



Research
High Performance Structures: Building Structures and Materials—Article

高性能多功能水泥基复合材料

Victor C. Li

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, MI 48109-2125, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 August 2018

Revised 2 October 2018

Accepted 15 November 2018

Available online 9 March 2019

关键词

高性能混凝土

多功能

智能

水泥基复合材料

耐久性

回弹性

可持续性

基础设施

摘要

混凝土是一种不断发展的材料，甚至高性能混凝土的定义也正随着时间的推移而发生变化。本文所说的混凝土材料的高性能特性是指那些直接影响我们生活质量的民用基础设施的理想耐久性、回弹性和可持续性的特性。这些特性包括拉伸延展性、自体裂缝宽度控制和材料的“绿色”环保性。此外，智能功能旨在通过响应结构周围环境的变化来提高基础设施的耐久性、回弹性和可持续性以实现其理想功能，从而使材料的行为方式更类似于某些生物材料。本文基于工程水泥基复合材料（ECC）的最新研究进展，提出可以设计出具有高性能兼智能多功能性的混凝土材料，并且其具有满足 21 世纪民用基础设施预期需求的潜力。本文重点介绍了 ECC 的相关特性以及未来研究的方向。

© 2019 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

21 世纪，人类对气候变化的关注日益增长，气候变化会带来大风、洪水和异常热浪等极端天气。基础设施设计人员必须考虑使基础设施适应极端荷载，以保持设施群体的回弹性。与此同时，缓解由地球平均地表温度上升引起的气候变化变得越来越迫切。如何减少与民用基础设施的建设和使用相关的温室气体的排放，必然是基础设施设计者首要考虑的事项。由于基础设施规模大、寿命长，增强建筑材料的“绿色”环保性能——特别是其耐久性——可以显著缓解气候变化。使民用基础设施适应气候变化和减缓气候变化是当今和未来土木工程师所面临的重大挑战。

图1中间的方框显示了支持当代和后代人类居住所必需的民用基础设施的特征。耐久性延长了建筑结构的寿命，免去了重复维修以及相关的经济和环境成本。它还要求建筑结构不能因功能退化而被削弱，尽管在某种程度上退化会限制其回弹性。一种结构不具备耐久性和回弹性就不可能持续发展。缺乏回弹性意味着结构的反复重建，特别是面对气候变化所引发的危害。根据世界环境与发展委员会（World Commission on Environment and Development）[1]的说法，“可持续发展是指满足当代人的需求，又不损害子孙后代满足其自身需求能力的发展。”可持续基础设施工程可以定义为与可持续发展原则相一致的材料开发、结构设计和施工以及基础设施管理的综合系统。

* Corresponding author.

E-mail address: vcli@umich.edu

混凝土基础设施的理想特性意味着对现代混凝土材料的若干高性能要求。首先，这种材料必须是绿色环保的，具有低能耗和低碳排放强度。这是直接支持基础设施可持续性的必要条件。其次，高性能混凝土必须具有延展性，以防止材料脆性断裂引起灾难性破坏。这对维持基础设施的回弹性至关重要。延展性也有助于基础设施的耐久性，如抑制混凝土覆盖层剥落，这是混凝土结构劣化的一种常见现象。但是，提高基础设施耐久性的最直接的方法应该是增强高性能混凝土自体裂缝宽度控制能力，以限制水和侵蚀剂通过混凝土表层进入，从而消除许多常见的基础设施劣化机制，如钢筋的腐蚀。因此，真正的高性能混凝土必须同时具有材料绿色环保性、拉伸延展性和自体裂缝宽度控制的特性，如图1中左侧方框所示。

智能材料是指能够对外部环境的刺激作出反应，并且在没有人为干预的情况下提供有用功能的材料。例如，自修复材料对水和空气做出反应，进行损伤修复，以恢复其固有的力学和传输性能。因此，智能材料同时支持基础设施的耐久性和回弹性。自感知材料对外部荷载做出反应，并确定其受损坏的位置和程度。它通过告知决策者需要何时何地去维修建筑结构来维持其持久性，并通过提供有关建筑结构是否可以重新投入使用的信息来支持建筑结构的回弹性，从而允许在主要荷载事件之后提前恢复建筑结构的使用。如果结合自感知和自修复的性能，材料是在没有外部干预的情况下传达愈合恢复水平的。自热自适应功能使材料能随着空气温度的升高自动改变其蓄热能力，从而限制建筑物内部温度的升高，并使其对能量密集型空调的需求降到最低。

该功能直接解决了建筑物在其生命周期使用阶段的可持续性。光催化材料通过产生电子-空穴对和高活性羟基自由基来响应来自太阳光的紫外线（UV）照射，从而减少对水和能量密集型洗涤剂的需求，并通过去除污染物来提高城市建筑结构周围空气的质量。这一功能也直接解决了基础设施的可持续性。如图1中右侧方框所示的智能材料的功能示例，通过对基础设施耐久性、回弹性和可持续性做出贡献，智能材料为高性能混凝土增添了重要价值。

为了在21世纪提高民用基础设施的耐久性、回弹性和可持续性，开发具有多种智能功能的高性能混凝土材料十分必要。尽管大量的研究已经涉及了高性能特性和智能功能，但要充分开发一种体现这些理想特性和智能功能的工业可扩展混凝土材料，还需要做更多的工作。开发同时具有高性能和智能的混凝土材料可能极具挑战性，但为了我们的地球，这应该是我们的目标。

工程水泥基复合材料（ECC）是一种试图体现上述愿望的混凝土材料。全球越来越多的研究人员和工业早期采用者已经对这种材料进行过广泛的研究和开发。本文将对ECC的特征和功能的一些亮点进行描述。该材料在运输、建筑和水利基础设施中的应用示例可参见参考文献[2]。这种材料也被称为应变硬化水泥复合材料（SHCC），这个名称强调了这种材料独特的拉伸应力-应变行为。

2. ECC 对基础设施耐久性的贡献

民用基础设施的耐久性受结构设计、使用环境和暴

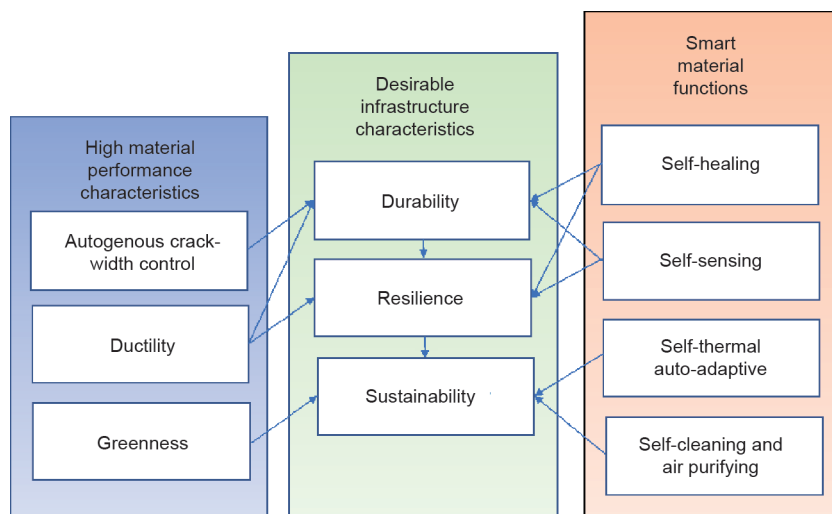


图1. 将高性能特性与多智能功能综合到混凝土材料中，以增强基础设施的耐久性、回弹性和可持续性。

露环境的影响。然而，混凝土材料的耐久性在建筑结构中起着关键作用。建筑结构中混凝土材料的耐久性与实验室中混凝土材料的耐久性不同，因为材料在现场需要承受荷载。荷载可以是永久荷载，也可以是可变荷载。由于强制变形（如热循环或基础沉降）以及混凝土构件的约束，该荷载也可能是诱导荷载。无论什么原因，荷载都可能导致混凝土材料开裂。尽管教科书上说混凝土结构在设计时是允许带裂缝的，但实际情况是裂缝加速了结构的劣化，缩短了结构使用寿命。

图2显示了不同形式的结构劣化，随着裂缝宽度的增加，水渗透、氯离子扩散、钢筋腐蚀等输运现象也在加剧。基于已发表文献中的数据[3-9]，将裂缝宽度在0.1 mm处对应的劣化程度归一化。在图2中，最明显的是劣化曲线的常见弯头形状。裂缝宽度在0.1 mm以下，特别是在小于0.05 mm时，劣化程度最小。然而，在裂缝宽度超过0.1 mm时，劣化程度呈非线性加速。图2表明，裂缝宽度对民用基础设施的使用寿命起着至关重要的作用。

进行实验室耐久性试验时，混凝土样品被暴露在不同的环境中。这是了解环境暴露对材料完整性影响的重要测试，而材料完整性由材料化学和微观结构决定。

然而，图2中的数据表明，真正的结构耐久性不仅要具有适当的材料化学和微观结构，还需要现场控制裂缝宽度。

在过去，结构中的裂缝控制是由钢筋来完成的。经验表明，这不是一种可靠的方法。更可靠的方法是直接在材料内部建立自体裂缝宽度控制。也就是说，无论荷载、加固细节、结构尺寸或暴露环境如何，裂缝宽度都将被设计为混凝土的固有特性。

图3为ECC的拉伸应力-应变曲线[10]。超出弹性极限时，ECC表现出应变硬化响应。也就是说，随着单轴拉伸试样的损坏，ECC的承载能力不断提高。虽然试样的微裂缝数目不断增加，但其宽度仍然被限制在0.06 mm以下。该样品不含任何钢筋。

图4[11]显示了不同尺寸的普通混凝土和ECC样品的裂缝宽度的发展情况。裂缝是由于干燥条件下的收缩引起的。对于普通混凝土，裂缝宽度随样品尺寸线性增加，且无限增加。对于ECC，裂缝宽度被限制在0.05 mm以下，与样品尺寸无关。

这两个实验证实了ECC的裂缝宽度与荷载和样品尺寸基本无关，也与钢筋无关。

已有大量文献对ECC的耐久性进行了记录[4,5,12-

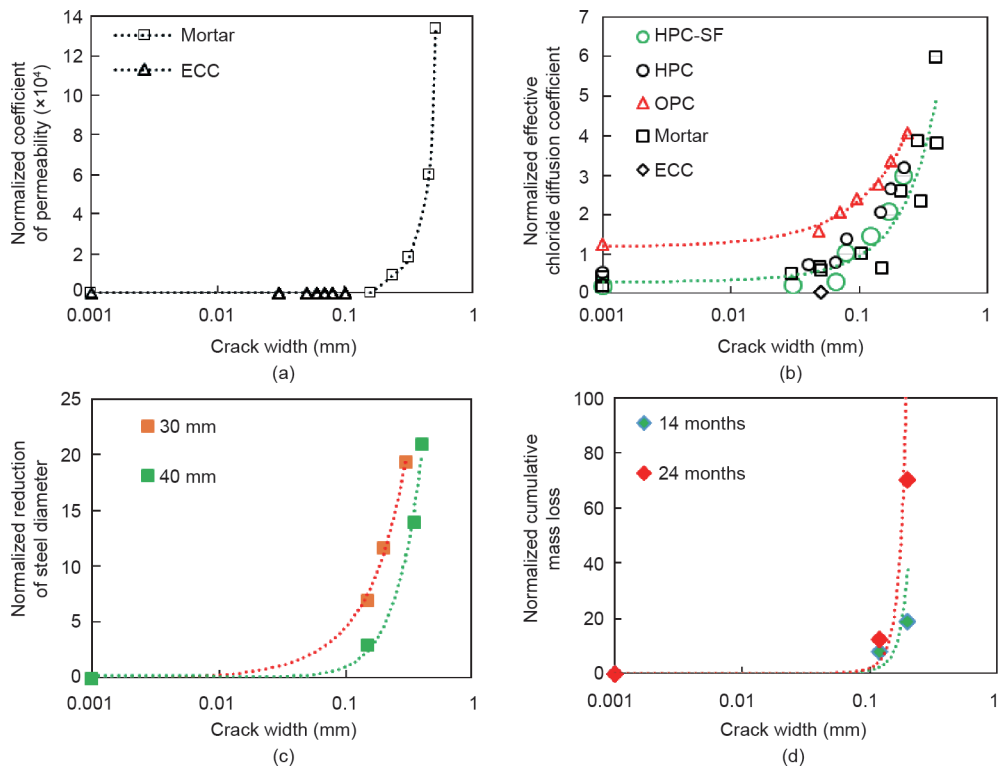


图2. 劣化速率由渗透系数 (a)、有效氯离子扩散系数 (b)、腐蚀钢直径减小量 (30 mm和40 mm表层厚度) (c) 和累积质量损失 (d) 表示，当裂缝宽度超过0.1 mm时表现为加速 (14个月和24个月的加速腐蚀试验)。将劣化速率数据归一化为每个图的0.1 mm裂缝宽度的数据集。HPC-SF：含硅粉的高性能混凝土；HPC：高性能混凝土；OPC：普通硅酸盐水泥。

14]。为了说明这种耐久性，图5[5]显示了混凝土梁试件在不同弯曲挠度下的有效氯离子扩散系数。尽管在ECC中观察到了有效氯离子扩散系数的增加，但这种增加是

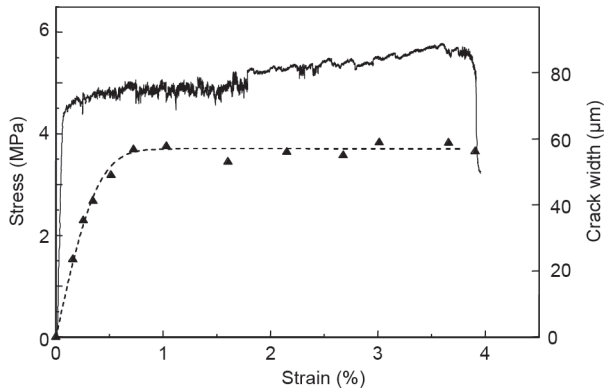


图3. 在典型的ECC中，应力-应变关系表现为3.8%的高延展性和自动控制裂缝宽度低于0.06 mm。经美国混凝土学会许可，改编自参考文献[10]，©2007。

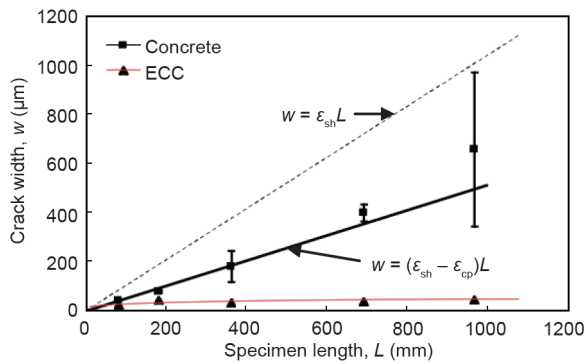


图4. 与普通混凝土不同，ECC中的裂缝宽度(w)与样品长度(L)无关，它是一种固有的材料特性[11]。 ϵ_{sh} 是干燥收缩应变， ϵ_{cp} 是蠕动应变。

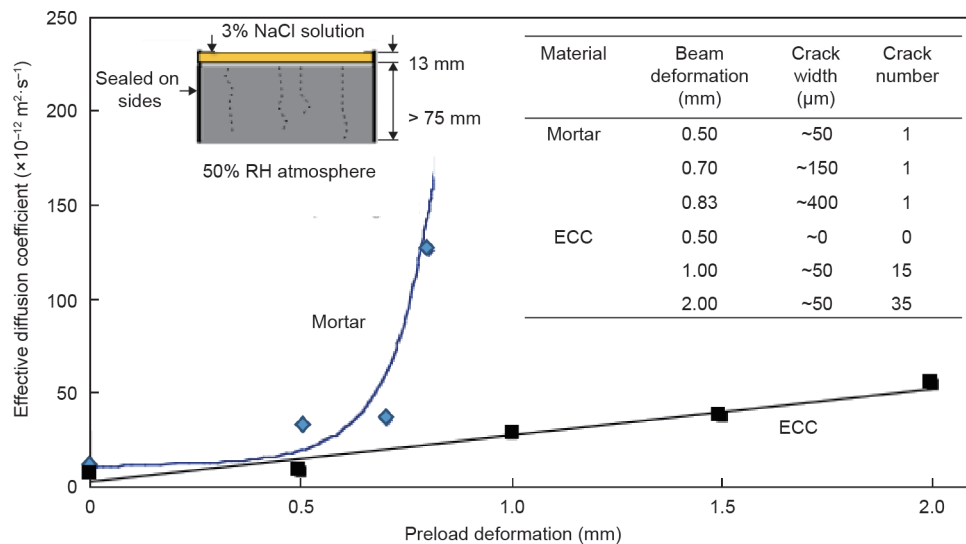


图5. 裂化砂浆和ECC的有效氯离子扩散系数。砂浆试件扩散系数随着梁试件的预变形呈指数增长，ECC梁的扩散系数则呈线性增长。RH：相对湿度。经美国混凝土学会许可，改编自参考文献[5]，©2007。

线性的，这表明在较高的强制变形下混凝土梁试件中裂缝的数量会不断增加。相比之下，由于单一裂缝的裂缝宽度增加，砂浆的有效氯离子扩散系数呈指数增长。该实验数据表明裂缝宽度比裂缝数对结构耐久性的影响更大。ECC内部固有的紧密裂缝宽度降低了氯离子进入混凝土结构单元表层的速度。裂缝宽度与氯离子扩散系数之间的相关性与图2 (b) 所示的弯头形状劣化曲线一致。

裂缝宽度对结构耐久性的重要性是显而易见的。这一点是通过梁试件的钢筋在加速腐蚀暴露状态下的腐蚀速率的实验证据得到验证的。如图6[12]结构所示，对一组梁试件进行预加载并使其保持弯曲状态。加速腐蚀过程需要梁试件暴露在潮湿[盐水淋浴，相对湿度 (RH) 90%，2天]和干燥 (RH 60%，5天) 循环条件下28天。控制钢筋混凝土 (R/C) 梁存在单个裂缝，而增强工程水泥复合材料 (R/ECC) 梁存在多个裂缝，且裂缝宽度低于0.01 mm。R/C梁和R/ECC梁的腐蚀速率表现出明显不同的劣化模式和劣化程度。在R/C梁中，钢筋混凝土裂缝锈蚀严重，而其余钢筋仍处于未锈蚀状态[图7 (a)] [13]。在R/ECC梁中，钢筋沿ECC中的多个裂缝点出现腐蚀，但腐蚀速率明显降低[图7 (b)]。这种腐蚀劣化速率和损伤形态的对比直接反映了ECC的裂缝控制行为。ECC自体裂缝宽度控制性能限制了氯离子渗透通过ECC表层，进而阻止了钢筋的后续腐蚀。实验结果与图2 (c)、(d) 所示的弯头形状劣化曲线一致。

虽然上述讨论利用了平均裂缝宽度来描述损伤程度及其对各种劣化机制的影响，但应注意ECC中的裂缝宽

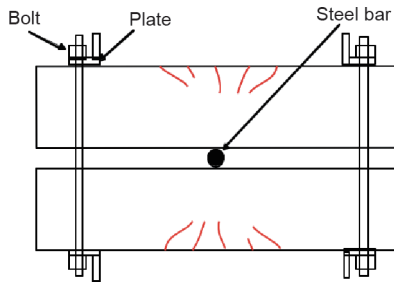


图6. 通过拧紧螺母诱导产生裂缝后, 将受到预荷载的梁组件暴露于加速腐蚀环境28天[12]。

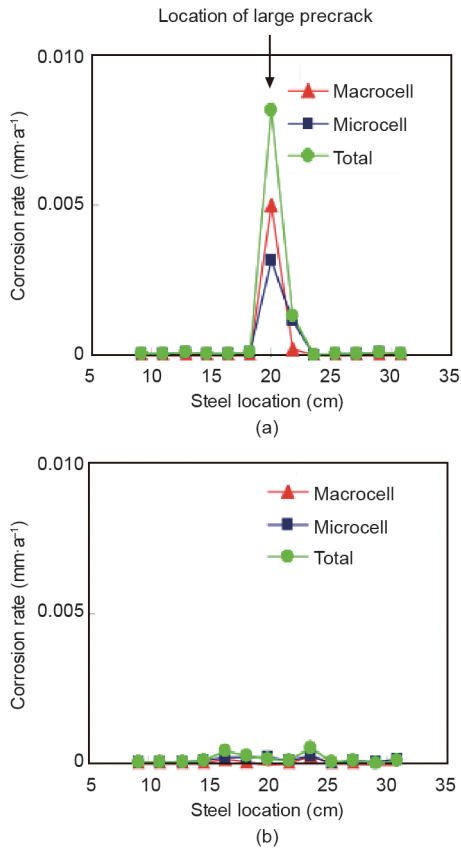


图7. (a) R/C梁和 (b) R/ECC梁的钢筋腐蚀速率。后一种情况的腐蚀沿钢筋扩散, 但其腐蚀扩散速度大大低于钢筋在R/C梁中的腐蚀扩散速度。经美国混凝土学会许可, 改编自参考文献[13], ©2008。

度通常呈对数正态分布, 且大的裂缝可能控制着运输和劣化机制[6,15,16]。对ECC材料耐久性的综合评价见参考文献[15]。

3. ECC 对基础设施可持续性的贡献

增强R/ECC结构的耐久性意味着在结构使用阶段可减少修复事件。也就是说, 与维修或更换事件相关的能量消耗和污染物排放也可以大幅减少。ECC对基础设施可持续性的贡献可通过位于美国密歇根州南部的桥面板进行量化。桥面板用ECC连接板进行改造, 传统的伸缩缝被替换(图8 [17])。为了满足桥面板频繁的维护需求(这也是伸缩缝的典型特征), 2005年研究人员在桥面板上安装了连接板。

综上所述, 考虑到R/ECC的耐久性的特点, 有研究者建立了生命周期评价模型[18]来计算可持续性指标。采用传统伸缩缝的桥面板与采用ECC连接板的桥面板的修理时间差异如图9[18]所示。该模型解释了由于修复事件而导致的交通模式的变化。

图10[18]显示了ECC改装面板和具有传统伸缩缝的面板的能源消耗总量和二氧化碳(CO₂)当量的比较。

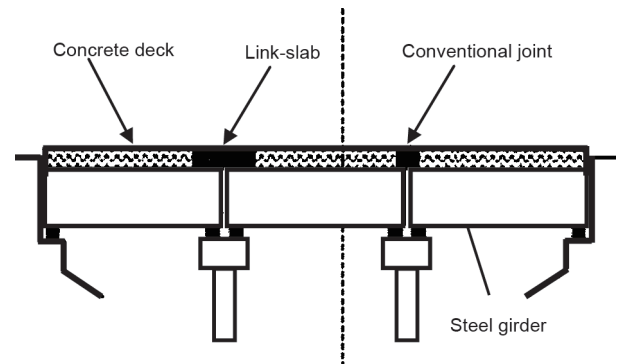


图8. 用ECC连接板取代传统伸缩缝的桥面板。经Springer许可, 改编自参考文献[17], ©2009。

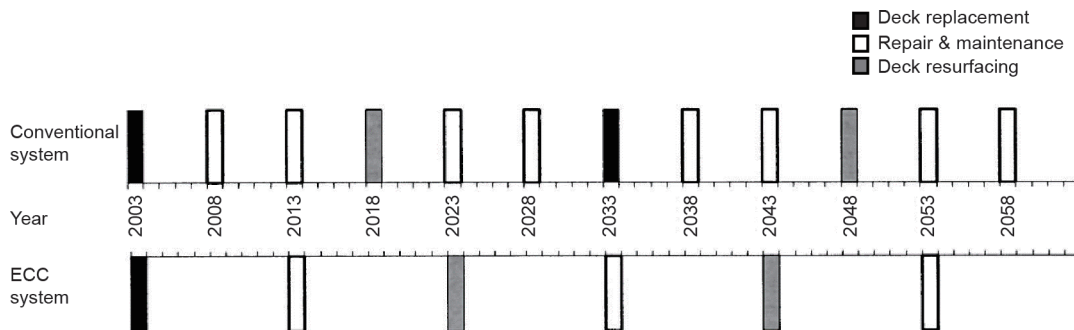


图9. 采用传统伸缩缝的桥面板与采用ECC连接板的桥面板的修复频率。经美国混凝土学会许可, 改编自参考文献[19], ©2005。

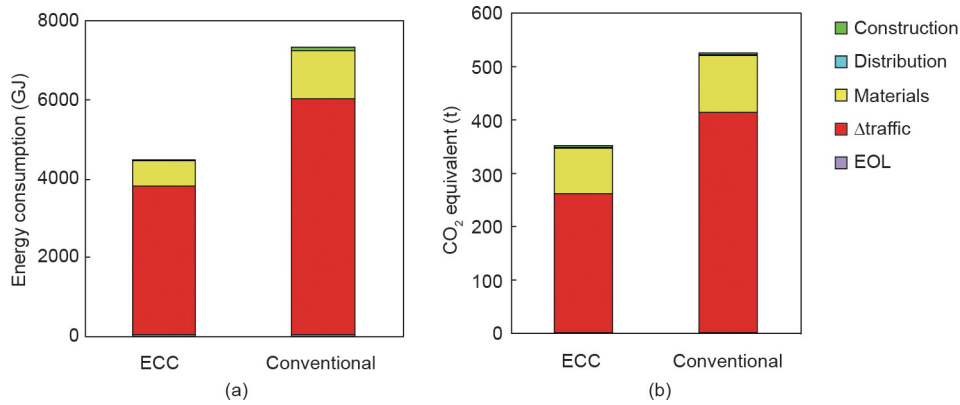


图10. 生命周期评估模型的结果，显示了ECC和传统桥面板体系在其生命周期内的能源消耗总量 (a) 和CO₂当量 (b)。用ECC连接板替代传统伸缩缝，可节省40%的能源消耗总量和33%碳足迹。因分布和寿命终止 (EOL) 的贡献太小，所以无法在当前使用的比例尺上观察到。经美国土木工程师学会许可，改编自参考文献[18]，©2005。

经过ECC连接板改造的桥面板更加耐用，可以节省40%的能源消耗总量和33%的CO₂当量。由于在桥面板使用寿命 (60年) 期间，维修事件 (Δtraffic) 的减少可缓解交通模式的改变，从而能节省大量资金。维修或更换接头所需的材料量的减少也节省了一些费用。该研究强调了ECC的拉伸延展性和紧密裂缝宽度对提高基础设施耐久性和可持续性的价值。虽然材料的绿色环保性对降低建筑材料能源消耗和碳排放是非常重要的，但结构耐久性在实现基础设施的可持续性方面起着更加重要的作用。

ECC的绿色环保性受到了人们的广泛关注。水泥凝胶可部分或全部地用辅助胶凝材料 (如高掺量粉煤灰 [19] 或粒化高炉矿渣 [20])、铁尾矿粉 [21] 填充物或粉煤灰地质聚合物 [22] 等硅酸盐水泥自由基黏结剂替代。ECC中常用的硅砂制品可由石灰石粉 [20] 替代，也可由铸造焙烧炉砂 [23]、铸造绿砂 [23]、铁尾砂 [24] 等工业废料替代。ECC中常用的聚乙烯醇 (PVA) 纤维可以用低能耗的聚丙烯纤维或可再生植物纤维 curaua [25] 来替代。Lepech 等 [23] 提出了一种系统的ECC绿色环保化方法，以确保新的性能适合铸造和保持ECC独特的拉伸延展性。

4. ECC 对基础设施回弹性的贡献

弹性结构可被描述为：在给定的荷载条件下可以延迟故障的产生，限制因故障而导致的功能退化，并能以更少的时间和更低的成本恢复至原有结构。该概念如图11所示，图11比较了传统结构和回弹性更强的结构的质量。

ECC的拉伸延展性使R/ECC结构在结构回弹性方面

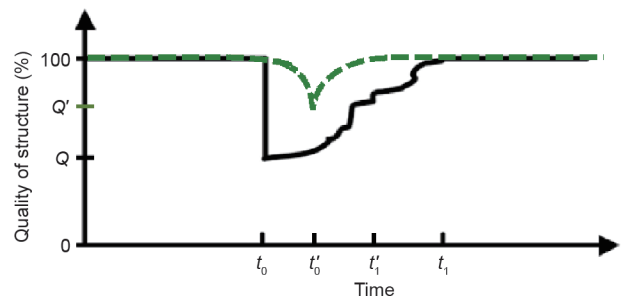


图11. 弹性基础设施由故障延迟、退化限制和快速的事后修复来定义。虚线展示了一个更具弹性的结构的质量变化，在与弹性较差的结构相比较时，它延迟了故障的发生 (从 t_0 到 t'_0)，限制了由于故障导致的功能退化 (从 Q 到 Q')，并在主要荷载事件后能更快地恢复功能 [从 $(t_1 - t_0)$ 缩短到 $(t'_1 - t'_0)$]。

具有显著优势。通过对比R/ECC梁与R/C梁在反向循环荷载下形变的滞后性 (图12) [26] 可以说明这一优势。采用不同材料的梁之间的损坏对比如图13所示 [26]。即使没有抗剪箍筋，R/ECC梁也能通过ECC在拉伸和剪切形变中的延展性来限制损坏 [26]。

以梁、柱、框架和墙为基础的大量实验研究已经得出了相同的结论：ECC的拉伸延展性有助于增强结构的回弹性 [27–32]。这一优势已在一些新的建筑物中得到利用。在这些建筑物中，R/ECC耦合梁被用来增强抗震安全性、施工便利性和增大实用楼面空间，从而节省建筑成本 [33]。最近，日本部署了超过1000台R/ECC预制减震器，以改造其沿东海岸线的高架桥。

5. 多功能 ECC

5.1. 自热自适应 ECC

自Alkan [34] 的开创性工作之后，自热自适应ECC [35] 被开发出来，以实现建筑物的节能目标。相变材料 (PCM) 可以通过从固相转化到液相时吸收热量

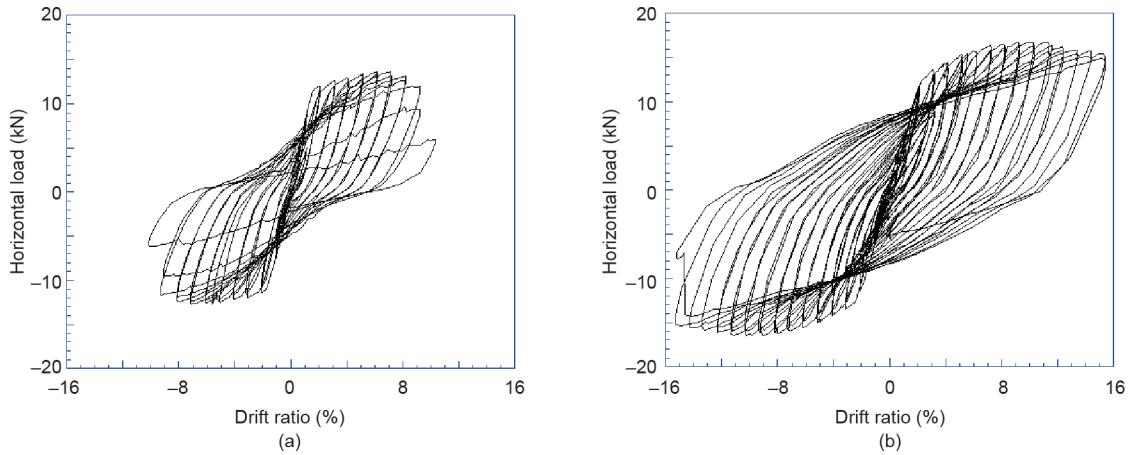


图12. R/C (a) 和R/ECC (b) 弯曲构件的滞后性。在使用R/ECC构件时,故障只有在更高的荷载和变形条件下才发生。由于ECC持续有效的限制, R/ECC构件在峰值之后的荷载下降率显著降低。经美国混凝土学会许可, 改编自参考文献[26], ©2002。

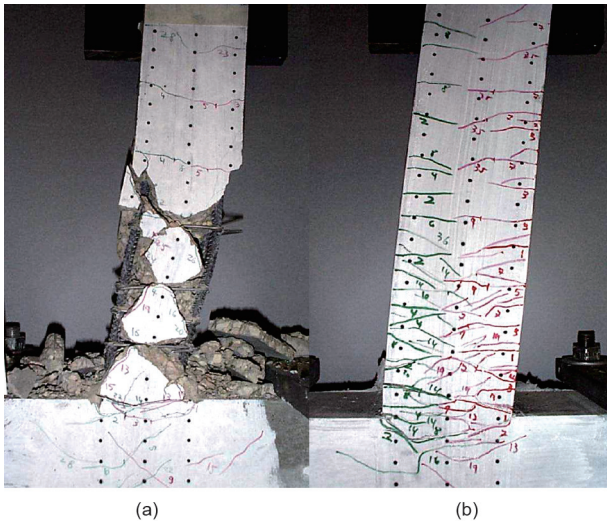


图13. R/C (a) 和R/ECC弯曲构件 (b) 在平移10%时的偏转形状和损伤模式。在R/C构件中,随着黏接剂的断裂,结构表层也相继脱落。在R/ECC构件中,显而易见,结构的破坏由底层开始扩散。损伤模式的对比表明, R/ECC构件在地震发生后能在较短的时间内恢复,而且有时需要较少的修复。经美国混凝土学会许可, 改编自参考文献[26], ©2002。

的形式暂时存储能量,然后再通过从液相转化回固相的形式释放热量。石蜡在 22.8°C 下经历了这种相变,是一种适合此类应用的相变材料,因为该转变温度与人体舒适度的变化相一致。图14[35]显示了一种嵌入ECC内部的 $5\mu\text{m}$ 微封装PCM。所得到的PCM-ECC在预期的转变温度下热容明显升高(图15[35])。与没有添加PCM的ECC相比,具有3% PCM的PCM-ECC具有大约35%的热容。当温度回到转变温度以下时,热容曲线是可逆的,因此该功能可无限重复。

研究人员使用PCM-ECC在美国密歇根州安娜堡的一户家庭中进行了一项关于太阳能烟囱(solar chimney)的研究,最后发现,在没有空调的情况下,该建筑物内

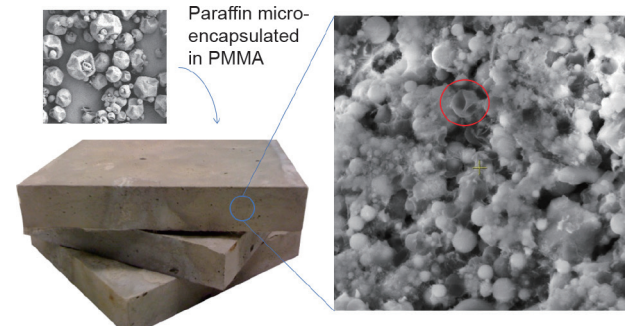


图14. 含有石蜡基PCM微胶囊的自热自适应ECC。 $5\mu\text{m}$ 的PCM微胶囊(红色圆圈)形如碎球或冷冻干豌豆。(断裂表面的显微照片上显示的光滑球形颗粒是未反应的飞灰颗粒。)当温度升高到 22.8°C 以上时,石蜡经历从固体到液体的相变。具有低黏结性能的这些微米尺寸颗粒的存在改变了ECC的微观结构和性质。PMMA: 聚甲基丙烯酸甲酯。经Elsevier公司许可, 改编自参考文献[35], ©2014。

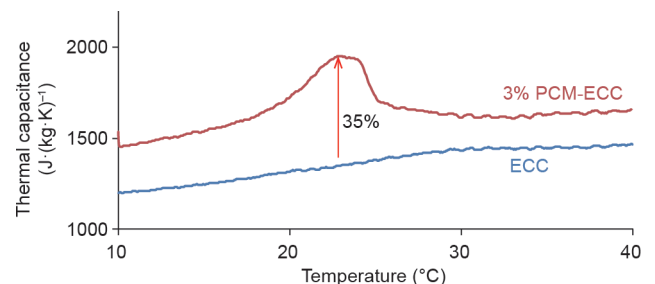


图15. 含有3%PCM的PCM-ECC和对照组ECC的热容随温度增加的曲线图。热容在约 23°C 下显示出35%的增长,该温度正好是石蜡从固体到液体发生相变的温度。这种潜热吸收可以产生临时能量存储和更明显的热质量,可用于提高建筑物的能源效率。当温度下降,液体蜡转变为固体状态时,相变现象是可逆的。经Elsevier公司许可, 改编自参考文献[35], ©2014。

部的峰值温度保持在 23°C 以下,并且与使用没有相变功能的传统混凝土的等效情况相比,其峰值温度降低了约 5°C ,延迟了2 h。

含有3% PCM微胶囊的材料拥有与ECC相协同的拉伸性能,其具有达到4%的拉伸应变能力,产生的裂缝

宽度为10 mm。然而，添加PCM微胶囊时，材料的抗压强度会受到负面影响，降至约28 MPa。

5.2. 自修复 ECC

关于水泥基材料的自修复现象的综述可参见参考文献[37]。

ECC具有独特的微裂缝损伤自修复能力。ECC的自修复能力结合了裂缝表面的自封闭功能和黏接功能。自封闭功能恢复了水渗透和氯离子扩散等传输性能，而黏接功能则恢复了拉伸强度、刚度和延展性等力学性能。有研究显示[36]，ECC的自修复功能在裂缝宽度小于50 μm ，以及当受损材料暴露于潮湿和干燥循环条件下时最有效。图16[36]显示了裂缝宽度函数的共振频率(RF)比。微裂缝出现后RF开始下降，而将ECC暴露于干湿循环条件下时，RF比明显地恢复到了100%。除了RF恢复之外，使用三维(3D)X射线计算机显微断层扫描技术[38]和扫描电子显微镜/X射线能谱仪(SEM/EDS)[39]研究了材料自修复的证据，证明更紧的裂缝可以自修复得更好。

当未水化的水泥颗粒和火山灰水泥与水接触时，自修复机制会持续产生水化和凝结硬化反应。反应产生的水化硅酸钙(CSH)填充微裂缝并黏合裂纹面。除了

CSH外，通过扫描电子显微镜(SEM)证实裂缝内部形成了碳酸钙(CaCO_3)晶体(图17)，这些晶体可能是氢氧化钙(CaOH)相与碳酸(来自周围空气中溶于水的 CO_2)反应的结果[39]。这些自修复的产物在有裂缝的墙壁上以及桥接纤维的表面上都有发现。

由于未水化的混凝土颗粒可以长期保持原有性质，

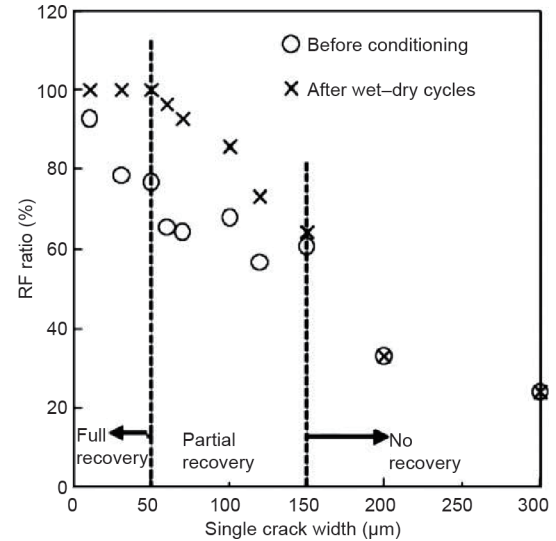


图16. RF随着裂缝宽度的增加而减小。在干湿循环后，由于自修复而恢复RF的现象在更紧密的裂缝宽度条件下有所增强。在该研究中，当裂缝宽度小于50 μm 时，RF的恢复率为100%。经Elsevier公司许可，改编自参考文献[36]，©2009。

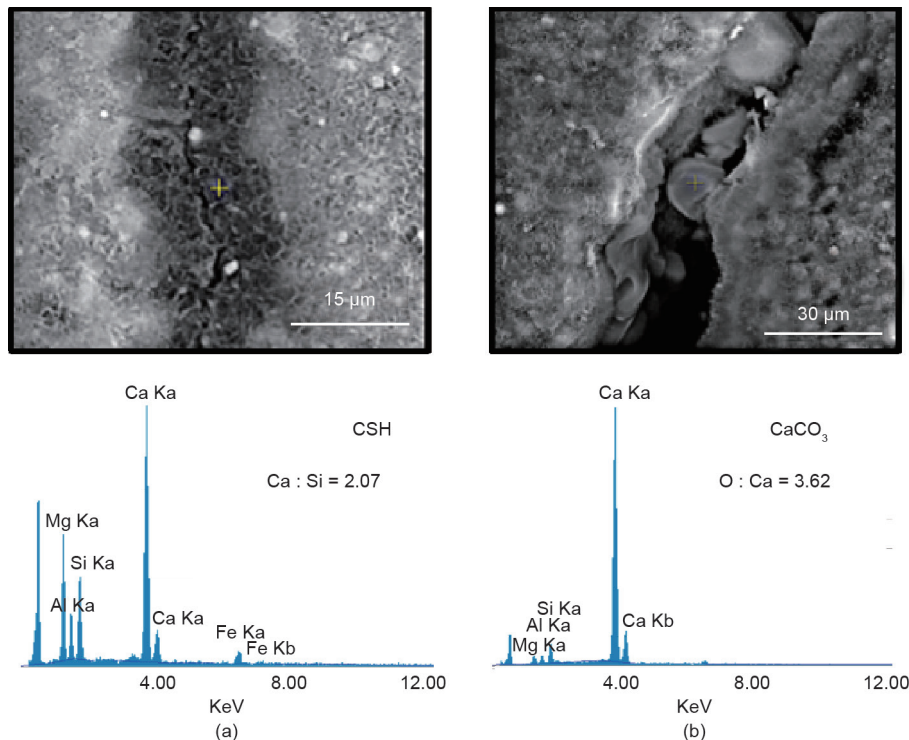


图17. SEM和EDS探测 (a) CSH的存在和 (b) ECC自修复裂缝中 CaCO_3 晶体的存在。在相同的ECC样品中可同时观察到两种自修复产物。经美国混凝土学会许可，改编自参考文献[39]，©2010。

所以ECC的自修复功能是可持续的。Yildirim等[40]的实验证明,在接触水后,尤其是当水中所含有的CO₂浓度较高时,已经存放一年的ECC样本仍然可以达到有效的自修复效果(图18)。

有研究指出,ECC的自修复功能是可重复的[36,41]。实验结果表明,经10次干湿循环后,因多次施加压力而损坏的试验样品可恢复其刚度和强度(图19)。

5.3. 自清洁和空气净化式 ECC

在Cassar等[42,43]的开创性工作的引导下,ECC还

可以具有自清洁和空气净化功能。

如图20所示,研究人员用罗丹明B(RhB)对ECC进行染色,当被染色的ECC暴露于UV照射下时会产生反射损失,但是通过在ECC中添加10% TiO₂纳米颗粒后,发现该反射损失是可以恢复的[44]。类似的,随着UV对TiO₂-ECC的照射,反应室中NO和NO_x的浓度显著降低(图21)。

5.4. 自感知 ECC

自感知混凝土材料领域的研究由Chung [45]等开创。

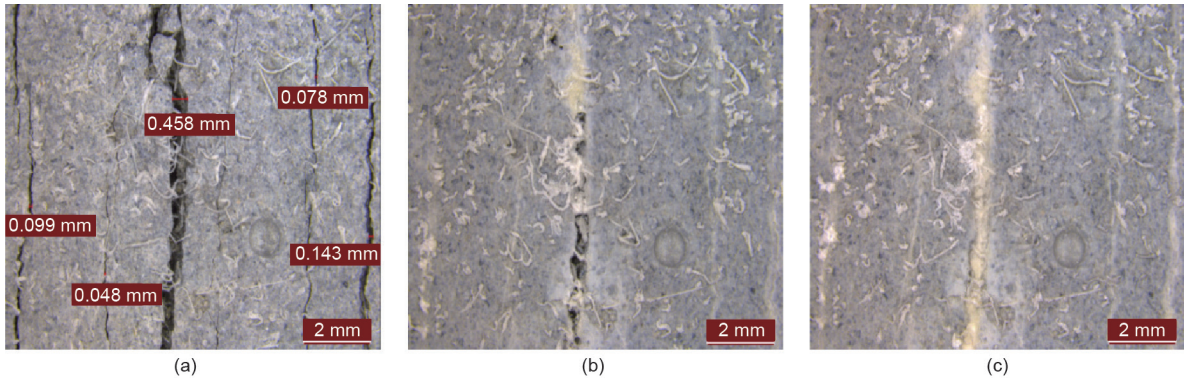


图18. 存放一年的ECC样本因分裂张力荷载而受损(a),在15天(b)和暴露于富含CO₂的水中30天(c)后显示出自修复的效果。经Elsevier公司许可,改编自参考文献[40], © 2018。

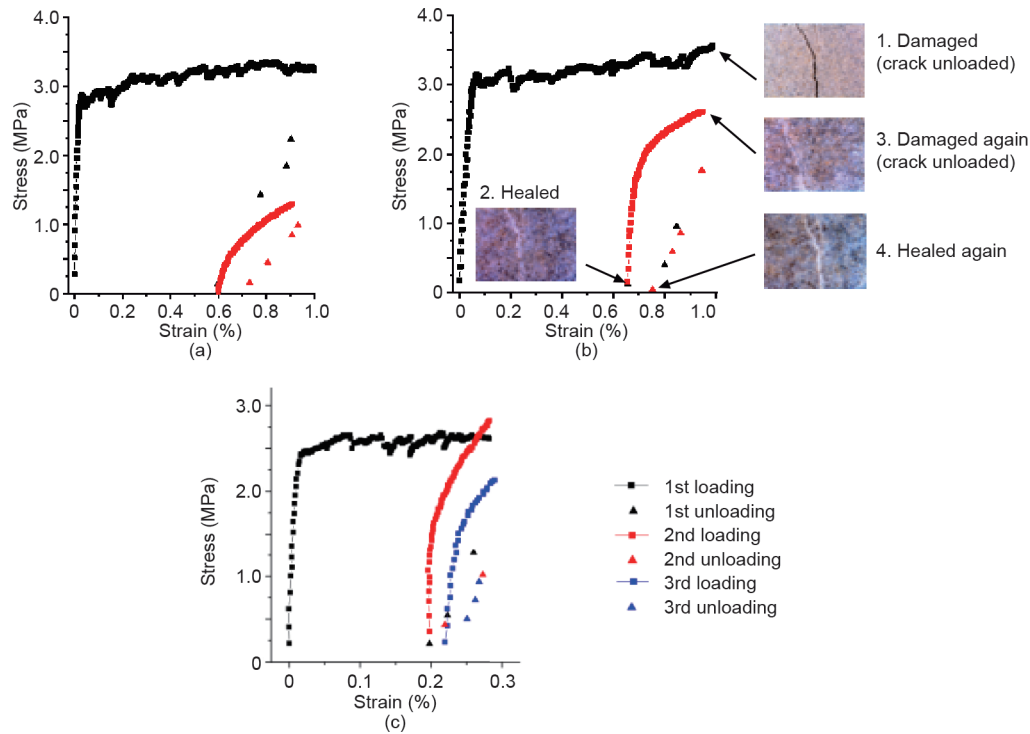


图19. 经重复施加压力的ECC的自修复过程。(a) 暴露于空气中的试验样品在重新施加压力时表现出低刚度的特征;(b) 暴露于10次干湿循环条件下的试样在重新施加压力时,其刚度得到了恢复;(c) 由于干湿循环为复合材料的自修复提供了条件,在实验中,经过两次重复施加压力的试样,其刚度得到了恢复。经日本混凝土协会许可,改编自参考文献[41], © 2010。

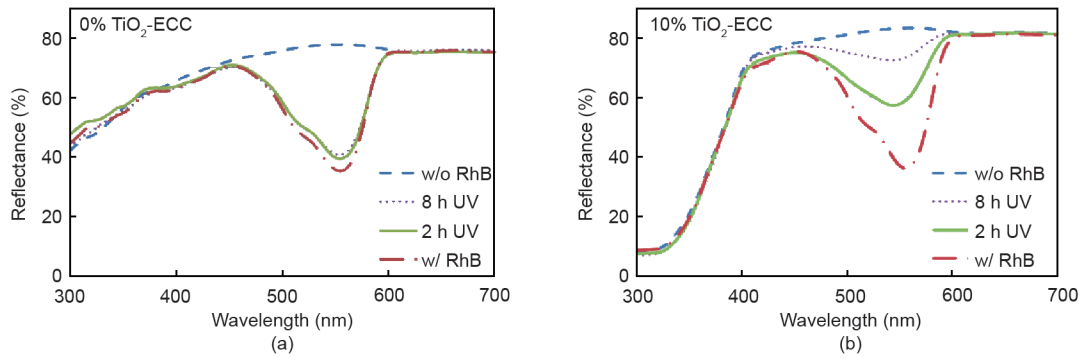


图20. 经RhB染色的ECC降低了其在450~600 nm波长范围内的反射率。(a) 在没有添加TiO₂的ECC中, 暴露于UV照射的反射率恢复可以忽略;(b) 在TiO₂-ECC样品中发现了明显的反射率恢复情况。w/o: 没有; w/: 有。经Elsevier公司许可, 改编自参考文献[44], ©2015。

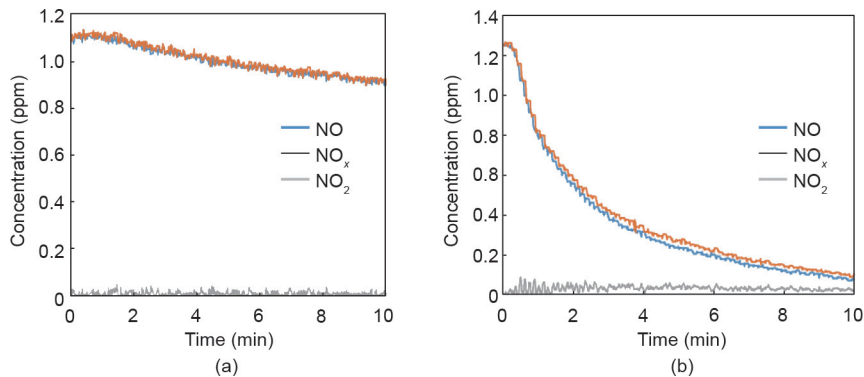


图21. 利用TiO₂实现的ECC的空气净化功能。(a) 在没有UV照射的情况下, 反应室中NO和NO₂浓度出现缓慢降低。(b) 在UV照射下, NO和NO_x的浓度在10 min内出现快速下降, 这表明TiO₂-ECC具有光催化空气净化功能。1 ppm = 10⁻⁶。

自感知ECC是为了自动检测和报告损伤而开发的[46]。ECC的这一特性是依据以下原则建立的: ECC是一种半导体材料, 其电阻率对由于荷载所引起的材料微观结构的变化具有敏感性。具体而言, 荷载引起的微裂缝改变了导电通路。根据定义, 裂缝是各向异性的, 受影响最大的路径是垂直于裂缝线的路径。该理论使得采用电阻断层成像(EIT)来映射ECC中的裂缝损坏成为可能。EIT使用可调节的正弦交流电(AC)来刺激样本并确定电压的幅值和相位, 从而计算出作为AC频率函数的阻抗。当利用电极阵列对样本周边电压进行监测时, 所收集的数据可以倒转为介质中每个点的电导率。图22[46]展示了这个原理。利用电导率图对不同荷载阶段检测到的微裂缝损伤进行检测, 尽管还可以进一步提高分辨率, 但是该微裂缝损害与微裂缝的视觉图像已经吻合得较好。

利用ECC的自感知功能可以在重大荷载事件后对结构状况进行自动报告。这些信息可以行之有效地支持关于是否继续操作、修复结构或更换结构的决策, 可以提高事件处理的效率, 并且可以在重大荷载事件中降低对第一时间参加响应的人员的危险性。

6. 结论

本文描述了为了最大限度地提高民用基础设施的耐用性、回弹性和可持续性, 将混凝土材料的高性能与智能功能两大特征相结合的需求。拉伸延展性和自体紧密裂缝宽度控制能力有助于实现基础设施中所需的这些性能。本文以ECC为例, 指出自适应、自感知、自热自适应、自清洁、空气净化等功能可以被整合到高性能混凝土材料中, 从而发展成为具有高性能和多功能性的现代建筑材料。随着材料的进一步升级和改进, 这些材料在实践中可以得到更广泛的应用。我们希望, 当前的技术状况能够为民用基础设施建设指明一个可行的方向, 从而支持未来真正实现智能城市的雄心壮志。

尽管在过去十年中, 高性能多功能混凝土材料的研究取得了重大进展, 但仍需进一步研究, 以使此类材料达到显著的绿色化, 最好能使其转化为负碳材料。为此, 研究人员应认真考虑利用CO₂作为资源。这个过程需要将材料组成工程与固化过程工程结合起来, 同时将材料开发与现代先进的施工方法相结合, 如建筑领域的3D打印法。具有极强耐久性材料的工业应用, 如具有自体

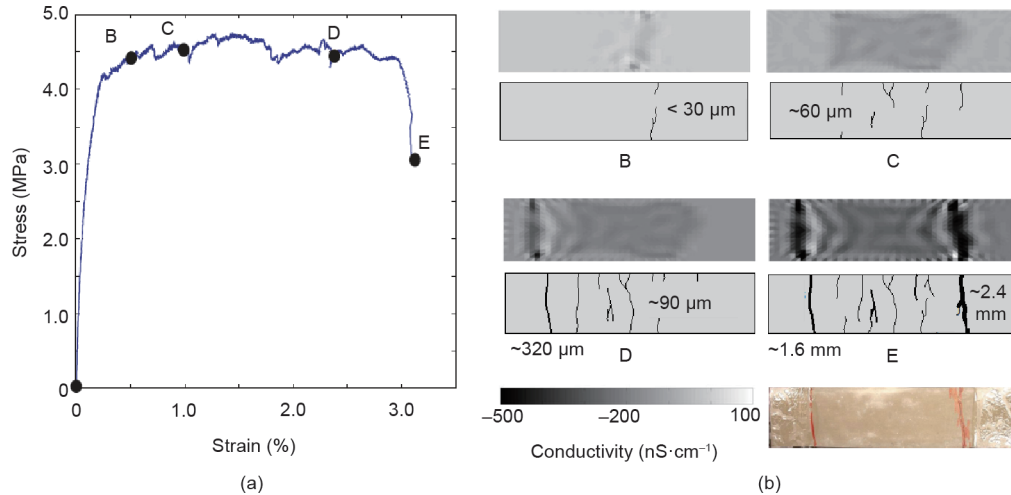


图22. (a) 拉伸应力-应变曲线显示出使用EIT制作 (b) 电导率图的应变水平 (B~E)。对与应变水平相对应的表面裂缝 (为了清楚起见, 使用墨迹进行标记) 进行展示。在实验中, 较大的裂缝成像明显, 但较小的裂缝需要提高分辨率才可以被识别 [46]。

紧密裂缝宽度控制能力的材料, 将从该领域试点项目的数据中获益。尽管抗压强度仍然是衡量混凝土质量的一个黄金标准, 但是大多数结构设计规范在注重混凝土抗压强度的同时, 还需要进行更新, 以反映现代基础设施耐久性、回弹性和可持续性要求所需的高性能混凝土特性。这些设计规范的新特性可包括最小拉伸延展性和最大自体裂缝宽度控制能力。最后, 具有模仿某些生物材料的多功能性的高性能混凝土材料正在迅速成为现实, 应该被用来应对气候变化并减缓气候变化进程。对高性能多功能混凝土的研究应该是21世纪土木工程界和决策机构的高度优先事项。

Acknowledgements

Much of the experimental data cited in this paper have been obtained by current and former graduate students and post-docs. The data in Fig. 2 were compiled by Dr. Yi Bao and Dr. Duo Zhang. Their contributions are acknowledged. The data in Fig. 21 were generated from an experimental study by Ms. Mingfeng Xu, a scholar at the University of Michigan visiting from Tongji University in China. This work is partially supported by a grant from the CMMI program at the United States National Science Foundation(1634694), by a Visiting Fellowship from the Institute of Advanced Studies at the Hong Kong University of Science and Technology, and by the James R. Rice Professorship and the E. Benjamin Wylie Professorship at the University of Michigan in Ann Arbor.

References

- [1] Brundtland GH. Our common future: report of the World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press; 1987.
- [2] Rokugo K, Kanda T, Yokota H, Sakata N. Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. *Mater Struct* 2009;42(9):1197–208.
- [3] Wang K, Jansen DC, Shah SP, Karr AF. Permeability study of cracked concrete. *Cement Concr Res* 1997;27(3):381–93.
- [4] Lepech MD, Li VC. Water permeability of engineered cementitious composites. *Cement Concr Compos* 2009;31(10):744–53.
- [5] Sahmaran M, Li M, Li VC. Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Mater J* 2007;104(6):604–11.
- [6] Liu H, Zhang Q, Gu C, Su H, Li VC. Influence of micro-cracking on the permeability of engineered cementitious composites. *Cement Concr Compos* 2016;72:104–13.
- [7] Djerbi A, Bonnet S, Khelidj A, Baroghel-bouny V. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. *Cement Concr Res* 2008;38(6):877–83.
- [8] Sahmaran M, Yaman IO. Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams. *Can J Civ Eng* 2008;35(3):236–45.
- [9] Blagojevic A. The influence of cracks on the durability and service life of reinforced concrete structures in relation to chloride-induced corrosion [dissertation]. Delft: Delft University of Technology; 2016.
- [10] Wang S, Li VC. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Mater J* 2007;104(3):233–41.
- [11] Li VC, Stang H. Elevating FRC material ductility to infrastructure durability. In: Proceedings of the 6th RILEM Symposium Fiber-Reinforced Concretes; 2004 Sep 20–22; Varenna, Italy; 2004. p. 171–86.
- [12] Miyazato S, Hiraishi Y. Transport properties and steel corrosion in ductile fiber reinforced cement composites. In: Proceedings of the 11th International Conference on Fracture; 2005 Mar 20–25; Turin, Italy; 2005. p. 1500–5.
- [13] Sahmaran M, Li VC, Andrade C. Corrosion resistance performance of steelreinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Mater J* 2008;105(3):243–50.
- [14] Sahmaran M, Lachemi M, Li VC. Assessing the durability of engineered cementitious composites under freezing and thawing cycles. *J ASTM Int* 2009;6(7):JAI102406.
- [15] Van Zijl GPAG, Wittmann FH, Oh BH, Kabele P, Toledo Filho RD, Fairbairn EMR, et al. Durability of strain-hardening cement-based composites (SHCC). *Mater Struct* 2012;45(10):1447–63.
- [16] Ranade R, Zhang J, Lynch JP, Li VC. Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. *Cement Concr Res* 2014;58:1–12.
- [17] Lepech MD, Li VC. Application of ECC for bridge deck link slabs. *Mater Struct* 2009;42(9):1185–95.
- [18] Keoleian GA, Kendall A, Dettling JE, Smith VM, Chandler RF, Lepech MD, et al. Life cycle modeling of concrete bridge design: comparison of engineered cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints. *J Infrastruct Syst* 2005;11(1):51–60.
- [19] Yang EH, Yang Y, Li VC. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI Mater J* 2007;104(6):620–8.
- [20] Zhou J, Qian S, Sierra Beltran MG, Ye G, van Breugel K, Li VC. Development

- of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. *Mater Struct* 2010;43(6):803–14.
- [21] Huang X, Ranade R, Li VC. Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement. *J Mater Civ Eng* 2013;25(7):923–31.
- [22] Ohno M, Li VC. A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Constr Build Mater* 2014;57: 163–8.
- [23] Lepech MD, Li VC, Robertson RE, Keoleian GA. Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Mater J* 2008;105(6):567–75.
- [24] Huang X, Ranade R, Ni W, Li VC. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. *Constr Build Mater* 2013;44:757–64.
- [25] Soltan DG, das Neves P, Olvera A, Savastano Junior H, Li VC. Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. *Ind Crops Prod* 2017;103:1–12.
- [26] Fischer G, Li VC. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions. *ACI Struct J* 2002;99(6):781–90.
- [27] Fukuyama H, Sato Y, Li VC, Matsuzaki Y, Mihashi H. Ductile engineered cementitious composite elements for seismic structural application. In: *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*; 2000 Jan 30–Feb 4; Auckland, New Zealand; 2000.
- [28] Fischer G, Fukuyama H, Li VC. Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions. In: *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites: Application and Evaluation*; 2002 Oct 21–22; Takayama, Japan; 2002. p. 269–78.
- [29] Parra-Montesinos G, Wight JK. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections. *J Struct Eng* 2000;126(10):1113–21.
- [30] Fischer G, Li VC. Intrinsic response control of moment-resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements. *ACI Struct J* 2003;100(2):166–76.
- [31] Kesner K, Billington SL. Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit. *J Struct Eng* 2005;131(11):1712–20.
- [32] Dehghani A, Nateghi-Alahi F, Fischer G. Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames. *Eng Struct* 2015;105:197–208.
- [33] Kanda T, Nagai S, Maruta M, Yamamoto Y. New high-rise R/C structure using ECC coupling beams. In: *Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites*; 2011 Dec 12–14; Rio de Janeiro, Brazil; 2011. p. 289–96.
- [34] Alkan C. Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage. *Thermochim Acta* 2006;451(1–2):126–30.
- [35] Desai D, Miller M, Lynch JP, Li VC. Development of thermally adaptive engineered cementitious composite for passive heat storage. *Constr Build Mater* 2014;67(Pt C):366–72.
- [36] Yang Y, Lepech MD, Yang EH, Li VC. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. *Cement Concr Res* 2009;39(5):382–90.
- [37] De Rooij M, van Tittelboom K, de Belie N, Schlangen E. Self-healing phenomena in cement-based materials. Dordrecht: Springer; 2013.
- [38] Fan S, Li M. X-ray computed microtomography of three-dimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites. *Smart Mater Struct* 2015;24(1):015021.
- [39] Kan LL, Shi HS, Sakulich AR, Li VC. Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials. *ACI Mater J* 2010;107(6):617–24.
- [40] Yıldırım G, Khiavi AH, Yesilmen S, Sahmaran M. Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement Concr Compos* 2018;87:172–86.
- [41] Yamamoto A, Watanabe K, Li VC, Niwa J. Effect of wet–dry condition on selfhealing property of early-age ECC. *Jap Concr Inst* 2010;32(1):251–6.
- [42] Cassar L, Beeldens A, Pimpinelli N, Guerrini GL. Photocatalysis of cementitious materials. In: *Proceedings of the International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials*; 2007 Oct 8–9; Florence, Italy. Paris: RILEM Publications SARL; 2007. p. 131–45.
- [43] Cassar L. Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air. *MRS Bull* 2004;29(5):328–31.
- [44] Zhao A, Yang J, Yang EH. Self-cleaning engineered cementitious composites. *Cement Concr Compos* 2015;64:74–83.
- [45] Chung DDL. Self-monitoring structural materials. *Mater Sci Eng Rep* 1998;22(2):57–78.
- [46] Hou T, Lynch JP. Tomographic imaging of crack damage in cementitious structural components. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Engineering*; 2006 Oct 12–13; Taipei, China; 2006.