

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

现代混凝土自收缩及其调控研究进展

李景浩, 何小波, 胡少伟, 蒋建华, 赵海涛

Advances in autogenous shrinkage and its regulation of modern concrete

LI Jinghao, HE Xiaobo, HU Shaowei, JIANG Jianhua, ZHAO Haitao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220111001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江下游河段桥墩压缩冲刷预测研究

Prediction of bridge pier compression scour in lower reaches of Yangtze River

水利水电工程学报. 2019(3): 16 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.003>

利用灰色残差GM(1,1)-Markov模型预测水工混凝土的劣化

Prediction of hydraulic concrete degradation based on gray residual GM (1,1)-Markov model

水利水电工程学报. 2021(1): 95 <https://doi.org/10.12170/20200228002>

MLR-Legendre多项式模型在混凝土坝裂缝开度预测中的应用

Application of MLR-Legendre polynomials model in concrete dam crack opening prediction

水利水电工程学报. 2019(2): 111 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.016>

基于CEEMDAN-PE-LSTM的混凝土坝变形预测

Concrete dam deformation prediction based on CEEMDAN-PE-LSTM model

水利水电工程学报. 2021(3): 41 <https://doi.org/10.12170/20200520003>

水电站厂房组合框架结构静态服役性态分析研究进展

Research progress of static and dynamic behavior analysis of composite frame structure of hydropower plant

水利水电工程学报. 2019(6): 8 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.002>

混凝土芯砂石桩振动沉管成桩效应及其累积特性研究

Study on compaction effect and its accumulation characteristics of concrete-core sand-gravel pile with vibrating immersed tube technology

水利水电工程学报. 2019(1): 18 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.003>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220111001

李景浩, 何小波, 胡少伟, 等. 现代混凝土自收缩及其调控研究进展 [J]. 水利水运工程学报, 2023(2): 150-161. (LI Jinghao, HE Xiaobo, HU Shaowei, et al. Advances in autogenous shrinkage and its regulation of modern concrete[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(2): 150-161. (in Chinese))

现代混凝土自收缩及其调控研究进展

李景浩^{1,2}, 何小波³, 胡少伟¹, 蒋建华², 赵海涛²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 湖州南浔城市投资发展集团有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 混凝土是使用最为广泛的建筑材料。现代混凝土为实现高性能而趋于采用低水胶比和高含量胶凝材料, 使得混凝土自收缩显著增大, 在约束条件下往往形成较大的拉应力, 因此现代混凝土结构开裂问题愈发严重, 显著降低了混凝土的耐久性, 缩短服役期, 这类问题在水工大体积及薄壁混凝土结构中尤为突出。对近些年来国内外混凝土自收缩及其调控研究进行了文献综述, 比较分析了自收缩“零点”与变形测量方法及装置、自收缩预测模型和自收缩调控措施 3 个方面的最新成果和进展, 总结了现有研究存在的不足, 并提出了一些关键问题的未来研究方向, 为实际工程裂缝控制和自收缩研究提供参考。

关键词: 现代混凝土; 自收缩; 测试方法; 预测模型; 收缩调控

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)02-0150-12

近些年来, 国家加大了对水利设施的建设投资力度, 并在西南地区成功建设了白鹤滩、乌东德等特大型水利枢纽。这些分布在西部高山峡谷地区的重大工程, 由于地形地貌限制, 高坝大库泄洪主要利用大断面水工隧洞, 其具有高水头、高流速的水力学特点, 因此对隧洞衬砌混凝土提出了高抗渗、抗冲磨、高耐久性等要求^[1]。为满足这些需求, 混凝土往往采用低水胶比和高胶凝材料含量, 加剧了混凝土内部自干燥, 进而加快、加大了自收缩^[2-3]。处于强约束状态中的水工建筑物混凝土, 龄期较大自收缩往往会形成较大的拉应力, 从而导致混凝土开裂^[4-5], 引起结构耐久性甚至安全性劣化^[6-7]。由此, 自收缩成为了当今混凝土材料和结构领域研究的热点与重点^[8], 学术界也从自收缩测试、预测和调控等方面对现代混凝土自收缩开展了系统全面的研究。

目前, 现代混凝土自收缩研究存在以下主要问题: (1) 自收缩的“零点”和变形的测量方法及装置不统一^[9], 导致难以比较分析不同研究者的结果; (2) 缺少精度高、普适性强的自收缩预测模型; (3) 当前的收缩调控措施在减缩的同时也会影响混凝土的其他性能, 且单一调控措施不能完全解决混凝土开裂问题。

本文对近年来现代混凝土自收缩研究进行综述, 并围绕以上主要问题重点进行讨论, 总结目前具有代表性的自收缩测试方法与装置、自收缩预测模型和自收缩调控措施的适用范围、优点与缺陷、最新成果或进展, 提出今后研究方向, 同时也为工程应用提供参考。

1 自收缩“零点”确定及变形测量方法

当前普遍接受的自收缩概念是混凝土在恒温环境、不受外力、不与外界进行湿度交换的条件下, 完全

收稿日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130901, 51878245, U1965105)

作者简介: 李景浩(1994—), 男, 河南平顶山人, 博士研究生, 主要从事水工结构工程与材料性能研究。

E-mail: 1710934891@qq.com 通信作者: 赵海涛(E-mail: zhaoh@hhu.edu.cn)

由胶凝材料水化引起的自身体积减小^[10]。自收缩发展的关键时刻是在混凝土微结构骨架形成并连通时,此后,混凝土弹性模量迅速发展,对混凝土的变形施加约束作用,混凝土在受到内外约束下形成拉应力,随着水泥水化的进行,拉应力不断增大,并最终导致开裂。这个“关键时刻”就是自收缩“零点”,自收缩的大小取决于“零点”选取和变形测量方法选择^[11],当前不同文献研究结果之间难以比较的根本原因在于自收缩“零点”和测量方法的选择不同。

1.1 自收缩“零点”

对混凝土实际工程早期裂缝控制有重要影响的自收缩变形是混凝土弹性模量迅速增大后发展起来的变形^[12]。因此,“零点”时刻往往选择在混凝土形成稳定微结构、或自干燥发生(相对湿度下降)或混凝土内部应力状态改变等时刻,根据这些关键时刻,当前有不同的自收缩“零点”选择。初凝时间^[13]和终凝时间^[14]作为水泥固相骨架形成的关键时刻而被作为自收缩“零点”;Huang等^[15]提出将混凝土内部相对湿度开始下降时刻作为自收缩“零点”;此外,次大变形速率时刻^[16]、膨胀变形峰值时刻^[17]和混凝土内孔隙负压压力出现时刻^[18]也都被选作自收缩“零点”。其中,凝结时间因其物理意义明确且相对容易测量,是当前广泛使用的自收缩“零点”。

传统凝结时间测量方法主要是贯入阻力法和针入度法,但贯入阻力法需要筛除混凝土粗骨料,操作不便且误差较大^[19];而针入度法测试结果受人为因素影响大,因此离散性较大^[20]。Miao等^[18]研发的孔隙负压测试技术(图1),无需筛除混凝土粗骨料即可直接测试,操作简便,结果也更符合实际,可推广用于凝结时间式自收缩“零点”的测试。

1.2 混凝土自收缩测量方法

目前自收缩测量方法包括体积法和线性法,其中线性法按照所用传感器是否与试件接触,分为接触式和非接触式测量法。

1.2.1 体积法 体积法是通过直接测量试件整体体积变化来表征自收缩的方法。首先将新拌水泥净浆或砂浆置入密闭橡胶袋内,再将其全部浸入水中,通过将测得的浮力变化量换算得到的体积变化量作为试样自收缩^[21]。体积法实现了从加水拌合后即开始测试的超早期龄期测试,但无法排除化学减缩形成的空隙。另外,橡胶皮袋的透水性也会影响最终试验结果。混凝土中的骨料可能会破坏橡皮袋,因此该方法不适用于测试混凝土自收缩。

1.2.2 接触式线性法 线性法适用于混凝土早期龄期自收缩变形测量,但是一般要从混凝土初凝开始测量。常用接触式传感器有埋入式应变计、电位式位移传感器(LVDT)和千分表^[22]。《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)推荐使用埋入式应变计法,该方法能实时自动监测,但由于早期混凝土弹性模量与应变计不匹配,使得埋入式应变计测试精度在早期并不高。另外,埋入式应变计成本较高且不能重复利用,因此其应用的广泛性受到限制。

侯东伟^[10]基于LVDT非接触式测量法^[23](图2(a))

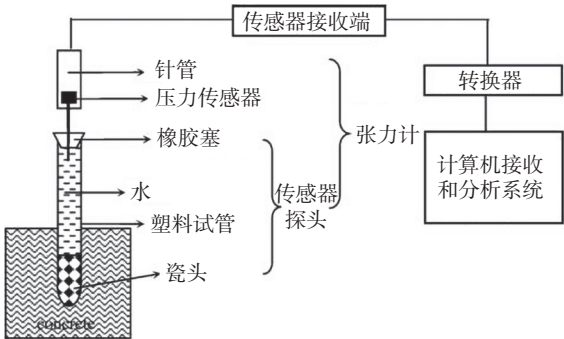
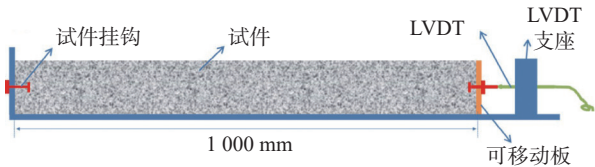
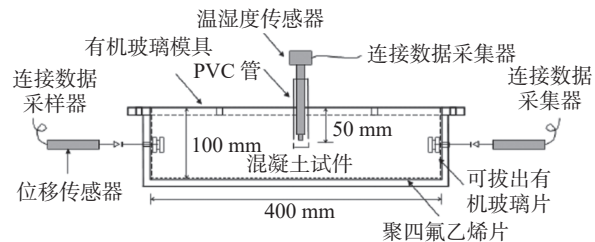


图1 孔隙压力测量装置简图^[18]

Fig. 1 Schematic diagram for capillary pressure measurement device^[18]



(a) 传统LVDT法自收缩测试装置



(b) 侯东伟自收缩测试装置

图2 LVDT法自收缩测试装置^[10]

Fig. 2 Autogenous shrinkage measurement device based on LVDT method^[10]

设计了自收缩-相对湿度一体化测试装置(图 2(b)),但试件和传感器在试验过程中易受到人为干扰。Tazawa 等^[24]设计了基于千分表法的自收缩测试装置,该装置在操作上不易对中测头,且无法连续测量。安明哲等^[25]改进了 Tazawa 的装置(图 3),实现了千分表读数的连续记录。

1.2.3 非接触式线性法 非接触式线性法可以弥补接触式传感器与黏弹性阶段混凝土之间存在相对滑移的缺陷。《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)推荐使用非接触法。主要传感器有电感式传感器、电容式传感器、激光位移传感器和电涡流位移传感器等^[26-27],其中电涡流法研究较多且技术较成熟^[28],该方法不仅精度高且可以循环使用。在侯东伟提出的测试装置^[10]基础上,赵海涛等^[29]基于电涡流传感器进行了改进,实现了混凝土在超早龄期自收缩变形和相对湿度的一体化高精度测试(图 4)。

综上所述,目前仍然缺乏统一的自收缩“零点”选取方法和测试指标,各种自收缩变形测试方法和装置各具特色,但也各有局限性。温度及其历程对相对湿度和自收缩发展具有重要影响,但现有自收缩测试装置并不适用于不同温度历程下混凝土自收缩发展的监测,未来应注重开展考虑温度历程影响的混凝土自收缩测试装置的开发。

2 自收缩预测模型

2.1 经验模型

混凝土设计参数,如水胶比、矿物掺合料含量、外加剂的种类及混凝土早龄期性能(相对湿度、抗压强度等)等对自收缩发展有显著影响。目前已有许多考虑混凝土设计参数的自收缩经验预测模型,例如考虑所用水泥类型和混凝土抗压强度的 CEB-FIP 模型^[30],以混凝土内部相对湿度为变量的蒋正武自收缩预测模型^[31],考虑水灰比、水泥类型和温度影响的 Tazawa 模型^[32],还有将矿物掺合料、胶凝材料用量和水胶比作为影响因素的楼瑛模型^[33]等。

这些经验预测模型形式简单,方便实用,为实际工程应用提供了很大便利。但这些经验模型本质上均是基于大量试验数据拟合提出的宏观唯象模型,未能揭示自收缩变形的本质。同时,模型的预测结果与实际有一定差距^[34],且只适用于特定工况,因此存在普适性问题。

2.2 机理模型

2.2.1 基于自干燥机理的自收缩预测模型 自干燥驱动自收缩理论是目前普遍接受的自收缩发展机理。基于该机理提出的主要有毛细孔负压理论、分散压力理论和表面张力理论^[35]等,有研究者基于这些理论提出了自收缩预测模型。

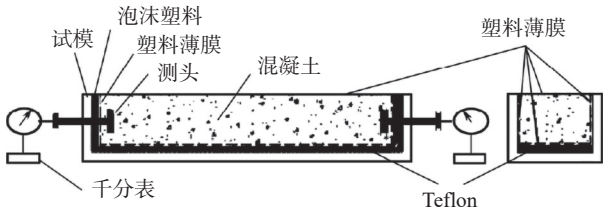
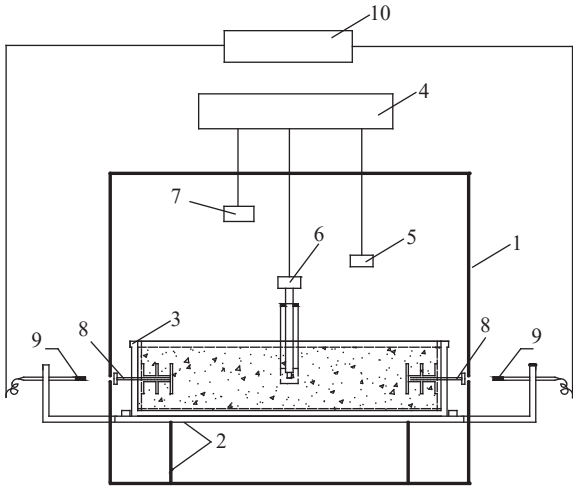


图 3 安明哲自收缩测试装置^[25]

Fig. 3 Autogenous shrinkage measurement device designed and improved by An Mingzhe^[25]



1-试验箱, 2-支架, 3-试件模具, 4-温湿控制主机, 5-箱内环境温湿度传感器, 6-试件内部温湿度传感器, 7-温湿调节器, 8-预埋标靶, 9-位移传感器, 10-位移采集主机

图 4 水泥基材料早龄期自收缩测试装置^[29]

Fig. 4 Early-age autogenous shrinkage measurement device of cementitious materials^[29]

毛细孔负压理论的机理见图 5(a)。该理论认为在给定相对湿度条件下毛细孔隙系统存在一个临界半径 r , 当毛细孔的接触半径大于 r 则毛细孔中不含水, 否则就被水充满并存在毛细孔负压力, 从而导致水泥骨架承受拉应力并产生收缩, 适用于 40%~100% 的相对湿度范围。Hua 等^[36]、Bentz 等^[37] 和 Zhang 等^[38] 也都基于毛细孔负压理论提出了自收缩预测模型。

分散压力理论的机理见图 5(b)。该理论认为自收缩来源于有吸附水分子层存在时两个非常接近的固体表面间的相互作用。当自干燥发生后, 分散压力降低, 两个接近的固体表面将靠得更近, 宏观上表现为收缩, 适用于 40%~100% 的相对湿度条件。但是目前对分散压力的研究仍存在很大争议, 暂时没有公认分散压力测试和计算的方法。

表面张力理论的机理见图 5(c)。该理论认为自收缩主要是由固体凝胶颗粒的表面张力增大所引起, 即 Gibbs-Bingham 收缩。但该理论适用于湿度低于 40% 的情况, 不能解释常规发生在相对湿度大于 70% 条件下的自收缩, Koenders 等^[39] 基于该理论提出了自收缩预测模型。

上述机理模型的参数难以精确确定, 且最终预测结果精度不高, 使其难以得到广泛应用。

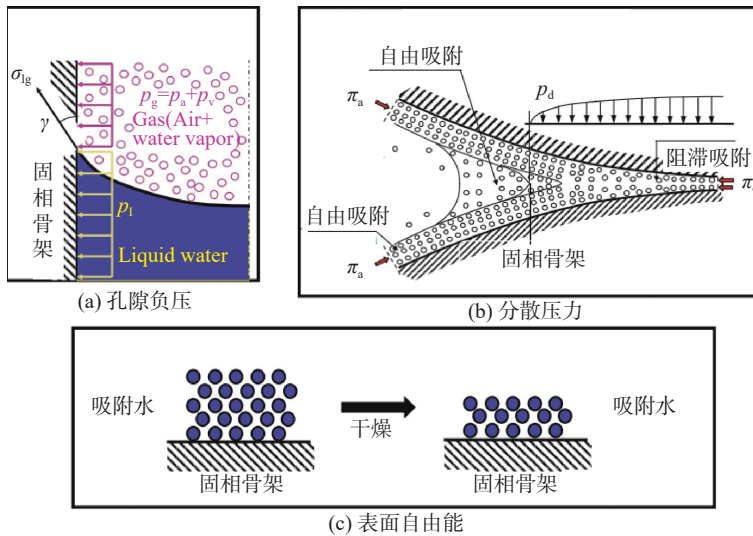


图 5 现有自收缩驱动力理论^[40]

Fig. 5 Current existing theories of autogenous shrinkage driven force^[40]

2.2.2 多尺度自收缩预测模型 混凝土是由不同尺度的物相共同组成的多尺度、非均匀材料, 因此构建的自收缩预测模型应考虑物相组成和尺度等性质。近年来基于多尺度方法建立的自收缩预测模型引起了学术界的广泛关注。多尺度方法从水化反应物与生成物尺度出发, 借助尺度间连接方法依次上升到水泥净浆、水泥砂浆和混凝土尺度, 其输入参数是混凝土内部微观和宏观性能, 如微观孔结构、变形模量和内部相对湿度等。

目前已有一些研究者基于多尺度方法进行了水泥基材料的自收缩预测模型构建的尝试。Xi 等^[41] 提出了跨纳米、微米和毫米 3 个尺度的水泥浆和混凝土的收缩多尺度模型, 但相关计算参数取值难以确定; Pichler 等^[42] 将混凝土分为水化产物、净浆、砂浆和宏观 4 个尺度, 基于微观力学和毛细孔负压理论, 借助自洽法、M-T(Mori-Tanaka)法等均匀化方法, 提出了水泥基材料多尺度自收缩模型, 但该模型与混凝土内部水分分布未建立直接联系; Liu 等^[43] 将混凝土分为净浆、砂浆和混凝土 3 个尺度, 运用渐近展开理论对各尺度代表体积单元之间进行连接; Liu 等^[44] 将水泥基材料分为球状 C-S-H、高密度 C-S-H 和低密度 C-S-H、水泥浆体、水泥砂浆和混凝土 4 个尺度, 以毛细孔负压力和分散压力为干燥收缩的驱动力, 基于 3D 格构模型提出了干燥收缩的多尺度预测模型; Zhao 等^[45] 基于连续介质微观力学和热动力学理论, 借助复合模型^[46]

提出了跨水化产物、水泥净浆、砂浆和混凝土 4 个尺度的多尺度自收缩预测模型。

综上所述,尺度及其物相划分、输入参数和均匀化方法三方面是构建自收缩多尺度预测模型的关键。当前已有的自收缩多尺度预测模型的尺度划分及物相不尽相同,统一且认可度高的尺度及物相划分是高精度多尺度自收缩预测模型的基础,需要未来进一步讨论与研究。

输入参数对自收缩多尺度模型十分重要,可分为两类:一类是收缩驱动力参数,如内部相对湿度等;另一类是弹性参数,如变形模量和泊松比等。当前已有模型在参数取值方面仍比较粗糙,特别是弹性参数。因此,多尺度模型的输入参数精细化仍是一个重要研究方向。同时,当前多尺度自收缩预测模型以毛细孔负压力为驱动力的占主流,但是如前所述,自收缩驱动力还需进一步深化研究,这也是提高自收缩多尺度预测模型精度和合理性的有效办法。

在均匀化方法方面,当前自收缩多尺度预测模型采用的方法各异,如 M-T 法、自洽法和广义自洽法等,各均匀化方法均有自己的优势和局限性,更高精度的均匀化方法等尺度间连接方法需进一步研究。

目前已有自收缩多尺度预测模型的研究对象几乎均为普通水泥基材料,伴随着收缩调控措施,如掺膨胀剂和内养护剂等,在现代混凝土中发挥着愈发重要作用的新形势,未来可进一步开展考虑收缩调控措施影响的现代混凝土自收缩多尺度预测模型研究。

3 自收缩调控措施

3.1 掺加矿物掺和料和纤维

掺加矿物掺和料,如粉煤灰和矿渣等,以减少混凝土中的水泥用量,是有效的减缩途径,同时可以节约生产成本和改善混凝土长期性能,因而应用广泛。但是水泥被过多替代将会削弱混凝土力学性能。

向混凝土中掺加纤维,如钢纤维等,利用纤维的黏结作用可以有效约束混凝土微裂缝的扩展。从微观角度看,纤维能够将毛细孔和微米、纳米级孔隙连通起来,能够抑制毛细孔内自干燥的发生^[47]。但在实际操作中,纤维由于不易均匀分散、易引起应力集中且成本较高等问题而应用受限。

3.2 掺加减缩剂和膨胀剂

减缩剂本质为表面活性剂,减缩剂分子能够有效减小毛细孔内溶液表面张力^[48],同时可以起到延缓水泥水化、提高内部相对湿度和促进混凝土膨胀^[49]的作用。随着减缩剂掺量增大,减缩效果越发明显。但是,较大掺量的减缩剂对混凝土早期强度发展不利。

向混凝土中引入膨胀剂,利用其水化产物结晶生长过程中对水泥骨架施加的结晶压力和吸水肿胀压力促使混凝土膨胀,以达到补偿收缩的目的^[50]。目前工程中应用最广泛的膨胀剂是硫铝酸钙类、氧化钙类和氧化镁类膨胀剂^[51]。硫铝酸钙类膨胀剂的膨胀源是钙矾石,钙矾石生长过程伴随着混凝土体积增大。钙矾石受温度影响很大,在 65℃ 时即开始分解,当温度恢复后会重新生成钙矾石,这种延迟效应会对硬化混凝土微观结构造成危害;氧化钙类膨胀剂的膨胀效率高达 97%,但是氧化钙水化速度快^[52],1~4 d 便可达到稳定,在低水胶比混凝土中后期会发生“回缩”^[53];而氧化镁膨胀剂在后期逐渐发挥其膨胀效能,其膨胀历程更符合大坝等水工结构的温度历程,因此水工结构普遍采用氧化镁膨胀剂。为了解决膨胀剂膨胀历程与混凝土强度发展的适应性问题,充分利用膨胀效能,目前已研发了双源膨胀剂,如氧化钙-硫铝酸钙和钙镁复合膨胀剂等。

温度和湿度对膨胀剂的水化历程和膨胀效能有重要影响^[54-55],但现有关于膨胀剂水化历程和改善混凝土变形性能效果的研究大多在恒温环境下开展,这与混凝土内部实际温度变化历程不匹配,需深入研究膨胀剂作用效果与温湿度历程的关系。

3.3 内养护剂

内养护可以克服蓄水、洒水养护方法的渗透深度有限的缺陷,内养护材料在混凝土内部能够发挥蓄水

库的作用,当水泥水化引发自干燥时即可释放预吸收水来缓解自干燥,从而实现内部养护的效果^[56]。目前最主要的内养护材料是超吸水树脂(SAP)^[57]与多孔轻骨料,如沸石、页岩和浮岩等。内养护材料的孔结构、粒径分布、含水量变化规律及内养护水分分布规律等影响和决定了内养护材料对混凝土微观结构和宏观性能的作用方式^[58-60]。当前关于内养护混凝土的研究多集中在其对强度、内部相对湿度及收缩变形等宏观性能的调控方面,对内养护材料释水机理及规律的认识仍然不足。

近年来,中子成像^[61]和低场核磁共振^[62](LF-NMR)技术以其无损连续监测的优势而被应用于水泥基材料的内部水分传输机理研究。中子成像技术基于中子穿过被测物体时与氢质子作用(散射和吸收等)而使得中子束强度发生衰减的原理,通过信号探测器成像来记录被测物体的中子射线透射信息,其所得图像能够定量分析并计算得到材料内部结构及分布状况。张鹏^[63]基于中子成像技术直观表现了开裂混凝土的水分侵入过程和水分重分布现象,并明确了冻融作用对混凝土吸水性能的影响(见图6(a)); Trtik等^[64]借助中子成像技术研究了预湿轻骨料在水泥砂浆第1天水化龄期内的释水速率与内养护水分传输距离(见图6(b),红色与蓝色分别表示得水与失水区域),结果表明轻骨料释水相对较快且水分近乎匀速传输了至少3 mm; Trtik等^[65]基于中子成像技术探究了SAP在水泥砂浆中的吸、释水规律(见图6(c),球内阴影表示水分),通过该试验直观展现了SAP预吸收水分随水化龄期的变化历程。

低场核磁共振技术是另一项近年来在水泥基材料研究领域崭露头角的先进技术,其主要指标是弛豫时间(纵向弛豫时间 T_1 与横向弛豫时间 T_2)和弛豫信号强度^[66],通过监测施加低频磁场后被测物质内部水分子中氢质子的弛豫时间及其对应信号强度,建立弛豫信号强度关于弛豫时间的图像,可用来反映水泥基材料的水化动力学、孔结构分布和毛细吸水动力学等与水分状态相关的性能。Zhao等^[67]基于低场核磁共振技术,利用孔径与 T_2 关系($d = CT_2$,其中: d 为孔隙直径, nm; C 为转换系数,取48 nm/ms; T_2 为孔内水分子的横向弛豫时间, ms),研究了钙镁复合膨胀剂与水化温升抑制剂对水泥砂浆早期龄期微观孔结构的影响(见图7(a)); Chidiac等^[68]借助低场核磁共振技术定量分析了SAP吸/释水量及其内养护效率,得出SAP的吸/释水倍率均为25 g/g SAP且与SAP含量成反比的结论; Gu等^[69]基于低场核磁共振技术的 T_1 - T_2 信号谱图定量分析了多孔页岩内液体成分及含量。同样基于 T_1 - T_2 信号谱图, Song等^[70]研究了在蒸、煮等条件下肉类中水分状态变化历程(见图7(b)),这些研究为低场核磁共振技术应用于内养护混凝土内部水分传输机理研究提供了参考,同时展现了低场核磁共振技术在该研究领域中的应用的潜力和前景。

综上所述,中子成像和低场核磁共振技术是未来进行混凝土内部水分传输机理及规律研究的重要方法,具有广阔的应用前景,但是当前关于将这两种技术应用于探究内养护混凝土内部水分传输机理的研究仍相对较少。

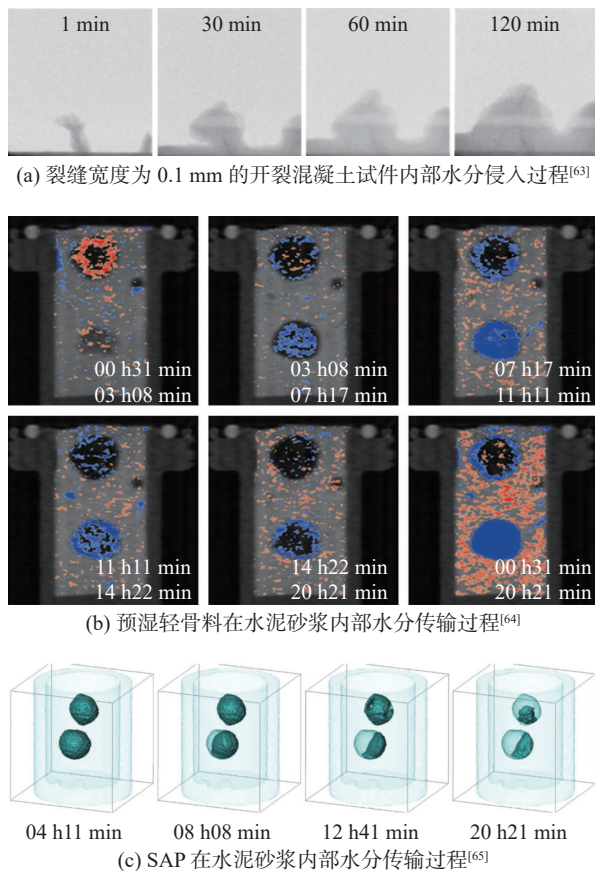
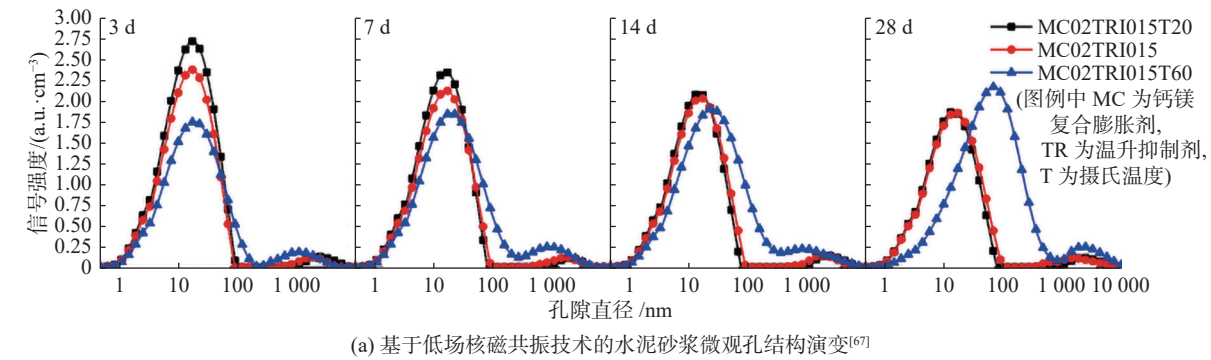
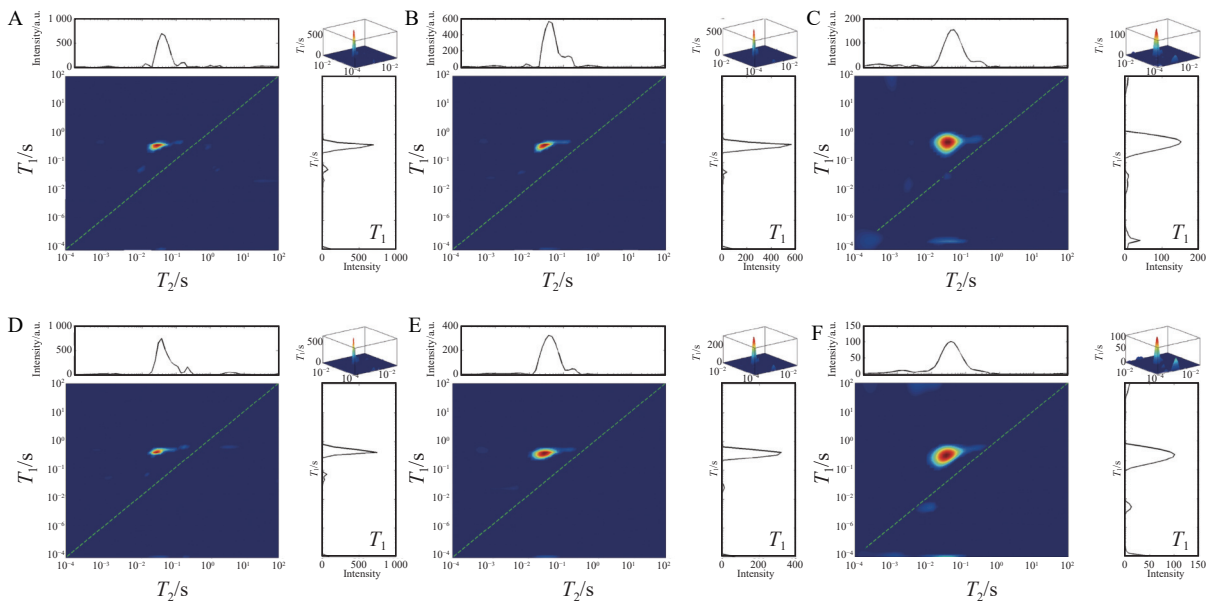


图6 基于中子成像技术的水泥基材料内部水分传输规律研究

Fig. 6 Neutron imaging-based water migration regulation study within cement-based materials



(a) 基于低场核磁共振技术的水泥砂浆微观孔结构演变^[67]



(b) 基于低场核磁共振技术的水分状态演变^[70]

图 7 基于低场核磁共振技术的物质内部水分传输规律研究

Fig. 7 LF-NMR based water transport regulation study within substances

3.4 多元调控

在严酷服役环境下,以上单一调控措施的效率往往是不够的。因此,近年来已有研究者尝试多元调控法,即将两种及以上的收缩调控技术复合使用。Zhao 等^[71]研究表明内养护材料与氧化钙膨胀剂复合使用能够表现出协同减缩作用,其变形性能优于单一内养护作用;Zhang 等^[72]研究发现氧化镁膨胀剂和减缩剂复合使用可以有效减小自收缩,且氧化镁可以弥补减缩剂后期减缩效率下降的缺点;秦鸿根等^[73]证实了SAP可以显著提高膨胀混凝土的膨胀率,且对强度和耐久性无不利影响;Oliveira 等^[74]研究表明减缩剂和膨胀剂复合使用对自密实混凝土的减缩同样表现出协同作用。

多元调控技术可以实现不同调控技术之间的协调工作,且能够弥补各自缺陷,甚至能达到“1+1>2”的效果。因此,多元调控将成为现代混凝土自收缩调控的发展趋势。

4 结 语

本文从自收缩测试方法(含“零点”)、自收缩预测模型和自收缩调控措施三方面综述了近些年关于自收缩及其调控的研究进展,得出以下结论:

(1)凝结时间物理意义明确,是最常用的自收缩“零点”,孔隙负压测试技术可直接测试混凝土凝结时间,应用前景广阔。体积法主要用于水泥净浆、砂浆自收缩变形测试;适用于混凝土测试的线性法中,相比于接触式,非接触式具有可重复、高精度、测试时间早等优势。但是尚没有统一的自收缩测试装置和方法,特别是适用于不同温度历程条件下的仍有待进一步研究和开发。

(2)自收缩经验模型使用简单但普适性较差,目前基于自干燥机理的预测模型在参数取值上难以精确化,有待进一步改进。基于多尺度方法的机理模型考虑了混凝土基本性能,是未来的主流研究方向。目前多尺度自收缩预测模型的尺度划分和尺度间相容方法各异,需提出合理的多尺度模型。另外,多尺度模型所用微观性能参数取值也需要进一步研究。同时,随着收缩调控措施的发展,考虑收缩调控措施影响的多尺度自收缩预测模型值得进一步研究。

(3)单独掺加矿物掺合料、纤维、减缩剂、膨胀剂和内养护剂等均能有效降低混凝土收缩与开裂风险。实践表明,多元调控的减缩效果大于单种调控措施。但是,关于膨胀剂的膨胀效能与混凝土温湿度之间的定量关系研究尚未深入进行。另外,内养护混凝土内部水分传输规律研究相对较少,深入研究更是鲜有报道,且缺少有效的测试方法;中子成像和低场核磁共振技术在相关研究中拥有巨大潜力和广阔前景。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范: DL/T 5207—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005. (National Development and Reform Commission. Technical specification for abrasion and cavitation resistance of concrete in hydraulic structures: DL/T 5207—2005[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005. (in Chinese))
- [2] LIU K Z, YU R, SHUI Z H, et al. Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for ultra-high performance concrete(UHPC) based on appropriate application of porous pumice[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 369-381.
- [3] KHEIR J, KLAUSEN A, HAMMER T A, et al. Early age autogenous shrinkage cracking risk of an ultra-high performance concrete(UHPC) wall: modelling and experimental results[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 257: 108024.
- [4] 胡钰泉, 胡少伟, 黄逸群. 带裂缝混凝土轴拉力学性能及Kaiser效应试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 67-75. (HU Yuquan, HU Shaowei, HUANG Yiqun. Experimental studies on mechanical properties and Kaiser effect of concrete with cracks under axial tensile stress[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(3): 67-75. (in Chinese))
- [5] LIU K Z, YU R, SHUI Z H, et al. Influence of external water introduced by coral sand on autogenous shrinkage and microstructure development of ultra-high strength concrete(UHSC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 119111.
- [6] 康春涛, 贡力, 王忠慧, 等. 利用灰色残差GM(1, 1)-Markov模型预测水工混凝土的劣化[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 95-103. (KANG Chuntao, GONG Li, WANG Zhonghui, et al. Prediction of hydraulic concrete degradation based on gray residual GM(1, 1)-Markov model[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(1): 95-103. (in Chinese))
- [7] 杜玉会, 李双喜. 低活性矿渣内养护水泥砂浆自收缩与孔结构分析[J]. 水利水运工程学报, 2022 (3): 136-144. (DU Yuhui, LI Shuangxi. Analysis of autogenous shrinkage and pore structure of cement mortar with low active slag as internal curing material[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022 (3): 136-144. (in Chinese))
- [8] MARUYAMA I, LURA P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105770.
- [9] HU Z L, SHI C J, CAO Z, et al. A review on testing methods for autogenous shrinkage measurement of cement-based materials[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2013, 2(2): 161-171.
- [10] 侯东伟. 混凝土自身与干燥收缩一体化及相关问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (HOU Dongwei. Integrative studies on autogenous and drying shrinkage of concrete and related issues[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [11] DARQUENNES A, STAQUET S, DELPLANCKE-OGLETREE M P, et al. Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(3): 368-379.

- [12] BENTUR A. Early-age shrinkage and cracking in cementitious system[J]. *Concrete Science and Engineering (France)*, 2001, 3(9): 3-12.
- [13] ZHAO H T, LI J H, LIU H, et al. Effects of shale and CaO incorporation on mechanical properties and autogenous deformation of early-age concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2021, 36(5): 653-663.
- [14] ASTM Committee on Standard. Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar: ASTM C1698-09[S]. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2009.
- [15] HUANG H, YE G. Examining the “time-zero” of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 97: 107-114.
- [16] ZHANG J, HOU D W, SUN W. Experimental study on the relationship between shrinkage and interior humidity of concrete at early age[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62(3): 191-199.
- [17] CUSSON D. Effect of blended cements on efficiency of internal curing of HPC, ACI SP-256[C]//*Proceedings of Internal curing of high-performance concrete: laboratory and field experiences*. Michigan: Farmington Hills, 2008: 105-120.
- [18] MIAO C W, TIAN Q, SUN W, et al. Water consumption of the early-age paste and the determination of “time-zero” of self-desiccation shrinkage[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(11): 1496-1501.
- [19] MA Y, YANG X, HU J, et al. Accurate determination of the “time-zero” of autogenous shrinkage in alkali-activated fly ash/slag system[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 177: 107367.
- [20] 张纪阳, 关博文, 马慧, 等. 用电阻率法研究氯氧镁水泥凝结时间[J]. *混凝土*, 2016(11): 21-23, 27. (ZHANG Jiyang, GUAN Bowen, MA Hui, et al. Study on setting time of magnesium oxychloride cement using electrical resistivity method[J]. *Concrete*, 2016(11): 21-23, 27. (in Chinese))
- [21] 田倩. 低水胶比大掺量矿物掺合料水泥基材料的收缩及机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. (TIAN Qian. Shrinkage and the mechanism of the cement-based material at low water to binder ratio incorporating high volume mineral admixtures[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese))
- [22] 涂妮, 张浩. 混凝土收缩试验研究方法进展[J]. *低温建筑技术*, 2016, 38(1): 5-7. (TU Ni, ZHANG Hao. Research progress in methods of concrete shrinkage test[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2016, 38(1): 5-7. (in Chinese))
- [23] LIU Z C, HANSEN W. Aggregate and slag cement effects on autogenous shrinkage in cementitious materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 429-436.
- [24] TAZAWA E I, MIYAZAWA S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(8): 1633-1638.
- [25] 安明哲, 覃维祖, 朱金铨. 高强混凝土的自收缩试验研究[J]. *山东建材学院学报*, 1998, 12(增刊1): 139-143. (AN Mingzhe, TAN Weizu, ZHU Jinquan. Experimental study on autogenous shrinkage of high-strength concrete[J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 1998, 12(Suppl1): 139-143. (in Chinese))
- [26] BENDIMERAD A Z, ROZIÈRE E, LOUKILI A. Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 733-745.
- [27] JIANG C H, YANG Y, WANG Y, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 61: 260-269.
- [28] SHEN D J, WANG X D, CHENG D B, et al. Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 512-522.
- [29] 赵海涛, 吴胜兴, 陈育志, 等. 水泥基材料早龄期自收缩测量装置: CN203720173U[P]. 2014-07-16. (ZHAO Haitao, WU Shengxing, CHEN Yuzhi, et al. Measurement device for early-age autogenous shrinkage of cementitious materials: CN203720173U[P]. 2014-07-16. (in Chinese))
- [30] CEB-FIP. Structural concrete-textbook on behaviour, design and performance updated knowledge of the CEB/FIP model code 1990 [M]. Switzerland: Federation Internationale du B'eton, 1999: 2.
- [31] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 水泥浆体中自身相对湿度变化与自收缩的研究[J]. *建筑材料学报*, 2003, 6(4): 345-349. (JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Peiming. Study on autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of cement pastes[J]. *Journal of Building Materials*, 2003, 6(4): 345-349. (in Chinese))
- [32] TAZAWA E I, MIYAZAWA S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste[J]. *Cement and*

[Concrete Research](#), 1995, 25(2): 281-287.

- [33] 楼瑛, 罗素蓉. 混凝土自收缩的测定及若干因素对自收缩影响规律的研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 100-105. (LOU Ying, LUO Surong. The study of how to measure autogenous shrinkage of concrete and a number of factors that influence it[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 100-105. (in Chinese))
- [34] YOO S W, KWON S J, JUNG S H. Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures[J]. [Construction and Building Materials](#), 2012, 34: 1-10.
- [35] LURA P, JENSEN O M, BREUGEL K V. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms[J]. [Cement and Concrete Research](#), 2003, 33(2): 223-232.
- [36] HUA C, ACKER P, EHRLACHER A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste: I. Modelling at macroscopic scale[J]. [Cement and Concrete Research](#), 1995, 25(7): 1457-1468.
- [37] BENTZ D P, GARBOCZI E J, QUENARD D A. Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: application to porous Vycor glass[J]. [Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering](#), 1998, 6(3): 211-236.
- [38] ZHANG J, HOU D W, HAN Y D. Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete[J]. [Construction and Building Materials](#), 2012, 29: 230-240.
- [39] KOENDERS E A B, BREUGEL K V. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste[J]. [Cement and Concrete Research](#), 1997, 27(10): 1489-1499.
- [40] FAIRBAIRN E M R, AZENHA M. Thermal cracking of massive concrete structures[M]. Switzerland: Springer Nature, 2019.
- [41] XI Y P, JENNINGS H M. Shrinkage of cement paste and concrete modelled by a multiscale effective homogeneous theory[J]. [Materials and Structures](#), 1997, 30(6): 329-339.
- [42] PICHLER C, LACKNER R, MANG H A. A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-age cement-based materials[J]. [Engineering Fracture Mechanics](#), 2007, 74(1/2): 34-58.
- [43] LIU S, LIU X, YUAN Y, et al. A stochastic multi-scale model for prediction of the autogenous shrinkage deformations of early-age concrete[J]. [Computers, Materials & Continua](#), 2014, 39(2): 85-112.
- [44] LIU L, WANG X C, CHEN H S, et al. Numerical modeling of drying shrinkage deformation of cement-based composites by coupling multiscale structure model with 3D lattice analyses[J]. [Computers & Structures](#), 2017, 178: 88-104.
- [45] ZHAO H T, LIU J P, YIN X L, et al. A multiscale prediction model and simulation for autogenous shrinkage deformation of early-age cementitious materials[J]. [Construction and Building Materials](#), 2019, 215: 482-493.
- [46] EGUCHI K, TERANISHI K. Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model[J]. [Cement and Concrete Research](#), 2005, 35(3): 483-493.
- [47] LIM J L G, RAMAN S N, SAFIUDDIN M, et al. Autogenous shrinkage, microstructure, and strength of ultra-high performance concrete incorporating carbon nanofibers[J]. [Materials](#), 2019, 12(2): 320.
- [48] RONGBING B, JIAN S. Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials[J]. [Cement and Concrete Research](#), 2005, 35(3): 445-448.
- [49] 孔爱散, 周长顺. 减缩剂在水泥基材料中的应用研究进展(II)——体积稳定性[J]. [混凝土](#), 2020(6): 79-84, 89. (KONG Aisan, ZHOU Changshun. Research progress of application of shrinkage-reducing admixture in cement-based materials(II)—Volume stability[J]. [Concrete](#), 2020(6): 79-84, 89. (in Chinese))
- [50] 殷新龙, 赵海涛, 仇宁, 等. 补偿收缩混凝土研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 60-65. (YIN Xinlong, ZHAO Haitao, QIU Ning, et al. Research progress of shrinkage-compensating concrete[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(4): 60-65. (in Chinese))
- [51] LIU Z, CUI X H, TANG M S. MgO-type delayed expansive cement[J]. [Cement and Concrete Research](#), 1991, 21(6): 1049-1057.
- [52] HIGUCHI T, EGUCHI M, MORIOKA M, et al. Hydration and properties of expansive additive treated high temperature carbonation[J]. [Cement and Concrete Research](#), 2014, 64: 11-16.
- [53] 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.
- [54] 姜正平, 韩静云, 张秀志. 不同养护条件下膨胀剂对水泥砂浆收缩性影响的研究[J]. [混凝土与水泥制品](#), 2003(3): 12-14.

- (JIANG Zhengping, HAN Jingyun, ZHANG Xiuzhi. Study of influence of expansive agent on mortar shrinkage under different condition of curing[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2003(3): 12-14. (in Chinese))
- [55] 阎培渝, 陈广智. 养护温度和胶凝材料组成对膨胀剂限制膨胀率的影响[J]. *建筑技术*, 2001, 32(1): 22-23. (YAN Peiyu, CHEN Guangzhi. Impact of curing temperature and gelling material composition to restricted expansion rate of expansion agent[J]. *Architecture Technology*, 2001, 32(1): 22-23. (in Chinese))
- [56] POURJAVADI A, FAKOORPOOR S M, KHALOO A, et al. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles[J]. *Materials & Design*, 2012, 42: 94-101.
- [57] 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.
- [58] CASTRO J, KEISER L, GOLIAS M, et al. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(10): 1001-1008.
- [59] SHEN P L, LU L N, WANG F Z, et al. Water desorption characteristics of saturated lightweight fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 106: 103456.
- [60] PAUL A, MURGADAS S, DELPIANO J, et al. The role of moisture transport mechanisms on the performance of lightweight aggregates in internal curing[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268: 121191.
- [61] ZHANG P, WITTMANN F H, LURA P, et al. Application of neutron imaging to investigate fundamental aspects of durability of cement-based materials: a review[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 108: 152-166.
- [62] ZHOU C S, REN F Z, ZENG Q, et al. Pore-size resolved water vapor adsorption kinetics of white cement mortars as viewed from proton NMR relaxation[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 105: 31-43.
- [63] 张鹏. 基于中子成像的水泥基材料毛细吸水特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010. (ZHANG Peng. Water capillary suction characteristics of cement-based materials based on neutron radiography method[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [64] TRTIK P, MÜNCH B, WEISS W J, et al. Release of internal curing water from lightweight aggregates in cement paste investigated by neutron and X-ray tomography[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 651(1): 244-249.
- [65] TRTIK P, MUENCH B, WEISS W J, et al. Neutron tomography measurements of water release from superabsorbent polymers in cement paste[C]//*Proceedings of International Conference on Material Science (Volume III)*. Germany: RILEM Publications, 2010: 175-185.
- [66] MCDONALD P J, KORB J P, MITCHELL J, et al. Surface relaxation and chemical exchange in hydrating cement pastes: a two-dimensional NMR relaxation study[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(1): 011409.
- [67] ZHAO H T, LI X L, CHEN X D, et al. Microstructure evolution of cement mortar containing MgO-CaO blended expansive agent and temperature rising inhibitor under multiple curing temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 278: 122376.
- [68] CHIDIAC S E, MIHALJEVIC S N, KRACHKOVSKIY S A, et al. Efficiency measure of SAP as internal curing for cement using NMR & MRI[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 278: 122365.
- [69] GU M X, XIE R H, JIN G W. A new quantitative evaluation method for fluid constituents with NMR T1-T2 spectra in shale reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 99: 104412.
- [70] SONG Y, HUANG F, LI X, et al. Water status evolution of pork blocks at different cooking procedures: a two-dimensional LF-NMR T1-T2 relaxation study[J]. *Food Research International*, 2021, 148: 110614.
- [71] ZHAO H T, LIU H, WAN Y, et al. Mechanical properties and autogenous deformation behavior of early-age concrete containing pre-wetted ceramsite and CaO-based expansive agent[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 120992.
- [72] ZHANG Z B, XU L L, TANG M S. Synergistic effect of MgO-based expansive agent and shrinkage reducing admixture on compensating the shrinkage of cementitious materials[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 163-167: 2350-2355.
- [73] 秦鸿根, 高美蓉, 庞超明, 等. SAP内养护剂改善膨胀混凝土性能及其机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(3): 394-399. (QIN Honggen, GAO Meirong, PANG Chaoming, et al. Research on performance improvement of expansive concrete with

internal curing agent SAP and its action mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(3): 394-399. (in Chinese))

- [74] JOSÉ OLIVEIRA M, RIBEIRO A B, BRANCO F G. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 52: 267-275.

Advances in autogenous shrinkage and its regulation of modern concrete

LI Jinghao^{1,2}, HE Xiaobo³, HU Shaowei¹, JIANG Jianhua², ZHAO Haitao²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Huzhou Nanxun City Investment & Development Group Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Concrete is the most widely-used construction materials, and modern concrete is produced with a low water to binder ratio and high binder materials content to obtain high performances, leading to a significant increase in autogenous shrinkage (AS), thus triggering a large tensile stress under restraint and further a serious early-age cracking, which deteriorates the concrete durability, shortens the service life and causes an incalculable loss, especially in hydraulic mass concrete and thin-walled concrete structures. This paper reviews the literatures on the latest achievements and progress at home and abroad for AS and relevant regulations in recent years, summarizing and comparatively analyzing the latest achievements and progress in methods and devices for AS “time-zero” and deformation measurement, AS prediction models and AS regulation techniques, pointing out the flaws in the current research and giving further research direction on some key problems, and setting a reference for practical engineering and further AS studies.

Key words: modern concrete; autogenous shrinkage; measurement methods; prediction model; shrinkage regulation