

文章编号:1007-9629(2021)03-0606-09

内养生路面混凝土水分传输特性及力学性能

覃 潇¹, 申爱琴², 李俊杰³, 谢政专⁴

(1. 佛山科学技术学院 佛山市智慧型陆地与海洋土木工程材料工程技术研究开发中心, 广东 佛山 528225;
2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 3. 广东新业混凝土有限公司, 广东 佛山 528305;
4. 广西交投集团有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要: 研究了内养生路面混凝土各形式水分在不同龄期的转化规律,探索了高吸水性聚合物(SAP)粒径及掺量对路面混凝土相对湿度、收缩性能及抗弯拉强度的影响,揭示了内养生对抗弯拉强度的影响机理.结果表明:小粒径 SAP 能够持续释放内养生水对混凝土进行较长时间的养生;内养生路面混凝土在 3、7 d 的减缩率高达 68.85%和 73.98%;内养生能够有效削弱路面混凝土垂直方向的湿度梯度,提升材料均匀性;小粒径 SAP 在释水养生过程中可对混凝土残留孔洞起到良好的水化填充作用,并能增强骨料-水泥石界面过渡区(ITZ)黏结强度.

关键词: 内养生路面混凝土;水分传输特性;相对湿度;水化;抗弯拉强度

中图分类号: U414.1

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.022

Water Transport Characteristics and Mechanical Properties of Internal Curing Pavement Concrete

QIN Xiao¹, SHEN Aiqin², LI Junjie³, XIE Zhengzhuang⁴

(1. Foshan Land Sea Smart Civil Engineering Material Technology R&D Center, Foshan University, Foshan 528225, China;
2. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Guangdong Xinye Concrete Co., Ltd., Foshan 528305, China;
4. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: The transformation rule of different forms of water of internal curing pavement concrete was researched at different ages, and the influences of SAP particle size and dosage on the relative humidity, shrinkage performance and flexural strength of pavement concrete were explored. The influence mechanism of internal curing on flexural strength was revealed. The results show that SAP with smaller particle size could release the water gradually for a longer period of time. The shrinkage reduction rate of internal curing pavement concrete on 3, 7 d was 68.85% and 73.98%, respectively. Internal curing technology could effectively reduce the vertical humidity gradient of pavement concrete and improve the homogeneity of material. SAP with smaller particle size plays a good hydration filling role on its residual holes, which could enhance the bonding strength of aggregate-cement matrix interfacial transition zone(ITZ).

Key words: internal curing pavement concrete; water transport characteristic; relative humidity; hydration; flexural strength

路面混凝土暴露于大气中,铺筑后极易在板内水化反应及蒸发双重作用下迅速丧失水分,致使收

缩微裂纹萌生^[1].水泥混凝土结构致密,采用传统养生方法难以保证水分充分浸润材料内部^[2-3].高吸水

收稿日期:2020-08-17; 修订日期:2020-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908130);广东省自然科学基金-面上项目(2021A1515011716);广西科技计划项目广西重点研发计划(桂科 AB17292032)

第一作者:覃 潇(1992—),女,广东佛山人,佛山科学技术学院讲师,硕士生导师,博士. E-mail:qinnao@fosu.edu.cn

性聚合物(SAP)内养生剂能够在水泥混凝土养生早期持续释水以维持混凝土内部的高湿状态,有效减少收缩微裂纹^[4-6]。

水泥混凝土各项性能的发展主要取决于其内部水分传输特性^[7],现有 SAP 内养生水泥混凝土相关研究大多集中于宏观性能^[8-10],缺乏对水分形式(包括毛细水、凝胶水和内养生水)转化规律的理论研究^[11]。史才军等^[12-13]应用低频¹H 核磁共振技术研究了水泥净浆的水分形式转化以及内部孔隙演化。Karakosta 等^[14]基于纵向弛豫时间 T_1 ,对水化凝胶的生长过程进行了精确监测。

目前,内养生混凝土的研究大多以结构混凝土为载体开展。路面混凝土属大面积薄板,内部水分极易丧失,内养生要求必然高于结构混凝土^[15];路面混凝土振动提浆施工工艺的应用使其水胶比与材料特性沿板自上而下存在“垂直梯度”;路面混凝土力学性能评价指标为抗弯拉强度,这对骨料-水泥石界面过渡区(ITZ)的黏结强度提出了更高的要求。综上,已有研究成果缺乏以内养生路面混凝土为载体所开展的水分传输特性研究,并在力学性能改善机理方面欠缺深入的分析。

本文定量分析了各形式水分在内养生路面混凝土中的转化规律;探索了 SAP 粒径及掺量对路面混凝土板内部相对湿度及收缩性能的影响,并对其湿度垂直空间分布特征进行了研究;基于对水分传输特性、水化程度及微观结构特征的综合分析,揭示了 SAP 内养生对路面混凝土抗弯拉强度的影响机理。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用海螺牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,密度为 3.15 g/cm^3 ,布莱恩细度为 $3\ 900 \text{ cm}^2/\text{g}$;矿物掺和料为汕头中业粉煤灰有限公司生产的 I 级粉煤灰,密度为 2.10 g/cm^3 ,比表面积为 $270 \text{ m}^2/\text{kg}$,活性指数为 75%;粗骨料为广东省晟兴石场生产的石灰岩碎石,分为 $4.75\sim 9.5 \text{ mm}$ 和 $9.5\sim 19 \text{ mm}$ 两档,两档料的质量比为 2:8;细集料为广东省清远市北江河砂,中砂,细度模数为 2.71,含泥量¹⁾为 0.6%。

内养生剂选用聚丙烯酸钠盐类 SAP,包括 $380\sim 830 \mu\text{m}$ (SAP-20)、 $180\sim 380 \mu\text{m}$ (SAP-40)和 $120\sim 150 \mu\text{m}$ (SAP-100)3 种粒径,密度均为 $0.70\sim 0.75 \text{ g/cm}^3$ 。SAP 在水泥浆体(水胶比 $m_w/m_b =$

0.37)中的吸液特性见图 1。由图 1 可见,SAP 在 30 min 时吸液倍率基本达到稳定。

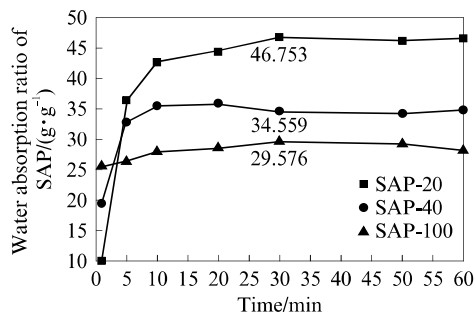


图 1 SAP 在水泥浆体($m_w/m_b=0.37$)中的吸液特性
Fig. 1 Water absorption characteristics of SAP in cement paste ($m_w/m_b=0.37$)

减水剂采用 JB-ZSC 型聚羧酸高性能减水剂,减水率为 26%。水为市政自来水。

1.2 试验配合比

经前期大量优化试验,已得出 C40 路面混凝土($m_w/m_b=0.37$)最优基准配合比,见表 1。在此基础上,根据 SAP 在 30 min 时的吸液倍率(见图 1)和式(1)确定内养生水引入量(W_{IC})、SAP 掺量(w_{SAP}),见表 2。其中 Non-S 代表不参加 SAP 的基准组,S-100-0.125 代表掺加 SAP-100 且 SAP 掺量为 0.125% 的试验组,其余编号以此类推。

$$\begin{cases} 0.36 \leq m_w/m_b \leq 0.42 \\ m_{w,IC}/m_b = 0.42 - m_w/m_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m_{w,IC}$ 为内养生水量; $m_{w,IC}/m_b$ 为内养生所需额外水胶比。

表 1 C40 路面混凝土($m_w/m_b=0.37$)最优基准配合比

Table 1 Optimum basic mix proportion of C40 pavement concrete ($m_w/m_b=0.37$)

Cement	Fly ash	Water	Sand	Coarse		Water reducer
				4.75-9.5 mm	9.5-19 mm	
368	65	160	745	790	198	2.81

表 2 内养生路面混凝土的内养生水引入量、SAP 掺量

Table 2 Amount of internal curing water and the dosage of SAP of internal curing pavement concrete

Specimen No.	$W_{IC}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$w_{SAP}/\%$
Non-S	0	0
S-20-0.092	18.57	0.092
S-40-0.124	18.57	0.124
S-100-0.125	16.01	0.125
S-100-0.145	18.57	0.145
S-100-0.165	21.13	0.165

1)文中涉及的含泥量、掺量、水胶比等均为质量分数或质量比。

1.3 低频¹H核磁共振(NMR)试验

选择¹H核磁共振谱,采用PQ-001型低频核磁共振分析仪测试横向弛豫时间 T_2 .通过InvFit软件对采集的弛豫信号进行反演拟合,得到弛豫时间 T_2 分布图谱.

1.4 相对湿度及收缩性能测试

分别采用深圳莫尼特公司生产的MIC-TD-TM型湿度传感器和MIC-YWC-5型位移计连续采集试件内部相对湿度及收缩变形.采用尺寸为400 mm×100 mm×100 mm的大尺寸薄板试件,标准养生24 h后开始测试,后续养生条件为:室温(20±2)℃,相对湿度RH=(80±5)%.垂直空间相对湿度测点布设示意图见图2,收缩变形试验中探头位置为试件2个相对侧面的中心点.

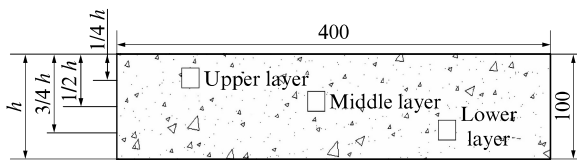


图2 垂直空间相对湿度测点布设示意图
Fig.2 Schematic diagram of RH test points in vertical space(size:mm)

1.5 热分析及SEM试验

采用美国TA公司生产的SDT Q600 DSC-TG综合热分析仪测试混凝土中的水泥水化程度.水化程度主要通过化学结合水含量及Ca(OH)₂含量来表征,计算方法如下:

$$w(\text{H}_2\text{O}) = w_{70-400} + w_{400-650} + w_{650-750} \frac{M(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{CO}_2)} \quad (2)$$

$$w(\text{Ca}(\text{OH})_2) = w_{400-650} \frac{M(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{H}_2\text{O})} + w_{650-750} \frac{M(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{CO}_2)} \quad (3)$$

式中: $w(\text{H}_2\text{O})$ 与 $w(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 分别为化学结合水含量和Ca(OH)₂含量; w_{70-400} 为70~400℃温度范围内试件的热失重量(C-S-H分解); $w_{400-650}$ 为400~650℃温度范围内试件的热失重量(Ca(OH)₂分解); $w_{650-750}$ 为650~750℃温度范围内试件的热失重量(其他产物分解); M 表示相对分子质量,H₂O、CO₂及Ca(OH)₂的相对分子质量分别为18、44、74.

采用Hitachi S-4800型场发射扫描电子显微镜(SEM)对路面混凝土微观结构进行表征,并根据配套的能谱仪(EDS)测试钙硅比 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 沿ITZ的分布,根据 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 的变化特征计算ITZ宽度.

1.6 抗弯拉强度测试方法

采用YES-1000型压力机对试件进行四点弯曲试验,测试其28 d抗弯拉强度,试验依据JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》开展.

2 结果与讨论

2.1 内部水分形式转化及分布规律分析

图3为内养生路面混凝土试件15 min~28 d龄期的NMR弛豫时间 T_2 分布图.考虑内养生水量占总水量的比例较小,为便于数据分析,在绘制 T_2 图谱时将内养生进程产生的右侧峰峰强增强300倍.

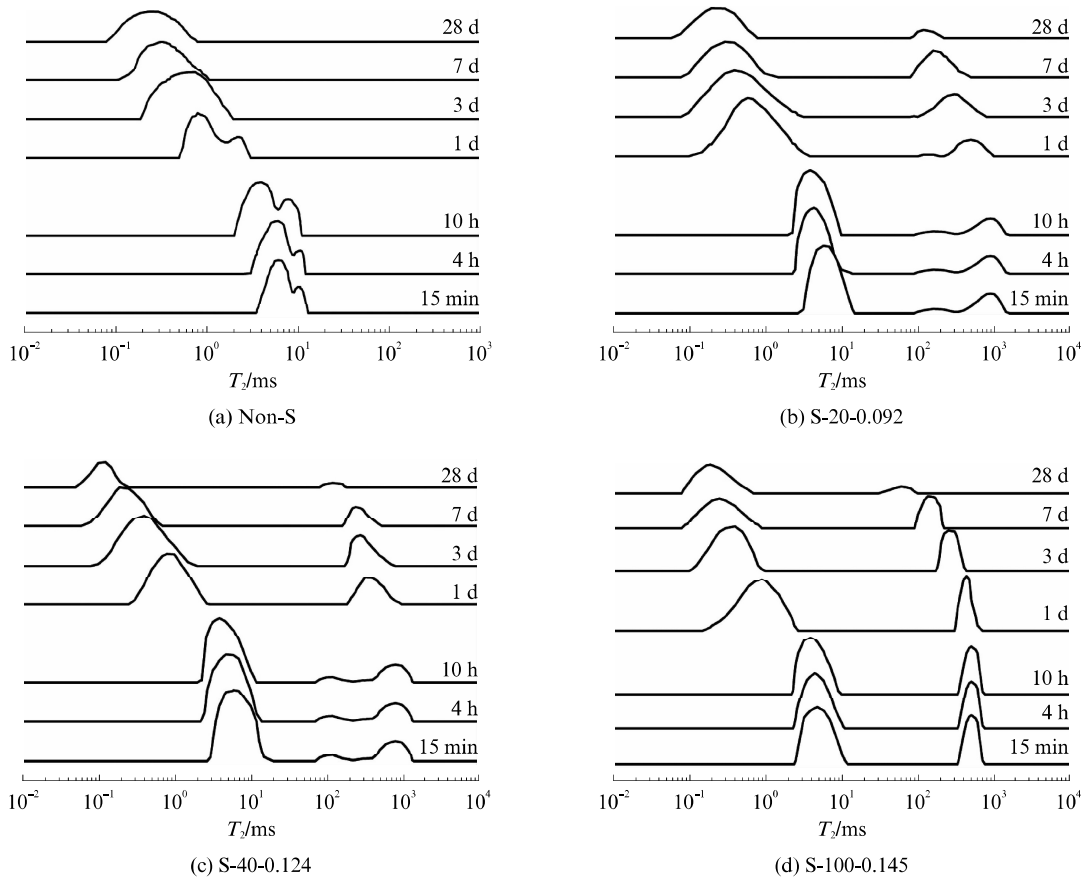
由图3(a)可知,基准组 T_2 分布图中只有1个弛豫主峰,而内养生组除左侧主峰外,还存在1~2个右侧主峰,如图3(b)~(d)所示,左峰是因新拌浆体絮凝结构中的毛细水产生,右峰则由SAP凝胶所束缚的内养生水造成.各主峰弛豫时间随龄期均不断减小,峰值持续降低.即随着胶凝材料的持续水化,浆体中原有毛细水逐渐转化为凝胶水或化学结合水,水化产物不断填充孔隙,致使孔中水分与孔壁的碰撞频率增大,弛豫时间随之减小.

15 min~1 d龄期范围内基准组的主峰具有“双峰形”特征(图3(a)),双峰之间的交界点平均在7 ms时出现.1 d前大部分未反应的可蒸发水进入水化产物孔中成为凝胶水,但同时残留部分毛细水,因而导致双峰的出现.因此,7 ms为区别凝胶水与毛细水的临界弛豫时间^[16].

弛豫峰包络面积与实际浆体水分含量呈正相关关系.由图3(b)~(d)可见,SAP粒径越小,内养生弛豫峰的位置区间范围越小,同时峰值有所增加.如1 d龄期时,S-20-0.092、S-40-0.124、S-100-0.145试样的右峰弛豫区间分别为120~900、200~905、310~600 ms,峰值分别为1.00、1.27和1.93.这是因为在相同内养生水含量下,SAP-100在浆体中的残留孔隙最小,使得S-100-0.145浆体孔中水分与孔壁的碰撞频率高于其他组.

为进一步探索不同形式水之间的转化规律,对 T_2 图谱中各弛豫峰的包络面积进行求解,并基于凝胶水与毛细水的临界弛豫时间计算毛细水、凝胶水及内养生水的含量(占初始拌和总水量的比例),计算公式见式(4)~(6),其中弛豫峰的包络面积 A 通过积分计算.计算出的各形式可蒸发水含量随龄期的变化见图4.

$$p_{w,ic} = \frac{A_w}{A_{15}} \quad (4)$$

图3 NMR弛豫时间 T_2 分布图Fig. 3 Distribution maps of NMR relaxation time T_2

$$p_{w, \text{cap}} = \frac{A_{rc}}{A_{15}} \quad (5)$$

$$p_{w, \text{gel}} = \frac{A_{lc}}{A_{15}} \quad (6)$$

式中: $p_{w, \text{IC}}$ 、 $p_{w, \text{cap}}$ 、 $p_{w, \text{gel}}$ 分别为内养生水、毛细水、凝胶水的含量; A_{15} 为15 min龄期时 T_2 图谱中所有弛豫峰的总包络面积,可视为初始拌和总水量对应的积分面积; A_{rp} 为内养生右峰的包络面积; A_{rc} 、 A_{lc} 分别为临界弛豫时间右侧、左侧部分的包络面积。

由图4(a)可知:终凝(10 h)前S-20-0.092与S-40-0.124浆体中毛细水含量均大于基准组Non-S, 10 h时分别为基准组的1.08、1.05倍,而S-100-0.145浆体中毛细水含量为基准组的99%,说明SAP-20和SAP-40在浆体终凝前出现了小幅释水,而SAP-100能够较好地锁住内养生水,并吸持部分拌和水,故S-100-0.145浆体中毛细水含量有所降低;7 d时,S-100-0.145浆体中毛细水含量反而最高(0.146 3%),依次是S-40-0.124(0.132 8%)、S-20-0.092(0.092 3%)和基准组(0.083 8%),可见S-100-0.145、S-40-0.124浆体中毛细水含量明显大于

基准组,说明在7 d时以上2组浆体仍处于释水养生阶段,而S-20-0.092浆体则基本完成释水。

由图4(b)可知:7 d龄期时凝胶水含量变化规律与毛细水变化规律相似;然而,28 d时,凝胶水含量由大到小排序再次恢复到S-20-0.092(0.528 2%)>S-40-0.124(0.460 2%)>S-100-0.145(0.438 2%)。究其原因,小粒径SAP可缓慢释水,能更好地促进胶凝材料水化,大幅增加凝胶水转化为化学结合水的比例,故凝胶水含量有所降低。

由图4(c)可见,在初凝(4 h)前,SAP持水能力由大到小排序为SAP-100>SAP-40>SAP-20,再次证明小粒径SAP能够从时间上及空间上均匀地对浆体进行内养生。

2.2 内部相对湿度发展规律及收缩性能研究

2.2.1 SAP粒径的影响

不同粒径SAP内养生路面混凝土中层测点处的内部相对湿度和收缩变形随龄期的发展曲线如图5所示。由图5可见,相比基准组,掺加SAP的各试件在内部相对湿度与收缩变形两方面均具备显著优势。

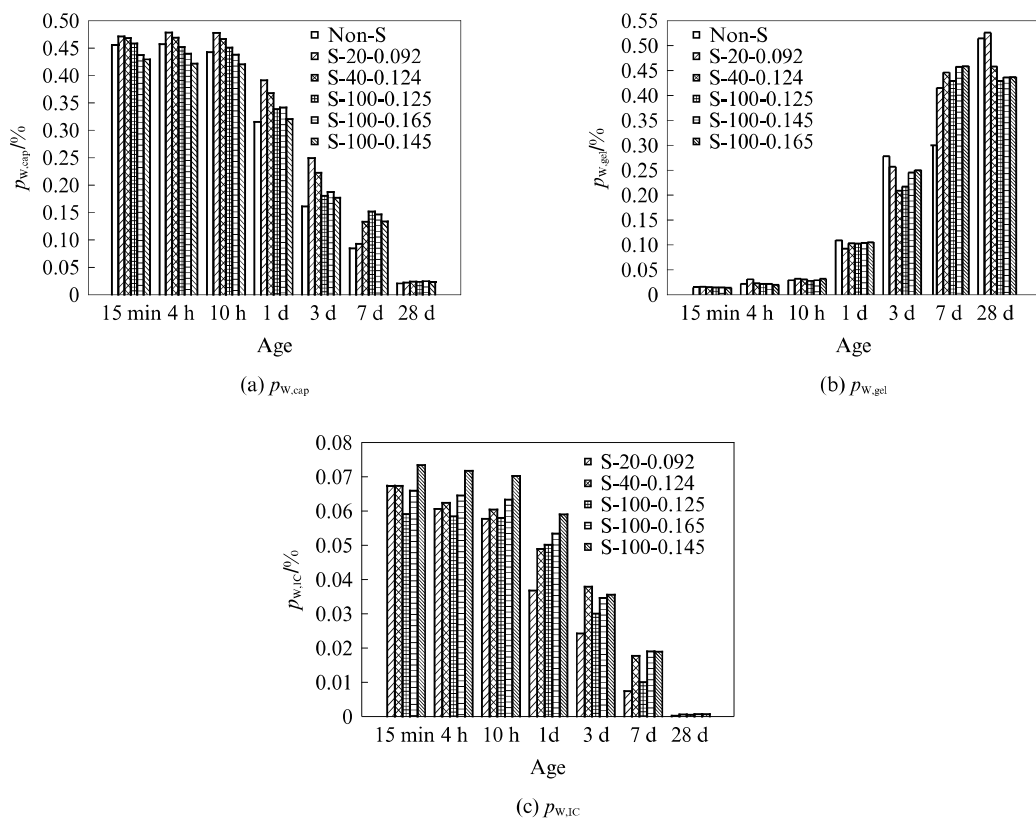


图4 各形式可蒸发水含量随龄期的变化

Fig. 4 Content variation with age of different forms of evaporable water

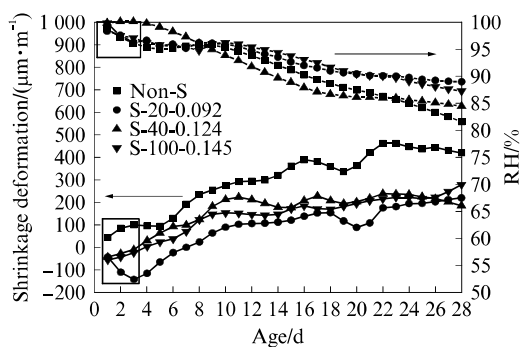


图5 不同粒径SAP内养生路面混凝土内部相对湿度和收缩变形随龄期的发展曲线

Fig. 5 Inner relative humidity and shrinkage deformation development curves with age of internal curing pavement concretes with SAP of different particle sizes

3、7 d龄期试件的收缩变形程度直接决定材料内部微裂纹数量,对于路面混凝土耐久性影响显著,而7 d后收缩变形的影响则相对较小。由图5可见:3 d时基准组试件的收缩变形为 $100.463 \mu\text{m}/\text{m}$,而内养生组均出现不同程度的膨胀,其中试件S-20-0.092膨胀变形最大($-140.242 \mu\text{m}/\text{m}$),在该阶段混凝土强度尚未发展完全,极易因膨胀而产生

微裂纹;而3 d时试件S-100-0.145($-12.735 \mu\text{m}/\text{m}$)与试件S-40-0.124($-8.331 \mu\text{m}/\text{m}$)的膨胀变形接近,说明参加SAP-40和SAP-100的试件在3 d时减缩效果优良;7 d龄期时,收缩变形由大到小排序为Non-S>S-40-0.124>S-100-0.145>S-20-0.092。综合3、7 d收缩变形测试结果可知,对于内养生组,试件S-20-0.092在3 d时变形过大,而试件S-40-0.124在7 d时变形最大,故认为试件S-100-0.145对收缩性能的改善效果最佳且最为稳定。

2.2.2 SAP掺量的影响

不同SAP掺量内养生路面混凝土内部相对湿度和收缩变形随龄期的发展曲线如图6所示。

由图6可见,对于不同SAP掺量的内养生路面混凝土,总体上遵循SAP掺量越大,内部相对湿度越高,收缩变形越小的规律。基准组试件在28 d时的内部相对湿度为81.53%,而在SAP最佳湿度补偿状态下(试件S-100-0.165),28 d时的内部相对湿度可达到93.12%,比基准组提高了14.22%。

SAP掺量越大,内养生路面混凝土收缩变形越小,与基准组试件相比,试件S-100-0.165在1、3、7、14、28 d的减缩率分别为2.04%、68.85%、73.98%、

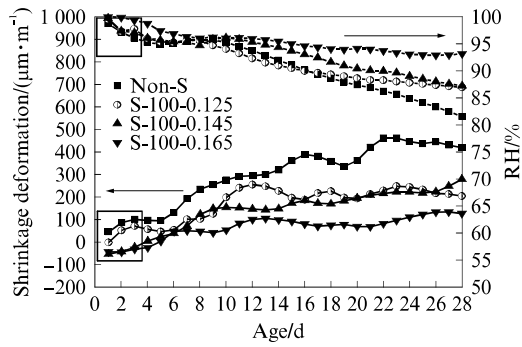
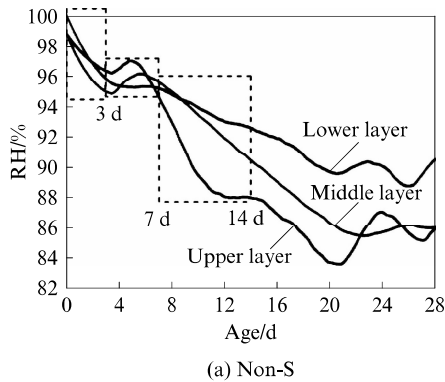


图6 不同SAP掺量内养生路面混凝土内部相对湿度和收缩变形随龄期的发展曲线
Fig. 6 Inner relative humidity and shrinkage deformation development curves with age of internal curing pavement concretes with SAP of different dosages



68.95%和69.83%。

2.2.3 内部相对湿度垂直空间分布特征

基准组与试件 S-100-0.145 的内部相对湿度垂直空间分布规律如图7所示。

由图7可知:在早龄期(0~3 d),内养生路面混凝土板 S-100-0.145 的内部相对湿度降低速度明显低于基准混凝土;在3 d龄期时,S-100-0.145 板上、中、下层混凝土均能保持高湿度状态,相对湿度分别为95.64%、98.77%和97.47%,比基准组分别提高了1.07%、4.07%和1.88%;进入水化稳定期后,内养生路面混凝土板 S-100-0.145 各层位之间的相对湿度差异并非如基准混凝土那样随龄期而增大,而是逐渐减小,在10 d左右时各层相对湿度值出现交

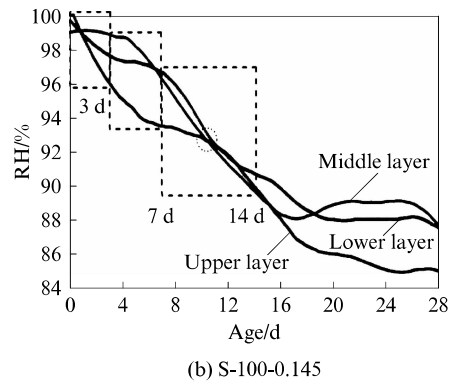


图7 基准组与试件 S-100-0.145 的内部相对湿度垂直空间分布规律
Fig. 7 Vertical spatial distribution of inner relative humidity of Non-S and S-100-0.145

汇点;当SAP释水完毕后,板内部相对湿度在外界干燥作用下的排序逐渐转变为上层<中层<下层,但三者之间的相对湿度接近。

以上试验结果表明,SAP在内养生阶段能够有效减小路面混凝土垂直方向湿度梯度,上层混凝土失水程度最大,SAP对该层位的补水量也就最多,其次是中层、下层,此特征对于提升水化产物密度、材料均匀性及抑制水泥混凝土路面的湿度翘曲应力极为有利,同时对于增强路面混凝土抗裂性能及受力稳定性具有积极作用。

2.3 基于热分析的化学结合水量及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量分析

根据式(2)、(3)及热分析试验数据,得到化学结合水量及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量,结果见表3。

由表3可知,7 d时内养生组的化学结合水含量和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量均高于基准组,说明SAP能够有效促进胶凝材料的水化,进而提升其水化程度;对于不同SAP粒径的内养生组,7 d时化学结合水含量排序为 S-100-0.145 > S-20-0.092 > S-40-0.124,

表3 化学结合水量及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量
Table 3 Content of chemically bound water and $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Specimen No.	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{Ca}(\text{OH})_2)/\%$
Non-S(7 d)	17.530	22.569
Non-S(28 d)	17.803	24.900
S-20-0.092(7 d)	18.027	22.927
S-40-0.124(7 d)	17.661	24.464
S-100-0.125(7 d)	18.320	23.682
S-100-0.145(7 d)	18.161	25.205
S-100-0.145(28 d)	21.232	30.571
S-100-0.165(7 d)	18.272	29.322

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量排序为 S-100-0.145 > S-40-0.124 > S-20-0.092,说明 S-100-0.145 试件生成的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、钙矾石(AFi)晶体、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物数量最多,对水化的促进作用最为显著。

对比不同SAP掺量下试件7 d时的化学结合水及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量可知,随着SAP-100掺量由0.125%增加至0.165%, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量增加,化学

结合水含量基本保持同一水平.这是因为 SAP 掺量越大,7 d 龄期内释放的内养生水越多,与 C_3S 、 C_2S 等反应生成的 $Ca(OH)_2$ 也就越多.

此外,S-100-0.145 组 7 d 时的化学结合水及 $Ca(OH)_2$ 含量分别比基准组提高了 3.60% 和 11.68%,在 28 d 时则分别比基准组提高了 19.26% 和 22.78%.因此,认为内养生组在 7 d 后再次出现了一个水化增强期,即 SAP-100 在 7 d 后仍会持续释水,促进胶凝材料水化.

2.4 抗弯拉强度及影响机理分析

影响内养生路面混凝土抗弯拉强度的因素主要包括 2 个方面:(1)内养生水化程度与密实度;(2)ITZ 的微观结构特性,包括 ITZ 的致密性和宽度.

不同 SAP 粒径及掺量下路面混凝土 28 d 抗弯拉强度如图 8 所示.由图 8 可看出:较小粒径的 SAP 能够有效增强路面混凝土抗弯拉强度;试件 S-40-0.124、S-100-0.145 的抗弯拉强度比基准组分别提

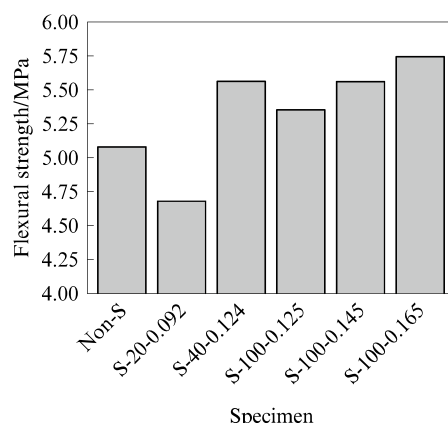


图 8 不同 SAP 粒径及掺量下路面混凝土 28 d 抗弯拉强度
Fig. 8 Flexural strength of pavement concretes with SAP of different particle sizes and dosages on 28 d

升了 9.66% 和 9.47%,而试件 S-20-0.092 的抗弯拉强度则比基准组低 7.69%;SAP-100 掺量越大,试件抗弯拉强度越高.

各路面混凝土 28 d 微观形貌见图 9.

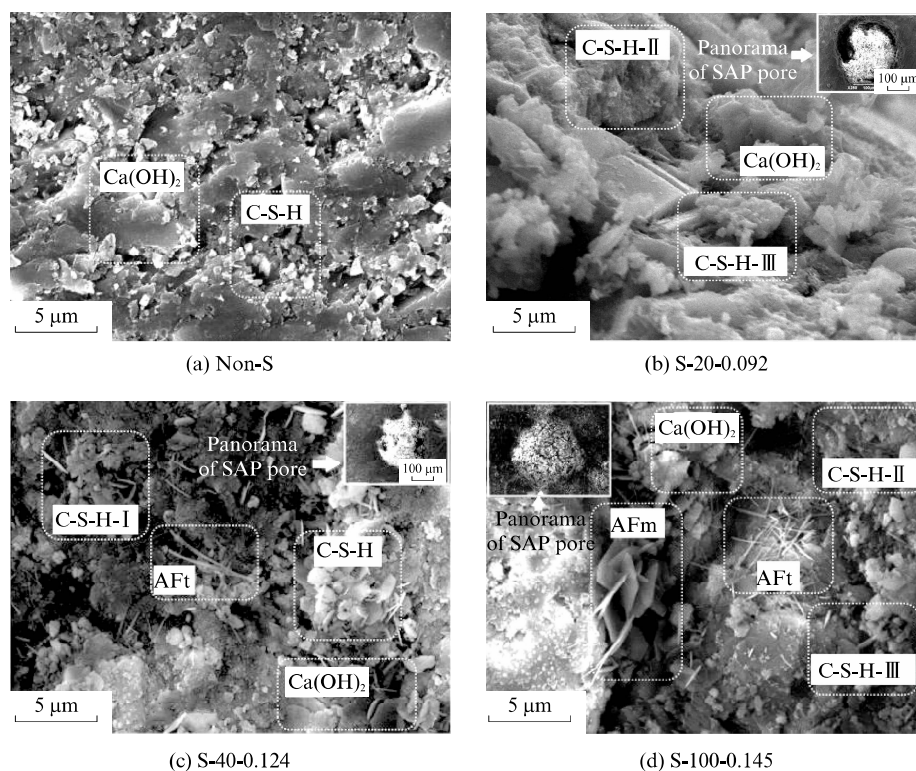


图 9 各路面混凝土 28 d 微观形貌
Fig. 9 Micrographs of pavement concretes on 28 d

由图 9 可见:基准组微观结构疏松(见图 9(a)),水化产物类型仅观测到 $Ca(OH)_2$ 与 C-S-H;试件 S-20-0.092 水化产物除 $Ca(OH)_2$ 外,还包含 2 种类型的 C-S-H(C-S-H-II、C-S-H-III);而试件 S-40-0.124 及 S-100-0.145 水化产物类型丰富,包括层状 $Ca(OH)_2$ 、

多种 C-S-H 凝胶(C-S-H-I、C-S-H-II、C-S-H-III)和针状 AFt 等,且水化产物之间相互重叠,结构致密;观察试件 S-40-0.124 和 S-100-0.145 中 SAP 残留孔全貌(见图 9(c)、(d))可发现,其在内养生过程中能够对 SAP 残留孔洞起到良好的水化填充作用,

特别是试件 S-100-0.145,孔内形成了致密的微观结构,水化产物与孔边界处紧密结合,有利于提升混凝土抗弯拉强度;而试件 S-20-0.092 中水化产物未能充分填充残留孔洞(见图 9(b)),结构较为疏松;较小粒径的 SAP 在拌和初期保水性能优良,能够吸收部分拌和水(包括聚集在 ITZ 内的水膜)以降低 ITZ 水胶比,并促进粉煤灰二次水化,消耗部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 层状解理,进而增强 ITZ 内水泥石与骨料之间的黏结强度、降低混凝土受弯拉时的裂纹扩展

速度;在合理掺量范围内,小粒径 SAP 掺量越大,胶凝材料水化程度越高,内养生混凝土抗弯拉强度有所提升。

相应的 ITZ 微观形貌、扫描路径与 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值见图 10,图中横坐标从左到右依次包括骨料、ITZ 及水泥石区域,2 个 $\triangle$ 之间的距离代表 ITZ 宽度。由于 S-20-0.092 抗弯拉强度及微观形貌特性相比其余内养生组较弱,故图 10 中不再列出该组的 ITZ 特征。

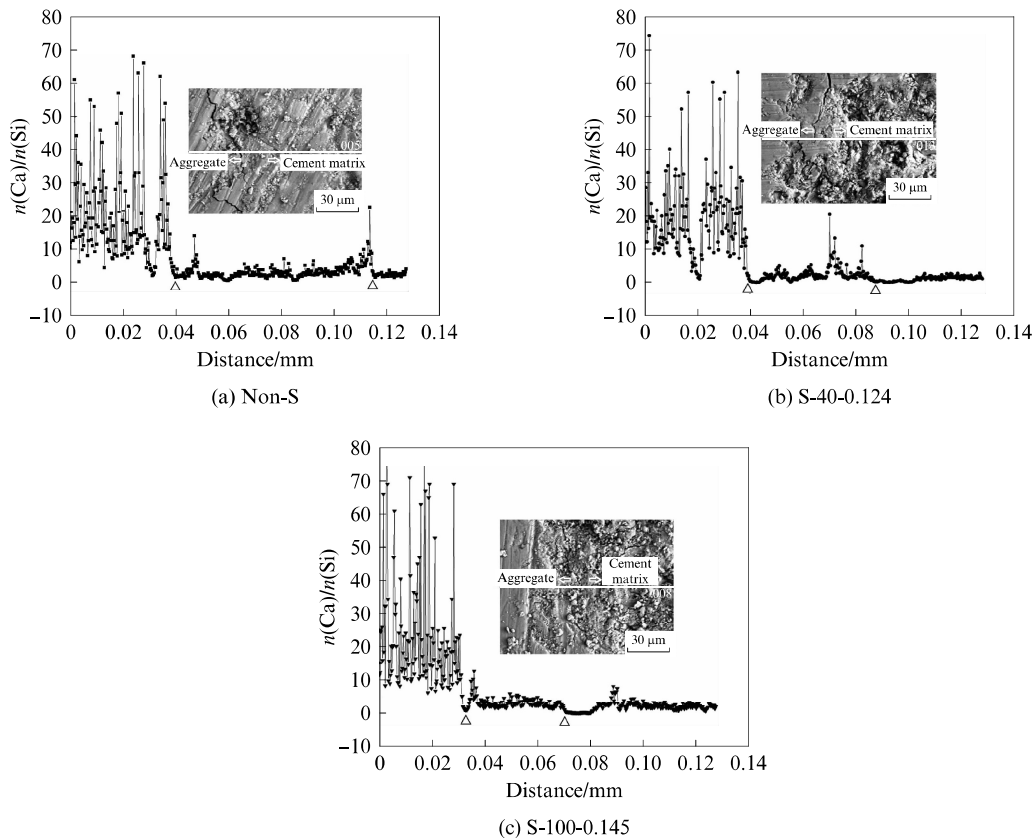


图 10 ITZ 微观形貌、扫描路径与 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值
Fig. 10 Micrographs, scan path and $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value of ITZ

由图 10(a)可知,基准组试件在 ITZ 处存在明显裂纹,试件 S-40-0.124 裂纹则较浅,而试件 S-100-0.145 水泥石与骨料之间未出现可见裂纹。再由图 10 中 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 的变化规律得出,试件 S-40-0.124 和 S-100-0.145 的 ITZ 宽度分别为 $48\mu\text{m}$ 、 $37\mu\text{m}$,仅为基准试件($75\mu\text{m}$)的 64.00%和 49.33%。以上特征说明小粒径 SAP 能够增强 ITZ 密实度、降低 ITZ 宽度。

3 结论

(1)小粒径 SAP(如 SAP100 与 SAP40)持水性能较好,能够在终凝(10 h)前有效持水,并于 10 h 后持续释放内养生水以促进水泥水化。S-100-0.145 内

养生浆体在 7 d 龄期时的毛细水含量最高,28 d 时凝胶水转化为化学结合水的比例最大,水化效果最优。

(2)与基准试件相比,内养生试件在最佳湿度补偿状态下,1、3、7、14、28 d 的减缩率分别为 2.04%、68.85%、73.98%、68.95%和 69.83%;内养生能够有效减小路面混凝土垂直方向湿度梯度,对于提升水化产物密实度、抑制水泥混凝土路面的湿度翘曲应力、增强路面混凝土受力稳定性具有积极作用。

(3)小粒径 SAP 在释水过程中能够对混凝土内残留孔洞起到良好的水化填充作用,增强 ITZ 密实度,并降低 ITZ 宽度,有助于增强水泥石与骨料之

间的黏结强度、降低混凝土受弯拉时的裂纹扩展速度。

参考文献:

- [1] 申爱琴,梁军林,熊建平.道路水泥混凝土的结构、性能与组成设计[M].北京:人民交通出版社,2011:43-56.
SHEN Aiqin, LIANG Junlin, XIONG Jianping. The structure, performance and composition design of road cement concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 43-56. (in Chinese)
- [2] 王立成,张磊.混凝土内养护技术研究进展评述[J].建筑材料学报,2020,23(6):1471-1478.
WANG Licheng, ZHANG Lei. Research progress on concrete internal curing technology[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1471-1478. (in Chinese)
- [3] HE Z M, SHEN A Q, GUO Y C, et al. Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 569-590.
- [4] LÜ Z H, SHEN A Q, HE Z M, et al. Absorption characteristics and shrinkage mitigation of superabsorbent polymers in pavement concrete[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020: 1-15.
- [5] 张蕊,周永祥,高超,等. SAP 对火山灰混凝土收缩性能的改善作用[J].建筑材料学报,2018,21(4):576-582.
ZHANG Rui, ZHOU Yongxiang, GAO Chao, et al. Improvement of SAP on shrinkage performance of pozzolanic concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 576-582. (in Chinese)
- [6] SHEN D J, SHI H F, TANG X J, et al. Effect of internal curing with super absorbent polymers on residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 309-320.
- [7] QIN X, SHEN A Q, LÜ Z Y, et al. Research on water transport behaviors and hydration characteristics of internal curing pavement concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118714.
- [8] 张守祺,路振宝,昂源,等.高吸水树脂吸液特性对混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(8):1278-1284.
ZHANG Shouqi, LU Zhenbao, ANG Yuan, et al. Effect of super-absorbent polymer water absorption characteristics on performance of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8): 1278-1284. (in Chinese)
- [9] LÜ Z H, GUO Y C, CHEN Z H, et al. Research on shrinkage development and fracture properties of internal curing pavement concrete based on humidity compensation[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 417-431.
- [10] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 82-90.
- [11] NIE S, ZHANG W Q, HU S G, et al. Improving the fluid transport properties of heat-cured concrete by internal curing [J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 522-531.
- [12] 史才军.水泥基材料测试分析方法[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:56-72.
SHI Caijun. Test and analysis method for cement-based materials[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2018: 56-72. (in Chinese)
- [13] BOHRIS A J, GOERKE U, MCDONALD P J, et al. A broad line NMR and MRI study of water and water transport in Portland cement pastes [J]. Magnetic Resonance Imaging, 1998, 16(5/6): 455.
- [14] KARAKOSTA E, DIAMANTOPOULOS G, KATSIOTIS M S, et al. In situ monitoring of cement gel growth dynamics. Use of a miniaturized permanent halbach magnet for precise ^1H NMR studies [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, 49(2): 613.
- [15] 王朝辉,傅一,陈谦,等.环氧沥青混凝土桥面铺装材料研究与应用进展[J].材料导报,2018,32(17):2992-3009.
WANG Chaohui, FU Yi, CHEN Qian, et al. Application and research advances in epoxy asphalt concrete serving as deck pavement material[J]. Materials Review, 2018, 32(17): 2992-3009. (in Chinese)