

文章编号:1007-9629(2023)06-0604-08

## 内养护剂和膨胀剂组合对混凝土收缩的影响

韩宇栋<sup>1,\*</sup>, 李威<sup>1</sup>, 岳清瑞<sup>2</sup>, 谢月<sup>1</sup>, 刘子祎<sup>3</sup>

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 北京科技大学 城镇化与城市安全研究院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为在等抗压强度前提下调控混凝土的早期收缩开裂, 以膨胀剂(HP-CSA)和由高吸水树脂(SAP)引入的内养护水占胶凝材料相同比例进行组合, 设计了各自的内掺量均为 0%、4.5%、6.0%、9.0% 共 4 种混凝土配合比, 研究了其对混凝土早期收缩的调控规律, 并分析了混凝土收缩、力学强度、内部相对湿度和干燥失水率之间的关系。结果表明: 混凝土早期收缩和内部相对湿度发展均呈 2 阶段规律; 随“HP-CSA+SAP”组合掺量增加, 其对混凝土早期收缩的调控作用逐渐增强, 且在阶段 I 的调控作用更为显著, 但 28 d 时仍不能根除混凝土的净干燥收缩; 组合掺量对混凝土早期内部湿度发展的整体影响较小; 混凝土 28 d 内的净干燥收缩与干燥失水率之间基本呈线性正相关。从调控收缩、强度保持和经济性等方面综合考虑, 6.0% 为最优调控组合掺量。

**关键词:** 混凝土收缩; 高吸水树脂内养护剂; 膨胀剂; 双掺; 等强度; 干燥失水率

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.005

## Effect of Internal Curing Agent and Expansion Agent on Concrete Shrinkage

HAN Yudong<sup>1,\*</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, YUE Qingrui<sup>2</sup>, XIE Yue<sup>1</sup>, LIU Ziyi<sup>3</sup>

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. Research Institute of Urbanization and City Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To control early-age shrinkage induced cracking for concrete with equivalent compressive strength, four concrete mixtures were prepared with co-addition of expansion agent (HP-CSA) and internal curing water introduced by superabsorbent polymer (SAP), both of them at the rate of 0%, 4.5%, 6.0% and 9.0% by mass to the dosage of total cementitious materials. The regulation effect of "HP-CSA+SAP" combination on early-age shrinkage of concrete was experimentally investigated. The relationships between shrinkage, mechanical strength, internal relative humidity and water loss rate during drying of concrete were analyzed. The test results show that the developments of early-age shrinkage and internal relative humidity of concrete both follow a two-stage rule. The more the dosage of "HP-CSA+SAP" combination, the better the controlling effect on early-age concrete shrinkage, especially in shrinkage developing stage I. However, as the net drying shrinkage of concrete could not be completely eliminated in 28 d, the influence of the combination dosage of "HP-CSA+SAP" on the development of early-age internal humidity of concrete is relatively small. The net drying shrinkage of concrete is positively linearly correlated to the water loss rate within 28 d. Considering the performances in shrinkage reducing, strength retention and cost-effectiveness, 6.0% is considered to be the optimal dosage of "HP-CSA+SAP" combination.

收稿日期: 2022-08-04; 修订日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178263); 北京市科技新星计划(Z201100006820024)

第一作者(通讯作者): 韩宇栋(1986—), 男, 安徽安庆人, 中冶建筑研究总院高级工程师, 硕士生导师, 博士. E-mail: hanyudong@cribc.com

**Key words:** shrinkage of concrete; superabsorbent polymer internal curing agent; expansion agent; double-mixing; equivalent strength; water loss rate during drying

为合理防控水泥基材料在工程应用时的收缩开裂风险,研究人员在采用内养护、掺入膨胀剂进行补偿收缩等方面开展了大量工作并积累了丰富的成果.利用预吸水轻集料的内养护作用,可有效降低砂浆<sup>[1]</sup>和混凝土<sup>[2]</sup>的自收缩.高吸水树脂(SAP)具有吸水能力强、成分可设计、养护效率高等优点<sup>[3]</sup>,作为内养护剂对混凝土有显著的减缩作用<sup>[4]</sup>.但也有研究表明,内养护并不能根除混凝土的自收缩,对干燥收缩的调控作用也有限<sup>[5]</sup>,且内养护剂用量较大时,会对水泥基材料的孔隙结构和力学性能等产生不利影响<sup>[6-7]</sup>.膨胀剂可通过其水化反应生成的膨胀性产物,使混凝土早期由收缩变形转变为膨胀变形<sup>[8]</sup>,从而对混凝土进行收缩补偿,弥补内养护在这方面的不足,如CaO基膨胀剂<sup>[9]</sup>的应用可使高性能混凝土的早期收缩得到有效控制.但膨胀剂单独应用时也存在一些问题,如未能及时充分反应的膨胀剂组分可能在水泥基材料硬化后发生二次膨胀<sup>[10]</sup>.

针对内养护剂与膨胀剂各自在混凝土减缩控制方面的优势与不足,本研究将SAP内养护剂与HP-CSA型复合膨胀剂进行组合双掺,设计了4种不同组合掺量的混凝土,研究内养护剂与膨胀剂双掺对混凝土早期收缩的影响规律,并分析此时混凝土收缩、力学强度、内部相对湿度和干燥失水率之间的关系,以期解决混凝土的早期自收缩问题,并发挥SAP内养护剂与复合膨胀剂在释水与耗水、残留孔隙与生成膨胀性产物填充孔隙等方面的时空协同作用,探寻其在自收缩和干燥收缩、前3d收缩和后期收缩调控等方面的互补性,由此提高混凝土的等强度和收缩调控效率.

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥采用金隅公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其粒度分布见图1.膨胀剂采用粉末状的HP-CSA型复合膨胀剂,其粒度分布见图1,矿物组成<sup>1)</sup>见表1.由图1可见,水泥与膨胀剂的颗粒粒径主要分布区间分别为3~65 μm和2~150 μm,且膨胀剂的颗粒粒径呈双峰分布.粉煤灰采用内蒙古某电厂出产的I级灰.SAP为噁唑聚丙酰胺型白色粉末,粒径为0.300~0.180 mm.粗骨料采用5~20 mm连续级配的

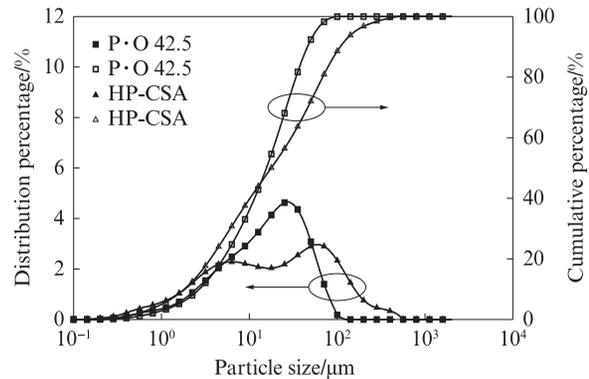


图1 水泥和膨胀剂的粒度分布

Fig. 1 Particle size distributions of cement and expansion agent

表1 膨胀剂的矿物组成

Table 1 Mineral composition of expansion agent

|     |   |                   |                     |                   | w/% |
|-----|---|-------------------|---------------------|-------------------|-----|
| CaO | Ca <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> O <sub>12</sub> SO <sub>4</sub> | CaSO <sub>4</sub> | Ca(OH) <sub>2</sub> | CaCO <sub>3</sub> |     |
| 47  | 7   | 36                | 7                   | 3                 |     |

破碎石灰石.细骨料采用细度模数为2.6的天然砂.减水剂采用天津特材公司生产的聚羧酸型减水剂.

### 1.2 配合比设计

将水胶比为0.420,28d强度为50 MPa的混凝土作为基准对照组,记为E0IC0.基于28d等强度原则,依次减小基准组水胶比至0.375、0.355、0.335,以占胶凝材料(水泥、HP-CSA复合膨胀剂和粉煤灰)总质量依次为4.5%、6.0%、9.0%的HP-CSA等质量内掺代替水泥,同时以占胶凝材料总质量为4.5%、6.0%、9.0%的比例引入内养护水(ICW),形成内养护水胶比(内养护水与胶凝材料的质量比)为0.045、0.060、0.090的3种组合调控混凝土,依次记为E4.5IC4.5D、E6IC6D、E9IC9D,混凝土配合比如表2所示.经测定,试验用SAP在水灰比为5.000的水泥净浆沉淀上层清液中充分饱水后的吸水倍率为27.4倍,据此可按照目标ICW引入量计算各组SAP掺量.考虑混凝土搅拌站制备方便,SAP以干粉形式先与同组的膨胀剂充分混匀后,搅拌时随胶凝材料一同掺入.实际拌和水量为配合比设计拌和水量与ICW引入量之和.

### 1.3 试验方法

混凝土自由变形、温湿度一体化试验模具内部尺寸为100 mm×100 mm×515 mm,成型后的混凝土试件尺寸为60 mm×100 mm×515 mm,详细试验步

1) 文中涉及的组成、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表2 混凝土配合比  
Table 2 Mix proportions of concretes

| Sample No. | Cement | Water  | Sand   | Coarse aggregate | Fly ash | HP-CSA | ICW   | SAP  |
|------------|--------|--------|--------|------------------|---------|--------|-------|------|
| E0IC0      | 345.00 | 180.60 | 726.00 | 1 045.00         | 85.00   | 0      | 0     | 0    |
| E4.5IC4.5D | 326.00 | 161.00 | 726.00 | 1 045.00         | 85.00   | 19.40  | 19.40 | 0.71 |
| E6IC6D     | 319.00 | 153.00 | 726.00 | 1 045.00         | 85.00   | 25.80  | 25.80 | 0.94 |
| E9IC9D     | 306.00 | 144.00 | 726.00 | 1 045.00         | 85.00   | 38.70  | 38.70 | 1.41 |

骤见文献[5].试验所用的高精度位移传感器工作量程为0~2 mm,测量精度为1 μm,采集频率为1 min/次;温湿度传感器的温度工作量程为0~50 ℃,精度为0.5 ℃,相对湿度工作量程为0%~100%,精度为2%,采集频率为10 min/次.收缩室内相对湿度为(47±5)%、温度为(23±1) ℃.图2为混凝土自由变形及内部温湿度测量的仪器布置照片,用于测试28 d内密封养护和干燥养护下各1块混凝土试件的自由变形(δ)、内部温度(T)和湿度(RH)发展.自由变形经过温度变形剥离后,即得到混凝土的自收缩(密封养护)或干燥收缩(干燥养护)(ε).

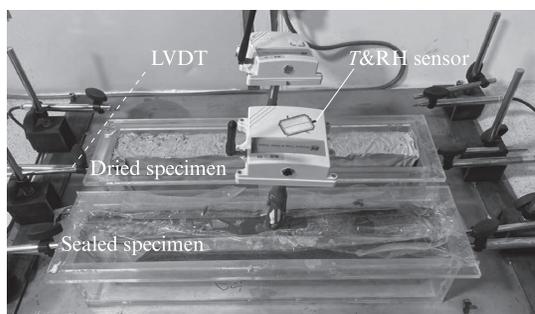


图2 混凝土自由变形及内部温湿度测量的仪器布置照片  
Fig. 2 Instrument layout photo for measurement of free deformation and internal temperature and relative humidity of concretes

同批成型及养护立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试件,其尺寸均为100 mm×100 mm×100 mm.各组抗压强度和劈裂抗拉强度试件每个测试龄期数量为3块,试件成型后置于相对湿度为(60±5)%、温度为(20±2) ℃的成型室内养护至1 d时脱模,随后分标准养护(Stan.)、密封养护(Seal)和干燥养护(Dry)3组继续养护至预定龄期.标准养护试件脱模后转移至相对湿度大于95%、温度为(20±2) ℃的标准养护室内继续养护.密封养护试件脱模后先将试件用保鲜膜作为养护膜进行密封,随后置于收缩室中继续养护至预定龄期.干燥养护试件在3 d时拆除养护膜,置于收缩室内继续养护至预定龄期.测试1 d、密封养护3 d、密封/干燥养护7 d和28 d、标准养护28 d等不同条件下各

组混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度.

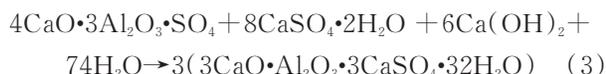
按照混凝土早期收缩干燥试件成型、养护方法及试件尺寸,各组混凝土每组成型3块干燥试件,置于收缩室中,从3 d时揭去养护膜开始至28 d内连续测定试件的环境干燥失水质量.

## 2 结果与分析

### 2.1 混凝土的自由变形和内部温度发展

由位移传感器测得的变形为混凝土的自由变形.图3为混凝土自由变形和内部温度随龄期的发展曲线,图中的收缩变形记为正值、膨胀变形记为负值.

由图3可见,随混凝土中“HP-CSA+SAP”组合掺量的增加,混凝土的自由变形由早期的收缩变形逐步转化为较为明显的膨胀变形,这与HP-CSA在加水拌和后快速发挥膨胀作用有关.HP-CSA的有效成分为CaO、4CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>和CaSO<sub>4</sub>,其各自的水化反应如式(1)~(3)所示.



CaO粉末是HP-CSA的主要有效成分,其水化反应短暂而剧烈,在水化初期即产生较大程度的膨胀、同时消耗大量水分.CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O、3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O(AFt)的生成速率较Ca(OH)<sub>2</sub>缓慢<sup>[11]</sup>,但AFt的膨胀效应更大.CaO水化为Ca(OH)<sub>2</sub>时,其固体摩尔体积膨胀90%<sup>[12]</sup>,AFt体积膨胀约为水化前化合物体积的2.5倍<sup>[13]</sup>,且由于式(1)以及水泥水化大量生成Ca(OH)<sub>2</sub>,式(3)得以持续向右进行,进一步产生膨胀效应.

由图3(a)可见,基准组E0IC0前3 d内自由变形曲线整体成“W”型发展趋势.由图3(b)~(d)可见,随“HP-CSA+SAP”逐级增量掺入,至E9IC9D时,前3 d内混凝土的自由变形总体逐渐由近似“W”型发展转变为近似“L”型发展.为方便后文分析,将E0IC0的“W”型自由变形曲线第2个拐点标记为S,组合调控下“L”型自由变形曲线拐点记为S\*,S或S\*点是混

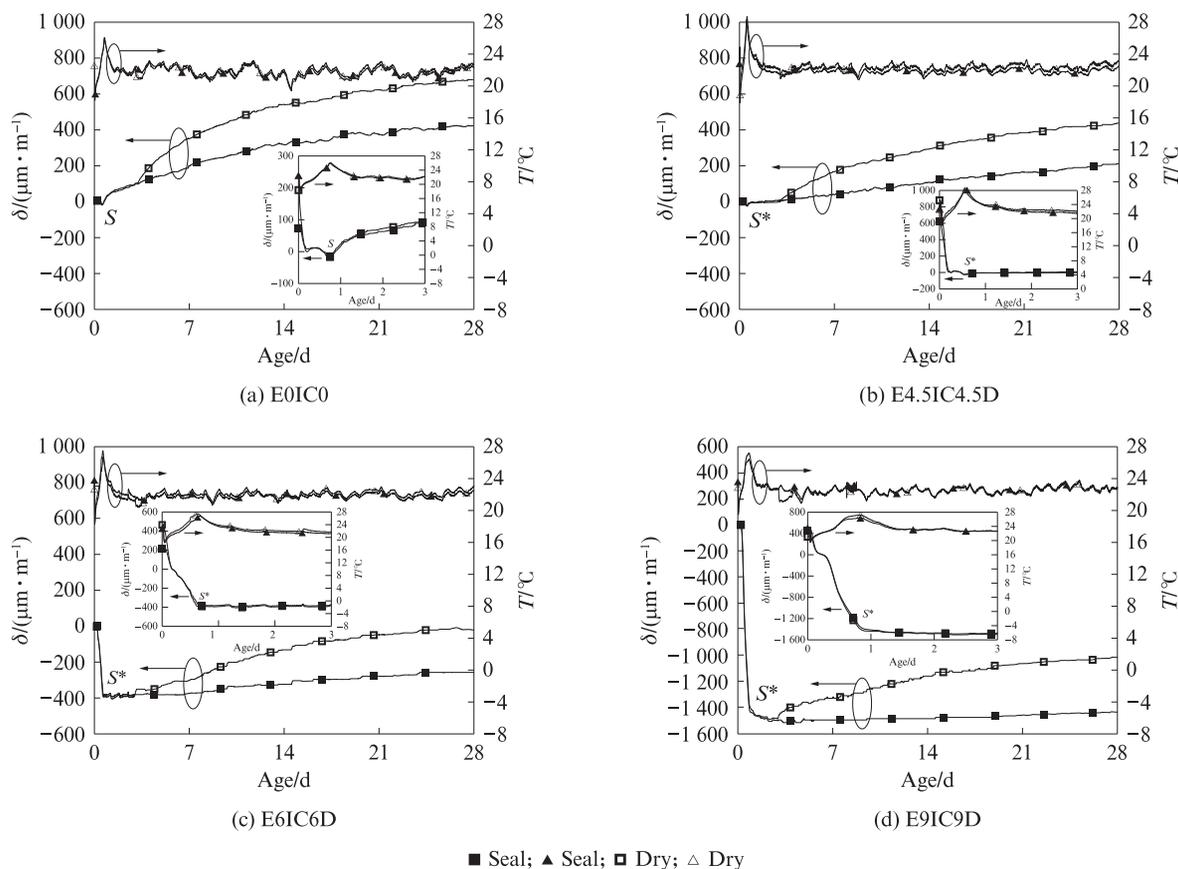


图3 混凝土自由变形和内部温度随龄期的发展曲线

Fig. 3 Development curves of free deformation and internal temperature of concretes with age

混凝土由快速收缩或膨胀向缓慢收缩或膨胀变化的转折点,也与混凝土内部温度温峰时刻相对应,其所对应的时刻记为  $t_S$  或  $t_{S^*}$ 。“HP-CSA+SAP”组合掺入使混凝土在 1 d 内即表现出明显的膨胀变形, E9IC9D 的膨胀变形达到  $1\,425\ \mu\text{m}/\text{m}$ , 这与 HP-CSA 中的组分早期大量水化引入的体积膨胀对化学收缩的补偿有关,还与大量掺入的 SAP 吸水明显延缓水泥水化、降低混凝土 1 d 强度(见 2.2)和试件刚度<sup>[14]</sup>有关。因此,即使 4 组混凝土的总水胶比基本相近,“HP-CSA+SAP”组合在调控同强度等级混凝土前 3 d 的自由收缩变形方面效果显著。

## 2.2 混凝土的收缩和内部相对湿度发展

混凝土凝结后的自由变形包含湿度变形和温度变形。本文基于张涛<sup>[15]</sup>提出的混凝土热膨胀系数随等效龄期发展的方程,并考虑 4 组混凝土总水胶比相差很小的情况,统一采用式(4)将温度变形从自由变形中分离。

$$\beta = C \times \exp(-\gamma \times t_{\text{eq}}) + \beta_0 \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为混凝土热膨胀系数;  $C$ ,  $\gamma$  和  $\beta_0$  为与混凝土水胶比及骨料含量等有关的系数<sup>[16]</sup>,  $C=95.07$ ,  $\gamma=0.12$ ,  $\beta_0=5.08$ ;  $t_{\text{eq}}$  为混凝土等效龄期。

剥离温度变形后,混凝土试件在密封状态下的收缩发展为自收缩,在干燥状态下的收缩发展为干燥收缩。图 4 为混凝土收缩和内部相对湿度随龄期的发展曲线。

本研究中,3 d 内的混凝土处于密封状态。由图 4 可见:当组合调控掺量为 4.5% 时,3 d 时的收缩变形为  $63\ \mu\text{m}/\text{m}$ ,表明该掺量尚不足以使混凝土由收缩完全转变为膨胀;提高掺量至 6.0% 时, E6IC6D 在 3 d 时已表现为  $280\ \mu\text{m}/\text{m}$  的膨胀;进一步提高掺量至 9.0% 时, E9IC9D 的膨胀出现“跳跃式”增大,调控组合的掺量相较于 6.0% 增加 50%, 3 d 时的膨胀变形增幅达 382%, 达到  $1\,350\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。引起这一现象的主要原因有 2 个:一是随着调控组合掺量的增加,此时前序膨胀反应产物量进一步增加,同时也促进了后续 AFt 的不断大量生成;二是在 SAP 高掺量情况下, E9IC9D 中的 SAP 大量吸水,同时 HP-CSA 的高掺量引发 CaO 在水化初期即快速大量耗水,这 2 种“水分竞争”因素的叠加限制了水泥 1 d 内的水化速率和水化量,从而导致 1 d 内混凝土的强度和刚度大幅下降,这将使组合调控的膨胀效应受到体系自身刚度的约束减弱,宏观膨胀变形被明显放大。

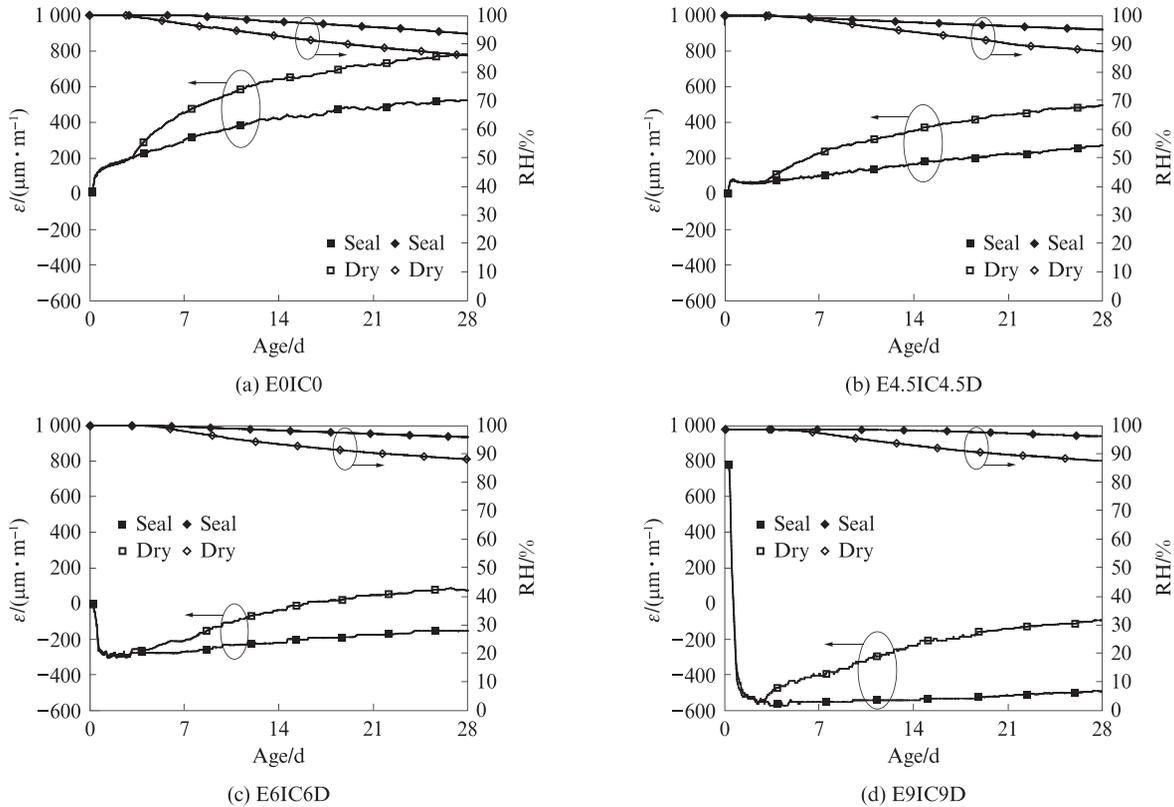


图4 混凝土收缩和内部相对湿度随龄期的发展曲线  
 Fig. 4 Development curves of shrinkage and interior RH of concretes with age

由图4还可见:3~28 d内,密封养护条件下,“HP-CSA+SAP”组合对混凝土自收缩的调控仍有显著作用,E4.5IC4.5D、E6IC6D、E9IC9D在3~28 d内自收缩值依次为208、123、59 μm/m,较基准组330 μm/m降幅依次为37.0%、62.7%、82.1%,即密封养护试件自收缩的降幅随组合调控掺量增大而逐渐加大;对于干燥养护的试件,“HP-CSA+SAP”组合对收缩的调控效果有所减弱,提高其掺量并不总是有利于减少收缩,3~28 d内,E4.5IC4.5D、E6IC6D的干燥收缩值依次较基准组减小26.3%、38.9%,而E9IC9D较基准组减小仅为21.1%。

相较于E0IC0,不同的“HP-CSA+SAP”组合掺量对密封养护、干燥养护试件内部相对湿度均有一定的调节作用;随着组合掺量的提高,由SAP引入的内养护水量增大,28 d时混凝土内部相对湿度微幅提高.这也是各组合掺量下密封养护试件、干燥养护试件收缩均小于E0IC0的原因之一。

图5为混凝土3~28 d的干燥失水率曲线.由图5可见,随“HP-CSA+SAP”组合掺量的增大,3个试验组混凝土的干燥失水率相差不大,且均低于基准组的干燥失水率.此外,随着组合掺量的增大,SAP颗粒吸、释水后残留空腔的影响可能导致28 d内混凝土内部大孔径毛细孔有所增多,试件自身刚

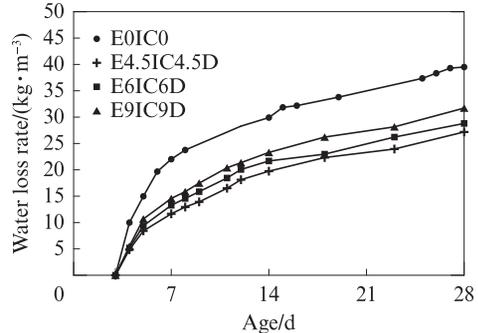


图5 混凝土3~28 d的干燥失水率曲线  
 Fig. 5 Water loss rate curves of concretes during drying between 3 and 28 d

度减小,抵抗收缩应力的能力下降.在上述2个因素的共同作用下,3个试验组混凝土的干燥收缩虽均小于基准组,但调控作用较为有限。

从28 d内混凝土的整体收缩调控效果来看,“HP-CSA+SAP”在4.5%掺量时调控作用不足,28 d时整体仍表现为收缩变形;9.0%掺量时虽然引入了较大膨胀,但对3~28 d净干燥收缩的调控作用比低掺量更差,且在实际工程中,这一掺量还存在膨胀变形可能过大以及调控材料成本偏高的问题;6.0%掺量时引入了合理的膨胀变形,混凝土的自收缩和干燥收缩均得到了较为理想的控制.综上所述,6.0%是较为理想的“HP-CSA+SAP”调控组合掺量。

### 2.3 混凝土收缩与干燥失水率、内部相对湿度的相关性

图6为混凝土3~28 d内干燥收缩( $\epsilon_{\text{gap}}$ )与干燥失水率的相关性.由图6可见,混凝土的干燥收缩与干燥失水率之间基本呈线性正相关.因此,干燥失水率可作为混凝土干燥收缩调控效果的简便易测的评价指标,也可用于快速计算混凝土的干燥收缩.

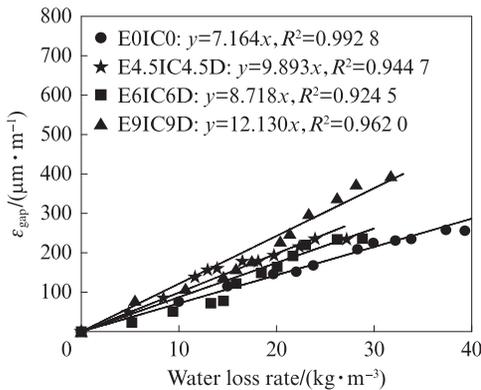


图6 混凝土3~28 d内干燥收缩与干燥失水率的相关性  
Fig. 6 Relationship between drying shrinkage of concretes and water loss rate during drying between 3 and 28 d

混凝土收缩与内部相对湿度发展均呈现2阶段发展模型(见图4),这与文献[14]结果一致.图7为混凝土收缩和内部相对湿度2阶段发展模型.由图7可见:混凝土的早期收缩呈先快速发展(阶段I)而后进入减速增长(阶段II)的2阶段规律;收缩发展阶段I的结束即对应 $t_I$ ( $t_{I(S)}$ 或 $t_{I(S^*)}$ )时刻,相应的收缩为 $\epsilon_{I(S)}$ 或 $\epsilon_{I(S^*)}$ ;测试龄期结束即对应 $t_{II}$ 时刻,该时刻处于混凝土收缩湿度发展阶段II,相应基准普通混凝土和组合调控混凝土的收缩分别为 $\epsilon_{II}$ 和 $\epsilon_{II'}$ ;对于“HP-CSA+SAP”掺量较高的组合调控混凝土,收缩发展阶段I相对于基准普通混凝土已转变为快速发展且较为明显的膨胀变形.混凝土早期内部相对湿度也呈2阶段发展模型,即先维持一定时长的内部湿度饱和期,而后进入内部湿度缓慢减小的下降期.本研究涉及的混凝土中,收缩发展阶段I均在内部湿度饱和期内.

图8为28 d混凝土收缩及内部相对湿度随“HP-CSA+SAP”调控组合掺量的变化曲线.由图8可见:在总水胶比基本不变的情况下,提高内养护水所占比例,混凝土内部相对湿度略微上升,即本研究中调控组合对4组混凝土湿度发展的影响总体较小,干燥养护与密封养护试件的内部湿度差值基本不变,表明调控组合对干燥养护试件的水分扩散影响很小; $\epsilon_{I(S)}$ 或 $\epsilon_{I(S^*)}$ 随组合掺量的增加,其膨胀增长呈现非线

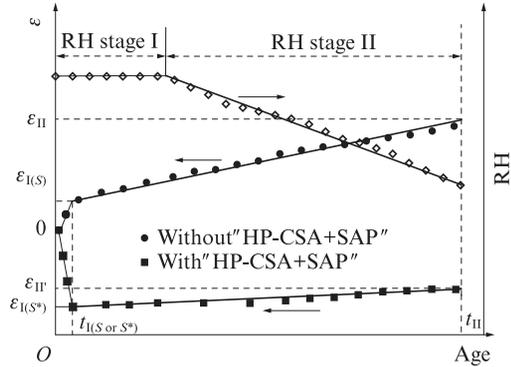


图7 混凝土收缩和内部相对湿度2阶段发展模型  
Fig. 7 Two-stage development models of shrinkage and interior RH of concretes

性趋势,28 d密封养护试件的自收缩和干燥养护试件的干燥收缩与阶段I收缩 $\epsilon_{I(S)}$ 或 $\epsilon_{I(S^*)}$ 的差值,随调控组合掺量的增加呈减小趋势;密封养护试件和干燥养护试件28 d的收缩之差(即净干燥收缩)并未随调控组合掺量的提高而消除,在掺量0%~6.0%时基本维持稳定,在掺量9.0%时甚至有所扩大,可见密封养护条件更有利于组合调控效能的发挥,在较高掺量9.0%时,密封养护试件在28 d时表现出比收缩阶段I结束后更大的膨胀,而在干燥条件下,调控组合掺量9.0%时,其对混凝土净干燥收缩的调控作用规律甚至是反向的.

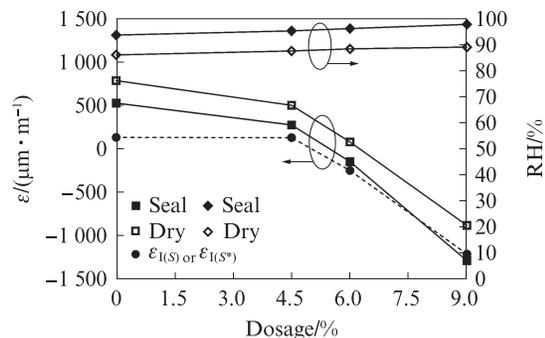


图8 28 d混凝土收缩及内部相对湿度随“HP-CSA+SAP”调控组合掺量的变化曲线  
Fig. 8 Variation curves of shrinkage and internal RH of concretes at 28 d with dosage of "HP-CSA+SAP" combination

### 2.4 混凝土力学强度与早期收缩调控的关系

图9为不同养护条件下混凝土力学强度随龄期的发展.由图9(a)可见:1 d时,随着“HP-CSA+SAP”组合掺量的增加,试验组抗压强度明显下降,E91C9D的1 d抗压强度相较于基准组下降51.7%,可推断降低1 d内混凝土的强度发展水平以削弱对此时段内膨胀剂水化产物膨胀效应的约束,是“放大”阶段I膨胀、调控阶段I收缩的重要机理(见图

10); 3、7、28 d时, E4.5IC4.5D、E6IC6D 密封养护和干燥养护试件的抗压强度均已高于基准组 E0IC0, 而 3、7 d时, E9IC9D 的抗压强度略低于基准组, 28 d时, 密封养护和干燥养护混凝土的抗压强度均已基本处于等强度水平, 这与 4 组混凝土的总水胶比接近以及内养护可促进混凝土中、后期的强度提升有关; 90 d 时, 密封养护试件的抗压强度较 28 d 增长值明显高于干燥养护情况, 可见密封养护有利于组合调控组试件长期强度的提高, 特别是密封养护的 E9IC9D, 其 90 d 抗压强度为 61.2 MPa, 超过基准组的 58.2 MPa; 28 d 时, 组合调控组标准养护试件的抗压

强度低于同期密封养护和干燥养护试件的抗压强度, 尤其是 E9IC9D 组, 这与充足的内养护和外部标准养护下膨胀剂掺量较高可能导致的膨胀量偏大, 以及 E9IC9D 标准养护下自身含水率高于其他养护方式有关. 图 4(d) 中 E9IC9D 密封养护试件在 28 d 内始终维持较高的膨胀变形, 且标准养护下 28 d 内部相对湿度可能比密封养护下的 98% 更高, 也可辅证此推断. 由图 9(b) 可见: 劈裂抗拉强度的整体发展规律与抗压强度相似, 当“HP-CSA+SAP”组合掺量达 9.0% 时, 密封养护和标准养护对 7、28 d 劈裂抗拉强度的不利影响较为明显, 但 90 d 时仍能上升至略高于基准组.

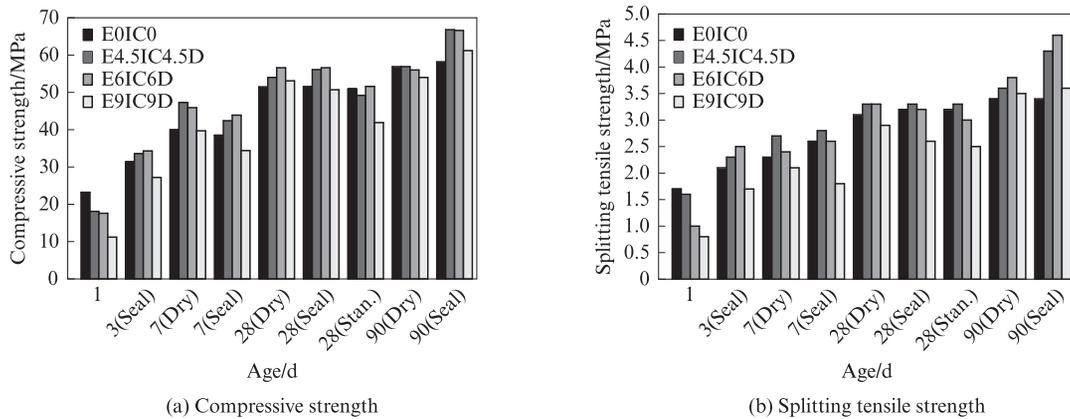


图 9 不同养护条件下混凝土力学强度随龄期的发展  
Fig. 9 Strength development of concretes under various curing conditions with age

图 10 为混凝土 1、28 d 抗压强度与自收缩相关性分析. 由图 10 可见, 混凝土 1 d 抗压强度和 1 d 自收缩明显呈相反发展趋势, 1 d 抗压强度越低则自收缩越小 (或自膨胀越大), 由此直观显示了“HP-CSA+SAP”组合对 1 d 自收缩的高调控效率, 这与调控组合可降低 1 d 内水泥水化程度和化学收缩量、明显降低 1 d 内的自约束效应等直接相关, 因此混凝土 1 d 内的收缩特性具有较好的可设计性. 由图 10 还可见, 28 d 时, 4 组密封养护的混凝土已基本发展至等抗压强度水平, 且随组合掺量的增大, 组合调控的 3 组混

凝土 28 d 抗压强度较 1 d 抗压强度增长率明显逐渐增大, 随调控组合掺量的增加, 4 组混凝土 28 d 抗压强度较 1 d 抗压强度增长率依次为 122%、210%、221%、354%, 1~28 d 内的自收缩随调控组合掺量的增大逐渐减小, 分别为 382、170、126、-46  $\mu\text{m}/\text{m}$ . 因此, 密封养护条件下, 当前研究设计的调控组合在 28 d 内可一直保持较好的调控效果, 掺量越大, 密封养护的调控效果越好, E6IC6D 和 E9IC9D 组试件在密封养护下均可实现 28 d 内无自收缩.

综上所述, 28 d 等强度水平的混凝土, 其硬化初期 1 d 内强度越低, 自约束效应越低, 导致 1 d 内膨胀剂的补偿收缩效率越高, 此外, 1~28 d 期间较大的强度发展, 将使得“HP-CSA+SAP”组合调控混凝土的 28 d 抗压强度恢复等强度水平.

### 3 结论

(1) 在混凝土 28 d 等强度的前提下, HP-CSA 膨胀剂和高吸水树脂内养护水 (“HP-CSA+SAP”) 对混凝土早期收缩的调控作用随其组合掺量增加而明显增强. 密封养护有助组合调控收缩效能的发挥, 但仍不能根除其早期净干燥收缩. 从调

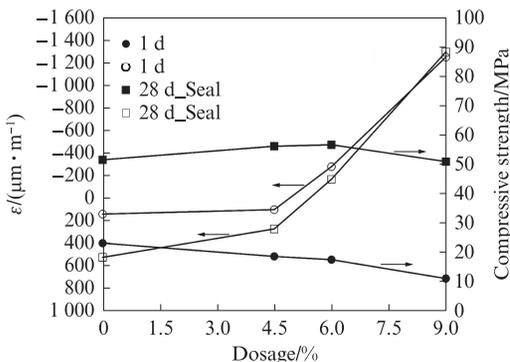


图 10 混凝土 1、28 d 抗压强度与自收缩相关性分析  
Fig. 10 Correlative analyses of compressive strength and autogenous shrinkage of concretes at 1, 28 d

控收缩和保持强度方面综合考虑,E6IC6D为相对最优的组合,其28 d自膨胀为 $152\ \mu\text{m}/\text{m}$ 、干燥收缩为 $75\ \mu\text{m}/\text{m}$ ,且28 d密封养护和干燥养护强度均略高于基准组。

(2) 28 d等强度水平的混凝土,“HP-CSA+SAP”组合掺量越高,其1 d内抗压强度发展越慢,但此后强度发展增长较快,膨胀剂在1 d内的膨胀效应被放大,“HP-CSA+SAP”组合调控对混凝土早期收缩效能的发挥越充分。

(3)混凝土早期收缩呈先快速发展(阶段I)而后进入减速增长(阶段II)的2阶段发展模型;随着“HP-CSA+SAP”组合掺量的增加,混凝土收缩阶段I从快速收缩逐渐转变为快速显著膨胀。混凝土早期内部相对湿度也呈2阶段发展模型,即先维持一定时长的内部湿度饱和期,而后进入内部湿度缓慢减小的下降期;在等强度原则设计下,“HP-CSA+SAP”组合对早期内部湿度发展的影响总体较小;混凝土28 d内的净干燥收缩与干燥失水率之间基本呈线性正相关。

#### 参考文献:

- [1] BENTUR A, IGARASHI S, KOVLER K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31:1587-1591.
- [2] 魏亚,郑小波,郭为强. 干燥环境下内养护混凝土收缩、强度及开裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(5):902-908.  
WEI Ya, ZHENG Xiaobo, GUO Weiqiang. Shrinkage, strength development and cracking of internally cured concrete exposed to dry conditions [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(5):902-908. (in Chinese)
- [3] 王立成,张磊. 混凝土内养护技术研究进展[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)
- [4] 丁小平,张君,韩宇栋,等. 考虑内养护剂释水的混凝土自干燥计算模型[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(3):242-247.  
DING Xiaoping, ZHANG Jun, HAN Yudong, et al. A calculation model of concrete self-desiccation considering the water release of internal curing agent [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(3):242-247. (in Chinese)
- [5] 韩宇栋,张君,王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(8):1070-1078.  
HAN Yudong, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. Influence of pre-wetted lightweight aggregate on early-age shrinkage of high strength concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(8):1070-1078. (in Chinese)
- [6] 郑小波,吴德芬,何文,等. 内养护混凝土不同养护方式下的减缩效果及强度发展[J]. *混凝土*, 2015(7):52-57.  
ZHENG Xiaobo, WU Defen, HE Wen, et al. Shrinkage-reducing effect and strength development of internally cured concrete under different curing conditions [J]. *Concrete*, 2015(7):52-57. (in Chinese)
- [7] 张高展,王宇骥,葛竞成,等. 轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3):499-507.  
ZHANG Gaozhan, WANG Yuxuan, GE Jingcheng, et al. Effect of light weight aggregate on workable ability and mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3):499-501. (in Chinese)
- [8] 李华,汪洋,王育江,等. 膨胀剂对混凝土早期基本徐变的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(3):256-262.  
LI Hua, WANG Yang, WANG Yujiang, et al. Effect of expansive additives on basic creep of early-age concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(3):256-262. (in Chinese)
- [9] ZHANG S Z, TIAN Q, LU A Q. Influence of CaO-based expansive agent on the deformation behavior of high performance concrete [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 438-439:113-116.
- [10] 韩建国,阎培渝,张友海.  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}-\text{CaSO}_4-\text{CaO}$  体系中CaO水化活性与膨胀特性关系[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(2):217-224.  
HAN Jianguo, YAN Peiyu, ZHANG Youhai. Relationship between CaO hydration activity and its expansive characteristics in  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}-\text{CaSO}_4-\text{CaO}$  systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2018, 58(2):217-224. (in Chinese)
- [11] 韩建国,阎培渝.  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}-\text{CaSO}_4-\text{CaO}$  体系在硅酸盐水泥浆体中的膨胀能力[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(8):1120-1125.  
HAN Jianguo, YAN Peiyu. Expansion character of  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}-\text{CaSO}_4-\text{CaO}$  system in Portland cement paste [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(8):1120-1125. (in Chinese)
- [12] 李鹏,苗苗,苗芳,等. 补偿收缩混凝土变形性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1):192-197, 208.  
LI Peng, MIAO Miao, MIAO Fang, et al. Research progress of deformation performance of the shrinkage-compensated concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(1):192-197, 208. (in Chinese)
- [13] 肖文慧. 膨胀剂组分对水泥浆性能影响的研究[J]. *当代化工*, 2017, 46(6):1065-1068.  
XIAO Wenhui. Study on the effect of expanding agent on cement slurry performance [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2017, 46(6):1065-1068. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 张涛. 混凝土早龄期开裂敏感性的影响因素研究[D]. 北京:清华大学, 2006.  
ZHANG Tao. Study on influencing factors of early age cracking sensitivity of concrete [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [16] ZHANG J, HAN Y D, GAO Y. Effects of water-binder ratio and coarse aggregate content on interior humidity, autogenous shrinkage, and drying shrinkage of concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(1):184-189.