

# 表面处理对使用水泥基体的CFRP约束的自密实、高性能、纤维增强混凝土的影响

罗曼·戴贝尔, 亚当·基纳兹

所属单位: 波兰建筑材料研究所

**摘要:** 随着混凝土技术的发展, 可以观察到将不同材料相互结合以提高结构效率和耐久性的趋势。在现代建筑行业中, 各种材料和技术越来越多地结合在一起, 以实现例如增强对结构动态冲击的抵抗力, 或扩大选定建筑元件的工作范围, 这意味着显著增加毁灭的能量。因此, 作者创建了混合元素, 称为复合元素, 由混凝土和钢筋组成。本研究探讨了混凝土表面的制备对使用水泥基体的碳纤维(CF)增强的高性能、自密实、纤维增强混凝土(HPSCFRC)性能的影响。在一般的层压工艺中, 这是使用环氧树脂预成型的。然而, 环氧树脂对相对较低的温度敏感, 因此作者试图在层压过程中使用水泥基体。当将硬化混凝土与新鲜混凝土基质或混合物连接时, 混凝土表面的类型很重要。在这项研究中, 考虑了三种类型的混凝土表面, 例如未准备、打磨和研磨。本文使用3D激光扫描仪检查所有表面, 以确定Abbott-Firestone剖面材料份额曲线。在这项研究中, 圆柱形混凝土试件用一层、两层和三层层压板加固。然后对它们进行单轴压缩试验。测试结果表明, 在层压过程中使用水泥基体, 由于其效率低, 在加固具有高抗压强度的混凝土构件时不应使用。此外, 混凝土的磨削表面与CF钢筋的配合效果最好。

**关键词:** 混凝土表面; 碳纤维增强塑料; 水泥基体; 高性能自密实纤维增强混凝土; 应力-应变特性; 加强

## The Impact of Surface Preparation for Self-compacting, High-performance, Fiber-reinforced Concrete Confined with CFRP Using a Cement Matrix

Roman Dybel, Adam Kinasz

Affiliation: Institute of Building Materials, Poland

**Abstract:** With the development of concrete technology, the tendency to combine different materials with each other to achieve a greater efficiency and durability of structures can be observed. In the modern construction industry, various materials and techniques are increasingly being combined in order to achieve e.g., an increased resistance to dynamic impacts of a structure, or an increased scope of work of a selected constructional element, which translates into a significant increase in the energy of destruction. Thus, hybrid elements, known as composite ones, are created, which consist of concrete and reinforcements. This study examined the influence of the preparation of the concrete surface on the behavior of high-performance, self-compacting, fiber-reinforced concrete (HPSCFRC), reinforced with carbon fibers (CF) using a cement matrix. In the general lamination processes, this is preformed using epoxy resin. However, epoxy resin is sensitive to relatively low temperatures, and therefore the authors attempted to use a cement matrix in the lamination process. When connecting hardened concrete with a fresh concrete matrix or mixture, the type of the concrete surface is significant. In this research, three types of concrete surfaces e.g., unprepared, sanded and grinded were considered. All of the surfaces were examined using a 3D laser scanner, to determine the Abbott-Firestone profile material share curve. In this research, cylindrical concrete specimens were reinforced with one, two and three layers of laminates. They were then subjected to a uniaxial compressive test. The results of tests showed that the use of cement matrix in the lamination process, due to its low efficiency, should not be applied when reinforcing concrete

elements with a high compressive strength. Moreover, the grinded surface of concrete showed the best cooperation with CF reinforcement.

**Keywords:** concrete surface; CFRP; cement matrix; high-performance self-compacting fiber reinforced concrete; stress-strain characteristic; reinforcement

### 引言:

复合材料(组合材料)是有意识地由两种或多种材料构成的材料,并且具有不同于单个组成材料的特性。纤维增强聚合物(FRP)复合材料可以定义为用纤维增强的聚合物。在加强现有和新设计的结构方面,FRP在土木工程中的使用变得越来越普遍。这是由于这组聚合物材料的许多优点。FRP材料最重要的优点是:高杨氏模量、强度重量比、耐腐蚀性环境、良好的疲劳性能、低生命周期成本、电磁透明性和低导热性。

例如,钢管混凝土(CFT)柱已得到广泛研究和应用。CFT柱由钢管和内填充混凝土组成,其中钢管作为混凝土的模板和外部约束。混凝土芯防止钢管向内屈曲。因此,CFT柱结合了钢和混凝土的有益品质。然而,CFT柱仍存在一定的缺点,即易发生局部屈曲、耐久性差、钢管屈服后围应力恒定等问题。混凝土填充纤维增强聚合物(FRP)管(CFFT)柱由于具有无钢结构、耐腐蚀和低能耗等优点,已被视为沿海环境中新型基础设施的替代结构。现有研究表明,CFFT柱在轴向压缩或轴向压缩和横向组合载荷下的性能非常好。然而,CFFT柱的刚度不足以支撑建筑载荷。

在土木工程中,已经观察到由自密实混凝土(SCC)制造的结构设计的密集增长。今天,在某些类型的建筑结构中使用经典的未改性混凝土是不够的。对结构在承载能力和使用性方面的要求越来越高,而使用普通混凝土来实现这些要求在某些情况下变得不经济,甚至是不可能的。这迫使人们寻找改善混凝土性能的新方法。由于材料工程的发展,出现了一种称为纤维增强混凝土的“新型混凝土”。新拌混凝土混合物的高抗压强度、特征流变特性和准塑性应力-应变曲线是高性能自密实纤维增强混凝土(HPSCFRC)特有的。在混凝土结构中使用钢纤维对于获得这种特殊建筑材料的高延展性和强度至关重要。

碳纤维(CF)最常用于加强工程结构,并具有良好的耐热性和耐化学性。工作温度是选择给定类型的纤维来增强复合材料的最重要标准之一。例如,与玻璃或芳纶纤维不同,碳纤维的性能在非氧化性气氛到2000摄氏度时不会改变。碳纤维增强聚合物(CFRP)材料通常用于增强土木工程中的各种类型的结构。然而,这种技术是一种相对昂贵但有效的解决方案。在混凝土研究的情

况下,CFRP通常被认为是一种有效的替代技术,可以加固许多类型的混凝土或砖石结构,包括旧结构和纪念碑。总的来说,目前的文献包含大量关于在各种类型样品中使用CFRP加固混凝土的研究,例如经典柱、混凝土表面空腔中使用CFRP材料的元件和偏心荷载作用下的混凝土柱。在梁结构的情况下也可以观察到CFRP技术的发展。扎基等人提出CFRP纤维锚杆作为T形梁的加强件。张等人建议使用CFRP箍筋来加固由再生骨料制成的钢筋骨料混凝土制成的混凝土梁。研究人员使用各种类型的FRP测试了钢筋混凝土。Kissman和Sundar检查了具有一层和两层玻璃纤维增强聚合物(GFRP)的钢筋混凝土柱。获得的结果表明,与普通混凝土相比,钢筋试样的抗压强度和轴向应变更大。当用两层、四层和六层BFRP加固混凝土时,强度系数分别提高了1.41、1.92和2.36。坎皮奥内等人已经表明,使用BFRP可以稳定钢筋混凝土的峰值后行为。Toutanji和Deng研究了芳纶纤维增强聚合物(AFRP)作为混凝土的约束。据作者介绍,干燥或潮湿的环境对AFRP钢筋混凝土试件的强度没有显著影响。2017年,Eid和Paultre提出了应力应变模型来预测FRP复合材料加固混凝土的行为。

CFRP在设计过程中仍然是一种新的趋势。基体在层压板中的作用可以由环氧树脂起,有时由水泥基体起。由于树脂在相对较低的温度下可塑化,因此正在寻找替代基质来增强混凝土结构。在某些情况下,这种作用可以由水泥基质来发挥,它肯定更能抵抗高温的影响。复合材料和无机基体的结合使用会影响钢筋混凝土的强度。水泥基体通常使用CEM I 52.5R水泥、硅灰、水和大量新一代高效减水剂(高达水泥质量的10%)制成。在FRP层板中使用水泥基体的有效时间通常不超过30分钟。在纤维增强材料(FRP)层压过程中使用水泥基体的主要优点是:抗压强度高(至100 MPa),在高温下无塑性行为,成本低,刚度高,与环氧树脂相比具有更高的耐高温性。另一方面,低拉伸强度(至10 MPa)、耐化学性和弯曲强度是主要缺点。

CFRP可以保护混凝土结构和复合结构已被多次证明。然而,在FRP技术中使用水泥基体加固混凝土构件取决于许多方面,例如混凝土强度和FRP类型。根据Al-Abdwais的说法,FRP钢筋从混凝土表面的剥离可能是外

部粘的关键故障, 这可能导致粘合强度降低。已经表明, 柔性和刚性粘合剂可以有效地用于用 CFRP 加固混凝土结构, 其中考虑了近表面贴装 (NSM) 技术。FRP 复合材料的基体材料具有关键功能: 保护 FRP 和 FRP 和基体之间的应力传递。现有研究表明, CFRP 和混凝土之间的粘行为取决于混凝土的类型和混凝土表面的粗糙度。

## 材料和方法

### 混凝土混合物的制备

本研究采用 HPSCFR 混凝土混合物。用于制造混合物的材料如下: 强度快速增加的 I 型波特兰水泥 52.5 R (500 kg/m<sup>3</sup>), 细骨料河砂 (650 kg/m<sup>3</sup>), 粗骨料辉绿岩 (1000 kg/m<sup>3</sup>)、高效减水剂 Sikament FM6 (17.5 kg/m<sup>3</sup>)、作为微填料添加的 Sika Fume (60 kg/m<sup>3</sup>) 和自来水厂的水 (160 kg/m<sup>3</sup>)。水与水泥 (w/c) 的比率等于 0.32。钢微增强材料 (78 kg/m<sup>3</sup>) 具有钢浆形纤维的形式, 长度 (l) 为 30 mm, 外径 (d) 为 0.3 mm。根据制造商的说法, 钢纤维的抗拉强度等于 1100 MPa。坍落度 (SF) 测试用于确定 HPSCFR 混凝土混合物的新鲜性能。坍落度等于 650 毫米, 塑性粘度为 12.5 秒, 这是根据欧洲标准定义的。作者没有观察到混凝土混合物成分的分。

### 标本

在所提出的研究中, 作者总共分析了 40 个样本。所有圆柱体样品的高度均为 200 毫米, 外径为 100 毫米。所有色谱柱分为三组: 每组有 12 个样品经过砂磨 (S) 和研磨 (G), 其余 12 个样品表面未处理 (U)。然后用 1、2 和 3 层碳纤维增强样品——每个系列 4 个样品。样品标记如下: U/S/G-1; 3-1; 4。例如, S-2-4 是指第四个混凝土样品, 表面经过打磨, 用水泥基体用两层碳纤维加固。样品 S-1、S-2、S-3 和 S-4 为参考样品, 未进行任何加固。

### 混凝土表面的形态特征

#### D 激光扫描仪

本文通过扫描表面来确定混凝土表面的特性。作者使用基于激光三角测量方法的创新 3D 激光扫描仪 (波兰弗罗茨瓦夫科技大学) 进行混凝土表面扫描, 该方法涉及测量激光束产生的线的变形。使用步进电机驱动的相机测量位于测试表面上的各个点之间的距离, 因此, 可以在间隔 10 mm 的轮廓中以 15 μm 的精度进行测量。激光器结构紧凑, 因此可以在实验室和现场条件下进行测试。该设备为每个测量点分配三个坐标, 描述其在测试表面上的位置。测量数据文件以 asc 格式保存。扫描结果是被检查表面形态的虚拟 3D 图像。分析图像以获得描述表面形态的参数值。

## 结果

对于用一层 CFRP 加固的混凝土, 作者观察到强度略有增加, 这取决于混凝土表面的类型。未经处理、砂磨和研磨表面的混凝土的平均抗压强度分别为 82.94 MPa、83.87 MPa 和 84.91 MPa。在这种情况下, 对于具有未准备、砂磨和研磨表面的混凝土, 样品在获得最大承载能力时的平均轴向变形能力分别等于 0.0066、0.0070 和 0.0072。破坏时样品的平均横向变形能力分别为 0.0027、0.0028 和 0.0029。在分析这些数据时, 可以得出结论, 就表面处理的类型而言, 获得的混凝土强度和变形性值之间没有显著差异。这些值略有不同, 因此可以假设差异在 5% 的统计误差范围内。

在用两层 CFRP 加固的样品中, 观察到抗压强度略有增加, 未制备、砂磨和研磨样品的抗压强度分别为 88.69 MPa、83.67 MPa 和 94.79 MPa。这意味着与非钢筋混凝土相比, 强度分别提高了 10%、4% 和 18%。具有砂磨表面的样品的抗压强度标准偏差最低, 为 1.95 MPa。研磨表面 (11.89 MPa) 和未处理表面 (5.44 MPa) 较高。对于具有未制备、砂磨和研磨表面的混凝土, 在试样破坏时刻试样的轴向变形能力分别等于 0.0081、0.0080 和 0.0088。样品的平均横向变形能力分别为 0.0033、0.0033 和 0.0038。对于具有研磨混凝土表面的样品, 与未经处理和砂磨表面的样品相比, 获得的平均轴向变形分别高出 9% 和 10%。平均横向变形也更高——与具有未经处理和打磨表面的样品相比, 具有研磨表面的混凝土记录了 15% 的增加。

对于用三层碳纤维增强塑料增强的样品, 未经处理、砂磨和磨削表面的样品的抗压强度值也有变化, 分别为 86.34 MPa、81.82 MPa 和 95.57 MPa。这意味着与非钢筋混凝土相比, 强度分别提高了 7%、2% 和 19%。具有研磨表面的样品的抗压强度的标准偏差最大。砂磨表面样品的抗压强度平均值也没有变化。对于具有未准备、砂磨和研磨表面的混凝土, 在失效时样品的平均轴向变形能力分别等于 0.0091、0.0084 和 0.0098。样品的横向变形能力分别等于 0.0036、0.0035 和 0.0041。对于磨削表面, 平均轴向变形能力比未经处理和砂磨表面的样品高 8% 和 17%。平均横向应变也更高——与未经处理和打磨表面的样品相比, 带有打磨表面的混凝土分别增加了 14% 和 17%。

### 失败的历程

下面给出了用一层碳纤维增强的样品失效的宏观分析。在 CFRP 层数超过一层的情况下, 损伤过程相似, 第一层钢筋与混凝土表面之间的附着力对破坏过程至关重要。在所有情况下, 重叠都被切断了。

### 未准备的表面

对于表面未经处理的样品, 应注意碳纤维对高性能水泥基体的粘附性与该基体对混凝土表面的粘附性相似。水泥基体从混凝土表面脱离, 在一定区域粘附到碳纤维上。在基体表面, 可以局部观察到粘附在其上的碳纤维组。这可能表明碳纤维与水泥基质的局部和更好的渗透。

#### 磨砂表面

在砂磨表面的情况下, 可以观察到水泥基体对混凝土表面的更好附着。只有一小部分水泥基体仍然粘在碳纤维上——其中一些在失效期间仍留在高性能基体上。局部地, 观察到基体与混凝土表面的低粘附力——这可能是由于层压板表面的局部压力而不是表面较大的凹陷, 这可能导致新鲜混合物的位移, 由于它的挤压。

#### 研磨表面

在研磨表面的情况下, 观察到与未经处理的表面类似的现象, 条件是在这种情况下这些现象更加分散并且不会发生在大表面上。根据碳纤维与水泥基体之间的粘附应力大于水泥基体与混凝土表面之间的粘附应力的众多小区域, 以及水泥基体与混凝土表面之间的粘附力大于在碳纤维和水泥基体之间的结果显示, 与其他情况相比, 碳纤维与水泥基质更好的渗透是该表面的特征。这可能会影响仅对磨削表面显示最大强化效率的事实。

综上所述, 外部钢筋与混凝土核心的最佳配合证明了研磨混凝土表面。高性能混凝土的表面是一个特定的表面, 这是由于其高密封性和低开孔率等原因造成的。因此, 可能会出现对未处理表面的低水泥附着。在使用所考虑的方法增强样品的过程中, 在应用增强剂后, 它们的表面受到一定的压力, 以实现更好的纤维渗透。对于所有样品, 该压力由同一个人手动完成。在砂磨表面的情况下, 可以从该表面的较深槽中局部挤压新鲜的水泥基体, 卸载后导致在碳纤维垫和表面较深部分之间形成一个空白空间, 可能影响结果。磨削表面的粗糙度比未经处理的表面更高, 而比砂磨表面的粗糙度更小, 可能是考虑到的所有表面类型的最佳组合, 这已通过抗压强度的结果得到证实。

#### 结论

外加 CF 钢筋与混凝土芯的最佳配合用于研磨混凝土表面。HPSCFRC 的表面是一个特殊的表面, 除其他原因外, 与普通性能混凝土相比, 它的高密封性和低开孔率。因此, 未处理的表面可能存在低水泥砂浆附着。一般来说, 混凝土的强度随着加强层数的增加而增加。然而, 这种规律性仅适用于磨碎的混凝土表面。表面粗糙度及其形态显着影响获得的结果。层压前未对混凝土表面进行预处理或表面轮廓高度差异太大(如砂磨表面

的情况) 导致碳纤维与 HPSCFRC 表面之间的协作低。混凝土基材的最佳制备工艺是研磨。考虑到 CF 加固成本高, 在加固高强混凝土时, 由于加固效率低, 不推荐使用水泥基体。

#### 参考文献:

- [1]Yang, W.; Gang, W.; Guofen, L. Performance of circular concrete-filled fiber-reinforced polymer-steel composite tube columns under axial compression. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2014, 33, 1911 - 1928.
- [2]Mayer, P.; Kaczmar, J. Właściwości i Zastosowania Włókien Węglowych i Szklanych. *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 2008, 6, 52 - 56.
- [3]Aidy Ali, Z.; Shaker, R.; Khalina, A.; Sapuan, S.M. Development of Anti-Ballistic Board from Ramie Fiber. *Polym.-Plast. Technol. Eng.* 2011, 50, 622 - 634.
- [4]Yeung, K.K.H.; Rao, K.P. Mechanical Properties of Kevlar-49 Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *Polym. Compos.* 2012, 20, 411 - 424.
- [5]Manigandan, S. Determination of Fracture Behavior under Biaxial Loading of Kevlar 149. *Appl. Mech. Mater.* 2015, 766 - 767, 1127 - 1132.
- [6]Qui, Y.; Schwartz, P. Micromechanical behavior of Kevlar-149/S-glass hybrid seven-fiber microcomposites: I. Tensile strength of the hybrid composite. *Compos. Sci. Technol.* 1993, 47, 289 - 301.
- [7]Al-Kheetan, M.J.; Rahman, M.M.; Balakrishna, M.N.; Chamberlain, D.A. Performance Enhancement of Self-Compacting Concrete in Saline Environment by Hydrophobic Surface Protection. *Can. J. Civ. Eng.* 2019, 46, 677 - 686.
- [8]Katzner, J.; Kobaka, J.; Ponikiewski, T. Influence of Crimped Steel Fibre on Properties of Concrete Based on an Aggregate Mix of Waste and Natural Aggregates. *Materials* 2020, 13, 1906.
- [9]Kostrzanowska-Siedlarz, A.; Gołaszewski, J. Rheological Properties of High Performance Self-Compacting Concrete: Effects of Composition and Time. *Constr. Build. Mater.* 2016, 115, 705 - 715.
- [10]Maria Cruz, A.; Javier, P. Self-Compacted Concrete with Self-Protection and Self-Sensing Functionality for Energy Infrastructures. *Materials* 2020, 13, 1106.
- [11]Biolzi, L.; Cattaneo, S. Response of steel fiber reinforced high strength concrete beams: Experiments and code predictions. *Cem. Concr. Compos.* 2017, 1 - 13.