

用于道路综合称重运动感应的智能石墨-水泥复合材料

哈桑-博克-乌贝蒂尼, 西蒙-亚历山德罗, 菲利普-比尔金

所属单位: 意大利土木与环境工程系

摘要: 智能多功能复合材料表现出更强的物理和机械性能, 可以为结构提供新的功能。作者最近启动了一项研究计划, 旨在开发新的应变感应路面材料, 以实现道路综合称重运动(WIM)感应。作者的目标是以较低的成本实现准确的WIM, 用于基础设施的监测, 并且与现成的解决方案相比, 具有更强的耐久性。以前的工作致力于制定一种信号处理算法, 用于估计轴数和重量, 以及基于部署在桥面上的压阻路面材料的输出的车辆速度。这项工作提出并描述了一种合适的低成本和高度可扩展的水泥基复合材料, 具有应变感应能力和足够的灵敏度, 以满足WIM信号的要求。本文提出石墨水泥基智能复合材料, 并针对其在WIM中的应用研究了其机电性能。由于石墨粉末容易分散在水泥基体中, 这些复合材料的设计具有可扩展性, 因此可用于建造智能路面的部分。本文提出的研究包括对不同数量的石墨样品进行机电测试, 以确定信号灵敏度方面的最佳组合。本文获得了20% (按重量) 的水泥最佳掺入量, 并选择用于制作 $30 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$ 的板材。在该板上进行的载荷识别试验结果表明, 所提出的技术是能够进行WIM的。

关键词: 智能材料; 智能路面; 石墨; 水泥; 称重运动; 应变

Smart Graphite-Cement Composite for Roadway-Integrated Weigh-In-Motion Sensing

Hasan Borke Ubertini, Simon Alessandro, Filippo Birgin

Affiliation: Department of Civil and Environmental Engineering, Italy

Abstract: Smart multifunctional composites exhibit enhanced physical and mechanical properties and can provide structures with new capabilities. The authors have recently initiated a research program aimed at developing new strain-sensing pavement materials enabling roadway-integrated weigh-in motion (WIM) sensing. The goal is to achieve an accurate WIM for infrastructure monitoring at lower costs and with enhanced durability compared to off-the-shelf solutions. Previous work was devoted to formulating a signal processing algorithm for estimating the axle number and weights, along with the vehicle speed based on the outputs of a piezoresistive pavement material deployed within a bridge deck. This work proposes and characterizes a suitable low-cost and highly scalable cement-based composite with strain-sensing capabilities and sufficient sensitivity to meet WIM signal requirements. Graphite cement-based smart composites are presented, and their electromechanical properties are investigated in view of their application to WIM. These composites are engineered for scalability owing to the ease of dispersion of the graphite powder in the cement matrix and can thus be used to build smart sections of road pavements. The research presented in this paper consists of electromechanical tests performed on samples of different amounts of graphite for the identification of the optimal mix in terms of signal sensitivity. An optimum inclusion level of 20% by weight of cement is obtained and selected for the fabrication of a plate of $30 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$. Results from load identification tests conducted on the plate show that the proposed technology is capable of WIM.

Keywords: Smart materials; smart pavements; graphite; cement; weigh-in motion; strain

引言:

水泥作为混凝土的核心成分,由于其生产过程简单、成本低和合适的机械性能,被广泛用于民用结构的建设中。新的混凝土添加剂和填料可以赋予材料多功能特性。一个可能的功能是应变感应,由于非导电基质中存在导电填料而产生的压阻率增强。这种增强的压阻率发生在渗流阈值附近,定义为发生电相变的填充物浓度水平。超过这个水平,导电网络就会在材料基体内部形成,导电模式由导电填料的网络来控制。由此可见,渗流阈值随着填料类型和形态的不同而变化。它可以通过实验、分析和数值方法来确定。

纳米结构的碳材料,包括碳纳米管(CNT)、碳纳米纤维(CNF)、石墨烯(GR)、氧化石墨烯(GO)和富勒烯,是有前途的元素,可用于许多实际领域。纳米结构碳材料最重要的应用之一是用它们来制造各种复合材料,包括碳/聚合物、碳/陶瓷、碳/水泥和碳/金属复合材料。

基础设施材料是现代文明中最常使用的材料。一些研究表明,随着纳米结构碳材料的加入,基础设施材料的整体性能可以从不同角度得到改变。人们认为,纳米结构的碳材料将改变胶凝材料的孔隙结构和水化过程,从而改变机械性能或使基础设施材料功能化。

通过结合不同类型的填充物,混合掺杂的方法也被报道。例如碳黑和碳纤维、碳黑和嵌段聚合物苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯、碳纳米管和镍纤维、碳纳米管和碳纳米纤维、碳纳米管和石墨烯,以及碳纳米管和石墨烯纳米片。具有较高长宽比的填充物被发现传感能力和机械性能方面更有效。通常情况下,它们需要少量的填料来达到渗流阈值。然而,具有较高长宽比的填充物往往会结块,它们在大体积上的分散是困难的,因此通常限制了它们在小范围内的应用。

最近,纳米技术和智能材料的发展已经产生了许多路面嵌入自感传感器和传感器阵列的交通监测技术的例子。本研究的目的是通过开发一种低成本和高度可扩展的复合材料,提高自感材料在运动称重(WIM)传感方面的现场应用性。拟议的技术利用石墨粉作为填充物。石墨是一种碳的同素异形体,以其高导电性和相对于其他碳基导电填料的低成本而闻名。石墨在水泥基体中的分散可以通过机械混合来达到令人满意的效果。高导电性的水泥-石墨混合物被研究用于阳极涂层、损伤监测和WIM应用。与棒状的碳微/纳米纤维和碳纳米管不同,石墨颗粒是扁形的三维填料,拥有较低的长宽比。它们被认为是颗粒状的夹杂物,要在材料基体内建立导电网络,通常需要大量的掺杂。

文献中已经讨论了带有颗粒状夹杂物的复合材料的应变感应能力。对于含有GNPs的复合材料,石墨层被发现具有类似于棒状填充物的渗滤行为,导致在给定的填充水平下灵敏度增加。然而,由此产生的测量因子,或电信号对应变的敏感性,被发现随着负载的大小而变化。这种变化被解释为由GNPs的存在所产生的材料基体内部的不完善。另一种颗粒状的填料,碳黑,也被发现可以增加水泥基材料的应变敏感性。与棒状填料不同,像石墨、碳黑和GNPs这样的颗粒状填料被认为会降低水泥基体的机械性能。通常情况下,这些填料需要过高的浓度水平才能达到渗水阈值,从而导致不可接受的机械性能。可能的解决方案是添加更多的水或使用增塑剂。加入更多的水也可能导致机械性能的明显下降。加水的效果会导致颗粒结块,但其对压阻性能的影响是不确定的。使用分散剂以尽量减少结块,可能会产生机械性能的下降,并通过改变电气特性来提高灵敏度。最后,增塑剂的使用可能会产生噪音信号。

在第一项关于自感应智能材料的研究中,作者对一种使WIM能够估计轴数和重量以及车速的算法进行了数值研究。在这里,研究扩展到研究可扩展的、基于石墨的智能材料的机电特性,以授权制定更准确的模型和WIM技术的现场部署。在小规模的立方体样品上,对渗滤阈值作为石墨浓度水平的函数进行了分析和实验调查。这些样品在不同水平的压缩载荷下进行测试,以观察不同石墨含量的灵敏度和线性度的变化,并确定最佳的石墨浓度水平。然后用最佳水平制作板状样品,并进行负载控制实验,模仿车轮的效果,研究材料识别和量化应用负载的能力。

复合材料的电气性能评估: 渗滤阈值

在这一节中,渗滤阈值作为填料量的一个函数被研究。该调查是通过分析和实验进行的。

分析性研究

原则上,填充物的体积占用增加了导电颗粒之间的接触数量。当每个导电颗粒的平均接触数高于一个给定的阈值时,就达到了电渗漏,文献中估计为1.38。产生这种阈值的导电粒子的体积分数被称为渗流的临界体积分数。超过这个分数,额外的导电颗粒将不会对电导率做出实质性的贡献。低于这个分数,电导率就会大大降低。影响渗流的主要变量是颗粒的长宽比,定义为颗粒的长短尺寸之比。在这里,为了分析计算体积分数,石墨填料的形态在扫描电子显微镜(SEM)下进行了检查。从扫描电子显微镜的照片上看,大部分的颗粒是以薄的椭圆形圆柱体的形式出现。长宽比,AR,取为 $AR = (d_1$

+ d_2)/ $2d_3$ ，其中 d_1 和 d_2 分别是椭圆表面的主轴和小轴； d_3 是第三轴尺寸，即椭圆圆柱体的高度。由此得出的平均 AR 值约为 8 至 10。因此，参考文献中的工作，通过三维数值模拟计算各种长宽比的填料的临界体积分数，预计会出现渗滤现象；基于该工作，预计渗滤阈值将发生在 10% 和 20% 的石墨与水泥重量比之间。

实验调查

样品的电阻率值是通过将样品连接到读出电路而不施加任何外部负载，并记录电压差来评估的。材料的电阻率 ρ 用 $\rho = R(A/e)$ 计算，其中 A 是电极之间样品的横截面积， e 是电极之间的距离， R 是样品的电阻。在固化时间为 3、7、15、30、60 和 100 天时，每个石墨浓度水平下三个样品的平均电阻率和范围。固化过程中电阻率的增加是干燥和化学转化的结果，导致离子传导减少。在固化过程中，石墨-水泥比例为 40% 的样品表现出比其他样品更低的电阻率。从图中可以看出，电学行为的转变从大约 20% 的石墨-水泥负荷开始，之后电阻率开始迅速下降，特别是在固化 60 天之后。这个数值与上一小节中的分析预测和文献中报道的数值很一致。

石墨-水泥复合材料的传感调查

正如机电模型所预期的，相对电阻和应变表现出相反的趋势。尽管采用了双相测量方法，但在石墨与水泥比例为 0% 的样品下，由于管理电介质行为，极化引起的残余漂移是明显的。红色虚线显示了两个相邻的最小值之间的漂移，突出了 0% 和 10% 的石墨-水泥比率样品的显著漂移。石墨量较高的样品不显示与应变时间历史无关的明显漂移。来自 30% 样品的记录信号表现出重大的失真。这是由于超过了渗滤阈值，在这里，压缩载荷导致电导率的最小变化。然而，40% 的样品表现出良好的灵敏度，但非线性度很高。这可以归因于材料的不完善（空隙和结块），由于导电填料的过载。此外，所有含有 40% 石墨的样品的应变时间历史中的残余变形是明显的。石墨与水泥比例为 10% 和 20% 的样品的电输出与应变时间史一致。灵敏度或测量系数的值与文献一致，并随着石墨与水泥比率的增加而增加，直至 20%，如果由于样品的不可靠而忽略 40% 的结果，则在 20% 时达到最大值。这与分析结果是一致的。20% 的比例被选为最佳组合。

石墨-水泥复合材料的机械性能

在不同的石墨-水泥比例下，样品的机械性能是用前几节所述的循环载荷试验来评估的。应力是通过将力 F 除以 25cm^2 的横截面积来计算的。黑色虚线代表在材料弹性范围内的假设下，为估计杨氏模量而采取的加载分

支。品红色点状虚线是平均应力-应变分支。

40% 的样品的应力-应变曲线在 0.5MPa 的应力增量附近表现出塑性变形，证实了这些样品被填充物超载并具有不可接受的机电性能的假说。另一个观察结果是，0% 的样品具有相似的加载和卸载模量，而其他样品的卸载模量比加载模量高得多。根据每个石墨-水泥比率下获得的最小和平均弹性模量 E 的结果显示，在 40% 的样品下，弹性模量有明显的变化。对于其他样品，弹性模量的顺序是相同的，20% 的样品略有增加，结果的变化可能是由于手工制作的过程。弹性模量的最小值超过了文献中报道的各种路面材料的弹性模量（3.5-13.5GPa）。总的来说，结果表明，20% 的石墨-水泥复合材料提供了足够的机械性能，适合作为一种结构性路面材料。

含石墨的水泥基板件的自我监测调查

为了使 WIM 应用的自感应路面单元更具代表性，我们制作了一个智能板样品。复合板的负载感应能力可以通过跟踪电极之间的电阻段来实现。作者利用的测试设备与测试立方体样品的设备相同。在板的周围增加了三个高精度的 LVDT，以记录测试期间板的顶部的位移。所需的材料被混合，以产生尺寸为 $30 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$ ，石墨-水泥重量比为 20% 的平板样品。电极配置、加载和数据采集如图 3 所示。使用尺寸为 $10 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$ 的钢板将载荷分布在相应的区域，以模拟按比例的车轮接触区域。样品从外部电极带电。选择中心部分是为了消除估计载荷时接触电阻的影响。

对极化行为的调查

为了评估极化效应的重要性，我们进行了两次测试，都是在不同的负载条件下进行的。在第一次测试中，平板保持无负荷状态，施加电位差。来自分流电阻和中心段的双相电压信号没有表现出噪音或时间上的变化。选择了方波的 80% 的充电点，通过与来自分流电阻的读数电压的比例比较，计算出中心段的电阻。正如在放大的窗口中显示的那样，在充电的最初几秒钟，由于材料的电容行为，观察到的中心段的电阻增加，直到达到一个稳定的状态。

在第二次测试中，板块在 2 千牛下被加载 150 秒。使用同样的后处理，得到了电阻时间历史。阻力和位移时间历史的比较显示了非线性漂移，这可归因于复合材料对长时间载荷的粘弹性性质的反应。考虑到设想中的 WIM 应用，由交通荷载引起的残余应变引起的漂移预计可以忽略不计。

板块对荷载跟踪的敏感性评估

作者收集了阻力时间历史对载荷大小和顶部位移的

影响。数据经过后处理,去除阻力(品红色虚线)和位移(红色虚线)时间序列中的非线性漂移,并将阻力数据归一到其初始值。非线性漂移是通过拟合和减去数据中的二度多项式来确定的。

根据信号的线性度与载荷和位移变化的关系,结果显示,对于载荷变化和位移都有很好的线性度。在2千牛的载荷增量之后,噪音与信号的比率被观察到是很低的,就压力而言是0.25MPa。与交通荷载相比,这个阈值低于文献中定义的卡车轴平均压力。因此,预计WIM系统的精度会很高,特别是在测量卡车重量时。据观察,板材对载荷增量的反应是快速的,因此便于快速交通载荷。这些结果表明,智能复合板可用于通过检查电阻的变化来估计由外部负载引起的压力变化。

讨论

在这项工作中进行的测试对掺有石墨粉末的水泥基复合材料的物理、机械和电气性能产生了以下观察结果:(1)使用简单的机械混合过程将石墨分散在水基水泥基质中显得很有效,从而形成了一个可扩展的制造过程,以生产大型部件并用于现场应用;(2)对具有不同比例石墨的立方体样品的测试允许确定性能最好的混合,其中发现20%的石墨-水泥重量比产生更好的线性度($R^2 = 0.87$)和更高的测量系数;(3)对使用确定的最佳混合物制造的智能板的研究表明,电阻变化和负载增量($R^2 = 0.97$)之间以及电阻变化和板的位移($R^2 = 0.95$),显示了现场应用的前景;(4)智能板上获得的信号表现出低噪音-信号比,因此显示了WIM传感的前景;(5)所研究的复合材料表现出良好的机械性能,在机电试验中没有遇到杨氏模量的明显下降。

结论

本研究提出在水泥基体中使用石墨夹杂物,以实现低成本和易于扩展的道路综合WIM应用。与其他用于制造智能复合材料的导电微填料或纳米填料(如碳纳米管和纳米纤维)相比,石墨夹杂物具有可扩展性,易于分散,成本低。该研究的结论如下。

(i)就水泥基材料的应变敏感性而言,20%的石墨-水泥重量比(12%的体积比)是最佳的掺杂水平;

(ii)拟议材料的弹性性能与其他更传统的路面材料相当;

(iii)使用中等规模的样品进行的敏感性测试表明,拟议材料可用于估计应用负荷。

总的来说,本研究的结果表明,拟议的复合材料和测量方法可以很容易地应用于现场的称重运动感应。

参考文献:

[1]Galao, O.; Bañón, L.; Baeza, F.J.; Carmona, J.; Garcés, P. Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing. *Materials* 2016, 9, 281.

[2]Lu, S.N.; Xie, N.; Feng, L.C.; Zhong, J. Applications of nanostructured carbon materials in constructions: The state of the art. *J. Nanomater.* 2015, 2015, doi.10.1155/2015/807416.

[3]Baeza, F.; Galao, O.; Zornoza, E.; Garcés, P. Multifunctional Cement Composites Strain and Damage Sensors Applied on Reinforced Concrete (RC) Structural Elements. *Materials* 2013, 6, 841 – 855.

[4]Laflamme, S.; Ubertini, F. Back-to-Basics: Self-Sensing Materials for Nondestructive Evaluation. *Mater. Eval.* 2020, 78, 526 – 536.

[5]Dong, W.; Li, W.; Tao, Z.; Wang, K. Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective. *Constr. Build. Mater.* 2019, 203, 146 – 163.

[6]García-Macías, E.; Castro-Triguero, R.; Sáez, A.; Ubertini, F. 3D mixed micromechanics-FEM modeling of piezoresistive carbon nanotube smart concrete. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2018, 340, 396 – 423.

[7]Ubertini, F.; Laflamme, S.; D’Alessandro, A. Smart cement paste with carbon nanotubes. In *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering*; Elsevier: Cambridge, UK, 2016; pp. 97 – 120.

[8]Nam, I.; Souri, H.; Lee, H.K. Percolation threshold and piezoresistive response of multi-wall carbon nanotube/cement composites. *Smart Struct. Syst.* 2016, 18, 217 – 231.

[9]Meoni, A.; D’Alessandro, A.; Downey, A.; García-Macías, E.; Rallini, M.; Materazzi, A.L.; Torre, L.; Laflamme, S.; Castro-Triguero, R.; Ubertini, F. An experimental study on static and dynamic strain sensitivity of embeddable smart concrete sensors doped with carbon nanotubes for SHM of large structures. *Sensors* 2018, 18, 831.

[10]Komori, T.; Makishima, K. Numbers of Fiber-to-Fiber Contacts in General Fiber Assemblies. *Text. Res. J.* 1977, 47, 13 – 17.