

# 掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土性能研究

张明亮<sup>1</sup>, 刘家彬<sup>1</sup>, 庞超明<sup>2</sup>, 秦鸿根<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>东南大学土木工程学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京

Email: 1379258256@qq.com, \*qinhonggen@126.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月25日

## 摘要

为配制地铁站叠合式墙板低收缩抗裂混凝土, 本文在优化配合比基础上, 采用内养护剂与膨胀剂的复掺技术, 研究了掺内养护剂的C40微膨胀混凝土的工作性、力学性能和变形性能。试验结果表明, 优化配合比参数, 掺适量的膨胀剂对混凝土工作性和力学性能有明显改善; 掺内养护剂对中高强膨胀混凝土具有明显的协同膨胀效应; 采用密度大、吸水率高的轻砂内养护剂, 可均匀分布于混凝土中, 促使膨胀剂和胶凝材料的充分水化, 有效提高混凝土的力学性能和变形性能, 其内养护效果优于SAP内养护剂。

## 关键词

微膨胀混凝土, 内养护, 协同膨胀效应, 力学性能, 变形性能

# Research on Performance of Micro-Expansive Concrete Mixed with Light Sand Internal Curing Agent

Mingliang Zhang<sup>1</sup>, Jiabin Liu<sup>1</sup>, Chaoming Pang<sup>2</sup>, Honggen Qin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Main Laboratory of Civil Engineering Materials of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu

Email: 1379258256@qq.com, \*qinhonggen@126.com

Received: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Dec. 16<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 25, 2020

\*通讯作者。

文章引用: 张明亮, 刘家彬, 庞超明, 秦鸿根. 掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土性能研究[J]. 土木工程, 2020, 9(12): 1337-1344. DOI: 10.12677/hjce.2020.912140

## Abstract

In order to prepare low-shrinkage and anti-cracking concrete for subway station superposed wall panels, this paper uses the compounding technology of internal curing agent and expansion agent on the basis of optimizing the mix ratio to study the workability and mechanics of C40 micro-expansion concrete with internal curing agent performance and deformation performance. The test results show that optimizing the mixing ratio parameters and adding an appropriate amount of expansive agent can significantly improve the workability and mechanical properties of concrete; adding internal curing agent has obvious synergistic expansion effect on medium and high-strength expansive concrete; adopting light weight with high density and high water absorption, the sand curing agent can be evenly distributed in the concrete to promote the full hydration of the expansion agent and the cementitious material, effectively improving the mechanical properties and deformation properties of the concrete, and its internal curing effect is better than the SAP internal curing agent.

## Keywords

Micro-Expansion Concrete, Internal Curing, Synergistic Expansion effect, Mechanical Properties, Deformation Properties

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

轨道交通地下车站叠合式墙板的现浇混凝土在温度、大面积和新老混凝土约束等影响下极易开裂,如何配制低收缩抗裂混凝土成为工程界当前研究的重点。相关研究表明,配制微膨胀混凝土可减少混凝土的收缩变形,提高混凝土的抗裂性。实际应用中微膨胀混凝土往往由于内部水分不足,膨胀剂不能充分水化,导致膨胀性能无法充分发挥,甚至会引起膨胀剂的延迟反应,影响混凝土体积稳定性[1]。内养护技术的出现则有效解决了混凝土内部水分不足的问题。陈波等[2]通过相关试验指出复掺 SAP 和 UEA 有利于提高混凝土综合抗裂性能。朱长华等[3]指出 SAP 吸水饱和后,在释水过程中补偿混凝土内部水化、蒸发所消耗水分,有效减小毛细孔溶液负压,延缓混凝土内部相对湿度的降低速率;但是,饱和 SAP 在释水过程中会逐步萎缩成“空穴”,对混凝土强度和耐久性产生不利影响。本文结合无锡地铁车站叠合式墙板的设计与施工,从内养护技术出发,配制了掺 SAP 和轻砂内养护剂的 C40 微膨胀混凝土,探究高吸水轻砂内养护剂的协同膨胀作用对微膨胀混凝土综合性能的影响。

## 2. 原材料与试验方法

### 2.1. 原材料

水泥为江苏鹤林产 P·O 42.5,密度为 3050 kg/m<sup>3</sup>,比表面积 385 m<sup>2</sup>/kg,28 d 抗压强度为 55.9 Mpa,氯离子含量为 0.023%,碱含量为 0.73%。

粉煤灰为南京华能产 F 类 II 级粉煤灰,密度为 2250 kg/m<sup>3</sup>,45 um 筛余率为 17.8%,需水量比 95%,烧失量 7.2%。

矿粉为南京梅宝产 S95 级矿粉，密度 2940 kg/m<sup>3</sup>，比表面积 408 m<sup>2</sup>/kg，28 天活性指数 102%，氯离子含量为 0.02%。

细骨料采用江西赣江 II 区中砂，细度模数为 2.60，级配合格，表观密度 2630 kg/m<sup>3</sup>，堆积密度 1510 kg/m<sup>3</sup>，空隙率 44%，含泥量 0.5%，泥块含量 0.2%。

粗骨料采用江西九江产，大小石子按 6:4 配成，5~31.5 mm 连续级配碎石，表观密度 2740 kg/m<sup>3</sup>，堆积密度 1500 kg/m<sup>3</sup>，空隙率 45%，含泥量 0.4%，泥块含量 0.2%。

减水剂采用江苏苏博特产的 PCA-10 型聚羧酸高效减水剂，含固量 20%，掺量为胶凝材料的 1%，减水率大于 25%。

膨胀剂采用江苏博特产的 HME-V，密度 2650 kg/m<sup>3</sup>，细度 1.18 mm，筛余 0.15%，掺量 8%；

轻砂内养护剂采用江苏智晟产的高吸水轻砂，粒径 1~4 mm，表观密度 1650 kg/m<sup>3</sup>，筒压强度大于 6 MPa，吸水率 35%。

SAP 采用市售的超强吸水树脂，粒径 30~300 μm，1 h 吸水率为 28 g/g，吸盐水率 15 g/g。

## 2.2. 混凝土配合比

根据地铁站叠合式墙板现浇低收缩抗裂混凝土配合比设计与施工要求，依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)首先计算基准配合比，再变动水胶比、砂率，后掺膨胀剂以及与不同类型内养护剂复掺。设计的地铁 C40 混凝土试验配合比列于表 1 中。

Table 1. Test mix ratio of subway C40 concrete

表 1. 地铁 C40 混凝土的试验配合比(kg/m<sup>3</sup>)

Group	Cement	Slag powder	Fly ash	Expanding agent	Internal Curing agent	Sand	Gravel	Water	Water reducer
DQ-1	297	63	63	0	0	741	1067	160	4.23
DQ-2	330	71	70	0	0	704	1055	160	4.71
DQ-3	269	58	57	0	0	776	1071	160	3.84
DQ-4	297	63	63	0	0	687	1121	160	4.23
DQ-5	297	46	46	34	0	741	1067	160	4.23
DQ-6	297	46	46	34	0.15%	741	1067	175	4.23
DQ-7	297	46	46	34	50	611	1067	180	4.23

## 2.3. 试验方法

混凝土坍落度、扩展度、含气量等工作性能试验依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GBT50080-2016)进行；混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度等试验依据《普通混凝土力学性能试验方案标准》(GB/T 50081-2002)进行；混凝土动弹性模量采用天津恒炜科技开发公司生产的动弹仪测试，试验依照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)进行；限制膨胀率试验参照《混凝土膨胀剂》(GBT 23439-2017)和《混凝土外加剂应用技术规范》(GB50119-2013)进行；变形性能和抗裂性能试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082-2009)进行。

## 3. 内养护剂对混凝土工作性能的影响

按表 1 的配合比拌制混凝土的拌合物，测试其坍落度、扩展度、粘聚性和保水性以及含气量和表观密度，试验结果列于表 2 中。

**Table 2.** Working performance of subway C40 high-fluidity concrete  
**表 2.** 地铁 C40 大流动性混凝土的工作性能

Group	Slump (mm)	Expansion (mm)	Cohesion	Water retention	Air content (%)	Measured apparent density (kg/m <sup>3</sup> )
DQ-1	205	640	good	no bleeding	1.7	2450
DQ-2	222	665	sticky	no bleeding	1.7	2450
DQ-3	230	710	ordinary	microbleeding	1.9	2450
DQ-4	230	660	better	microbleeding	1.6	2460
DQ-5	220	485	good	no bleeding	2.9	2430
DQ-6	255	625	good	no bleeding	3.2	2400
DQ-7	222	625	good	no bleeding	1.1	2420

表 2 结果表明, 对大流动性的 C40 混凝土, 在基准配合比 DQ-1 的基础上变动水胶比, 改变胶凝材料用量的同时, 适当调整砂率, 对混凝土流动性、粘聚性和保水性影响不大且满足设计与施工要求。

根据设计要求, 当掺入 8% 的膨胀剂或者同时掺入 SAP 内养护剂时, 混凝土工作性能有所改善, 粘聚性、保水性提高; 对复掺膨胀剂和轻砂内养护剂(等体积取代细骨料)的混凝土(DQ-7)拌合物的工作性能也有所改善, 可较好的满足施工要求。

#### 4. 内养护剂对混凝土力学性能的影响

按表 1 配合比制备混凝土试件并进行标准养护, 测试其力学性能, 试验结果列于表 3 中。

**Table 3.** Mechanical properties of subway C40 high-fluidity concrete  
**表 3.** 地铁 C40 大流动混凝土的力学性能

Group	Compressive strength (MPa)		Splitting tensile strength 28 d (MPa)	Flexural strength 28 d (MPa)	Axial tensile strength 28 d (MPa)
	7 d	28 d			
DQ-1	39.6	48.0	3.06	5.78	2.64
DQ-2	40.1	50.9	3.54	6.89	3.06
DQ-3	34.8	46.2	3.00	5.61	2.55
DQ-4	38.0	50.2	2.88	5.53	2.47
DQ-5	39.8	50.7	3.61	6.55	3.06
DQ-6	43.7	49.1	3.34	5.95	2.81
DQ-7	42.9	52.3	3.32	5.70	2.81

##### 4.1. 内养护剂对混凝土抗压强度影响

水胶比是影响混凝土强度的主要因素, 由表 3 中前四组可见, 随着水胶比的增大, 混凝土抗压强度明显减小, 而砂率对强度的影响不大。仅掺膨胀剂组(DQ-5)等量取代掺合料, 7 d 抗压强度与基准组相近, 28 d 混凝土强度提高了 5.6%, 可知掺入适量膨胀剂有利于提高混凝土的抗压强度。

此外, 在混凝土中掺膨胀剂的同时, 掺入适量的内养护剂, 可促进膨胀剂和胶凝材料的水化, 充分发挥协同膨胀作用, 提高混凝土的密实性和膨胀率。表 3 中 DQ-6、DQ-7 和 DQ-5 相比可看出, 掺入 SAP 和轻砂内养护剂的膨胀混凝土 7 d 强度分别提高 9.8% 和 7.8%; 而掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土(DQ-7) 28 d 抗压强度提高了 3.2%, 但掺 SAP 内养护剂的膨胀混凝土强度相比变化不大。这是由于轻砂具有一定的强度且密度较大、分布均匀, 在养护过程中缓慢释水, 促使胶凝材料持续水化, 提高了混凝土的中后

期抗压强度，而 SAP 颗粒吸水密度较轻，易上浮且释水速度快，失水后形成小孔。故掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土强度高于掺 SAP 内养护剂的微膨胀混凝土。

#### 4.2. 内养护剂对混凝土抗折强度、劈裂抗拉强度和轴拉强度的影响

混凝土抗折强度指混凝土受弯折断的极限应力，C40 混凝土抗折强度一般为 4.5 MPa 左右。由表 3 可见，水胶比对混凝土的抗折强度有明显影响，水胶比越小，混凝土抗折强度越大；砂率减小，混凝土的抗折强度有所降低；掺入膨胀剂，混凝土的抗折强度明显增强，掺入内养护剂的膨胀混凝土根据内养护剂的不同，影响程度不同，总体上对混凝土的抗折强度影响不大。

轴心抗拉强度是混凝土的一项重要性能指标，但轴心抗拉试验较繁琐，大都采用劈裂抗拉试验，测定劈裂抗拉强度换算成轴心抗拉强度。尹健等[4]通过试验数据分析指出，在高性能混凝土轴心抗拉强度与劈裂抗拉强度的比值  $K = 0.921$ ，其推定误差在 $\pm 8\%$ 以内。本试验采用边长为 100 mm 的混凝土试件，用 0.85 的尺寸换算系数，计算结果如表 3。

有关标准规定 C40 混凝土轴心抗拉强度标准值为 2.39 MPa，试验中各组抗拉强度都大于标准值。观察表 3 中前三组可看出，混凝土的抗拉强度随着水胶比的减小而增大；掺入 8% 的膨胀剂有效改善了混凝土的抗拉性能，与基准组(DQ-1)相比，掺入内养护剂的膨胀混凝土比基准混凝土的抗拉强度明显增大，可知掺适量的膨胀剂和内养护剂有利于密实混凝土结构，提高混凝土抗拉强度。

#### 4.3. 内养护剂对混凝土弹性模量影响

早在 1807 年材料弹性模量这个概念就被提出，混凝土弹性模量反映了混凝土应力-应变之间的相关性，体现了混凝土的刚度，是研究混凝土变形裂缝的重要参数、计算混凝土材性的重要系数。Sang-Hun Han [5]的研究指出，混凝土的动弹性模量与静弹性模量之间的关系不受水泥种类以及龄期的影响。因此可根据混凝土动弹性模量随时间变化规律来反映和分析混凝土力学性能的影响因素和变化规律。

已有研究表明，混凝土弹性模量会因混凝土自身以及环境改变而发生变化，主要因素包括骨料、水胶比、龄期等[6]。吕丽萍[7]通过弹性模量试验分析发现，砂率与弹性模量具有一定关系，且存在一个最佳值；此外，弹性模量随水胶比减小而增大。曹茂柏[8]分析试验数据得出混凝土的弹性模量随着骨料的弹性模量增大而增大，而且骨料的体积分数越大，其对应混凝土的弹性模量也越大。

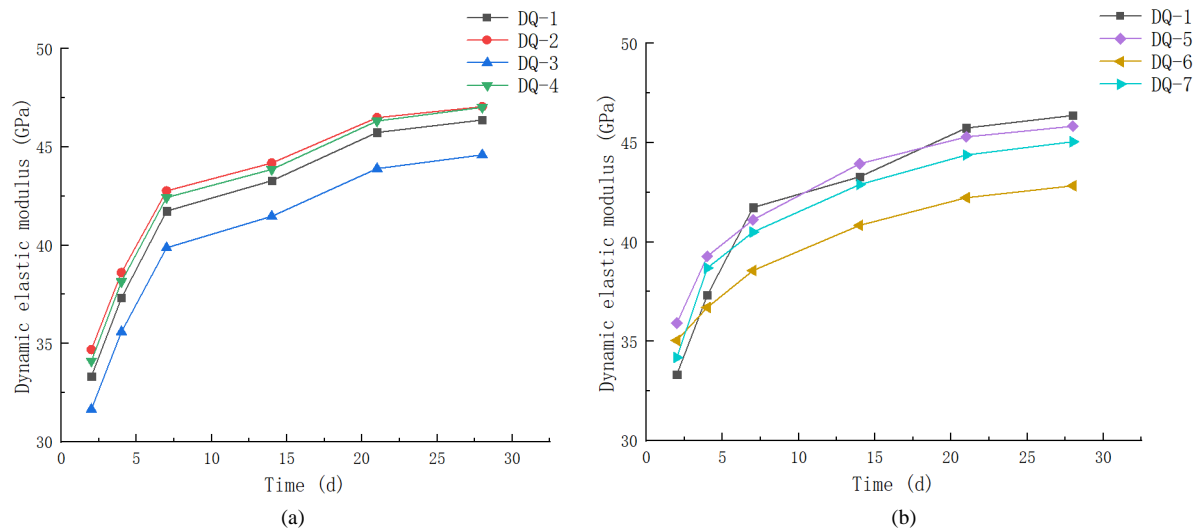
##### 4.3.1. 动弹性模量变化曲线

按表 1 的配合比制备 7 组混凝土试件，进行标准养护，测试了混凝土抗压强度和动弹性模量，结果列于表 4，混凝土动弹性模量随时间的变化规律曲线列于图 1。

Table 4. The relationship between static elastic modulus and dynamic elastic modulus

表 4. 静弹性模量与动弹性模量的关系

Group	Dynamic elastic modulus $E_d$ (GPa)	Compressive strength (MPa)	Static elastic modulus $E_s$ (GPa)	$K = E_s/E_d$ (%)
DQ-1	48.0	46.37	34.4	74.2
DQ-2	50.9	47.05	34.9	74.2
DQ-3	46.2	44.60	34.0	76.2
DQ-4	50.2	47.02	34.8	74.0
DQ-5	50.7	45.83	34.9	76.2
DQ-6	49.1	42.83	34.6	80.8
DQ-7	52.3	45.05	35.2	78.1



**Figure 1.** Variation law of concrete dynamic elastic modulus. (a) Change water-binder ratio and sand content; (b) Change internal curing agent and expansion agent

**图 1.** 混凝土动弹性模量变化规律。(a) 改变水胶比和砂率; (b) 改变内养护剂和膨胀剂

### 3.3.2. 动弹性模量影响因素分析

图 1 的试验结果表明, 从龄期发展来看, 动弹性模量早期(1~7 d)发展较快, 中期(7~21 d)逐渐变缓, 21~28 d 发展更趋于平缓; 与其强度的发展规律一致。混凝土 3 d 的动弹性模量可达到 28 d 的 70%, 7 d 达到 28 d 的 90%。

影响混凝土动弹性模量的关键因素有: 水胶比、砂率、膨胀剂、内养护剂。

#### 1) 水胶比的影响

从图 1(a)中曲线可以看出, 水胶比越小, 其动弹性模量曲线越高, 即混凝土动弹性模量越大。经计算, 基准混凝土的动弹性模量在第 3 d 达到 28 d 弹性模量的 72%, DQ-2 混凝土达到 74%, DQ-3 达到 71%; 在第 7 d, 分别达到混凝土弹性模量的 90%、91%、89%。可以发现, 随着水胶比的变化, 其混凝土动弹性模量增长率变化不大。

#### 2) 砂率的影响

从图 1(a)中曲线还可以看出, 砂率对混凝土动弹性模量变化有一定影响。由混凝土动弹性模量随时间变化曲线可看出减小砂率, 粗骨料用量增加, 混凝土动弹性模量增大。

#### 3) 膨胀剂的影响

观察图 1(b)可知, 掺膨胀混凝土(DQ-5)的动弹性模量在第 3 d 就达到动弹性模量的 80%左右, 第 7 d 则和前四组无差异。从中可以看出膨胀剂的掺入会加快混凝土动弹性模量的早期发展, 但后期发展速度和未掺入膨胀剂混凝土区别不大。

#### 4) 内养护剂的影响

图 1(b)显示 DQ-6、DQ-7 两组的动弹性模量值较小, 可知掺入轻砂内养护剂的膨胀混凝土动弹性模量比不掺组相有所减小, 其中, 掺入 SAP 组最为明显。轻砂为无机高强轻骨料, 具有一定的强度且与混凝土有较好的粘结, 故以轻砂为内养护剂的膨胀混凝土动弹性模量降低不明显。而 SAP 释水后会在混凝土内部形成微孔, 故对动弹性模量影响更大。

### 4.3.3. 动弹性模量与静弹性模量关系

混凝土动弹性模量与静弹性模量有很好的相关性, 可通过无损测试混凝土的动弹性模量后, 计算转



化成静弹性模量。郑永来等[9]在研究动弹性模量变化规律的实验中指出,对于混凝土材料,动弹模可高出静弹模 40%。周小二等[10]在试验中发现混合骨料混凝土动弹性模量比静弹性模量略高,其比值范围在 1.05~1.25 之间,均值为 1.14,该值随轻骨料所占比例增加而略有增大。研究表明,选用不同配合比制成的混凝土试块,其动弹性模量和静弹性模量差值有一定的差异。根据文献[11]混凝土静弹性模量与抗压强度存在如下关系:

$$E_{ci} = E_{c0} * \alpha_E * \left( \frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中:  $E_{ci}$ ——混凝土 28 d 静弹性模量;  $F_{ck}$ ——混凝土抗压强度;  $\Delta f = 8 \text{ MPa}$ ;

$E_{c0} = 21.5 * 10^3 \text{ MPa}$ ;  $\alpha_E$  查表,取 0.90

将表 4 中 7 组混凝土抗压强度代入公式(1)中,计算出混凝土的静弹性模量  $E_{ci}$  (见表 4)结果表明,动弹性模量与静弹性模量具有很好的相关性,二者的比值 K 的范围为 74%~80%,故取中间值 77%。

## 5. 掺内养护剂对混凝土变形性能的影响

根据表 1 的配合比制备混凝土试件,按标准方法测试混凝土在水中 14 d 限制膨胀率、恒温恒湿条件下的 28 d 自收缩率和 60 d 干燥收缩率,试验结果列于表 5 中。

**Table 5.** Deformation performance of micro-expansion concrete mixed with different internal curing agents

**表 5.** 掺不同内养护剂的微膨胀混凝土变形性能

Group	14 d Limited expansion rate in water ( $10^{-6}$ )	28 d Self-drying shrinkage ( $10^{-6}$ )	60 d Drying shrinkage ( $10^{-6}$ )
DQ-1	-28	-137	-233
DQ-5	248	-22	-224
DQ-6	250	131	-273
DQ-7	426	167	-196

(注:“-”表示收缩变形,“+”表示膨胀变形)

试验结果表明:

1) 微膨胀混凝土(DQ-5)与同强等级的普通混凝土(DQ-1)相比,具有更好的变形性能,水中 14 d 限制膨胀率增加了  $276 \times 10^{-6}$ , 28 d 自收缩减少了 84%, 60 d 干燥收缩率减少了 4%。

2) 内养护剂对微膨胀混凝土发挥了明显的协同膨胀作用,掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土组(DQ-7)相较不掺内养护剂(DQ-5)组,水中 14 d 限制膨胀率分别增加了 72%, 28 d 自收缩分别减少了  $189 \times 10^{-6}$ , 60 d 干燥收缩率减小了 13%。

由于轻砂内养护剂粒径小、吸水率大,且表观密度大,可均匀分布于混凝土中并缓慢释水,有效地促进了膨胀剂和胶凝材料的水化,改善了混凝土变形性能方面。因此,掺轻砂内养护剂的微膨胀混凝土比不掺内养护剂或掺 SAP 内养护剂组具有更好的变形性能,不但具有显著的协同膨胀作用,还具有明显的减小自收缩作用。

## 6. 结论

本文结合地铁车站叠合式墙板的设计与施工,研究了掺轻砂内养护剂微膨胀混凝土的综合性能,得出如下结论:

1) 复掺膨胀剂和适量轻砂内养护剂,有助于大流动性微膨胀混凝土工作性能的改善和力学性能的提高。

2) 混凝土动弹性模量随龄期发展可综合反映混凝土力学性能的变化规律。混凝土力学性能随着水胶比的减小而增大, 砂率的适当调整对混凝土力学性能影响不大, 但砂率增大, 混凝土抗折和抗拉强度有所提高。

3) 掺轻砂内养护剂对膨胀混凝土具有良好的协同膨胀效应。由于轻砂内养护剂颗粒粒径小、表观密度和吸水率大, 在混凝土中分布均匀并缓慢释水, 有效地促进了膨胀剂和胶凝材料的水化, 在改善混凝土变形性能方面均优于不掺内养护剂或掺 SAP 内养护剂的微膨胀混凝土。

## 参考文献

- [1] 党玉栋. 减缩剂与内养护对水泥基材料体积稳定性的影响[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [2] 陈波, 丁建彤, 蔡跃波, 白银, 张文潇. 内养护与膨胀剂复合作用对混凝土综合抗裂性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 189-195+201.
- [3] 朱长华, 李享涛, 王保江, 等. 内养护对混凝土抗裂性及水化的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 221-225.
- [4] 尹健, 周士琼. 高性能混凝土轴心抗拉强度与劈裂抗拉强度试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2001, 19(2): 25-29.
- [5] Han, S.H. and Kim, J.K. (2004) Effect of Temperature and Age on the Relationship between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete. *Cement & Concrete Research*, **34**, 1219-1227.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.011>
- [6] 王佳雯. 混凝土抗压强度与动弹性模量关系试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [7] 吕丽萍, 史忠. 浅谈影响混凝土弹性模量的因素[J]. 混凝土, 2003(1): 33-34.
- [8] 曹茂柏. 对混凝土弹性模量影响因素的探讨[J]. 科技通报, 2012, 28(012):195-197.
- [9] 郑永来, 周橙, 黄炜, 夏颂佑. 动态弹性模量的实验研究[J]. 河海大学学报, 1998(2): 31-35.
- [10] 张燕坤, 周小二. 混合骨料混凝土的动弹性模量试验研究[J]. 建筑技术, 2012, 43(7): 650-651.
- [11] CEB-FIB (2010) Fib Model Code for Concrete Structures. Ernst & Sohn, Berlin.