

文章编号:0559-9350(2021)06-0647-13

裂缝对混凝土中水分传输影响研究进展

王立成, 穆林钧, 邹 凯

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 由荷载或环境因素产生的混凝土裂缝, 不仅降低了混凝土抵抗水分侵入的能力, 还为侵蚀性介质侵入混凝土内部提供附加通道, 造成钢筋混凝土结构耐久性不足和使用寿命降低。本文从试验研究和数值模拟两个方面, 系统评述了裂缝对混凝土中水分传输影响的研究进展。研究发现, 混凝土裂缝中的水分传输系数与裂缝宽度的二次或三次方成正比; 裂缝迂曲度的增加能显著降低水分的传输速度; 裂缝粗糙度的变化对水分传输速度影响很小; 裂缝密度的增加能增大混凝土的吸水量。此外, 裂缝的自愈合能够降低水分在混凝土裂缝中的传输速度。研究裂缝对混凝土中水分传输规律的影响可为钢筋混凝土结构的耐久性设计提供理论依据。最后, 在总结已有研究成果的基础上, 分析了开裂混凝土中水分传输研究存在的问题, 并对未来可能的研究方向给出了建议。

关键词: 混凝土; 水分传输; 裂缝; 耐久性; 研究进展

中图分类号: TV431

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20201035

1 研究背景

实际工程中混凝土结构往往承受干燥收缩、热应力、钢筋锈蚀、温湿度变化及施工不良、静/动荷载作用等多种不利外界因素的影响, 导致混凝土存在不同程度的损伤, 这些损伤主要体现在混凝土内部产生的裂缝或微裂缝^[1-4]。裂缝的存在不仅直接降低混凝土结构的力学性能, 而且不同程度上造成混凝土内部孔隙结构的相互连通, 加快水分和侵蚀性介质(如硫酸根离子、氯离子等)的传输速度^[5-7], 进而导致混凝土结构的劣化损伤以及内部钢筋的锈蚀。近年来, 国内外学者针对开裂混凝土的水分传输问题开展了大量的研究, 其出发点可归结于以下两点^[8-9]: (1)水的存在是混凝土大多数劣化反应(化学、物理)的先决条件; (2)水是有害物质(氯离子等)侵入混凝土内部的传输载体。混凝土结构的服役寿命在“裂缝→吸水性增加→性能降低”的周期循环和“劣化-开裂-透水性增强-进一步劣化”的连锁反应下不断降低^[9]。因此, 准确地分析裂缝对混凝土中水分传输规律的影响是开展复杂环境条件下混凝土结构耐久性分析和使用寿命评估的重要前提条件。

混凝土中水分传输包括渗透、毛细吸水、蒸发等多种机制, 水分在混凝土内部主要通过气相和液相两种形式进行传输, 而不同尺度的微观结构和含水量导致水分在混凝土内部可能发生一种或者多种机制的传输。裂缝形态参数(包括裂缝宽度、密度、长度、粗糙度和迂曲度等)是影响混凝土裂缝中水分传输速度的重要因素^[10-11]。由于裂缝诱导产生方式、养护条件以及水传输测试方法等存在较大差异, 获得的混凝土水分传输系数和裂缝宽度阈值(Threshold crack width)等结论尚不统一, 甚至存在较多相互矛盾之处。本文在对国内外相关文献分析的基础上, 系统评述液态水在开裂混凝土中以渗透和毛细吸水为主要传输形式的研究进展, 讨论裂缝宽度、粗糙度、迂曲度和连通性、裂缝密度和裂缝自愈合等对裂缝或开裂混凝土中水分传输的影响规律, 分析目前研究中存在的问题, 并对未

收稿日期: 2020-12-14; 网络首发时间: 2021-03-19

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210319.1152.003.html>

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2020-MS-100); 绿色建筑材料国家重点实验室开放基金项目(2018)

作者简介: 王立成(1975-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土强度理论和钢筋混凝土耐久性研究。

E-mail: wanglich@dlut.edu.cn

来的研究方向给出建议。

2 混凝土裂缝观测方法

为了确保混凝土结构服役期间的安全性,裂缝观测是结构维护中不可缺少的手段。目前研究者常采用扫描电子显微镜法、X射线断层扫描成像法(CT)、数字图像处理技术等对裂缝形貌进行观测,这些方法主要是从试件或材料表面辨识裂缝形貌,进而量化表征裂缝形态参数(包括裂缝宽度、长度、密度等)并建立其与混凝土渗透性的关系^[12]。现代化的观测技术避免了试验测试过程中对混凝土裂缝的二次破坏,混凝土裂缝观测的主要方法可归纳为以下4种。

2.1 染色侵入法(Dye-impregnation method) 为获得清晰的混凝土裂缝几何形态,在观测时可采用染料浸渍处理混凝土裂缝表面。例如:Bisschop等^[13]采用荧光环氧树脂浸渍裂缝并通过荧光显微镜观测混凝土的裂缝形态。Zhou等^[14]采用极细碳黑染料(约0.5 nm)浸渍混凝土裂缝表面,并利用数字光学显微镜观察裂缝的几何形状。Berrocal等^[15]开展了钢筋混凝土梁(RC)和纤维增强混凝土梁(R/FRC)弯曲裂缝的试验,在裂缝中浸渍染色的环氧树脂之后,完成图像处理和分析,进而研究混凝土内部裂缝的形态。Li等^[16]在混凝土加热后将环氧树脂浸渍进入其裂缝中并在室温下硬化,采用碳化硅纸抛光试件表面和背散射电子图像分析技术(Backscattered electron image analysis),通过场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察超高性能混凝土的裂缝,并通过图像分析进行了表征。染色侵入法的缺点主要是需要在试件表面进行切割、打磨、抛光等操作,表面处理时易造成试件内部的损伤,引入新的裂缝并对水分传输结果产生干扰。

2.2 扫描电子显微镜法(SEM) 扫描电子显微镜(SEM)是观察微观结构变化的有力工具,可以动态观察原始试件裂缝的产生以及扩展过程^[13],且可忽略三维显微图像和高放大倍率等的影响,测试分辨率比较高。缺点在于试件的制备过程比较繁琐,显微镜扫描区域过小。

2.3 X射线断层扫描成像法(X-ray CT) X射线计算机断层扫描法(X-ray CT)是一种有效的无损检测方法,可真实评估完整的三维裂缝几何形态,从而确定裂缝在何处以及如何开始、扩展和合并。Landis等^[17-18]采用X-ray CT研究了砂浆试件的开裂过程。Fan等^[19]和Isaka等^[20]通过X-ray CT和三维(3D)图像重建方法分析了花岗岩的微观孔隙网络变化规律。Wang等^[21]利用X-ray CT探索了轴向压缩下页岩的裂缝演变过程。目前断层扫描成像法的观测范围受到设备分辨率的影响,试件尺寸越大,观测精度就会降低。

2.4 数字图像处理技术 与传统的手动观测方法相比,图像处理技术可提供精确的裂缝几何形态或相关参数结果。裂缝观测的处理难度往往取决于图像的尺寸,提高分辨率可获取混凝土裂缝表面的详细图像。Yang等^[22]提出了图像分析方法用于捕捉裂缝,该方法可在肉眼看不到裂缝之前检测出混凝土的表面裂缝。Rimkus等^[23]利用开发的数字图像处理算法获得对应于裂缝的像素坐标,该算法的主要贡献是实现了裂缝检测的自动化,可以消除传统试验的主观判断误差。Talab等^[24]提出了图像处理的二值化方法(OTSU),利用光学荧光显微镜检测图像中的裂缝。Kim等^[25]基于计算机视觉方法,采用OTSU自动从图像中提取裂缝形态信息。Valença等^[26]综合了图像处理和地面激光扫描(TLS)技术(简称MCrack-TLS),用于评估混凝土桥梁中的裂缝。Mohan等^[27]评述了与裂缝观测相关的50篇文献,总结出图像处理技术自动识别混凝土裂缝形态参数的多种方法。Bayar等^[28]根据数字图像处理技术(DIP)和Voronoi图,利用机器学习算法(MLA)测量、监视混凝土裂缝的宽度、长度、深度和几何形状。这种新颖的现代化技术对裂缝观测具有精确、快速、价格低廉的优点,是一种无损观测方法。

3 开裂混凝土水分传输试验研究

混凝土的耐久性与材料孔隙中的水分传输密切相关。裂缝的存在不仅能促使水分流动的路径相互连通,并且裂缝扩展导致混凝土渗透性不断提高,使得更多水及侵蚀性离子侵入混凝土内部而加

速其劣化。混凝土裂缝中的水分传输与多种因素有关,其中裂缝形态(如裂缝宽度、密度、粗糙度等)被认为是影响开裂混凝土中水分传输的主要因素。因此,对裂缝形态参数及其对水分传输规律的影响进行定量分析可为研究开裂混凝土结构在服役条件下的耐久性评估提供理论支撑。

3.1 裂缝粗糙度 粗糙裂缝表面会导致按裂缝宽度计算得出的裂缝面积与水通过的真实面积存在差异。实际混凝土的裂缝表面往往呈现凹凸不平的形貌,给水的流动带来较大摩擦,进而阻碍水分传输。然而部分学者却得出了相反的试验结果。比如,Akhavan等^[29]采用劈裂拉伸方法产生裂缝,并利用 Darcian flow-thru cell 测试了普通砂浆和掺纤维砂浆圆盘试件的水分传输系数,发现两者之间并不存在显著差异。另外,Akhavan等^[30]采用有机玻璃制备了宽度为 10~220 μm 的裂缝近似模拟开裂的混凝土,采用恒定水头渗透试验测量混凝土的渗透率,光滑裂缝表面试件(绝对粗糙度为 1.70 μm)与粗糙裂缝表面试件(绝对粗糙度为 0.34 μm)测试的水分渗透率相差不超过 5.6%。

Li等^[31]通过三点弯曲法将砂浆圆盘试件劈裂,对开裂试件开展了水分渗透试验,利用激光轮廓仪扫描试件断裂面的形貌,并通过 3D 分形维数定量分析裂缝表面的粗糙度。试验结果表明,水主要在裂缝重新闭合后的残余裂缝开口中渗透,由于裂缝表面的沟道效应优于表面摩擦效应,导致较粗糙的表面具有较大的(初始)水流量,比如相同水灰比($w/c=0.6$)时掺 558 kg/m³ 碎石的初始水流量比未掺碎石时提高了 83%,且相对于水灰比 0.4 时提高了约 7.7 倍。

3.2 裂缝迂曲度和连通性 裂缝的迂曲延长了水分传输路径,降低了开裂混凝土的水分传输速度。Ahmad等^[32]的试验数据表明,当裂缝的迂曲度(定义为等效直裂缝长度和弯曲裂缝长度之比的平方)小于 150 时,混凝土的水分渗透系数随迂曲度的增大而减小,但当裂缝的迂曲度超过 150 时,减小的幅度很小,混凝土可视为具有低渗透性,比如迂曲度 $\tau=149$ 、200、245、275 时,水分渗透系数分别为 5.2×10^{-12} 、 4.8×10^{-12} 、 4.5×10^{-12} 、 4.1×10^{-12} m/s。Bear^[33]发现开裂混凝土的渗透系数与裂缝迂曲度的二次方成反比。Darma等^[34]借助 X-ray CT 在原位扩散测试中利用碳酸铯(Cs_2CO_3)作为示踪剂,研究了开裂混凝土中溶质的传输过程,根据裂缝中示踪粒子的分布给出了溶质的扩散系数。由于扩散过程中溶液不能传输进入所有的裂缝,故引入裂缝气泡参量 ζ ,建立的扩散系数计算公式为:

$$D_{cr} = \frac{\tau}{\delta^2} D_0 \zeta \quad (1)$$

式中: D_0 为溶液中离子的自由扩散系数, m²/s; τ 为裂缝的迂曲度; δ 为裂缝的连通性。

3.3 裂缝宽度 裂缝宽度是影响开裂混凝土水分传输的主要因素,目前的研究主要集中于建立混凝土渗透性的裂缝宽度阈值以及其与水分传输系数之间的定量关系。Akhavan等^[29-30]考虑混凝土裂缝的迂曲度和粗糙度,建立了水分传输系数与裂缝宽度之间的关系式如下:

$$k = \frac{\tau w_{eff}^2}{12(1 + 8.8 R_r^{1.5})} \quad (2)$$

式中: w_{eff} 为有效裂缝宽度, μm; R_r 为裂缝表面的相对粗糙度, $R_r = \frac{R_a}{2w_{eff}}$, R_a 为绝对粗糙度,定义为试件表面凸起的平均高度, μm。

Li等^[35]对裂缝宽度为 80~260 μm 的开裂混凝土试件开展了恒定水头渗透试验(水压 0.1 MPa),测量了试件的水分传输系数,并基于式(2)将 R_r 替换为新的参数 R_s (即相对粗糙度,定义为裂缝表面的实际面积与投影面积之比),结果发现试验值与预测值的相关系数 R^2 均大于 0.8,因此采用修正后的表达式来预测开裂混凝土的水分传输系数:

$$k = \frac{\tau w_{eff}^2}{12(-51 + 45 R_s^{1.5})} \quad (R_s > 1.087) \quad (3)$$

Aldea等^[36]应用反馈-控制劈裂加载试验在混凝土中引入宽度 $w=50 \sim 400$ μm 不等的裂缝,研究了开裂混凝土在 300 mm 水头水压下的渗透性。研究发现,对于普通混凝土,当 $w=200$ μm 时,开裂混凝土的水分渗透系数(约为 6.17×10^{-9} cm/s)比未开裂混凝土(约为 3.66×10^{-8} cm/s)增加了 6 倍,而当 $w > 200$ μm 时,水分渗透系数迅速增加, $w=350$ μm 时的水分传输系数达到 1.0×10^{-5} cm/s,此外还发现水

分传输系数与裂缝宽度的三次方成正比，这与 Van Mullem 等^[37]得出的结论类似。Picandet 等^[9]采用同样的方法开展了混凝土气、水渗透性试验，基于开裂岩石的平行板理论模型建立了混凝土的水分传输系数与裂缝宽度之间的关系，其表达式为：

$$k = \frac{\lambda w^3}{\Delta 12} \tag{4}$$

式中： λ 为裂缝粗糙折减系数； w 为裂缝宽度， μm ； Δ 为裂缝密度， $\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$ 。

先进的成像技术为可视化研究水泥基材料中裂缝宽度对水分传输影响提供了条件。张苑竹等^[38]利用红外热像仪可视化实时追踪水分在开裂混凝土中的运动过程(裂缝宽度 $w=300、500、1000\ \mu\text{m}$)，并基于 Richards 方程及立方定律提出了外水压力作用下(0.1 ~ 0.6 MPa)非饱和开裂混凝土的水分传输方程。结果表明，在相同裂缝宽度下，混凝土的纵向裂缝渗透性比横向裂缝渗透性高，且裂缝宽度与水分传输系数呈正相关。另外，Yang 等^[39-40]采用 X-ray CT 对具有不同裂缝宽度的不饱和砂浆水分传输过程进行了可视化实时监测，发现开裂砂浆中水分为二维传输，且裂缝宽度越大，毛细吸水高度越低；裂缝宽度从 0 增加到 100 μm 时，开裂砂浆的吸水速率呈线性增加；当 $w>100\ \mu\text{m}$ 时，吸水速率逐渐下降，但减小的速度相对慢； $w=100\ \mu\text{m}$ 时，吸水速率达到最大，为 $2.7\times10^{-2}\ \text{mm/s}$ 。

部分学者^[30-32, 36, 41-42]在试验和理论分析的基础上，获得了裂缝宽度阈值(下限值 w_1 ，上限值 w_2)及其对水分传输的影响规律，发现水分传输系数与混凝土本身的材料组成无关，仅与裂缝宽度和外界环境条件有关。本文收集了部分试验结果汇总在表 1 中，主要结论总结如下：(1) $w<w_1$ 时，由于混凝土裂缝宽度很小，水泥水化所产生的 CaCO_3 沉淀等会堵塞裂缝，促进混凝土的裂缝自愈合，使得开裂混凝土的水分传输速度降低，裂缝宽度对水分传输速度影响很小；(2) $w_1\leq w\leq w_2$ 时，虽然混凝土内部颗粒的阻滞效应以及水泥持续水化产生的 CaCO_3 沉淀等影响了水分的传输，但由于裂缝宽度的增加，裂缝中水分传输量也随之增大，此时水分传输不仅沿着裂缝方向继续延伸，同时沿垂直于裂缝方向继续渗透，从而导致裂缝中水分传输系数随着裂缝宽度的增加而增大；(3) $w>w_2$ 时，由于裂缝壁及 CaCO_3 沉淀等的阻滞效应很小，水分很快贯穿裂缝，裂缝中水分与基体混凝土的接触面积增大，此时可忽略水分沿裂缝方向的传输，只考虑沿垂直裂缝面的渗透，开裂混凝土吸水量稳步增加并最终趋于稳定。

表 1 影响水分传输的裂缝宽度阈值

数据来源	水灰比	裂缝诱导产生方式	水传输测试方法	$w_1/\mu\text{m}$	$w_2/\mu\text{m}$
Li 等 ^[35]	0.43	反馈劈裂试验	常水头渗透测试	150	
Aldea 等 ^[36]	0.45	反馈劈裂试验	低压水渗透测试	50	200
Shin 等 ^[42]		劈裂试验	常水头渗透测试	200	300
Wang 等 ^[43]	0.41	反馈劈裂试验	稳态迁移测试	50	200
Hyun 等 ^[44]	0.54	反馈劈裂试验	水渗透测试	50	100
Liu 等 ^[45]	0.25	单轴拉伸试验	变水头渗透测试	50	80
Park 等 ^[46]	0.44	劈裂试验	水渗透测试		200
Akhavan ^[47]	0.37	劈裂试验	Darcian flow-thru cell 测试	60	80

以上研究有助于认识混凝土裂缝宽度对水分传输的影响规律，但不同文献中的试验数据具有很大的离散性，主要体现在两方面：(1)试验中获得的水分渗透系数(K)的量级存在较大差异，例如当裂缝宽度 $w=100\ \mu\text{m}$ 时，Aldea 等^[36]和 Liu 等^[45]获得的 K 值分别约为 $1.58\times10^{-8}\ \text{m/s}$ 和 $2.73\times10^{-8}\ \text{m/s}$ ，而 Park 等^[46]的结果 K 值却仅为 $5.57\times10^{-11}\ \text{m/s}$ ；(2)裂缝宽度阈值不同。由于混凝土组成成分、裂缝诱导产生方式、养护条件以及水传输测试方法等的不同，大量学者在试验中得出的或在计算中采用的 w_1 和 w_2 值具有较大的离散性，如表 1 所示。

3.4 裂缝密度 实际工程结构中，混凝土内部存在多条裂缝。目前关于裂缝密度对混凝土水分传输规律影响的研究报道较少。Torrijos 等^[48]对暴露于低湿度(干燥室)或高温条件及受碱-硅反应

(ASR)影响的混凝土开展了水渗透试验,得出混凝土渗透性随裂缝密度的增大而逐渐增加的结论,当裂缝密度为 0.43 cm/cm^2 时,水分渗透系数达到 $1.2\times 10^{-9}\text{ m/s}$ 。

Ebigbo等^[49]研究发现,多条裂缝的存在能够增大混凝土的吸水量。由于裂缝网络的交织,水分润湿锋可贯穿整个试件,并通过水泥基体较容易地在未连接的裂缝之间建立“桥梁”。另外, Van Bellegheem等^[50]对带有单条或多条人工裂缝的砂浆试件开展了吸水试验,并利用X射线扫描获得了水分分布图;研究发现,在初始时刻,水分在单条裂缝中传输直至裂缝被水完全充满,随着时间的推移,水分侵入前锋逐渐向前延伸,但由于相邻裂缝之间水分渗透区开始重叠,在存在4条裂缝时,单位面积砂浆的总吸水量比在单条裂缝情况下小。

3.5 裂缝自愈合 胶凝材料的自愈合,是一个复杂的物理和化学过程。在一定裂缝宽度和理想养护条件下,裂缝在较长时间内的自愈合会降低水和侵蚀性离子进入混凝土内部的速度。据报道^[7,51-52],开裂混凝土的内在自愈合包含三个主要机理:物理、化学和力学过程,见图1。

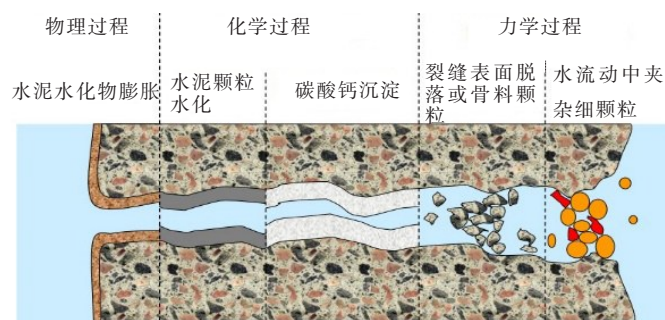


图1 水泥基材料内部自愈合可能存在的机理^[7,51,52]

3.5.1 混凝土基体自愈合能力 混凝土基体本身的自愈合取决于开裂混凝土内部修复化合物的含量和修复能力,例如混凝土基质中的游离钙离子和未水化水泥颗粒。当裂缝出现后,水泥浆体颗粒释放出来,水泥水化产物通过接触自然环境的水和二氧化碳反应生成碳酸钙、C-S-H凝胶等填充裂缝。

现有研究表明^[7,53-55],混凝土的裂缝宽度越小,较高温度和碱性环境能促进裂缝的自愈合。Reinhardt等^[53]利用自主研发的装置开展了开裂高性能混凝土在不同温度下的自愈合试验(温度范围为 $20\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,裂缝宽度范围为 $50\sim 200\text{ }\mu\text{m}$),发现裂缝宽度越小自愈合速率越快,较高的温度有利于裂缝的自愈合。例如在温度 $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,25 h后裂缝宽度 $w=50\text{ }\mu\text{m}$ 试件的水流量仅为初始流量的45%,而 $w=150\text{ }\mu\text{m}$ 试件的水流量为初始流量的75%。Jiang等^[54]研究发现,早期出现的裂缝在静水中的愈合效果优于流动水中,高pH和温度 $T>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会加速裂缝的自愈合。Roig-Flores等^[55]发现, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水中的混凝土比在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时具有更好的自愈合能力。王立成等^[7]研究发现海水养护环境中的裂缝自愈合效果优于淡水养护,主要与离子的种类、数量等有关。

关于能够实现混凝土基体本身自愈合的最大裂缝宽度,由于试验方法的不同,不同学者在试验中观察到的结果存在很大差异,文献中给出的自愈合最大裂缝宽度有 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ^[56]、 $100\text{ }\mu\text{m}$ ^[57]、 $200\text{ }\mu\text{m}$ ^[58]、 $205\text{ }\mu\text{m}$ ^[59]和 $300\text{ }\mu\text{m}$ ^[60]。Edvardsen研究证实^[61],处于 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 宽度范围内的混凝土裂缝中的水,在14 d后不再流动,而 $w=300\text{ }\mu\text{m}$ 时混凝土裂缝中的水流速与初始流速相比减少80%。另外, Maes等^[62]的结果发现,在模拟海洋环境中养护的砂浆试件能够依靠自身愈合最大裂缝宽度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.5.2 掺入含自修复化合物的混凝土裂缝自愈合 在混凝土中掺入含自修复化合物的胶囊或者矿物质能够促进裂缝的愈合速度和愈合效果。混凝土开裂时,胶囊破碎,自修复化合物在裂缝位置处释放,立即有效地对裂缝进行修复。虽然该方法在修复效率上具有明显优势,但随着裂缝的发展和扩大,所需的自修复胶囊数量也会迅速增加,导致成本增加^[63]。很多学者^[54,64-72]考虑在混凝土中添加矿物质以提高裂缝自愈合的速率。例如, Suleiman等^[64]通过定量分析发现,添加石灰石微填料、普通硅酸盐水泥、膨润土和偏高岭土的混凝土裂缝愈合率分别为32.26%、27.27%、25.6%和24.1%。而

Qureshi 等^[65-66]研究了膨胀矿物(氧化镁、膨润土和生石灰)对硅酸盐水泥基(PC)材料早期自愈合能力的影响。结果表明,膨胀矿物的水化产物有效促进了愈合产物(CaCO₃等)的形成,在 28 d 内修复了宽度为 180 μm 范围内的裂缝,降低了混凝土的渗透性。Chindasiriphan 等^[67]研究表明,裂缝宽度随粉煤灰替代率的增加而减小,裂缝中水分传输速度随高吸水性聚合物(SAP)含量的增大而降低,粉煤灰和 SAP 的耦合作用在 28 d 内实现了 100% 的裂缝自愈合。

多个研究团队的试验结果表明^[68-69],在一定矿渣含量和碱性环境条件中,存在一个可完全愈合的最大裂缝宽度,裂缝宽度超过最大值后只能部分愈合或不愈合,部分试验结果如图 2 所示。

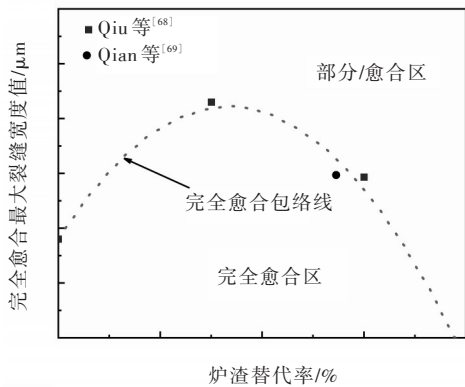


图 2 含矿渣 ECC 能实现自愈合的裂缝宽度与炉渣取代率之间的关系

表 2 矿物质改善混凝土自愈合效果

文献来源	矿物质	矿物质掺量	裂缝宽度自愈合效果
Jiang 等 ^[54]	化学膨胀剂、二氧化硅、膨润土、 结晶添加剂	单掺 8%, 多掺 14%	14d 内愈合 220μm
Van Tittelboom 等 ^[63]	石灰石粉、高炉矿渣、粉煤灰	粉煤灰: 30%、50%; 矿渣: 50%、75%、 85%	42d 内愈合 200μm
Van Tittelboom 等 ^[71]	高炉矿渣、粉煤灰	21% ~ 35% 和 66% ~ 80%	42d 内 200 ~ 250μm 愈合率 约 67%
Ahn 和 Kishi ^[72]	硫铝酸钙、硬石膏、石灰石粉、 蒙脱石矿物	最高 10%	33d 内愈合 160 ~ 220μm
Sisomphon 等 ^[73]	硫铝酸钙、结晶添加剂、硬石膏、 石灰石粉、蒙脱石矿物	4.44% 和 15.24%	56d 内愈合 100 ~ 400μm
Huang 等 ^[74]	高炉矿渣	66%	4d 内愈合 6μm
Lee 和 Ryou ^[75]	硫铝酸钙	10%	w<0.1mm、0.1 ~ 0.2mm 分 别在 11d 和 14d 完全愈合
Qureshi 和 Al-Tabbaa ^[76]	氧化镁膨胀剂	4% ~ 12%	w<0.5mm 在 28d 完全愈合

表 2 总结了关于添加的矿物质种类、掺量对改善混凝土自愈合的效果。从表 2 可以看出,裂缝自愈合的效果与添加的矿物类型密切相关,不同研究人员采用的常见矿物主要包括硫铝酸钙、石灰石粉、膨润土、粉煤灰(FA)、硅灰(SF)和高炉矿渣(BFS)等。

4 开裂混凝土水分传输数值模拟

由于不同裂缝形态参数之间存在内在关系,试验研究往往很难针对单一因素讨论其对水分传输的影响。随着有限元技术的发展,以及 COMSOL、ABAQUS 等商业软件的应用,国内外学者在试验研究的基础上建立了开裂混凝土水分传输过程分析的数值模拟方法,目前主要采用的数值模型包括 3D

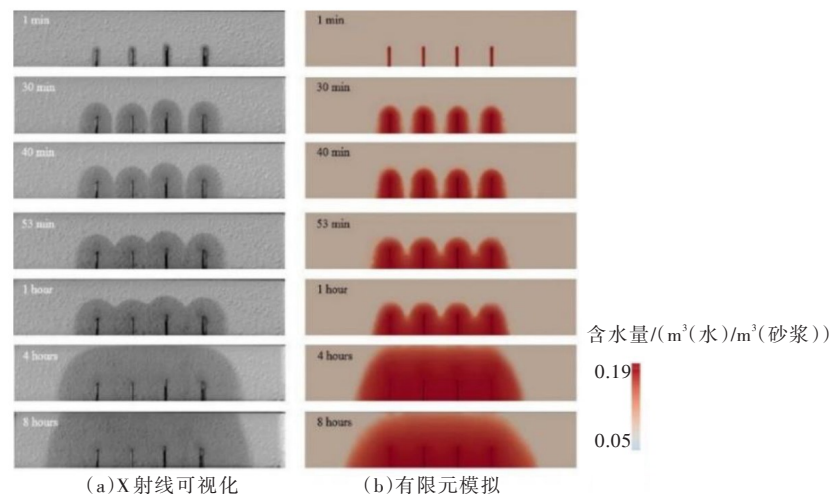


图3 水分分布^[79]

有限元模型、细观格构网络模型、两相吸水模型等。数值模拟可从宏观/细观角度有针对性地研究裂缝几何形态对开裂混凝土中水分传输规律的影响。

宏观上，混凝土可视为连续均匀介质。Huang等^[77]将开裂后的砂浆视为两相吸水模型(裂缝和水泥砂浆)，考虑裂缝和砂浆中水的质量平衡，采用数值方法模拟了含单条裂缝砂浆试件的吸水和润湿过程。结果表明，开裂砂浆与水接触时，裂缝中立即充满水，水分在裂缝中呈二维传输并继续渗透到砂浆内部。Luan等^[78]基于多孔介质传输理论和质量守恒定律建立了带裂缝ECC(Engineered Cementitious Composite)两相吸水模型，分析了裂缝密度对混凝土水分传输的影响，发现随着裂缝空间体积的增大，水从裂缝进入ECC基体的速度大大加快，吸水量随着裂缝密度的增加而增大。

Van Belleghem等^[79]结合达西方程和质量守恒定律考虑非饱和砂浆的毛细吸附作用以及水分的蒸发过程，并用有限元方法建立了数值模型并求解3D Richard方程，得到的数值模拟结果见图3所示。由图3可知，在1 min时，裂缝已被水完全充满，在吸水后的40~50 min之间，水分在两条相邻裂缝间的砂浆区域开始重叠。

Smyl等^[80-81]建立了开裂砂浆和混凝土的双渗透和经典等温吸附模型，采用HYDRUS 3D有限元分析平台进行数值求解。数值仿真结果表明，双渗透模型很好地模拟后期阶段的水分传输过程，而经典等温吸附模型可更好地预测初始阶段的水分传输规律。

刘兆麟^[82]将曲折走向的裂缝等效简化为光滑平直裂缝，建立了带裂缝砂浆数值模型，利用COM-SOL商业软件模拟了不同裂缝宽度、长度、条数、方向的水分传输过程，并开展了再生混凝土的水分传输数值仿真模拟。

以上数值方法从宏观尺度揭示了开裂混凝土的水分传输规律，但未能考虑混凝土微/细观结构对水分传输的影响。实际上，混凝土是由粗、细骨料和水泥砂浆拌和而成的多相复合材料，由于干燥

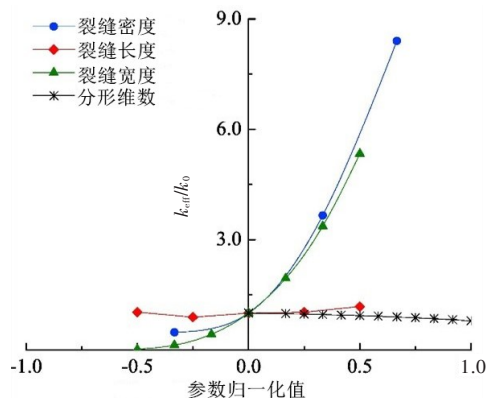


图4 不同裂缝形态参数对水分渗透数值结果的敏感性分析^[89]

收缩、热应力、钢筋腐蚀等多种外界因素的影响,造成混凝土不同程度上的损伤,其内部存在大量的空隙和裂缝等缺陷。因此可从细观角度出发,将开裂混凝土视为由骨料、水泥砂浆、界面过度区(ITZ)和裂缝组成的四相非均质材料,研究和揭示裂缝对混凝土中水分传输规律的影响机理。

王立成等^[83-86]建立了开裂混凝土的细观格构网络模型(Mesoscale lattice network model),考虑裂缝表面粗糙度和迂曲度等因素,采用折减系数将裂缝宽度简化为等效裂缝宽度,且裂缝具有独立的水分传输系数,分析了水分在含单条等宽度裂缝混凝土中的传输规律。

Li等^[88-89]建立了具有不同裂缝几何参数(裂缝密度、宽度、长度和粗糙度)的三维离散网络数值模型,采用有限元方法模拟了混凝土中水分的传输过程。图4显示了水分渗透情况下,不同裂缝形态参数对数值结果的敏感性分析,可见对于开裂混凝土试件,裂缝密度和宽度的影响尤为显著。

以上研究工作从宏观/细观角度采用数值方法加深了人们关于裂缝对混凝土水分传输规律影响的认识。但混凝土内部真实裂缝往往具有三维空间复杂网络结构,现有模型无法反映真实的裂缝形态,需进一步建立准确的数值模型分析裂缝几何形态对水分传输规律的影响机理。

5 结语

水分传输是导致钢筋混凝土结构使用寿命和承载力降低的重要原因,研究裂缝对混凝土中水分传输规律的影响对准确开展钢筋混凝土结构的耐久性设计和使用寿命预测具有重要意义。本文从裂缝观测方法、裂缝形态表征、裂缝自愈及水分传输过程的数值模拟等方面综述了近年来国内外文献中关于开裂混凝土水分传输的研究进展。已有研究表明,裂缝形态对开裂混凝土水分传输产生不同程度的影响,混凝土水分传输系数与裂缝宽度的二次或三次方成正比;裂缝粗糙度的变化对水分传输速度影响很小,裂缝迂曲度的增大和裂缝自愈会导致开裂混凝土水分传输系数的降低,增加裂缝密度能够提高混凝土的吸水量。虽然目前对于开裂混凝土中水分传输的研究发表了很多研究成果,但除了与裂缝宽度建立了定量关系外,其他关于裂缝形态的表征参数以及裂缝自愈对水分传输速度的影响尚未有明确的量化关系,特别是试验与数值模拟中仍有很多亟需解决的问题,主要包括以下5个方面:(1)开裂混凝土内部水分的一维传输理论已相对成熟,但关于水分的二维或三维传输理论及试验研究却鲜有报道。(2)由于裂缝的诱导产生方式和水传输测试的方法不同,不同试验获得的裂缝宽度阈值结果具有很大的离散性。实际工程中裂缝宽度往往与深度有关,这与试验条件下诱导产生的等宽度裂缝有较大差异,如何将试验结果应用到实际工程结构中是一个较大的难点。(3)混凝土内部真实裂缝往往是三维的复杂形态,而现有的多数水分传输研究中仅对平面的裂缝进行分析。目前关于裂缝对水分传输规律的影响已经进行了大量试验研究和数值模拟,但在解释裂缝加快水分传输方面的机理上仍存在局限性,包括不同裂缝形态参数的相关性及其与水分传输系数的定量关系,目前没有明确的共识和完整的数据库。(4)混凝土基体自身的自愈能力较低,而裂缝的自主愈合效果取决于混凝土配合比中矿物掺和料的类型和掺量,还与修复环境有密切关系。此外,裂缝宽度变化、混凝土组成材料的化学成分和水流速等对裂缝自愈也会产生重要影响,需进一步建立裂缝自愈效果的评价指标。(5)开裂混凝土中水分传输过程数值模拟的关键是在离散裂缝或弥散裂缝网络中追踪水分的运动及分布规律,但混凝土中裂缝通常分布密集、宽度范围较大,现有研究主要针对单条平直裂缝,或将曲折裂缝进行平直等效简化处理,因此数值方法仍存在较多不足。

针对以上问题,作者认为关于开裂混凝土的水分传输规律可从以下4个方面深入研究:(1)将开裂混凝土在细观层次上视为由水泥浆体、骨料、界面过渡区(ITZ)、裂缝和损伤区(DZ)组成的五相复合材料,建立水分二维或三维传输的细观数值模型,以便准确合理地模拟开裂混凝土内部水分传输规律。(2)不同裂缝形态参数之间往往具有相关性,比如裂缝宽度与深度、裂缝密度与深度等,综合考虑不同裂缝形态参数的影响,建立不同裂缝形态参数与裂缝中水分传输系数的定量关系,为数值模拟提供基础性条件。(3)为了改进开裂混凝土的水分传输模型,需深入了解混凝土组分、构件截面

形状、配筋和应力状态等对裂缝形态的影响, 试验中应生成与真实几何形态尽可能相近的裂缝, 以便对开裂混凝土中水分的多维传输开展深入研究。(4)在荷载和环境耦合作用下, 裂缝宽度、长度、方向等参数随时间变化对水分传输规律的影响; 对于非荷载因素, 包括混凝土初期的自收缩和干缩裂缝, 与荷载产生的宏观裂缝形态完全不同, 对混凝土内部水分和介质传输及耐久性影响较大, 应是未来研究工作的重点之一。

参 考 文 献:

- [1] 穆松, 刘建忠. 基于混凝土裂缝特征的氯离子传输性质研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(6): 829-838.
- [2] HOSEINI M, BINDIGANAVILE V, BANTHIA N. The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(4): 213-220.
- [3] WIN P P, WATANABE M, MACHIDA A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7): 1073-1079.
- [4] 鲍玖文. 持载及裂缝对混凝土中水分和氯离子传输性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [5] 王海龙, 金伟良, 孙晓燕. 基于断裂力学的钢筋混凝土保护层锈胀开裂模型[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 863-869.
- [6] 武少赞. 混凝土裂缝自愈合机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] 王立成, 武少赞. 混凝土劈拉开裂和裂缝自愈合机理[J]. 水利学报, 2019, 50(7): 787-797.
- [8] SWAMY R N. Concrete technology: past, present, and future[J]. Cement and Concrete Composites, 1994, 16(3): 1-30.
- [9] PICANDET V, KHELIDJ A. Gas and water permeability of cracked concrete[C]//International Conference on Performance of Construction Materials. Le Caire, Egypt, 2003.
- [10] 田雪凯, 王海龙, 程旭东, 等. 混凝土裂缝形态参数对Cl⁻传输性能影响的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(4): 309-316.
- [11] 朱承龙, 蒋林华, 李炜, 等. 裂缝对混凝土中氯离子传输的影响的研究进展[J]. 混凝土, 2014(5): 19-22, 26.
- [12] 李乐. 含随机裂纹网络孔隙材料的渗透性研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [13] BISSCHOP J, MIER J G M V. How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy?[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 279-287.
- [14] ZHOU C S, LI K F, PANG X Y. Geometry of crack network and its impact on transport properties of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(9): 1261-1272.
- [15] BERROCAL C G, LÖFGREN I, LUNDGREN K, et al. Characterisation of bending cracks in R/FRC using image analysis[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 90: 104-116.
- [16] LI Y, ZHANG Y, YANG E H, et al. Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 116: 168-178.
- [17] LANDIS E N, NAGY E N. Three-dimensional work of fracture for mortar in compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65(2): 223-234.
- [18] LANDIS E N. Damage variables based on three-dimensional measurements of crack geometry[J]. Strength, Fracture and Complexity, 2005, 3(2): 163-173.
- [19] FAN L F, GAO J W, WU Z J, et al. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 505-519.
- [20] ISAKA B A, RANJITH P, RATHNAWEERA T, et al. Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. Geothermics, 2019, 81: 152-167.
- [21] WANG Y, LI C H, HAO J, et al. X-ray micro-tomography for investigation of meso-structural changes and crack evolution in Longmaxi formation shale during compressive deformation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 164: 278-288.
- [22] YANG Y S, YANG C M, HUANG C W. Thin crack observation in a reinforced concrete bridge pier test using image processing and analysis[J]. Elsevier Science Ltd. 2015, 83: 99-108.

- [23] RIMKUS A, PODVIEZKO A, GRIBNIAK V . Processing digital images for crack localization in reinforced concrete members[J] . Procedia Engineering, 2015, 122: 239–243 .
- [24] TALAB A M A , HUANG Z, XI F, et al . Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques[J] . International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(3): 1030–1033 .
- [25] KIM H, AHN E, CHO S, et al . Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures[J] . Cement and Concrete Research, 2017, 99: 53–61 .
- [26] VALENÇA J, PUENTE I, JÚLIO E, et al . Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey[J] . Construction and Building Materials, 2017, 146 : 668–678 .
- [27] MOHAN A, POOBAL S . Crack detection using image processing: A critical review and analysis[J] . Alexandria Engineering Journal, 2017, 57(2): 787–798 .
- [28] BAYAR G, BILIR T . A novel study for the estimation of crack propagation in concrete using machine learning algorithms[J] . Construction and Building Materials, 2019, 215: 670–685 .
- [29] AKHAVAN A, SHAFATIAN S M H, RAJABIPOUR S F . Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars [J] . Cement and Concrete Research, 2012, 42: 313–320 .
- [30] AKHAVAN A, RAJABIPOUR F . Quantifying permeability, electrical conductivity, and diffusion coefficient of rough parallel plates simulating cracks in concrete[J] . Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2017, 29(9): 04017119 .
- [31] LI K F, MA M J, WANG X M . Experimental study of water flow behaviour in narrow fractures of cementitious materials[J] . Cement and Concrete Composites, 2011, 33(10): 1009–1013 .
- [32] AHMAD S, AZAD A K, LOUGHLIN K F . Effect of the key mixture parameters on tortuosity and permeability of concrete[J] . Journal of Advanced Concrete Technology, 2012, 10(3): 86–94 .
- [33] BEAR J . Dynamics of Fluids in Porous Media[M] . Milton Keynes: Courier Corporation, 2013 .
- [34] DARMA I S, SUGIYAMA T, PROMENTILLA M A B . Application of X-ray CT to study diffusivity in cracked concrete through the observation of tracer transport [J] . Journal of Advanced Concrete Technology, 2013, 11(10): 266–281 .
- [35] LI D, LIU S . Macro polypropylene fiber influences on crack geometry and water permeability of concrete[J] . Construction and Building Materials, 2020, 231: 117128 .
- [36] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A . Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete[J] . Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1999, 11(3): 181–187 .
- [37] VAN MULLEM T, GRUYAERT E, DEBBAUT B, et al . Novel active crack width control technique to reduce the variation on water permeability results for self-healing concrete[J] . Construction and Building Materials, 2019, 203(10): 541–551 .
- [38] 张苑竹, 金立乔, 魏新江, 等 . 水压下开裂混凝土中水分渗透红外试验[J] . 中国公路学报, 2018, 31(8): 129–136 .
- [39] 杨林 . 非饱和混凝土水分与氯离子传输行为研究[D] . 南京: 东南大学, 2017 .
- [40] YANG L, GAO D Y, ZHANG Y S, et al . Study on water and chloride transport in cracked mortar using X-ray CT, gravimetric method and natural immersion method[J] . Construction and Building Materials, 2018, 176: 652–664 .
- [41] YANG Z F, WEISS W J, OLEK J . Water transport in concrete damaged by tensile loading and freeze-thaw cycling[J] . Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2006, 18(3): 424–434 .
- [42] SHIN K J, BAE W, CHOI S W, et al . Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens[J] . Construction and Building Materials, 2017, 151(1): 907–915 .
- [43] WANG K J, JANSEN D C, SHAH S P, et al . Permeability study of cracked concrete[J] . Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381–393 .
- [44] HYUN T Y, KIM C Y, KIM J K . Permeability of cracked concrete as a function of hydraulic pressure and crack width[J] . Journal of the Korea Concrete Institute, 2008, 20(3): 291–298 .
- [45] LIU H Z, ZHANG Q, GU C S, et al . Influence of microcrack self-healing behavior on the permeability of Engi-

- neered Cementitious Composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 82: 14–22.
- [46] PARK S S, KWON S J, JUNG S H, et al. Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 27(1): 597–604.
- [47] AKHAVAN A. Characterizing saturated mass transport in fractured cementitious materials[D]. Park, PA: Pennsylvania State University, 2012.
- [48] TORRIJOS M C, GIACCIO G, ZERBINO R. Internal cracking and transport properties in damaged concretes [J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(1): 109–121.
- [49] EBIGBO A, LANG P S, PALUSZNY A, et al. Inclusion-based effective medium models for the permeability of a 3D fractured rock mass[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 113(1): 137–158.
- [50] VAN BELLEGHEM B, MONTOYA R, DEWANCKELE J, et al. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar—A comparison between experimental study and finite element analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 110: 154–162.
- [51] HUA X. Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in concrete repair system[D]. Delft University of Technology, 2010.
- [52] WU M, JOHANNESSON B, GEIKER M. A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28: 571–583.
- [53] REINHARDT H, JOOSS M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(7): 981–985.
- [54] JIANG Z W, LI W T, YUAN Z C. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 57: 116–127.
- [55] ROIG-FLORES M, MOSCATO S, SERNA P, et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 86: 1–11.
- [56] SAHMARAN M, KESKIN S B, OZERKAN G, et al. Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(10): 872–879.
- [57] REINHARDT H W, JOOSS M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(7): 981–985.
- [58] EDVARSEN C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(4): 448–454.
- [59] ALDEA C M, SONG W J, POPOVICS J S. Extent of healing of cracked normal strength concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000, 12(1): 92–96.
- [60] 程东辉, 潘洪涛. 混凝土裂缝自动愈合机理研究[J]. *森林工程*, 2005, 21(3): 53–54.
- [61] EDVARSEN C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(4): 448–454.
- [62] MAES M, SNOECK D, BELIE N D. Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 114–124.
- [63] VAN TITTELBOOM K, DE BELIE N. Self-Healing in cementitious materials—a review[J]. *Materials*, 2013, 66: 2182–2217.
- [64] SULEIMAN A J, NELSON A L, NEHDI M. Visualization and quantification of crack self-healing in cement-based materials incorporating different minerals [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 103: 49–58.
- [65] QURESHI T, KANELLOPOULOS A, AL-TABBAA A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals—I: Impact in early age crack healing[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 768–784.
- [66] QURESHI T, KANELLOPOULOS A, AL-TABBAA A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals—II: Impact of age and the role of optimised expansive minerals in healing performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 194: 266–275.
- [67] CHINDASIRIPHAN P, YOKOTA H, PIMPAKAN P. Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 233: 116975.
- [68] QIU J S, TAN H S, YANG E H. Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on au-

- togenous healing of engineered cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 203–212.
- [69] QIAN S, ZHOU J, ROOIJ M R D, et al. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(9): 613–621.
 - [70] YANG Y Z, LEPECH M D, YANG E H, et al. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(5): 382–390.
 - [71] VAN TITTELBOOM K, GRUYAERT E, RAHIER H, et al. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 349–359.
 - [72] AHN T H, KISHI T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2010, 8: 171–176.
 - [73] SISOMPHON K, COPUROGLU O, KOENDERS E A B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(4): 566–574.
 - [74] HUANG H, YE G, DAMIDOT D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 60: 68–82.
 - [75] LEE Y S, RYOU J S. Self-healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 188–193.
 - [76] QURESHI T S, AL-TABBAA A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO[J]. Smart Material Structures, 2016, 25(8): 084004.
 - [77] HUANG H, YE G, BREUGEL K V. Numerical simulation on moisture transport in cracked cement-based materials in view of self-healing of crack[J]. Journal of Wuhan University of Technology—Mater Science Edition, 2010, 25(6): 1077–1081.
 - [78] LUAN Y, ISHIDA T. Simulation on water absorption behavior of ECC material with different crack density and distribution[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 2014, 36(1): 826–831.
 - [79] VAN BELLEGHEM B, MONTOYA R, DEWANCKELE J, et al. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar—A comparison between experimental study and finite element analysis[J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 154–162.
 - [80] SMYL D, GHASEMZADEH F, POUR-GHAZ M. Modeling water absorption in concrete and mortar with distributed damage[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 438–449.
 - [81] SMYL D, GHASEMZADEH F, POUR-GHAZ M. Can the dual-permeability model be used to simulate unsaturated moisture flow in damaged mortar and concrete?[J]. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 2017, 9(2): 54–66.
 - [82] 刘兆麟. 非饱和水泥基材料中水分传输的数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
 - [83] WANG L C, UEDA T. Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(4): 519–528.
 - [84] 王立成, 鲍玖文. 开裂混凝土中水分传输过程的细观模型[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 972–977, 983.
 - [85] WANG L C, BAO J W, UEDA T. Prediction of mass transport in cracked-unsaturated concrete by mesoscale lattice model[J]. Ocean Engineering, 2016, 127: 144–157.
 - [86] 王立成, 鲍玖文. 干湿交替下开裂混凝土中水分传输的细观数值分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 986–995.
 - [87] ZHANG P, WITTMANN F H, ZHAO T, et al. Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete[J]. Physica B: Condensed Matter, 2010, 405(7): 1866–1871.
 - [88] LI X X, CHEN S H, XU Y, et al. Modeling capillary water absorption in concrete with discrete crack network[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2017, 30(1): 04017263.
 - [89] LI X X, LI D Q, XU Y. Modeling the effects of microcracks on water permeability of concrete using 3D discrete crack network[J]. Composite Structures, 2019, 210: 262–273.

(下转第 672 页)

Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system

CHEN Wenlong¹, XU Zongxue², SONG Lixiang¹, ZHANG Dawei¹, LIU Pei¹

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China;

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Pluvial and fluvial floods were considered independently in traditional flood disaster prevention. According to the investigation and analysis on flooding occurred in Guangzhou City in May 22, 2020, a new concept, in which the whole river basin is regarded as an integrated system, is proposed in this study. The design rainfall patterns from both municipal authorities and water authorities are integrated as one pattern through the way of "big one include small one, and long one include short one". A simulation model for fluvial and pluvial flooding in urban area is developed by coupling the low impact development facilities, small-scale municipal drainage system, and large-scale hydraulic drainage system. Take the control measures of pluvial and fluvial urban floods in Guangzhou as an example, the case study shows that the control engineering layout optimization based on holistic view of watershed system can not only meet the economic and restrictive principles for highly urbanized areas, but also achieve systematic governance and reach the overall standards. It effectively avoids the disadvantages of "fluvial flooding caused by pluvial flooding and vice versa" in the traditional flood divide-management mode, which provides a new approach for urban flood management in China.

Keywords: holistic view of watershed system; joint control of fluvial and pluvial floods; rain pattern; urban flood simulation

(责任编辑: 李福田)

(上接第 658 页)

Review of research progress on water transport mechanism of cracks within concrete

WANG Licheng, MU Linjun, ZOU Kai

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Cracking of concrete, which may be induced by mechanical loads or resulted from the exposed environmental action, not only reduces the ability of concrete to resist water penetration, but also provides additional pathways for aggressive media to penetrate into concrete. This process will obviously reduce service life as well as durability insufficiency of reinforced concrete structures. This paper systematically reviews the research progress relating to the influence of cracks on water transport within concrete from experimental research and numerical simulation. The previous studies indicated that water transport coefficient of cracked concrete is proportional to the second or third power of crack width. The increase of crack tortuosity can significantly reduce the speed of water transport, while it has little effect by changing the crack surface roughness. Meanwhile, the water content absorbed of concrete can be increased due to the development of crack density. In addition, the self-healing of cracks exposed to profitable environments can decrease water transport speed in cracks of concrete. Therefore, to investigate the effect of cracking or cracks concrete on water transport mechanisms in concrete will provide the theoretical basis for durability design of reinforced concrete structures. Based on the summary of the existing research results, research expectations as well as future priorities associated with water transport mechanisms of the cracked concrete are argued and suggested in the final section of the paper.

Keywords: concrete; water transport; cracks; durability; research progress

(责任编辑: 王冰伟)