浆体离心液的稳定吸水率基本一致及内养护用水量一致有关。

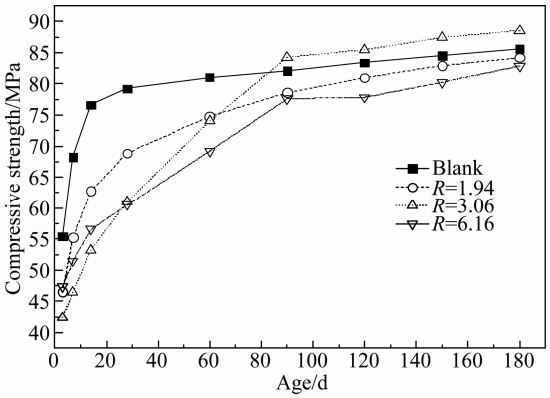


图 5　吸水率比对内养护混凝土抗压强度的影响

Fig. 5　Effect of water absorption ratio (R) on compressive strength of ICC

2.4　吸水率比对混凝土自收缩的影响作用

图 6 给出了 SAP 对混凝土自收缩的影响作用规律。可知，随龄期增加，空白混凝土和内养护混凝土自收缩逐步增大。在初始至 60 d 龄期时，自收缩增长快速；在 60~180 d 龄期时，自收缩逐步趋于稳定。SAP 内养护降低自收缩，28、60 d 和 180 d 最大降幅约为 32.8%、38.7%和 40.0%。SAP 吸水率比对自收缩的影响作用不明显。

在胶凝材料凝结硬化过程中，SAP 内养护水随水泥石相对湿度降低逐步释放，对 SAP 颗粒周边水泥石补水[1, 19]，缓解因湿度降低诱发的自收缩。本研究中 SAP 吸水率比对自收缩的影响无明显差异，其原因与内养护用水量、SAP 掺量及其稳定吸水率相近有关。

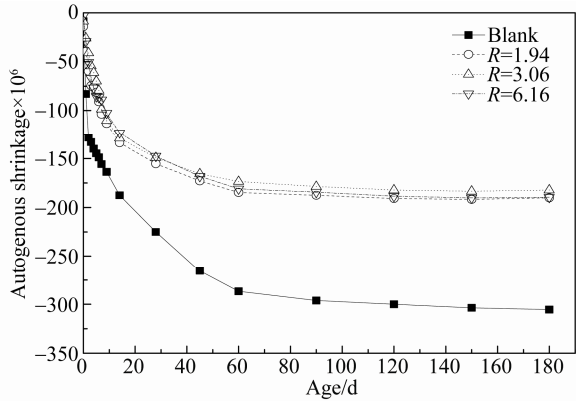


图 6　吸水率比对内养护混凝土自收缩的影响

Fig. 6　Effect of water absorption ratio (R) on autogenous shrinkage of ICC

2.5　吸水率比对混凝土干燥收缩的影响作用

SAP 对混凝土干燥收缩的影响作用规律见图 7。与自养护相似，随龄期增加，空白混凝土和内养护混凝土干燥收缩逐步增大。在初始至 60 d 龄期时，干燥收缩增长快速；在 60~180 d 龄期时，干燥收缩逐步趋于稳定。SAP 内养护降低干燥收缩，28、60 d 和 180 d 最大降幅约为 33.1%、34.2%和 29.2%。SAP 吸水率比对干燥收缩的影响作用不明显。

根据相关研究报道[19–20]，SAP 降低干燥收缩的机理如下：1) SAP 内养护改变混凝土表面水分挥发机制，可减小干缩；2) SAP 内养护增加混凝土试件内部相对湿度，可降低自收缩进而减小干缩。因此，SAP 内养护对干燥收缩影响取决于 2 种作用综合结果，而对自收缩的影响主要取决于第 2 种作用。

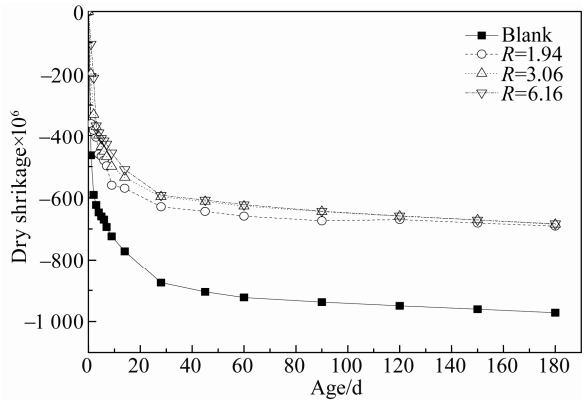


图 7　吸水率比对内养护混凝土干燥收缩的影响

Fig. 7　Effect of water absorption ratio (R) on dry shrinkage of ICC

3　结论

1) 为表征 SAP 在混凝土拌合物中的吸液特性，提出了 SAP 吸水率比作为表征指标。

2) SAP 在水泥浆体离心液中吸水率呈迅速增加、逐渐降低和最后稳定的规律。当吸水率比为 1.94~6.16 范围内时，SAP 吸水率比越大，吸水率峰值越大、释水时间越长。

3) SAP吸水率比对混凝土拌合物流变性的影响明显，且对屈服应力和塑性黏度的作用规律不同。设计 SAP 型内养护混凝土工作性时，应加以考虑。

4) SAP 可降低混凝土中、早龄期(0~60 d)抗压强度，对后期(60~180 d)抗压强度影响相对较小。当吸水率比为 1.94~6.16 范围内时，SAP 吸水率比对该规律无明显影响。

5) SAP 降低混凝土自收缩和干燥收缩。当吸水率比为 1.94~6.16 范围内时，SAP 吸水率比对该规律无明显影响。

参考文献:

[1] KONG X M, LU Z B. Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete[J]. Mater Struct, 2015, 48: 2741–2758.

[2] POWERS T C, BROWNYARD TL. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste//Bulletin 22, Research Laboratories of the Portland Cement Association[C]. Chicago, 1948.

[3] POWERS T C. Physical properties of cement paste//Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement[C]. Washington, DC. (Paper V-1), 1960: 577–613.

[4] POWERS T C. The nonevaporable water content of hardened Portland-cement paste-its significance for concrete research and its method of determination[J]. ASTM Bull, 1949, 158: 68–76.

[5] SCHRÖFL C, MECHTCHERINE V, GORGES M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture tomitigate autogenous shrinkage[J]. Cem Concr Res, 2012, 42: 865–873.

[6] GJØRV O E. Durability of concrete structures[J]. Arabian J Sci Eng, 2011, 36(2): 151–172.

[7] BJØNTEGAARD Ø. Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high-performance concrete[D]. Trondheim. Norwegian University of Science and Technology, Division of Structural Engineering, 1999.

[8] CRAEYE B, GEIRNAERT M, SCHUTTER G D. Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(1): 1–13.

[9] ASSMMANNA, REINHARDT H W. Tensile creep and shrinkage of SAP modified concrete[J]. Cem Concr Res, 2014, 58: 179–185.

[10] SHEN D J, JIANG J L, ZHANG M Y, et al. Tensile creep and cracking potential of high performance concrete internally cured with super absorbent polymers at early age[J]. Constr Build Mater, 2018, 165: 451–461.

[11] MECHTCHERINE V, SECRIERU E, SCHRÖFL C. Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars-development of yield stress and plastic viscosity over time[J]. Cem Concr Res, 2015, 67: 52–65.

[12] HASHOLT M T, JENSEN O M, LAUSTSEN S. Superabsorbent polymers as a means of improving frost resistance of concrete[J]. Adv Civ Eng Mater, 2015, 4: 237–256.

[13] KANG S H, HONG S G, MOON J. Absorption kinetics of superabsorbent polymers (SAP) in various cement-based solutions[J]. Cem Concr Res, 2017, 97: 73–83.

[14] 孔祥明, 路振宝, 石晶, 等. 磷酸及磷酸盐类化合物对水泥水化动力学的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11): 1553–1558.
KONG Xiangming, LU Zhenbao, SHI Jing, et al. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(11): 1553–1558.

[15] ZHU Q, BARNEY C W, ERK K A. Effect of ionic crosslinking on the swelling and mechanical response of model superabsorbent polymer hydrogels for internally cured concrete[J]. Mater Struct, 2015, 48: 2261–2276.

[16] SCHRÖFL C, MECHTCHERINE V, VONTOBEL P, et al. Sorption kinetics of superabsorbent polymers (SAPs) in fresh Portland cement-based pastes visualized and quantified by neutron radiography and correlated to the progress of cement hydration[J]. Cem Concr Res, 2015, 75: 1–13.

[17] 黄明奎. 公路工程材料流变学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010: 160–161.
HUANG Mingkui. Rheology of highway engineering material (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 160–161.

[18] 胡曙光, 周宇飞, 王发洲, 等. 高吸水性树脂颗粒对混凝土自收缩与强度的影响[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(1): 1–4.
HU Shuguang, ZHOU Yufei, WANG Fazhou, et al. J Huazhong Univ Sci Technol: Urb Sci Ed (in Chinese), 2008, 25(1): 1–4.

[19] MA X W, LIU J H, WU Z M, et al. Effects of SAP on the properties and pore structure of high performance cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2017, 131: 476–484.

[20] IGARASHI S, WATABABE A. Experimental study on prevention of autogenous deformation by internal curing using super-absorbent polymer particles//RILEM. International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete[C]. Bagneux: RILEM Publications, 2006: 77–86.