

用于智能结构健康监测的被嵌入纺织钢筋混凝土中的 光纤传感器：综述

科特·阿尔维斯，伯恩哈德·布雷默，卢尔德·罗斯
隶属机构：英国工程与建筑环境学院

摘要：在过去的十年中，碳纤维技术、增材制造技术、传感器工程（即可穿戴设备）和新的结构加固技术等领域取得了快速发展。这些发展虽然来自不同的领域，但共同为具有非腐蚀钢筋和内置传感器的混凝土结构铺平了道路。因此，这项工作的目的是通过概述这两个领域的最新技术进步来弥合土木工程和传感器工程界之间的差距，特别关注嵌入光纤传感器的纺织钢筋混凝土。引言部分强调了减少建筑行业产生的碳足迹的重要性，以及如何通过使用最先进的加固技术有效地实现这一目标。除了这些好处之外，还可以通过使用传感器，特别是光纤传感器，实施基础设施监控，以确保结构在整个生命周期内的安全运行。本文对光纤传感器工程进行了广泛的描述，与传统的结构健康监测方法相比，光纤传感器工程能够在结构的制造阶段将传感器整合到结构的加固机制中，从而实现有效的监测和更广泛的能力。未来，这些发展与人工智能概念相结合，将导致用于智能监控应用的分布式传感器网络，特别是使此类分布式网络能够在其制造阶段实施/嵌入。

关键词：纺织加固；结构健康监测；光纤传感器；智能传感；土木工程中的传感器；结构加固

Fiber Optic Sensors Embedded in Textile-Reinforced Concrete for Smart Structural Health Monitoring: A Review

Kort Alwis, Bernhard Bremer, Lourdes Roth
Affiliation: School of Engineering and Built Environment, UK

Abstract: The last decade has seen rapid developments in the areas of carbon fiber technology, additive manufacturing technology, sensor engineering, i.e., wearables, and new structural reinforcement techniques. These developments, although from different areas, have collectively paved way for concrete structures with non-corrosive reinforcement and in-built sensors. Therefore, the purpose of this effort is to bridge the gap between civil engineering and sensor engineering communities through an overview on the up-to-date technological advances in both sectors, with a special focus on textile reinforced concrete embedded with fiber optic sensors. The introduction section highlights the importance of reducing the carbon footprint resulting from the building industry and how this could be effectively achieved by the use of state-of-the-art reinforcement techniques. Added to these benefits would be the implementations on infrastructure monitoring for the safe operation of structures through their entire lifespan by utilizing sensors, specifically, fiber optic sensors. The paper presents an extensive description on fiber optic sensor engineering that enables the incorporation of sensors into the reinforcement mechanism of a structure at its manufacturing stage, enabling effective monitoring and a wider range of capabilities when compared to conventional means of structural health monitoring. In future, these developments, when combined with artificial intelligence concepts, will lead to distributed sensor networks for smart monitoring applications, particularly enabling such distributed networks to be implemented/embedded at their manufacturing stage.

Keywords: Textile reinforcement; structural health monitoring; fiber optic sensors; smart sensing; sensors in civil engineering; reinforcement of structures

引言:

《巴黎协定》旨在通过将本世纪内的全球气温上升控制在工业化前的水平以应对气候变化的威胁。人类活动造成的环境影响使这项任务具有挑战性。由于建筑行业,混凝土是世界上使用量第二大的材料,因为它需要大量消耗原材料,并造成大量二氧化碳排放。水泥生产占二氧化碳总排放量的 6.5%,约为全球航空排放量的三倍。尽管建筑业消耗了全球大部分资源,但大多数建筑物的使用寿命有限,即 40 至 80 年。这意味着大多数基础设施的寿命几乎不会比普通人的寿命长,同时消耗更多的能源和资源。即使在考虑环境影响之前,这种相对较短的使用寿命和相关成本的组合在经济意义上也是不可接受和不合理的。此外,为了应对环境保护和缓解气候变化影响的全球挑战,正在开展新的研究,以利用适当的工程减少建筑业产生的二氧化碳排放,同时保持建筑的安全性和耐用性基础设施。为此,研究了新的混凝土加固技术手段,具有低碳足迹、长期使用的高可靠性和安全性。

在传统建筑结构中,钢筋由变形钢筋组成,即钢筋混凝土 (SRC),其屈服强度约为 450–500 MPa,由于其延展性、低成本、坚固性和易用性,是迄今为止最常用的组合的安置。变形钢筋的肋条/凹槽能够与混凝土充分粘合,从而将钢筋的力传递到混凝土。混凝土和钢筋具有相似的热膨胀系数这一事实进一步促进了这一点。然而,传统钢筋的问题在于它对环境有害且具有腐蚀性。更重要的是,钢筋需要混凝土涂层来充分防止腐蚀,因此需要生产更多的混凝土来保护钢筋。钢筋混凝土结构的相当一部分劣化是由于钢筋的腐蚀。因此,即使使用较厚的混凝土层,腐蚀也是不可避免的。

早在 1990 年代中期,人们就对开发用于民用基础设施的纤维增强复合材料产生了兴趣,因为它们具有出色的重量性能以及固有的耐腐蚀性和耐疲劳性。即便如此,钢筋混凝土一直在不断地被使用,并且在实践中还没有具有竞争力的替代品。这也可能是由于土木/结构工程部门的谨慎性质,他们必须充分解决新技术中的所有风险因素,即使有有效的最新发展,尽管是在实验室环境中。因此,即使在实验室层面或实际上通过国家/国际主导的研究存在先进技术,这些发展也需要相当长的时间才能进入行业,直到它们在可行性、安全性和长期性方面经过实际测试和彻底评估采用。

然而,在过去的十年中,已经看到了对 SRC 的各种替代建议以及他们对解决传统钢筋中存在的问题的实际实施的评估。随着非金属加固方法的引入,例如纺织钢筋混凝土 (TRC),在建筑施工中使用钢筋正在成为过去的技术。TRC 是一种由非金属增强材料和混凝土组成的复合材料,其中网格状增强材料由多达数千根细丝的浸

渍纱线组成。TRC 可以根据使用的材料进行表征,即木材、碳、耐碱玻璃 (ARG)、芳纶、玄武岩等,其中碳和 ARG 是最常见的。除环境因素外,TRC 的寿命耐久性还取决于各种其他因素,例如长丝材料,即碳、玻璃等、浸渍材料和纱线的物理尺寸,以及生产过程。

当将织物增强材料(例如由纤维制成的)添加到微调砂浆中时,会产生一种柔性水泥复合材料。这种复合材料将具有足够的抗拉能力,以至于可以省略钢筋。这种结果的优点是能够获得流体新鲜混凝土固有的形状自由度。在钢筋的情况下,混凝土的高 pH 值要求是为了保护钢筋,即钢筋,因此,如果钢筋没有腐蚀的可能性,混凝土的 pH 值将不再重要。由于玻璃/聚合物不易腐蚀,因此不需要过多的混凝土覆盖。因此,非金属增强结构元件的厚度可以保持在几厘米以内,从而实现薄而优雅的结构,在使用更少资源的同时提供相当的强度,从而减少总体二氧化碳排放量。

另一方面,光纤传感器 (FOS) 在此方面具有相当大的潜力,并具有其他优势,例如抗电磁干扰和重量轻。这是一些民用基础设施的一个重要方面,即线路电气化的铁路。因此,对用于 SHM 目的的 FOS 的可行性和部署进行了深入研究。用于土木结构应变测量的理想 FOS 所需的特性包括足够的灵敏度和动态范围;线性响应;对被测量场变化方向的敏感性;是单端的,即尽量减少引线的数量;对热波动不敏感;对结构无扰动;不受电源中断的影响;复用能力;易于大规模生产,并且在结构的整个生命周期内都经久耐用。

用于 SHM 目的的 FOS 的最新发展是纺织品的制造,即用于加固,传感器在制造阶段已经嵌入到纺织品中。与必须从外部粘合到结构上的传统 FOS 相比,例如用于桥梁应变监测的案例,这种传感器嵌入式加固新技术意味着混凝土可以直接浇注在织物上,而无需进一步实施将是必要的。这种改进不仅会大大降低服务提供商的劳动力成本,而且会加强对结构更广泛区域变形的监测,即与点传感器相比。

最近关于结构加固新发展的评论从土木和机械工程的角度提供了全面的信息。关于钢筋混凝土传感器的现有文献主要集中在基于压电的传感器和碳纤维导电性的利用上。有大量关于在混凝土中嵌入 FOS 的文献,特别是在钢筋或碳钢筋上嵌入 FOS。事实上,目前 FOS 经常嵌入混凝土梁中进行负载测试。然而,这些传感器是在结构寿命的后期嵌入的,即最常见的是将传感器连接在结构表面上。另一方面,TRC 的概念相对较新。在结构的制造阶段嵌入 FOS 并直接嵌入装置内的网格加固是一项即将到来的技术,尚未被业界广泛采用。我们坚信,随着将传感器系统嵌入 TRC 的技术不断得到改进和广泛

使用,该领域将在不久的将来越来越受到关注,尽管其潜力仍远未得到充分利用。从在制造阶段嵌入最新结构加固技术,特别是在 TRC 中的 FOS 主题的非常有限的文献中可以明显看出这一点。该交流旨在解决这一差距,并提供将 FOS 用于土木结构的 SHM 时所面临的最新技术和挑战,特别是在使用 TRC 制造的结构上。

一、纺织基混凝土加固

在 TRC 中,多轴纺织织物与高强度细粒混凝土结合使用。通常,TRC 基材由最大聚集粒度在 1 至 2 毫米之间的基质和由 ARG、碳或聚合物制成的高性能连续复丝纱线组成。多轴增强织物由多根长丝纱线制成,即粗纱,其中包含数百至数千根直径约为 $5-25\ \mu\text{m}$ 的单丝。这些纱线可以通过改变它们的数量和长丝方向来根据预期的应力放置。如此制造的粗纱结构提供了与混凝土复合材料接触的足够尺寸。纤维通常会放置在复合材料的主要应力方向上,与使用随机分布的短纤维相比,这导致更高的有效性。TRC 的主要优点是其高抗拉强度和灵活的延展性,这使得结构相对较薄的混凝土构件成为可能。迄今为止,TRC 已被广泛研究,尤其是 TU Dresden 和 RWTH Aachen 大学,近二十年来,其在行业中的应用潜力得到了充分证实。

所用纤维材料的固有特性、数量和排列方式将影响复合 TRC 的性能,以确保其在预期寿命内安全运行。该材料还应能承受碱性介质,同时保持其固有特性。此外,在考虑潜在的候选材料时,应考虑纤维的弹性模量以及纤维的韧度和延展性。例如,纤维的弹性模量应高于混凝土基体的弹性模量。未能满足这一要求可能会导致裂缝的形成,从而对混凝土/结构的刚度产生不利影响。纤维还应在钢筋本身和混凝土之间具有足够的粘合力,以便实现被测量数据的有效传输。其他实际考虑将涉及成本效益和易于制造。使用 ARG 和碳来设计和制造纺织品增强材料基本上满足了这些要求。

二、光纤技术和传感器

用于电信目的的光纤在 1990 年代发展迅速。事实上,大多数仍在使用的光源、检测器和相关耗材,即连接器、耦合器等,都在最初专注于电信窗口的波长下工作,即 1550 nm 和 1300 nm。近年来,光纤在传感器领域也引起了相当大的关注,因为它比传统的基于电的传感器具有抗电磁干扰、复用能力、耐高温能力、化学惰性、鲁棒性和重量轻等诸多优点。FOS 系统由传感器设备(即传感元件或机构)、承载被测量数据的通信通道和提供能量并检测/处理和调节接收信号的子系统组成。由于可以沿单根光纤嵌入多个传感器,从而创建分布式传感器网络,因此可以检测局部损坏,例如应变、裂纹和腐蚀。传统的电传感器必须有两根导线用于每个传感器以

形成电回路。相比之下,光纤网络的复用能力更容易实现和安装。FOS 既可用作点传感器,也可用于分布式传感器配置,从而使传感器或传感器网络的设计更加灵活和应用特定。因此,根据所使用的转换机制,可以开发出各种物理和化学传感器,在广泛的行业中具有潜在的应用。

三、集成 FOS

在集成 FOS 的情况下,测量沿暴露于被测量的光纤的整个长度进行集成,即,当 FOS 元件暴露于空间不同的刺激时,仅获得一个最终的总测量值。集成 FOS 的典型示例是固有 Sagnac 和 Mach-Zehnder 干涉传感器。术语固有意味着吞吐量特性由影响环境信号调制,其中光和目标被测量之间的相互作用(传感)发生在光纤内/光纤内,因此光纤本身就是传感器。例如,光纤 Sagnac 干涉仪(SI)通常由偏振宽带光源、3 dB 熔融光纤耦合器、偏振控制器(PC)、光谱分析仪(OSA)和基于 High 的光纤传感元件组成。双折射(HB)保偏(PM)光纤。使用熔接光纤耦合器将来自光源的光分成两个反向传播的光束。两束反向传播的光束通过光纤元件传播并在熔接光纤耦合器处重新组合,在此使用 OSA 记录相应的干涉图案。干涉图案的相位取决于所用光纤的双折射。PC 用于控制光源的偏振。例如,光纤 SI 已用于确定应变或压力等参数。此外,当应用低温敏感的 HB PM 光子晶体光纤(PCF)时,可以补偿对温度的交叉敏感性。在混凝土结构的 SHM 方面,光纤 SI 已成功用于测量钢筋的腐蚀。

相比之下,光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)可以通过使用两个 3 dB 耦合器来构建,这些耦合器将来自光源的光分离到单模光纤参考/传感器臂,并重新组合以产生推断在探测器上的图案。由于热膨胀、力或应变而引起的测量臂长度变化会导致在两个光纤臂中传播的光之间存在相位差,进而导致干涉图案变化。一般而言,集成干涉技术的优势在于允许以相对准确且成本效益高的方法来表征嵌入 SHM 应用中的混凝土结构中的 FOS。一种光纤 Mach-Zehnder 装置,用于表征基于纺织品的碳增强结构和光学玻璃纤维之间的应变传递。

四、基于点的 FOS

当仅在沿要监测的结构的离散点处获得测量时,使用基于点的 FOS。这个概念可以设计为在传输或反射模式下运行,具体取决于要求/应用。此外,它的优点是,根据工作原理,可以将基于点的 FOS 设计为成本相对较低、鲁棒性和紧凑性。

五、基于光栅的 FOS

基于光栅的 FOS 由光纤纤芯折射率的周期性扰动组成。光纤纤芯的这种调制可以通过不同的激光曝光技术形成。通常,根据耦合特性,基于光栅的 FOS 的机制可分为同向传播和反向传播耦合。在同向传播耦合的情况

下,光在光纤内沿相同方向传播的模式之间耦合。由于补偿要耦合的模式之间的传播常数失配所需的光栅周期约为数百微米,因此这种类型的光栅结构称为长周期光栅(LPG)。相反,对于反向传播耦合,光在光纤内的两个反向传播模式之间耦合,相应的光纤元件称为光纤布拉格光栅(FBG)。

在 SHM 应用方面,FBG 传感器是最成熟的基于光栅的传感器,已应用于测量应变、温度和 RH 等参数。当光耦合到 FBG 中时,只有特定波长的光会被反射(所谓的布拉格波长),而其余的光会传播到光纤的末端。布拉格波长由要耦合的模式的有效折射率以及光栅周期定义。这两个参数都取决于外部扰动、温度和应变,因此通过监测反射布拉格波长的变化,可以监测外部扰动(即温度或应变)的变化。此外,由于 FBG 对两个被测量(即温度和应变)敏感,因此可以应用两个具有不同材料特性或封装在不对称弹性基板上的 FBG 来区分两个被测量,从而补偿这种固有的交叉敏感性。

六、基于点的干涉 FOS

与集成干涉式 FOS 相比,基于点的干涉式 FOS 由光调制器元件以及输入和输出光纤组成,以便将光传输到光调制器和从光调制器传出。由于光调制器元件将物理变化转换为两个干涉光波之间的相位差,因此光调制器充当传感元件。因此,光纤仅代表光传输介质,外部刺激可以通过光纤链路上的离散传感元件进行监测。这被称为外部传感器设置。对于 SHM,最常见的基于点的干涉 FOS 是所谓的外法布里珀罗干涉仪(EFPI)。与内部传感器元件相比,在外部传感器的情况下,在光纤内传播的光由外部/外部光学元件调制。EFPI FOS 可以通过两根光纤来实现,两根光纤之间通常有几十到几百微米的间隙,并使用玻璃毛细管对齐和安装。光纤的光学端面导致低精度干涉仪,其中由于热膨胀、应变或压力导致的两根光纤之间间隙的任何长度变化都被转换为干涉信号的相位差。EFPI FOS 的优势之一是即使在非常高的温度下也能运行。此外,完全封装的 EFPI FOS 可以设计为紧凑型,长度仅为几毫米,因此可以嵌入到结构部件中而不会影响其性能。

七、微弯 FOS

在微弯 FOS 的情况下,光损耗是由调制在光纤内传播的光的幅度的被测量引起的,因此调制光纤链路的功率损耗。为了调制在光纤内传播的光的幅度,采用了一种换能器机构,该机构可以基于两个具有锯齿形边缘的板或缠绕在光纤周围的螺旋线。在这两种情况下,光纤的弯曲都会导致从纤芯模式到包层模式的光耦合,这些模式会被光纤的初级涂层高度衰减,因此,纤维的弯曲会直接导致光衰减。

八、制造技术

光纤在混凝土中的结合可以事后手动进行,也可以在钢筋结构的制造过程中自动进行。然而,就大型加固结构的批量生产而言,后一种并入技术更为经济。位于德国开姆尼茨的撒克逊纺织研究所(STFI)在 FOS 集成 TRC 方面进行了大量工作,该研究所开发了不同的技术,可将光纤自动结合到基于纺织品的增强结构中。为了将光纤集成到纺织网状结构(TNS)中,STFI 开发了一种合适的卷对卷针织技术。TNS 是由以 0° 和 90° 方向排列的耐碱玻璃复丝和聚丙烯复丝线组成的双轴网格。它们是使用经编机制造的,然后通过施加共聚物涂层进行稳定。对于光纤的集成,STFI 制造了间距为 20 mm 的 TNS 和 2400 tex 耐碱玻璃复丝以及 44 tex 复丝线。在 TNS 的编织过程中集成了光学玻璃纤维。缝合技术不仅能够在光纤传感器和 TNS 之间实现充分的粘合,而且还可以降低进入光纤的光弯曲损耗。

对于功能化碳结构(FCS)的制造,即由碳丝组成并用光学玻璃纤维功能化的基于纺织品的增强结构,STFI 还开发了一种合适的刺绣技术。在这种情况下,光纤同时被“编织”,同时制造基于碳丝的织物增强结构,以生产网格状元件。所开发的制造技术允许制造定制结构,因为可以制造不同形状的多层碳丝,因此可以针对目标应用优化增强结构。这是专门为同时处理碳纤维和光纤而开发的。通过在聚乙烯醇(PVA)非织造基材上绣制光纤和碳丝,获得交织的碳/光纤束。为了获得网格状结构,然后将多层碳纤维集成在 PVA 基板上,在制造过程完成后通过将 PVA 溶解在热水(50°C 范围内)中将其去除。

九、耐高碱性混凝土环境

波特兰水泥孔隙中的水呈碱性,pH 值介于 12.5 和 13.5。因此,当功能化 TRC 嵌入混凝土时,高碱性环境可能会降低光学玻璃纤维和纺织长丝的机械性能以及两者之间的结合,从而限制组合的寿命和操作传感和加固结构。因此,研究了高碱性混凝土环境对功能化纺织品基碳增强结构的影响。在这项研究中,根据光学玻璃纤维(丙烯酸酯、聚酰亚胺和碳)的涂层和纺织长丝的特克斯数(400、800 和 1600 tex)的 300 毫米长的一维结构,根据该技术制造。此外,为了模拟高碱性混凝土环境,本研究使用了 5% NaOH 溶液(pH 14),样品在该溶液中暴露了三个月。从调查中,作者推断,带有碳涂层的光学玻璃纤维对高碱性孔隙水的抵抗力最好。此外,由于 PVA 用于制造功能化的基于纺织品的增强结构(其对化学品相对惰性),因此功能化的增强结构通常相对稳定地抵抗碱性孔隙水的侵蚀。具有较高特数的基于纺织品的增强结构获得了最佳阻力。

十、不同的光纤配置

为了研究 TRC 内部光纤的形状是否对传感器响应有任何影响,研究了三种不同的光纤集成配置。第一种配置是直光纤,而在第二种和第三种配置中,光纤分别与偏移或曲折集成在一起。选择后两种情况是为了研究空间变化以及这种变化是否会导致优化的传感器响应。使用 1600 tex 碳丝和丙烯酸酯涂层光学 SM 玻璃纤维(Coming CC)制造功能化 TRC 结构,每个结构的最终尺寸为 $500 \times 110 \text{ mm}^2$, 网格尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。使用光纤 Mach-Zehnder 干涉仪方法分析了光纤传感器响应的表征。

结论

可穿戴传感器技术市场最近的增长,特别是在生物医学和机器人领域,为未来的民用基础设施指明了一个明确的方向。可以推断,纺织品增强材料将取代传统的同类产品,而民用基础设施将完全嵌入传感器和其他功能,以确保其安全性、舒适性和长期耐用性,同时最大限度地减少原本预期的碳足迹。为了实现这些目标,需要安装可靠且具有成本效益的传感器。与混凝土加固部门非常相似,基础设施监测传感器部门也发生了向新传感方法的巨大转变,即采用光纤传感器,而不是传统的 SHM 方案,如应变仪。

在用传感器对这些增强结构进行功能化以用于 SHM 应用方面,FOS 是最佳候选者,因为它们具有体积小、重量轻、远程询问和多路复用能力等优点。光纤可以在 TRC 的大批量制造过程中集成,也可以定制。因此,这种结构可以经济地制造并针对特定目标应用进行优化。当 FCS 配备光纤时,Bremer 等人证明,相应的传感器响应线性地取决于施加的应变,具有相对较低的滞后,并且根据积分方向,可以区分横向和纵向载荷。此外,在分布式传感方面,还可以验证集成光纤可以用于确定施加的应变分布。然而,根据所施加负载的大小,所获得的负载峰值往往会变宽,这会降低空间分辨率。因此,推断对于 FOS 响应,光纤和织物基增强结构之间的粘合长度很重要,即粘合长度足够长,从而避免光纤在点的方向变化测量,以便施加的负载可以充分转移到 FOS。此外,研究表明,当将功能化的基于织物的碳增强结构嵌入高碱性混凝土中时,所应用的相对惰性的 PVA 涂层可提供显著的抵抗结构恶化的能力。为了增强裂纹检测机制,在功能化 TNS 的制造过程中对光学玻璃纤维进行了预应变。此外,当将功能化 TNS 嵌入混凝土时,观察到 0.09 dB 的微不足道的光衰减和相对较高的裂缝检测灵敏度,即 1.4 mm。表 1 总结了功能化 TNS 和 FCS 的性能以进行比较。功能化 TRC 的未来方向明确指出,增加对光纤传感器网络的瑞利、布里渊和/或拉曼散射的利用,以及它们在结构健康监测中的实施,如以及与人工智能算法的结合,用于信号分析和灵敏度增强。

参考文献:

- [1]Klar, A.; Dromy, I.; Linker, R. Monitoring tunneling induced ground displacements using distributed fiber-optic sensing. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014, 40, 141 – 150.
- [2]Xu, J.; Dong, Y.; Zhang, Z.; Li, S.; He, S.; Li, H. Full scale strain monitoring of a suspension bridge using high performance distributed fiber optic sensors. *Meas. Sci. Technol.* 2016, 27, 124017.
- [3]Stajanca, P.; Chruscicki, S.; Homann, T.; Seifert, S.; Schmidt, D.; Habib, A. Detection of Leak-Induced Pipeline Vibrations Using Fiber—Optic Distributed Acoustic Sensing. *Sensors* 2018, 18, 2841.
- [4]Soller, B.J.; Gifford, D.K.; Wolfe, M.S.; Froggatt, M.E. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. *Opt. Express* 2005, 13, 666 – 674.
- [5]Zhang, H.; Wu, Z. Performance Evaluation of BOTDR-based Distributed Fiber Optic Sensors for Crack Monitoring. *Struct. Health Monit.* 2008, 7, 143 – 156.
- [6]Jamioy, C.A.G.; Lopez-Higuera, J.M. Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications. *J. Sens.* 2012, 2012, 1 – 17.
- [7]Mirzaei, A.; Bahrampour, A.R.; Taraz, M.; Bahrampour, M.; Foroushani, S.A. Transient response of buried oil pipelines fiber optic leak detector based on the distributed temperature measurement. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013, 65, 110 – 122.
- [8]Sun, Y.; Cao, S.; Xu, H.; Zhou, X. Application of Distributed Fiber Optic Sensing Technique to Monitor Stability of a Geogrid-Reinforced Model Slope. *Int. J. Geosynth. Ground Eng.* 2020, 6, 1 – 11.
- [9]Moser, F.; Lienhart, W.; Woschitz, H.; Schuller, H. Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing. *J. Civ. Struct. Health Monit* 2016, 6, 321 – 327.
- [10]Lau, K.-T.; Yuan, L.; Zhou, L.-M.; Wu, J.; Woo, C.-H. Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors. *Compos. Struct.* 2001, 51, 9 – 20.
- [11]Montanini, R.; Recupero, A.; De Domenico, F.; Freni, F. Strain Sharing Assessment in Woven Fiber Reinforced Concrete Beams Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors* 2016, 16, 1564.
- [12]Bremer, K.; Alwis, L.S.M.; Zheng, Y.; Weigand, F.; Kuhne, M.; Helbig, R.; Roth, B. Durability of Functionalized Carbon Structures with Optical Fiber Sensors in a Highly Alkaline Concrete Environment. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2476.