

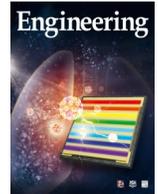


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Civil Engineering Materials—Article

宏观裂缝混凝土中表观气体渗透率的测定

Pierre Rossi

Univ Gustave Eiffel, French Institute of Science And Technology for Transport, Development and Networks (IFSTTAR), F-77447 Marne-la-Vallée, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 June 2020

Revised 21 September 2020

Accepted 9 November 2020

Available online 31 March 2021

关键词

混凝土

宏观裂缝

气体传输

渗透率

摘要

本文报道了一项旨在测定开裂混凝土表观气体渗透率的实验研究分析。由于难以对气体渗透率进行可靠的实验测试,国际文献中缺乏对这一问题的研究。本研究的主要目的是提供新颖可靠的实验结果,并提出表观裂缝渗透率演化与表观裂缝张开度之间的解析函数。考虑 Poiseuille 定律,这些函数似乎是相关的。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在评估诸如核电站、船舶等战略结构的耐久性和安全性时,必须考虑混凝土结构裂缝中的气体传输问题。为此,法国交通、规划和网络科学技术研究所(French Institute of Sciences and Technologies for Transportation, Development, and Networks, IFSTTAR)开展了一项研究,将数值模型的开发与实验研究联系起来,以处理气体通过混凝土裂缝传输的问题。此前,IFSTTAR进行过类似的研究以解决液体通过混凝土结构中裂缝传输的问题[1–2]。因此,目前的研究可以被认为是以前工作的调整或发展,尤其在实验方面。本研究框架中使用的是与混凝土开裂过程相关的同一数值模型,即由IFSTTAR [3–4]开发的半显式概率开裂模型,因此本文未对该模型进行介绍。对之前有关液体传输的工作[1–2]进行调整是必要的,因为从实验方面来讲,让气体通过裂缝要比让液体通过裂缝需

要更加精细的工作。

本文展示的实验研究是在法国国家研究机构管理的MACENA项目(ANR-11-RSNR-012)框架内进行的。大部分实验结果已经发表在一份与该项目有关的报道(法语版)中[5]。本文的新颖之处在于对实验结果的分析(以及提出的物理假设)。这一分析引出了表观宏观裂缝张开度和表观气体渗透率之间的一种新关系(未在报道中提出)。

文献中关于裂缝混凝土结构中气流的实验研究很少,无法提供主要物理现象及与这些物理现象关联的可靠分析。这些研究大多涉及大型钢筋混凝土结构构件[6–12]。考虑同时存在几个局部宏观裂缝,客观确定与每个裂缝相关的气流是困难的。因此,通过这些实验结果无法确定与开裂过程相关的流动规律。为了确定这个规律,可以在一个小的混凝土试件中产生单个裂缝并确定流体传输特性的实验技术。为此,Ismaïl等[13]提出了一种基于环形测量

* Corresponding author.

E-mail address: pierre.rossi@univ-eiffel.fr.

单元的试验，用于测量开裂空心圆柱形试件的渗透率，而 Picandet 等[14]则采用了劈裂试验（即巴西试验）。在第二个实验中，实验方案可以根据以下三个阶段进行解释：在初始阶段，在开口处机械地产生一个裂缝；在第二阶段，将试件卸载，并使用光学仪器对裂缝的几何形状进行表征；在第三阶段，即试验的最后阶段，通过标准测量方法（Cembureau 方案）估测裂缝试件的渗透率与先前表征的裂缝张开度的关系。然而，应该强调的是，在渗透率测试过程中，裂缝的几何形状可能会发生显著变化，因为有几种原因会导致裂缝重新闭合（如在 Cembureau 方案中试件的弹性卸载或径向密封压力的应用）。基于这一考虑，Choinska 等[15]讨论了在机械加载情况下实时测量渗透率的可能性。在他们提出的方案中，在试件的一侧配备了允许空气进入的覆盖物，在试件的另一侧使用数字图像相关（DIC）技术实时监测其位移场。Ezzedine El Dandachy [16]最近展示了与此方案相关的一些结果。虽然该试验[15–16]与本实验研究中提出的试验（见第2节）相似，但没有详细讨论保证结果可靠的两个要点，即：

- 对宏观裂缝扩展的充分控制和对其中张开度的精确测定；
- 预防由测试装置造成的气体泄漏，因为气体泄漏会给表观渗透率的测定带来误差。

在目前的实验工作中，这两点都得到准确的考虑（见第2节）。

2. 实验程序

2.1. 机械方面

本文所提出的实验程序的机械步骤涉及形成一个具有逐步可控和可测张开度的单裂缝。这一机械步骤与之前实验研究[1–2]中液体通过裂缝的步骤相同。机械步骤可以总结如下。

步骤1：在混凝土圆盘（直径 110 mm，厚 50 mm）上进行了劈裂试验（巴西试验）。本试验是在配备闭环控制系统的 Tinus Olssen (± 500 kN) 液压机上进行的。

步骤2：采用控制压力机转向的方式来控制裂缝的张开度，并在试件表面中心得到单一裂缝[17]。

步骤3：通过测量垂直于裂缝的试件直径变化来控制裂缝的张开度。如图1所示，在位于正中平面后 15 mm 和正中平面前 15 mm 进行测量[在 ± 10 V 下使用 ± 1 mm 的线性可变差动变压器（LVDT）实现] [5]。实时计算这些数据的平均值，以便更好地控制实验。此步骤可防止裂缝在发生回弹现象时失去控制[18]。

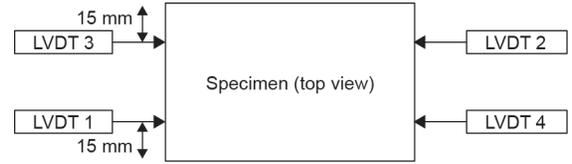


图1. 试件直径扩张测量示意图。

步骤4：试件直径扩张量的测量与裂缝张开度的测量相关联。为了达到这个目的，设计了如下策略。

- LVDT 测量可估算试件在其表面右侧的直径扩张。通过从这个直径扩张估算值中去除弹性形变部分（即线性定律，一种力的函数，在第一次弹性加载中确定），得到了在试件每个面高度处的裂缝张开度估计值。

- 相比之下，之前的实验研究[1–2]使用 DIC 技术建立了平均有效表面积和裂缝中心平均张开度之间的线性统计关系。将由 DIC 技术分析得到的试件中间高度处的裂缝张开度与利用 LVDT 测量得到的相同数据进行比较。对于所有测试件，这种比较均得到了可重复和一致的结果。

关于使用建议的机械试验装置测定裂缝张开度，可以提出几点意见：

意见1。在大多数测试件中，最大裂缝张开度没有出现在试件的中间高度处（沿着裂缝）。这种现象很容易用混凝土的非匀质性来解释。

意见2。过去已经通过观察和解释证明，在混凝土结构的裂缝扩展过程中，裂缝在表面的扩展速度比内部快[19–20]。此外，在裂缝结构内部，存在多个导致裂缝不连续扩展的“材料桥”（material bridge）。这种表面裂缝和内部裂缝之间的差异意味着表面裂缝不能代表整体裂缝的实际情况。这就是为什么在讨论试件中心的平均裂缝张开度时，通常提到表观裂缝张开度的原因。

意见3。使用 LVDT 测量获得的裂缝张开度的测量结果似乎比使用 DIC 技术获得的更加全面。

因此，在本研究的框架内提出了以下假设：

假设1。裂缝被认为是沿裂缝全长间隔相同距离的两个平面。

假设2。通过测量试件中间高度处的裂缝张开度得到两个平面表面之间的距离，该距离被认为是沿着裂缝方向的裂缝张开度的平均值。

即使已经做出了强有力的假设，但这种选择被认为是可以接受的。该选择与参考文献[5]中提出的选择有很大的不同，这是目前研究工作的基础；事实上，在之前的报道（使用 DIC 分析）中，通过计算沿裂缝表面的平均裂缝张开度来得到裂缝张开度[1–2,5]。

2.2. 水力学方面

水力学研究是本次试验研究的重点和难点。

在先前的研究中，主要关注通过裂缝的水传输[2]，受水载荷作用的试件表面部分并不是试件总表面；相反，由于在两个试件表面上存在储罐和接头，受水载荷作用的表面积将减小。因此，在液体渗透率试验中，受到液体压力的表面被限制在一个直径（称为有效直径）等于硅胶接头内径为 77 mm 的圆形表面内。同样，裂缝表面只有一部分被认为是液体的渗流区。

在本研究中使用了相同的常规装置（图2 [5]）。



图2. 试验装置的照片。

然而，由于目前的研究关注的是气体传输而不是液体传输，因此需要克服一些困难。主要的困难是潜在的气体泄漏问题，下面将进一步讨论这一问题。对于渗透率试验，该设备包括两个钢罐，将钢罐放置在试件表面，并通过螺丝系统拧紧。

上游压力室与加压、调节、过滤后的空气回路相连，而下游压力室与真空泵相连[5]。在该装置的上游安装了一个压力调节器和一个具有热效应的质量流量计（Bronkhorst®, F-111AC-50K-AAD-33V, 1~50 nL·min⁻¹, Bronkhorst High-Tech B.V., 荷兰）。真空泵位于下游，允许的最小压力为30 mbar（3 kPa）。使用热电偶测量腔室内的流体温度。在储罐和试件表面之间插入了两个硅胶接头（2 mm 厚），以防止上下游表面的气体泄漏。硅胶接头的低刚性确保试件没有受到与腔体相关的机械约束作用。上游压力室的进气口通过浸泡在恒温槽中的盘管冷却，温度保持在22 °C。

进行以下测量：四组直径扩张的LVDT测量、气缸位移、日期和时间、上游压力、下游压力、两个腔室之间的压差、质量流量、上游和下游温度以及施加在试件上的力。与水渗透率实验研究[1-2,5]相比，该实验模式的主要不足在于：①使用适用于空气传输的质量流量计进行流量测量；②使用压力调节器；③使用真空泵；④为空气供应回路制造了一个冷却盘管，以确保气体保持恒定的温度，因此气流被认为是等温的（这仍然是一个强有力的假设）。

使用这种测试装置进行的第一次测试表明，尽管使用了硅胶接头，仍存在气体泄漏。针对这一问题，采取了以下步骤：①在试件的圆柱体表面使用了ABM75，本产品通常用于在混凝土试件上粘贴应变仪。②用一个附加的质量流量计（与第一个质量流量计具有相同的特性）来验证这个新解决方案的效率。

图3展示了由两个质量流量计测得的上游和下游空气流量的比较，可以认为在测试期间基本上一致[5]。下游流量测量的扰动与真空泵（隔膜泵）工艺有关，也与必须不断抽吸空气才能达到设定值这一事实有关，此时裂缝的张开度是很重要的。当真空泵暂时停止时，数值更加稳定。

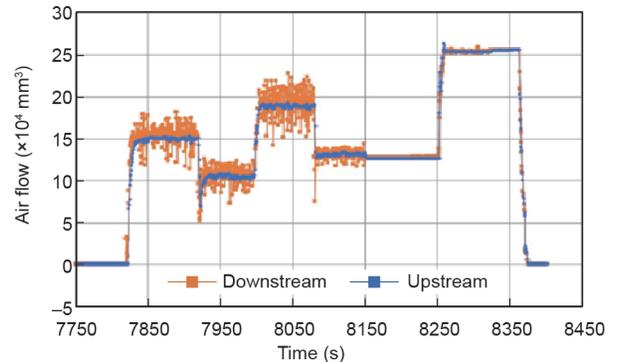


图3. 开裂状态下上游和下游流动的比较。

3. 测试程序

本研究采用的混凝土配比设计如表1所示。

试件在内生条件下保存，由一层玻璃纸薄膜上的两层

表1 所研究混凝土的配比设计

Constituents	Content (kg·m ⁻³)
Sand 0/4	830
Aggregate 4/11	445
Aggregate 8/16	550
Cement 52.5	320
Superplasticizer	2.4
Total water	198

自黏式铝箔保护。这种保护一直持续到实验开始。为了进行渗透率测试，铝箔保护膜被从试件表面移除，但保留在圆柱体外围。机械载荷通过这个薄的保护装置传递。这种安排比标准劈裂试验中通常使用传统胶合板得到的载荷分布更好。为了尽量减少流体可压缩性的影响，在这一实验开展期间进行的测试都是在相对较低的特定压力条件下进行的。施加的压力比（由上游和下游压力计算得到）为1.2和1.5。与标准渗透率测试实验相比，这些压力比被认为是较低的。这一选择取决于两个方面：①避免必须考虑气体的可压缩性，可能会给实验结果的分析造成困难；②避免气体泄漏。事实上，在采用所建议的试验装置进行的第一次测试中，当施加更高的压力比时，观察到了一些气体泄漏。

图4展示了开裂过程中施加的压力条件的循环示例[5]。如图所示，试验过程中施加的最大下游压力（使用真空泵获得）略大于1 bar（100 kpa），相当于平均大气压。

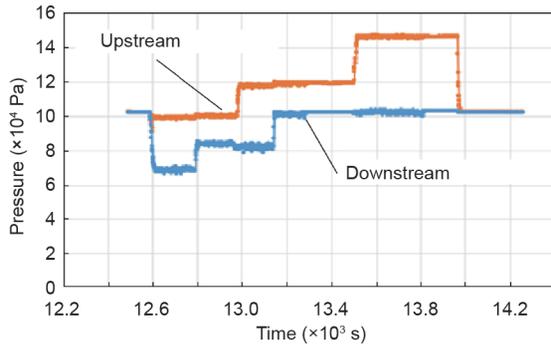


图4. 开裂过程中施加上游和下游压力条件的示例。

在试验过程中定期施加裂缝开口。由于试验是间接控制的（作为直径扩张和所施加力的函数），所以施加的力不是恒定的，尽管变化很小。施加的裂缝开口如图5所示[5]。在本研究中成功测试了四个试件。

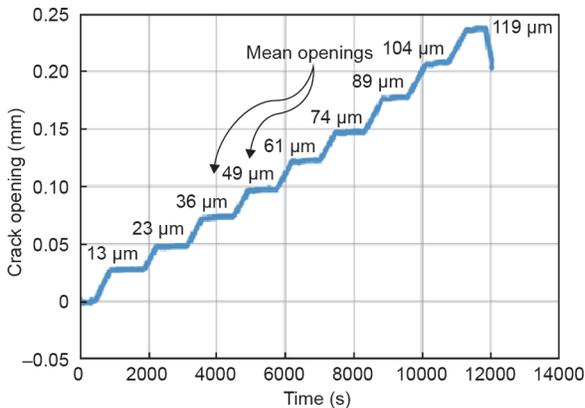


图5. 在试验过程中施加的裂缝开口。转载自参考文献[5]。

4. 结果和分析

从示意图上看，气体在裂缝中的运动可以近似为流体在两块平板之间的流动。在本研究的框架中，做了以下假设：理想气体、既定流量、低压比和恒定体积流量。所有这些假设使得与裂缝体积有关的积分动量守恒可以写成宏观压力梯度的平方 $[(p_2^2 - p_1^2)/L]$ 与质量流量 (q) 函数之间的关系，其中 p_1 为上游压力， p_2 为下游压力。这种关系（在理论上并考虑到假设框架）必须是线性的，且具有以下形式：

$$\frac{p_2^2 - p_1^2}{L} = 2rT\rho_m \frac{p_2 - p_1}{L} = -2rT \left(\frac{12}{w^2} \right) \frac{\mu}{\rho_m S} q \quad (1)$$

式中， r 、 T 、 w 、 μ 、 ρ_m 和 S 分别表示理想气体常数、热力学温度、流动平面之间的距离、动态黏度、密度和流动截面。

$$\rho_m = \frac{P_m}{rT} = \frac{P_1 + P_2}{2rT} \quad (2)$$

注：等式（1）在形式上非常接近Poiseuille定律。

图6显示了一些裂缝开口的压力梯度的平方与质量流量的关系曲线。此图来自参考文献[5]，其中有一个重要的变化，即裂缝张开度的测定方法（见第2节）。可以注意到，这些曲线展现出较小的非线性，特别是对于较大的质量流量。这一观察结果与在假设框架中得到的理论关系相矛盾。这种明显的矛盾可以用试件开裂部分内部“材料桥”的存在来解释。质量流量和压力梯度的平方越大，穿过这些“材料桥”内部的空气量就越多。正是这种聚集在“材料桥”中的截留空气量，以及通过裂缝表面经过未开裂混凝土的空气量的增加，可能导致曲线的非线性。

如图6所示，利用曲线的线性部分，根据表观裂缝张开度[等式（1）]测定了裂缝的表观渗透率。

图7展示了表观裂缝渗透率 (K_{app}) 与表观裂缝张开

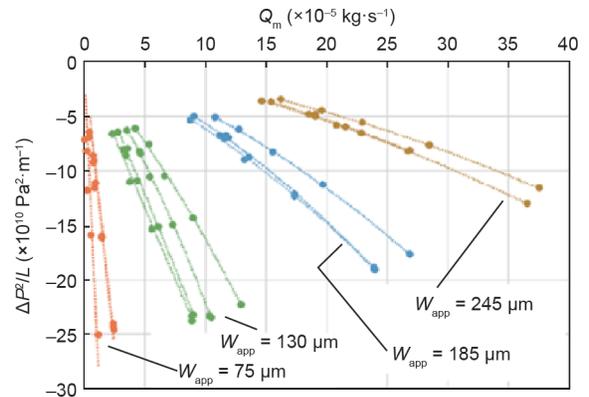


图6. 不同表观裂缝张开度和不同试件的的压力梯度平方随质量流量 (Q_m) 变化的曲线。

度 (W_{app}) 的关系曲线。该图也描绘了严格应用理论所预期的曲线。

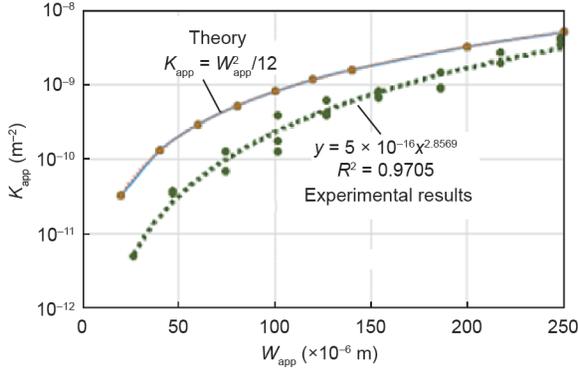


图7. 表观渗透率随表观裂缝张开度的变化曲线——实验点的精确拟合曲线。

从图中观察到:

- 有关开裂混凝土试件的曲线形状与理论曲线相似(幂函数)。
- 开裂混凝土的表观裂缝渗透率小于理论裂缝存在时的裂缝渗透率, 这是预期的结果。当裂缝张开度增大时(裂缝张开度大于 $200 \mu\text{m}$), 这种差异会变小。

可以用解析关系[等式 (3)]来拟合图7的曲线:

$$K_{app} = 5 \times 10^{-16} W_{app}^{2.8569} \quad (3)$$

显然, 等式 (3) 取决于所研究的混凝土, 特别是其非匀质性和孔隙度水平。因此, 对其他类型的混凝土进行相同类型的实验研究以获得更多的普遍信息应该是有趣的。同样重要的是要重申一个事实, 即等式 (3) 必须被认为是真实值的近似值, 因为在本研究中裂缝张开度和空气传输距离是粗略估计的。

由于这些原因, 可以将等式 (3) 的值 2.8569 近似为 2.8 或 2.9。从图 8 可以看出, 这两个值与拟合实验点相关。

另一个需要关注的事实是, 所提出的试验方案会造成

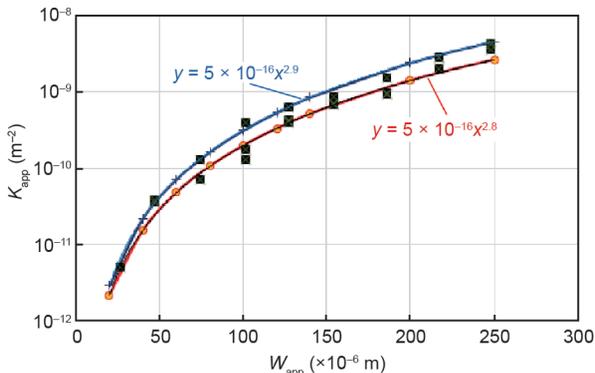


图8. 表观渗透率随表观裂缝张开度的变化曲线——两条近似拟合曲线。

施加的一些(但不是所有)下游压力低于大气压力(图4)。然而, 在与核电站反应堆压力容器相关的真实情况下, 该下游压力永远不会低于大气压力。可以认为, 如果这种情况对实验结果的分析有重大影响, 那么图7将会受到比现在更大的干扰。

最后, 值得注意的是, 对于本研究中所考虑的压力和压力比的值, 可以认为目前等式 (3) 是有效的。为了进行更全面的分析, 必须开发另一个测试装置和测试方案来研究更高的压力和压力比。

5. 讨论与总结

本文对一项旨在测定混凝土裂缝表观渗透率的实验研究进行了分析。为了达到这一目的, 试验装置如下: ①在直径为 110 mm 、厚度为 50 mm 的混凝土圆盘上进行劈裂试验, 以产生裂缝; ②对试件中心的裂缝张开度进行控制和测量; ③气体渗透率试验在一个装置上进行, 该装置在试件表面放置两个钢罐并用螺丝系统拧紧。上游压力室连接到加压、调节和过滤过的空气回路, 下游压力室与真空泵相连。

得到以下主要结果:

- 增加的机械程序能够很好地控制裂缝的产生并测量试件中心的平均裂缝张开度。
- 实验过程表明宏观压力梯度施加和测量良好, 且系统中没有气体泄漏。
- 根据 Poiseuille 理论, 表观气体渗透率随表观裂缝张开度的变化是相关的。

必须指出的是, 为测定表观气体渗透率作为宏观裂缝张开度函数的变化而提出的实验方法(及其分析)必须被视为一种宏观信息导向的工程方法。在数值模型的背景下使用这些信息是合理的, 并且只有当该模型也是宏观的并被用作工程工具时, 才可能被认为是相关的。

从更物理学的角度来看, 这种方法容易受到质疑, 因为该方法是基于一个非常强大的假设, 即裂缝内存在一个已知的恒定压力梯度。然而, 由于储罐和裂缝之间的体积差异很大, 因此这个假设并不合理。如果试验过程中的最大宏观裂缝张开度小于 0.3 mm , 则裂缝张开度与试件直径 (110 mm) 以及与压力下气罐直径的比值大于 $3/1000$ 。因此, 认为气体与裂缝之间的接触面无穷大是合理的。如果这个无穷大的假设被认为是相关的, 那么也可以合理地接受该实验测试实现了对真实核电站反应堆压力容器发生情况的充分模拟。在此条件下, 即使不能很好地测定宏观裂缝入口和出口之间存在的真实压力梯度, 也可以认为

在本研究的应用领域框架内，试验获得的表观渗透率是可以被接受的。

总之，为了实现更相关的理论方法，可以认为有必要改变裂缝和流体传输的建模尺寸，并开发其他类型的试验装置。最后，应该记住的是，本文提出的实验研究（及其分析）的目的是在外部（大气压力）和内部（在事故情况下）压力已知或可预测，但宏观裂缝入口和出口的压力不可预测的情况下，提供有关核电站反应堆压力容器宏观裂缝泄漏的有用信息。

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge funding support from French National Research Agency through the MACE-NA project (ANR-11-RSNR-012).

References

- [1] Rastiello G. Influence de la fissuration sur le transfert de fluides dans les structures en béton Stratégies de modélisation probabiliste et étude expérimentale [dissertation]. Marne la vallee: Université Paris Est; 2013. French.
- [2] Rastiello G, Boulay C, Dal Pont S, Tailhan JL, Rossi P. Real-time water permeability evolution of a localized crack in concrete under loading. *Cement Concr Res* 2014;56:20–8.
- [3] Tailhan J-L, Dal Pont S, Rossi P. From local to global probabilistic modeling of concrete cracking. *Ann Solid Struct Mech* 2010;1(2):103–15.
- [4] Rastiello G, Tailhan JL, Rossi P, Dal Pont S. Macroscopic probabilistic cracking approach for the numerical modelling of fluid leakage. *Ann Solid Struct Mech* 2015;7(1–2):1–16.
- [5] Tailhan JL, Rastiello G, Renaud JC, Boulay C, Antony G. Détermination expérimentale du débit d'air en fonction de l'ouverture d'une macrofissure dans le béton. Report of MACENA Project (ANR-11-RSNR-012), WP3–Task 1.3. Report. Paris: Agence Nationale de la Recherche; Feb 2018. French.
- [6] Rizkalla SH, Lau BL, Simmonds SH. Air leakage characteristics in reinforced concrete. *J Struct Eng* 1984;110(5):1149–62.
- [7] Suzuki T, Takiguchi K, Hotta H, Kojima N, Fukuhara M, Kimura K. Experimental study on the leakage of gas through cracked concrete walls. In: *Proceedings of the Concrete and Specific Aspects of Non-Metallic Materials Q05—Material and Structural Aspects of Concrete MiRT 10*; 1989 Aug 22–27; Anaheim, CA, USA; 1989.
- [8] Nagano T, Kowda A, Matumura T, Inada Y, Yajima K. Experimental study of leakage through residual shear cracks on r/c walls. In: *Proceedings of the Concrete and Specific Aspects of Non-Metallic Materials Q05—Material and Structural Aspects of Concrete MiRT 10*; 1989 Aug 22–27; Anaheim, CA, USA; 1989.
- [9] Suzuki T, Takiguchi K, Hotta H. Leakage of gas through concrete cracks. *Nucl Eng Des* 1992;133(1):121–30.
- [10] Dameron RA, Rashid YR, Tang HT. Leak area and leakage rate prediction for probabilistic risk assessment of concrete containments under severe core conditions. *Nucl Eng Des* 1995;156(1–2):173–9.
- [11] Riva P, Brusa L, Contri P, Imperato L. Prediction of air and steam leak rate through cracked reinforced concrete panels. *Nucl Eng Des* 1999;192(1):13–30.
- [12] Gelain T. An original method to assess leakage through cracked reinforced concrete walls. *Eng Struct* 2012;38:11–20.
- [13] Ismail M, Gagné R, François R, Toumi A. Measurement and modeling of gas transfer in cracked mortars. *Mater Struct* 2007;39(1):43–52.
- [14] Picandet V, Khelidj A, Bellegou H. Crack effects on gas and water permeability of concretes. *Cem Concr Res* 2009;39(6):537–47.
- [15] Choinska M, Dufour F, Pijaudier-Cabot G, Huerta A, Khelidj A. How to extract a crack opening from a continuous damage finite element computation? Application for the estimation of permeability. In: Shao J, Burlion N, editors. *Thermo-hydromechanical and chemical coupling in geomaterials and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2008.
- [16] Ezzedine El Dandachy M. Characterization and modelling of permeability of damaged concrete: application to reinforced damaged concrete structures [dissertation]. Saint-Martin d'Hères: Grenoble University; 2016. French.
- [17] Boulay C, Dal Pont S, Belin P. Real-time evolution of electrical resistance in cracking concrete. *Cement Concr Res* 2009;39(9):825–31.
- [18] Aldea C-M, Shah SP, Karr A. The permeability of cracked concrete. *Mater Struct* 1999;32(5):370–6.
- [19] Rossi P, Le Maou F. Device for the detection and location of cracks in concrete using fibre optics. *Eng Fract Mech* 1990;35(1–3):303–11.
- [20] Rossi P. Fissuration du Béton: du Matériau à la Structure. Application de la Mécanique Linéaire de la Rupture [dissertation]. Marne la Vallee: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées; 1986. French.