

Research Progress of Internal Curing in High-Performance Concrete

Yuqi Zhou¹, Honghui Chen²

¹China Construction First Group Construction & Development Co., Ltd., Beijing

²Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: chh15@mails.tsinghua.edu.cn

Received: Dec. 14th, 2017; accepted: Dec. 27th, 2017; published: Jan. 3rd, 2018

Abstract

High-performance concrete is widely applied to all kinds of building and construction projects. Due to the low water to binder ratio and large amount of cementitious materials, the autogenous shrinkage of high-performance concrete is significantly severe, thus resulting in microcracks and even cracking. So the mechanical properties and durability of concrete are seriously impacted. The internal curing technology relies on the pre-absorbent materials to release moisture to maintain sufficient internal wetting of the concrete, which can effectively reduce the autogenous shrinkage and ensure the mechanical properties and durability of the concrete. This paper has summarized the research progress in internal-curing of high strength concrete in recent years from the aspects of the working mechanism of the internal curing reagents, the types of the internal curing reagents, comparison of the effect of different internal curing reagents and the engineering application of the internal curing reagents.

Keywords

High-Performance Concrete, Internal Curing, Autogenous Shrinkage, Mechanical Properties, Durability

高强混凝土内养护的研究进展

周予启¹, 陈宏辉²

¹中建一局集团建设发展有限公司, 北京

²清华大学土木工程系, 北京

Email: chh15@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017年12月14日; 录用日期: 2017年12月27日; 发布日期: 2018年1月3日

文章引用: 周予启, 陈宏辉. 高强混凝土内养护的研究进展[J]. 土木工程, 2018, 7(1): 1-7.

DOI: 10.12677/hjce.2018.71001

摘要

高强高性能混凝土在各类建筑工程中被广泛地应用。但由于高性能混凝土水胶比较低、胶凝材料用量较大,其早期的自收缩较为严重,从而产生微裂纹进而开裂,严重影响其力学性能和耐久性。而内养护技术依靠预吸水材料释放水分维持混凝土内部充分湿润,可以有效地减少自收缩,保障混凝土的力学性能和耐久性。本文从内养护剂的作用机理、内养护剂的种类、不同内养护剂的作用效果对比以及内养护剂的工程应用等方面总结了近年来高强混凝土内养护的研究进展。

关键词

高强混凝土, 内养护, 自收缩, 力学性能, 耐久性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 前言

混凝土强度的增高,可以有效地降低建筑物自重,这种混凝土技术的进步,使得从上世纪 80 年代以来,高强高性能混凝土在各类建筑结构中得到了越来越广泛的应用。尤其是在高层建筑和大跨度桥梁的建造中[1]。水是混凝土的一个重要组成部分,它是水泥水化的必须物质。水胶比很大程度上决定了硬化混凝土的微观结构,包括孔结构、孔溶液性质、内部相对湿度、界面过渡区等,因此也是决定混凝土力学性能和耐久性的一个关键因素。在高强高性能混凝土中,水胶比很低,胶材用量较大,因此内部孔隙尺寸小,孔溶液碱度高,混凝土的力学性能和耐久性都较好。但是,降低水胶比造成了混凝土内部相对湿度降低而造成自干燥,材料自收缩增大;同时,由于胶凝材料的用量较大,也就意味着发生自收缩的材料占比大,因此高强混凝土由于自收缩而导致早期开裂从而影响力学性能与耐久性的问题是很严重的[2][3]。

混凝土的自收缩是指在恒温、与外界无水分交换条件下产生的收缩[4][5][6][7][8]。混凝土的自收缩不仅仅在混凝土表面发生,而且在混凝土内部均匀的发生。混凝土自收缩主要是由水泥水化引起的混凝土内部自干燥产生的毛细管张力造成的。所谓自干燥,是指在外界无水供应时,水泥水化消耗毛细孔水导致饱和蒸气压即内部湿度降低的现象[4]。由于混凝土的自收缩与水泥水化密切相关,所以混凝土中水泥基材料的组成成份、矿物掺合料的种类与掺量[9][10]等对自收缩有重要影响。此外,水灰比对自收缩也有很大影响:当水灰比较低时,毛细孔中普遍发生的自干燥现象表现为宏观上的自收缩;而当水灰比较高时,自干燥现象仅在局部毛细孔中发生,宏观上可以忽略[11]。自收缩产生的微裂缝会发展而导致开裂,微裂缝为 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等有害介质侵蚀提供了迁移和扩散通道,降低了混凝土的耐久性;开裂则使混凝土出现脆性断裂结构整体破坏,导致严重的灾难性事故和难以挽回的经济损失[12]。因此,降低高强混凝土的早期收缩和控制裂缝已经成为国内外的研究热点。

美国的学者 T. C. Power [13]认为,水泥水化的水灰比应不低于 0.42,在养护比较充分的情况下,至少也不应低于 0.36,否则胶凝材料将无法完全得到水化,从而出现混凝土的内部相对湿度下降迅速的现象,出现混凝土早期自收缩的现象。高强高性能混凝土水灰比往往低于 0.40 且结构密实。传统的外部养

护方法有洒水、喷雾、围水、覆盖(覆草、覆袋、覆砂)、覆膜(覆盖塑料膜、涂刷养护剂或减蒸剂)等, 对表面湿度有保证, 但水分很难到达混凝土内部未水化的胶凝材料的部分, 因此对自收缩的抑制效果很微小[14]。因此, 在近年来的研究中, 内养护被认为是一个很有效的增加混凝土内部湿度从而减少自收缩的养护方法[15] [16]。

内养护, 也称作自养护, 是指在绝湿、绝热条件下依靠预吸水材料释放水分维持混凝土内部充分湿润的养护方式[17] [18] [19]。在内养护中, 将水带入水泥基材料中需要一定的介质, 也就是内养护材料。根据内养护剂吸水机理的不同可以分为物理性吸水材料和多孔材料[14]。物理性吸水材料主要是超吸水聚合物(SAP) [20], 如聚丙烯酸钠高吸水树脂、聚丙烯酰胺高吸水树脂、羟乙基纤维素醚等, 主要依靠其充分伸展三维网络和高分子链上基团亲水性吸附水分[21]; 多孔材料则是指各种钙、硅、铝等天然和人工合成的多孔材料[22] [23] [24] [25], 如轻集料(LWA)、硅藻土浮石、膨胀页岩、珍珠岩等, 主要依靠分布于结构内部的毛细孔吸附和储存水分。其中, 高吸水性树脂和轻集料是最常用的内养护剂。

2. 内养护剂在高强混凝土中的作用机理

在高强混凝土中, 内养护的作用主要是减小混凝土的自收缩。因此内养护的机理也主要关注在自收缩上。轻集料、高吸水性树脂的减小自收缩的机理主要是它们在释放内部水分的机制上。当胶凝材料水化消耗水时, 内养护剂与胶凝材料之间就形成了一个湿度梯度, 两者之间产生一定毛细压力差, 从而养护剂中的水分释放出来补偿损失的湿度[26]。另一方面, 在水化开始后, 孔溶液中的离子浓度不断上升, 促使孔溶液中的离子向内养护剂迁移, 因此孔溶液与内养护剂中的离子浓度差也是水分迁移的动力[26]。

此外, 在混凝土终凝时(自收缩开始的时间), 化学收缩在混凝土内部留下很多孔隙[27], 胶凝材料水化时, 内部湿度降低, 在孔隙中形成毛细张力, 这就导致了自收缩[8]。而在内养护条件下, 当相对湿度低于 100%时, 这种压力差则使内养护剂释放水分, 一方面补偿自收缩, 另一方面也促进了水化[28] [29]。在胶凝材料不断水化过程中, 水分不断从内养护剂中迁移出来, 从而有效地降低了早期的自收缩, 防止了微裂纹的产生。Friedemann 等人[30] [31]研究水分迁移过程时发现, 水分的迁移始于水化加速期, 且这种迁移使得混凝土内部水分分布均匀。

3. 不同内养护剂的作用效果对比

内养护剂可以分为高吸水性聚合物和多孔材料两大类。高吸水性树脂(SAP), 吸水能力很强, 但释放水的速度缓慢; 而对于多孔材料, 由于是孔隙储水, 因此储水能力较弱, 释放水分快速[14]。

轻集料又叫做多孔陶粒, 大多由页岩或黏土等无机质材料经煅烧而成。轻集料作为最早应用的内养护材料, 可以降低自收缩, 并提高内部湿度。但吸水能力较低、密度小、脆性孔偏多、吸水能力偏低, 导致达到同样内养护效果时材料用量相比高吸水能力材料偏大经济性明显下降。此外, 其实密度较小, 在混凝土拌合时上浮, 对混凝土的流动性也有影响[12]。轻集料的多孔兼脆性则加速了本身已为脆性材料的混凝土的弹性模量和抗压强度的劣化。膨胀页岩、页岩陶粒和粘土陶粒等天然材料, 24 h 真空吸水率也可达 80%, 在相对湿度 93%下, 24 h 吸水率 85%~98%, 同样可增加混凝土内部湿度[23] [24]。

硅藻土主要由硅藻植物死亡以后的遗骸所形成, 是由无定型 SiO_2 组成的, 多孔而轻, 孔隙度达 80%~90%, 粒径在 10~74 μm , 平均孔径 3 nm 左右, 能吸附自身质量 1.54 倍的水, 将其适量掺入混凝土中, 强度提高了 26% [32]。稻壳经过焚烧后的稻壳灰, 含有大量的活性 SiO_2 , 也是一种多孔材料, 孔径在 5~60 nm, 研究表明, 在混凝土养护过程中, 稻壳灰中储存的水分逐渐释放出来促进周围未水化胶凝材料区域水化反应继续进行, 缓解了自干燥效应, 使早期自收缩变形变小, 此外, 其活性 SiO_2 也具有火

山灰活性,对混凝土强度也有一定的提高作用[33]。赤泥作为制取氧化铝过程中产生的固体废弃物,也是一种多孔材料,有一定的储水和释水能力,实验证明,随着砂浆中赤泥含量的增加,蓄水量也增加,从而弥补水化过程中的水分缺失,砂浆的自收缩明显降低,强度有所提高;同时,赤泥的掺入会缓解新拌砂浆的泌水和离析现象但同时降低新拌砂浆的流动性[34]。废陶瓷再生砂具有轻骨料的特点。陶瓷作为烧结熔融材料,其内部孔隙率高,在利用废旧陶瓷制备再生砂的加工过程中也会对其表面裂纹造成损伤,所以吸水率远远高于天然骨料,它与天然砂有相近的和易性和强度,且它可以均匀分布在水泥中,内养护作用显著[35](表 1)。

高吸水树脂(SAP),也叫超吸水聚合物或超强吸水剂,是一种分子结构上含大量羧基、羟基、羧酸盐基、酰胺基等亲水基团的低交联度三维网状结构的高分子材料用于混凝土内养护常见高吸水树脂的粒径 100~250 μm,吸水倍率 500 以上,吸合成孔溶液倍率多低 40。对混凝土的自收缩有较好的抑制作用,降低微裂纹的形成[12] [38]。其缓慢释放水,促进低水灰比水泥的水化和二次水化的进行,这样水化产物的增加不仅提高了混凝土的强度,而且有利于其自身密实度的提高。随着水化的进行,水化产物的不断增加,混凝土的早期收缩将会降低,后期收缩也会减小,这样有利于混凝土耐久性能的提高[39] [40]。高吸水性树脂同样也具有密度小,拌合时上浮的缺点。现有聚合物内养护材料经济性欠佳,售价高达每吨 2 万元,限制了其在附加值相对不高的混凝土行业的应用。

高吸水性树脂的种类非常多,大量研究均表明,SAP 在减小混凝土自收缩、提高混凝土强度和耐久性方面均有较强的改善作用,但改善程度与 SAP 的种类与粒形相关[41]。按照化学成分可将 SAP 分为淀粉系、纤维素系和合成树脂系。因其合成体系的不同,也呈现出不同的结构。淀粉分子含有大量的羟基,具有较强的吸水性。淀粉类 SAP 主要指淀粉与丙烯腈、丙烯酸、丙烯酰胺等亲水性烯类单体的接枝共聚物。淀粉接枝类 SAP 吸水率高达几千倍,其缺陷是吸水后凝胶强度低、水溶部分多、残留的丙烯腈单体有毒、耐盐性差等[42]。纤维素类 SAP 同样属于多羟基类物质,但其吸水倍率小,溶解性较差,吸水后容易集结成团,耐热性不佳,吸水后凝胶强度低,其合成工艺比较复杂,长期保水性能差[42]。而合成系

Table 1. The effect comparison of different porous material curing agents
表 1. 不同多孔材料养护剂作用效果比较

多孔材料种类	改善效果	缺陷
轻集料(陶粒)	在保证各组混凝土强度对等的情况下,随着陶粒掺量增加,混凝土的早期自收缩明显减小[36]	随着陶粒掺量的增加,混凝土的混凝土 7, 28 和 90 天龄期的抗压强度均随着陶粒掺量的增加而略有降低,这是由于其本身多孔和脆性[37]
硅藻土	掺 10%硅藻土,并保证胶砂流动度相近时,砂浆强度提高了 26%,此外,掺入微米纳孔材料硅藻土可改善轻集料混凝土的保温隔热性能[32]	掺加 10%硅藻土使胶砂流动度变差,但幅度不大[32]
稻壳灰	掺量 20%,超高强混凝土的自收缩明显减小,15 d 龄期的自收缩几乎完全消除[33]	掺 10%稻壳灰使胶砂流动度变差,幅度比掺 10%硅藻土更小[32]
赤泥	随着赤泥掺量增加,砂浆 14 d、28 d 和 56 d 的强度都逐渐增加而自收缩则减小;在掺量 50%时,其 28 d 抗压强度增加 13.2%,50 d 的自收缩减少了 22.8% [34]	赤泥对混凝土的工作性影响很大,随着赤泥掺量增加,流动性减小,取代率达到 50% 的时候,砂浆几乎不出现流动[34]
废陶瓷再生砂	使用陶瓷再生砂时,砂浆干燥养护条件下的 7、14 和 28 d 强度均高于标准养护条件下使用天然砂砂浆的对应的强度,而将两种砂各 50%混合时,干燥养护条件下各龄期强度就远高于标准养护条件下天然砂砂浆的强度[35]	陶瓷再生砂质轻,多孔,增加了混凝土的脆性[35]

SAP, 制备工艺较强简单, 吸水保水能力较强。合成类 SAP 以丙烯酸类 SAP 为主, 因其生产成本低, 产品质量稳定[43]。丙烯酸类 SAP 也具有耐盐性差的缺点。

4. 内养护剂在重点工程中的应用案例

内养护作为一种有效的防止自收缩的养护方式, 在工程中常用于干旱地区, 道路、桥梁等表面较大, 易失水的环境中。如兰新铁路第二双线 LXS-15 标段[44]。该工程位于甘肃省酒泉市境内, 沿线穿越安西极旱荒漠国家自然保护区, 地理形式为戈壁与荒滩该地区自然条件恶劣: 温差大, 风沙大, 日照干旱缺水。该工程在施工前, 对混凝土掺内养护剂时的收缩情况进行了反复的试验研究, 并通过现场试验段的施工, 配合适合当地气候情况的养护工艺, 证实内养护剂加入高性能混凝土中能够明显提高早期混凝土内部的相对湿度, 减少混凝土内部的自收缩变形, 增强混凝土强度, 增加混凝土的耐久性这一新材料的引进成功解决了在我国西北干旱地区建设高速铁路过程中产生的混凝土收缩开裂, 养护期内混凝土强度增长缓慢的难题, 确保了工程质量和使用寿命。

5. 结论

内养护技术从自收缩产生的机理出发, 通过调节高强混凝土内部湿度促进未水化水泥颗粒水化来抑制其收缩, 降低开裂风险, 同时改善材料的耐久性。近年来内养护剂的种类越来越多, 对于内养护剂作用机理, 内养材料孔结构及不同作用对于水分迁移过程的影响的研究也越来越深入。但是, 这些研究仍处于不太成熟的阶段。轻集料、高吸水性树脂等密度低, 容易上浮, 难以振捣泵送的缺点还有待解决。如何选择原材料, 如何设计内养护混凝土配比以获得最大的内养护效率仍然需要进一步的研究。另外, 缺少内养护剂在工程中的使用案例。

参考文献 (References)

- [1] 王松林, 张箭. 浅谈高强混凝土的自收缩机理及国内外研究进展[J]. 硅谷, 2010(10): 83.
- [2] Zhang, J., Hou, D. and Chen, H. (2011) Experimental and Theoretical Studies on Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**, 312-320. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000171](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000171)
- [3] Zhang, J., Hou, D. and Han, Y. (2012) Micromechanical Modeling on Autogenous and Drying Shrinkages of Concrete. *Construction and Building Materials*, **29**, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.022>
- [4] Hua, C., Ehrlacher, A. and Acker, P. (1995) Analyses and Models of the Autogenous Shrinkage of Hardening Cement Paste I. Modeling at Macroscopic Scale. *Cement and Concrete Research*, **25**, 1457-1468. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00140-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00140-8)
- [5] Hua, C., Ehrlacher, A. and Acker, P. (1997) Analyses and Models of the Autogenous Shrinkage of Hardening Cement Paste II. Modelling at Scale of Hydrating Grains. *Cement and Concrete Research*, **27**, 245-258. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00202-5)
- [6] 杨全兵. 高性能混凝土的自收缩机理研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(S1): 72-75.
- [7] 安明喆. 高性能混凝土自收缩的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1999.
- [8] Tazawa, E., Miyazawa, S. and Kasai, T. (1995) Chemical Shrinkage and Autogenous Shrinkage of Hydrating Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, **25**, 288-292. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00011-9)
- [9] Kinuthia, J.M., Wild, S., Sabir, B.B., et al. (2000) Self-Compensating Autogenous Shrinkage in Portland Cement-Metakaolin-Fly Ash Pastes. *Advances in Cement Research*, **12**, 35-43. <https://doi.org/10.1680/adcr.2000.12.1.35>
- [10] Ghafari, E., Ghahari, S.A., Costa, H., et al. (2016) Effect of Supplementary Cementitious Materials on Autogenous Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, **127**, 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123>
- [11] 朱耀台. 混凝土结构早期收缩裂缝的试验研究与收缩应力场的理论建模[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2005.

- [12] 崔艳玲, 薛飞, 崔建世. 混凝土内养护技术研究现状[J]. 河南建材, 2016(4): 214-216.
- [13] Powers, T.C., and Brownyard, T.L. (1948) Studies of the Properties of Hardened Portland Cement Paste. Research Laboratories of the Portland Cement Association, 45-89.
- [14] Liu, J., Shi, C., Ma, X., *et al.* (2017) An Overview on the Effect of Internal Curing on Shrinkage of High Performance Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, **146**, 702-712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.154>
- [15] Zhutovsky, S. and Kovler, K. (2012) Effect of Internal Curing on Durability-Related Properties of High Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, **42**, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.07.012>
- [16] Shen, D., Shi, H., Tang, X., *et al.* (2016) Effect of Internal Curing with Super Absorbent Polymers on Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens. *Construction and Building Materials*, **120**, 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.048>
- [17] Bentur, A., Igarashi, S. and Kovler, K. (2001) Prevention of Autogenous Shrinkage in High-Strength Concrete by Internal Curing using Wet Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Research*, **31**, 1587-1591. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00608-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00608-1)
- [18] Weber, S. and Reinhardt, H.W. (1997) A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous-curing. *Advanced Cement Based Materials*, **6**, 59-68. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00009-6)
- [19] Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., *et al.* (1999) Effects of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete. *Cement and Concrete Research*, **29**, 611-614. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00202-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00202-6)
- [20] Jensen, O.M. and Hansen, P.F. (2001) Water-Entrained Cement-Based Materials I. Principles and Theoretical Background. *Cement and Concrete Research*, **31**, 647-654. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00463-X)
- [21] Jensen, O.M. and Lura, P. (2006) Techniques and Materials for Internal Water Curing of Concrete. *Materials and Structures*, **39**, 817-825. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9136-6>
- [22] Atahan, H.N., Oktar, O.N. and Taşdemir, M.A. (2009) Effects of Water-Cement Ratio and Curing Time on the Critical Pore Width of Hardened Cement Paste. *Construction and Building Materials*, **23**, 1196-1200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.011>
- [23] Castro, J., Keiser, L., Goliás, M., *et al.* (2011) Absorption and Desorption Properties of Fine Lightweight Aggregate for Application to Internally Cured Concrete Mixtures. *Cement and Concrete Composites*, **33**, 1001-1008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.006>
- [24] Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Lura, P., *et al.* (2013) An Investigation on the Use of Zeolite Aggregates for Internal Curing of Concrete. *Construction and Building Materials*, **40**, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.10.009>
- [25] Akcay, B. and Tasdemir, M.A. (2009) Optimisation of Using Lightweight Aggregates in Mitigating Autogenous Deformation of Concrete. *Construction and Building Materials*, **23**, 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.015>
- [26] 蒋亚清, 许仲梓, 吴建林, 等. 高性能混凝土中饱水轻集料的微养护作用及其机理[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(5): 13-15.
- [27] Jensen, O.M. and Hansen, P.F. (2001) Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective. *Cement and Concrete Research*, **31**, 1859-1865. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00501-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00501-4)
- [28] Wei, Y., Xiang, Y. and Zhang, Q. (2014) Internal Curing Efficiency of Prewetted LWFAs on Concrete Humidity and Autogenous Shrinkage Development. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, 947-954. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000883](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000883)
- [29] Han, Y., Zhang, J., Luosun, Y., *et al.* (2014) Effect of Internal Curing on Internal Relative Humidity and Shrinkage of High Strength Concrete Slabs. *Construction and Building Materials*, **61**, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.060>
- [30] Friedemann, K., Stallmach, F. and Karger, J. (2006) NMR Diffusion and Relaxation Studies during Cement Hydration—A Non-Destructive Approach for Clarification of the Mechanism of Internal Post Curing of Cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, **36**, 817-826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.007>
- [31] Nestle, N., Kuehn, A., Friedemann, K., *et al.* (2009) Water Balance and Pore Structure Development in Cementitious Materials in Internal Curing with Modified Superabsorbent Polymer Studied by NMR. *Microporous and Mesoporous Materials*, **125**, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.02.024>
- [32] 胡维新, 黄伟, 秦鸿根. 硅藻土、超细稻壳灰、硅灰对双重多孔混凝土性能的影响[J]. 工业建筑, 2014(10): 113-116.
- [33] 叶光, V. T. Nguyen. 稻壳灰抑制超高性能混凝土的自收缩机理分析(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2012(2): 212-216.

- [34] 刘日鑫, 熊煦, 周慧, 等. 拜耳法赤泥对自密实砂浆工作性能及自收缩特性影响分析[J]. 硅酸盐通报, 2016(6): 1964-1969.
- [35] 刘凤利, 刘俊华. 废陶瓷再生砂在砂浆中的内养护作用试验研究[J]. 混凝土, 2012(11): 102-103.
- [36] 普永强, 杨医博. 无机多孔固体类混凝土内养护材料研究进展[J]. 广东建材, 2017(4): 33-35.
- [37] 王彦军, 隋术波, 高波, 等. 内养护技术对高强混凝土性能的影响[J]. 建材世界, 2017(2): 31-34.
- [38] 张珍林. 高吸水性树脂对高强混凝土早期减缩效果及机理研究[J]. 清华大学, 2013, 17(4): 559-565.
- [39] 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(1): 1-4.
- [40] 逢鲁峰. 掺高吸水树脂内养护高性能混凝土的性能和作用机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [41] 钟佩华, 刘加平, 王育江, 等. 高吸水树脂种类与粒形对高强混凝土自收缩及耐久性的影响[J]. 新型建筑材料, 2015(1): 8-12.
- [42] 林通, 邱海霞, 于九皋. 高吸水性树脂[J]. 化学通报, 2003(9): 598-605.
- [43] 胡涛, 周苏闽, 李登好. 丙烯酸系高吸水树脂的应用研究[J]. 精细石油化工进展, 2006, 7(4): 5-8.
- [44] 马丽娜. 混凝土内养护剂在干旱风沙地区高速铁路中的应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2013(10): 108-109.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org