

# 用于经济循环的绿色混凝土：可持续性和强度特性综述

努里·哈姆拉尼，瓦埃尔·库库克瓦尔，穆拉特·艾尔萨迪格，阿巴塔尔·奥纳特

所属机构：卡塔尔大学土木与建筑工程系

**摘要：**传统波特兰水泥混凝土（PCC）的主要关注点与全球水泥和天然粗骨料（NCA）的大量消耗有关，这一方面导致自然资源的枯竭，另一方面导致生态问题。因此，绿色混凝土（GC）的概念，通过用补充胶凝材料（SCM）代替水泥，如研磨颗粒高炉渣（GGBFS），粉煤灰（FA），硅粉（SF）和偏高岭土（MK），或用回收的粗骨料代替NCA，可以在解决PCC的环境威胁方面发挥重要作用。目前，越来越多的文献强调在具体应用中实现GC的重要性。因此，本文通过同行评审文献数据库Scopus进行了系统的文献综述。共综述了114篇论文，涵盖以下领域：（一）气相色谱的可持续性效益，（二）气相色谱的强度特性。根据这一综述，读者将能够选择其中一种SCM的最佳更换水泥水平，以达到适合特定混凝土应用的一定混凝土强度范围。

**关键词：**绿色混凝土；水泥；研磨造粒高炉渣；粉煤灰；硅粉；偏高岭土

## Green Concrete for A Circular Economy: A Review on Sustainability and Strength Properties

Nuri Hamrani, Wael Kucukvar, Murat Elsadig, Abatar Onat

Affiliation: Department of Civil and Architectural Engineering, Qatar University

**Abstract:** A primary concern of conventional Portland cement concrete (PCC) is associated with the massive amount of global cement and natural coarse aggregates (NCA) consumption, which causes depletion of natural resources on the one hand and ecological problems on the other. As a result, the concept of green concrete (GC), by replacing cement with supplementary cementitious materials (SCMs) such as ground granulated blast furnace slag (GGBFS), fly ash (FA), silica fume (SF), and metakaolin (MK), or replacing NCA with recycled coarse aggregates, can play an essential role in addressing the environmental threat of PCC. Currently, there is a growing body of literature that emphasizes the importance of implementing GC in concrete applications. Therefore, this paper has conducted a systematic literature review through the peer-reviewed literature database Scopus. A total of 114 papers were reviewed that cover the following areas: (1) sustainability benefits of GC, (2) strength properties of GC. Based on this review, the reader will be able to select the optimum replacement level of cement with one of the SCMs to achieve a certain concrete strength range that would suit a certain concrete application.

**Keywords:** Green concrete; Cement; Ground granulated blast furnace slag; Fly ash; Silica fume; Metakaolin

### 引言：

随着气候变化风险的增加以及由于它们在建筑行业的利用而造成的自然资源枯竭，可持续性已变得非常重要，循环经济（CE）一词已成为导致可持续发展的最重要因素之一。与基于制造，使用和最终处置方法的传统经济体系相反，CE的概念是围绕废物和资源管理的新兴框架，旨在通过促进废物和资源循环的概念，为流行的线性获取 - 制造 - 处置实践提供替代方案，以创建闭环系统并减少资源消耗。诸如但不限于再利用，回收和再

制造之类的策略使这一概念得以实施。许多研究员的目标是通过创建一个认知单元和一个以一组废物和资源管理策略的能力为中心的话语空间来阐明CE在废物和资源管理辩论中的潜在催化功能，以延长资源的生产寿命。

有证据表明，人口增长率的提高是城市扩张的最重要因素之一。最近，记录显示，与1960年人口只有30亿相比，2017年人口急剧跃升至72亿。这种急剧增长对环境造成了压力，因此需要分配更多的住房单元以及服务和工业设施。因此，各国正在经历一场建设方面的革命，

以满足必要的需要。

从建筑的角度来看，波特兰水泥混凝土（PCC）被认为是最重要的材料，广泛用于具有不同结构应用，原料丰富。每年，全球生产超过60亿吨混凝土，相当于地球上的1吨/人均。以前的研究报告说，在一立方码的混凝土中，10%重量含有水泥，每1吨水泥产生约0.9吨碳足迹。在水泥的制造过程中，两种基本原料，即钙质材料（即石灰石）和泥质材料（即粘土），在1400~1650℃的高温下熔化，转移到水泥熟料中。因此，这个过程消耗了大量的化石燃料，导致巨大的碳足迹。这与将石灰石（CaCO<sub>3</sub>）分解成（CaO + CO<sub>2</sub>）的化学反应引起的碳足迹并列[9, 10]。国际能源署（2016年世界能源展望）估计，全球碳足迹为216亿吨，其中水泥产量占总碳足迹的8%。

此外，在过去十年中，由于全球对混凝土的需求不断增长，水泥行业已成为二氧化碳排放量增长第二快的行业。与此同时，最近的统计数据显示，全球每年产生的炉渣和粉煤灰（FA）废物分别约为2.7亿至3.2亿吨和10亿吨。此外，在美国和挪威，硅粉（SF）的年产量估计为 $2 \times 10^5$ 至 $5 \times 10^5$ 吨。在土耳其，Baspinar和Demir还表示，一家硅铁生产厂生产了700至1000吨SF。此外，稻壳灰分（RHA）是另一种高活性的火山灰材料，作为从稻粒荚中获得的残留物，全球产量高达1.56亿吨。

与水泥问题相结合的是，来自拆除和重建旧结构的巨大全球建筑和拆除（C&D）废物，这造成了环境负担的另一个来源。此前据观察，全球每年产生超过5亿吨的C&D废物。最近，Akhtar和Sarmah表示，全球每年产生的C&D废物数量超过30亿吨，其中中国，印度和美国是这种废物的主要贡献者。随后，在将C&D废物处理到垃圾填埋场时，更多的土地区域被占用和污染。全球天然粗骨料（NCA）的年消费量已达到400亿吨，每年增长5%，而消费量最高的集中在亚太地区。这种对不可再生自然资源的巨大消耗在一些国家的自然资源枯竭中发挥了至关重要的作用。因此，自上个世纪以来，绿色混凝土（GC）一直是研究的对象。它通常被称为混凝土，有助于更好地开采废物，减少自然资源的消耗和减少碳足迹。

根据Long等人的说法，实施了不同的策略来实现具有更高可持续性的环保混凝土。一种是通过用C&D废物产生的回收粗骨料（RCA）部分替代NCA来减少自然资源的枯竭。另一种方法是用废弃的补充胶凝材料（SCMs）部分替代普通波特兰水泥（OPC），根据Liew

等人将其分为三组：1-工业废物，如研磨颗粒高炉渣（GGBFS），粉煤灰（FA）和硅粉（SF），2-农业废物，如RHA，玉米芯灰（CA），和锯末灰（SA），以及3-城市垃圾，如玻璃和塑料。此外，纤维素纳米晶体是从植物和树木中提取的其他绿色材料，当部分被OPC取代时，可以显著降低CO<sub>2</sub>消耗，提高混凝土的抗压强度和断裂性能。

#### 气相色谱的可持续性优势

在世界范围内，废物是一个日益严重的公共卫生问题。然而，认识到它是该行业的潜在原材料来源将提高资源效率，因为遵循这样的策略可以建立一个CE系统，通过该系统，材料循环将被关闭。因此，最大限度地减少自然资源枯竭，减少碳足迹，消除浪费。在初始阶段，RC的成分是在向工厂提供推荐的原材料和废物副产品（如GGBFS，FA和SF）后制造的，以部分取代OPC并避免将其丢弃到垃圾填埋场。接下来是建筑的施工过程和使用寿命。只要有需要，建筑物就应该翻新和修理，以延长其使用寿命。在建筑物达到其使用寿命的某个阶段，将进行拆除行动，并且产生的废物可以回收用于相同或另一个过程。

在可持续发展的历史上，GC被认为是改善三大可持续发展支柱的关键因素：环境，经济和社会。这是由于GC技术中发现的循环特性，该技术将为NCA保护水泥和自然资源，如页岩，石灰石，天然岩石和粘土，减少和节省垃圾填埋场面积和成本，并通过减少水泥需求来减少碳足迹，从而减少水泥制造过程中的化石燃料消耗。此外，利用GC可以保护地面的储水量并保护自然栖息地。这是因为聚集沉积物充当地下水库，当通过采矿过程提取时，地面的储存能力将丧失。此外，由于土地和植被坡度的变化，排水模式也会发生变化。因此，使用利用RCA而不是NCA的环保混凝土，或利用废弃的SCM作为其成分之一来部分替代水泥，可能在创建设施以改善结构知识和维护安全的生态和经济解决方案方面发挥关键作用。此外，将这些副产品处理到垃圾填埋场的问题是一个主要的环境问题，因为它们含有大量的可浸出有毒元素，这可能会对水，土壤和空气造成生态危害。

迄今为止，有几项研究已经对PCC和GC进行了比较生命周期评估（LCA）。例如，Knoeri等人分析了12种混凝土混合物与RCA的LCA，发现与具有NCA的对应传统混凝土（CC）相比，对环境的影响减轻了30%。这种缓解措施是由于避免了垃圾填埋场的C&D废物处置以及从钢筋中回收的废铁。这与Yazdanbakhsh等人非

常吻合,其中RCA的两个环境影响指标(包括酸化和烟雾形成)分别比NCA低16%和17%。此外,在他们的研究中,Yazdanbakhsh等人证明,将RCA运输到预拌工厂对环境的影响比运输NCA低35%。Faleschini和Pellegrino还表明,用混凝土中的电弧炉(EAF C)炉渣代替NCA可将温室气体排放量减少35%。根据Abbas等人的说法,在混凝土中实施RCA还有另一个降低成本的优势,因为骨料是在本地获得的,而不是从偏远地区拖曳的。Shan等人的LCA与先前的研究结果一致,其结果显示,与从海外进口的NCA相比,本地RCA的环境负荷明显较低。

Turk等人从三种工业副产品中制备了GC混合物,它们是(一)铸造砂,(二)EAF S(用作制造骨料)和(三)FA(用作矿物混合物)。他们的结果表明,FA的环境影响减少了25%,铸造砂减少了15%,EAF S的环境影响减少了5%至35%。Gursel等人通过LCA方法研究了RHA和FA混合混凝土混合料的全球变暖潜能值(GWP)。与CC相比,CC的GWP为544千克CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>,从他们的分析中可以看出,含有40%OPC,40%FA,15%RHA和5%石灰石粉的混合物显示出最低的GWP,为284千克CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>,对抗压强度没有相当大的影响。这一发现也得到了托马斯的支持,其中提出了一种环保、经济和耐用的混凝土,并用RHA部分取代了OPC。虽然Flower和Sanjayan发现正常混凝土强度混合物的碳足迹为263至290千克CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>,但一种混合物中用25%的FA代替OPC,在另一种混合物中用40%的GGBFS代替OPC,碳足迹分别减少了15%和22%。与水泥生产相比,GGBFS生产产生的碳足迹不到十分之一,而生产水泥所需的能量不到五分之一。

在Yu等人最近的一项研究中,OPC被不少于80%的FA所取代,该FA针对的是30 MPa的低强度混凝土。他们的研究采用了两个材料可持续性指标,仅关注所用材料的制造过程,即隐含能量和隐含碳含量。有趣的是,观察到GC混合物表现出传统M30混凝土混合物的隐含能量和隐含碳足迹的1/4至1/3。这种环境改善伴随着M30混合物成本的35%。Elchalakani等人进行了一项案例研究,以准备一种高效且低碳足迹的混凝土混合料设计,以建造阿拉伯联合酋长国的马斯达尔市。为此,制备了13种不同的混凝土混合物,其中50%至80%用GGBFS代替OPC。用GGBFS制成的混凝土混合料的测试结果表明,碳足迹减少了60%,因此,具有80%GGBFS和20%OPC的混合物被提名用于马斯达尔城的未来建设。

## 气相色谱的强度特性

### 一、带磨碎颗粒高炉渣的混凝土(GGBFS)

炉渣是在钢的制造过程中产生的副产品。它由构成OPC的相同成分组成,例如氧化铝,石灰和二氧化硅,但比例不同。当炉渣离开高炉时,必须迅速冷却,以尽量减少熔渣的结晶,并将其转化为小于4.75毫米的细玻璃状和颗粒状颗粒。然后将颗粒状产物研磨成细粉以获得GGBFS。

基于在混凝土中以不同百分比结合GGBFS的几项研究的压缩,弯曲和分裂拉伸强度的结果,已经记录了与具有100%OPC的对照混合物相比,当GGBFS部分掺入混凝土中时,7天的抗压强度较低。然而,25%置换的GGBFS混合物试样的抗压强度在28 d时更高。对于55%的GGBFS置换,在56和90 d时分别获得与对照试样相似且更高的抗压强度,而当使用60%置换GGBFS时,两者的抗压强度都更高。Oner和Akyuz发现,产生最高抗压强度的GGBFS替代物的最佳水平为55%。有趣的是,Oner和Akyuz注意到,对于相同的混凝土可加工性,随着GGBFS替代品的增加,水粘合剂(W/b)比率降低,因此GGBFS对可加工性具有积极影响,因为可以用更低的用水量实现更高的抗压强度。

对于弯曲强度,Khatib和Hibbert表明,在90天的固化过程中,60%GGBFS试样的强度比对照试样提高了19.6%。请记住,弯曲行为对微裂纹敏感,GGBFS的更细颗粒以及二次火山灰反应可以减少硬化混凝土中的孔隙连通性,从而提高弯曲强度。Guneyisi和Gesoglu记录了类似的观察结果,其中在90天的长时间内实现了更高的压缩和分裂拉伸强度,其替代水平为GGBFS的60%。

GGBFS混凝土在早期强度较低主要归因于GGBFS的缓慢火山灰反应,这取决于后期氢氧化钙Ca(OH)<sub>2</sub>的可用性形式。通过火山灰反应,会产生额外的硅酸钙水合物(C-S-H)凝胶,这将使混凝土的微观结构致密化,从而获得更高的GGBFS混凝土抗压强度。为了增强GGBFS混凝土的早期强度并进一步产生(C-S-H)凝胶,一些研究表明添加Ca(OH)<sub>2</sub>作为熟石灰。虽然GGBFS混凝土的早期强度很低,但当以低W/b比添加减水剂(SP)时,这种缺陷可能会被消除。Johari等人获得的20%GGBFS置换结果显示,当以0.28 W/b比率掺入14 Kg/m<sup>3</sup> SP时,7天抗压强度(79.6 MPa)高于对照标本(74.8 MPa)。而在28天和90天时,在60%的更替水平上获得了相当和更高的强度。

## 二、粉煤灰混凝土 (FA)

FA是一种细粉副产品,是发电厂高温燃烧煤粉产生的残留物。它是一种主要由二氧化硅和氧化铝组成的火山灰,当与水 and 石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合时,通过火山灰反应形成与波特兰水泥相似的化合物[5],但具有更致密和渗透性更小的微观结构。文献中报道,在全球FA生产中,只有25%用于该行业。

根据Naik等人的说法,添加高百分比的FA(50%至70%)显示出比没有FA的参考试样更低的抗压强度。这一观察结果与Lam等人一致,然而,在28天时FA的较低百分比(15-25%)时实现了与参考物相当的强度,而在56天和90天时显示出较高的强度。这仅限于具有低 $W/b = 0.3$ 的试样,而在较高的 $W/b$ 比率下记录较低的强度。虽然Bouzoubaa和Lachemi的结果表明,随着FA%从50%降低到40%, $W/b$ 比从0.45降低到0.35,抗压强度提高到35 MPa,所有混合物的目标28天强度都达到了35 MPa。与之前的发现相比,在 $W/b = 0.3$ 的FA用50%替换水泥时,Atis和Ash发现7,28和365天的抗压强度分别为48.3,66.55和83.60 MPa,而对照试样强度为52.63,64.55和77.08 MPa。Han等人得出结论,添加30%的FA可以提高365天的长期强度,而当水泥被10%的FA取代时,在28天获得更高的早期强度。

Siddique表示,随着 $W/b = 0.4$ 的替代率从40%增加到50%,抗压强度继续下降,然而,获得的强度足以用于钢筋混凝土结构。Dinakar等人已经证明,对于低强度自压实混凝土(20~30MPa),FA的置换率可达70%~85%,而对于强度较高的牌号(60~90MPa),置换比可在30%~50%的范围内。在他们的分析中,Nath和Sarker得出结论,当用粉煤灰部分替换水泥时,如果不对 $W/b$ 比率进行调整,则28天的强度将下降。因此,当在没有FA的试样中将 $W/b$ 比从0.41调整到含40%FA的试样的0.31时,可以在28天内获得67 MPa的高强度混凝土。在56天时,强度显著增加至88 MPa,但在此年龄之后没有注意到强度的进一步增加。Durán-Herrera等人获得的结果提请注意,当 $W/b$ 等于或高于0.5时,在超过30%的替代率下使用FA效率低下,其中在28天时报告了45%的强度显著下降。7 d后,研究指出,FA混凝土在28、56、90和365天的强度增益大于参考混凝土。通过调整 $W/b$ 比率,在FA的20%至40%的替代水平上超过了参考28天强度,但对于FA的60%至80%的更高替代水平,在90天时超过了参考强度。此外,FA混凝土在28至365天之间显示出优异的抗弯强度。

当水泥被FA部分取代时,强度的增加归因于重新结晶的碳酸钙以及在胶凝基质中产生额外的(C-S-H)凝胶,这是由FA和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之间的相互作用形成的,降低了过渡区和基质的孔隙率。此外,填充聚集体之间空隙的更细颗粒及其球形将产生更好的颗粒填料和更致密的糊状物,因此强度将增加。

## 三、含硅粉的混凝土

SF是另一种具有高度碎片结构的高效火山灰,当用于混凝土时,与水合水泥产生的石灰反应,以减少水泥浆料中的孔径体积和毛细管。SF是冶金工业中由硅铁,金属硅等硅合金产生的废物。其微小的颗粒的特征是微观球形,直径范围为0.1至0.5微米( $\mu\text{m}$ )。

SF混凝土的抗压强度继续显著增加,长达56天,然而,超过这个年龄后仅略有增加。SF添加后弯曲强度也得到增强,发现SF的最佳含量为15%。这与参考完全一致。虽然超过这个极限会降低强度,但在25%的SF下仍然可以达到77.5 MPa的高强度混凝土, $W/b$ 比为0.3,SP为12.6 kg/m<sup>3</sup>。Wong和Razak制备了几种混凝土混合物,其重量为0%至15%的水泥作为SF,其 $W/b$ 比分别为0.27,0.3和0.33。结果显示,由于SF的添加,3 d时强度没有立即增强,但从7天开始,在所有年龄段都获得了比对照混凝土更高的强度,直到10%SF混凝土在90天时达到17%的增量。这可以归因于早期火山灰活性的缓慢性质和火山灰的稀释作用。人们还注意到,将 $W/b$ 比率从0.3降低到0.27并没有像预期的那样激发强度的显著增加。在他们的研究中,Bhanja和Sengupta还研究了各种 $W/b$ 比率(即0.27,0.3,0.38和0.42)对混凝土抗压,弯曲和拉伸强度的影响,SF掺入为水泥重量的0%至30%。从他们的研究中可以看出,拉伸强度的最佳SF替代水平是混合物中 $W/b$ 比的函数,这证实了先前的发现。28天时拉伸强度的最佳替代水平在5%至10%的范围内,而对于抗压和弯曲强度,则在15%至25%的范围内。与剖分拉伸强度相比,由于SF掺入,弯曲强度表现出更大的改善。

根据之前GGBFS和FA的调查结果,7天和28天的优势是与没有GGBFS或FA的对照标本相比,强度降低,而在56天和90天的后期达到相当或更高的强度。相比之下,当水泥部分被SF取代时,7天和7天后的早期年龄强度显示出对控制混凝土的明显增强。这归因于SF的粒径小于GGBFS和FA,这导致SF和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的 $\text{SiO}_2$ 之间的火山灰反应增加,这是由于水泥的水化而产生的C-S-H凝胶,其生长到砂浆的毛细管空隙中,从而形成

更致密的微观结构。此外, SF作为填料的物理作用也有助于强度的发展, 因为SF的细颗粒会导致过渡区孔隙率的降低, 从而增强糊状物和骨料之间的互锁机制。

#### 四、含偏高岭土的混凝土(MK)

与GGBFS, FA和SF不同, MK不是副产品, 而是通过在650至800℃的温度范围内煅烧高岭土粘土制成的。高岭土暴露于这个温度范围是为了分解晶体结构并从高岭土的间隙中除去化学结合的水, 从而使材料转化为称为MK的无定形铝硅酸盐。在制造过程中, MK经过一个控制良好的过程, 仔细细化颗粒以驱除惰性杂质, 减轻其颜色, 并产生具有高反应性粉末, 在性能和结构上具有高度一致性。与10 μm的水泥粒径相比, MK的中值粒径为1.3 μm。

Zhang和Malhotra报告说, 10%MK混凝土的抗压强度在所有年龄段(长达180天)表现出比对照混凝土更高的抗压强度值。在20%MK的更高更替水平下, Khatib和Hibbert概述了没有进一步提高力量的记录。此外, Khatib和Hibbert得出结论, 10%MK的替代水平是最好的, 并且发现它在力量发展方面优于SF, 特别是在3天的早期, 其中触发的强度高于对照, 而对于SF, 在7天或之后触发了高于对照的强度。

Dinakar等人指出, 在10%MK的最佳替代水平下, 在0.3的低W/b比下可以获得100 MPa的强度值。同样的混凝土混合料在28天内产生了抗压强度5.15%的裂解强度和相对较高的弹性模量。Ramezianpour和Jovein表示, 抗压强度的提高水平是在较低的W/b和混凝土固化期增加的情况下发展起来的。在他们的研究中, W/b比为0.35和0.4的混凝土MK的最佳用量分别为10%和12.5%。然而, 根据文献, 在0.5 W/b比下, 40至50 MPa混凝土的最佳MK量为20%, 而在W/b为0.3时, 80至100 MPa混凝土的最佳MK量为10%。MK在混凝土中的快速强度发展主要归因于水泥水化过程中MK的孔隙填充效应和释放的Ca(OH)<sub>2</sub>的快速火山灰反应, 通过形成C-S-H凝胶在密集堆积的颗粒中产生更多的键。此外, 这也可能归因于氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)含量较高, 这导致更高的火山灰活性。

#### 讨论

RLES以前没有被框定, 当然也不是集体的, 以延长资源的生产寿命。CE的重构以一种更清晰的方式铸造了RLES, 更清楚地描述了它们在管理废物和资源方面可以发挥的作用。因此, 行政长官对废物和资源辩论的服务已经阐明了一组延长资源寿命的战略的能力, 作

为促进额外价值提取和减少价值损失和破坏的手段。实际上, CE伞形概念命名并描绘了一种新的现象, 并通过它赋予它可以讨论的单元的实质, 从而创建了一个认知单元。这也创造了一个平台, 可以在其中进行专门讨论RPES的适当应用, 从而产生一个话语空间。正是在这种能力下, 该概念的催化功能在于, 从这个意义上说, CE可以促进填补关于什么构成有意义和可操作的废物和资源管理实践的知识空白。本文所呈现的叙述在范围, 时间框架和地理位置方面受到限制, 并且忽略了有关不同但共同演变的科学, 政策和实践话语的细节。我们进一步认为, 通过关注物质流动如何被非物质流动(即不同形式的社会嵌入性)塑造并与之相互作用, 我们可以丰富我们对废物和资源管理中社会制度变革的辅助或抑制的理解。

#### 结论

本文首先讨论了GC的可持续性优势, 然后分析了将GGBFS, FA, SF或MK作为部分替代材料用于水泥时的力学性能, 在不同的更换水平, 不同的年龄和不同的抗压强度方面具有不同的W/b比。根据上述综述, 主要结果总结如下:

- SF和MK在获得比具有100%OPC的控制组合更高的早期强度方面非常有效。

- 在90天时, GGBFS混凝土报告的抗压强度高于40 MPa, 但混凝土在W/b为0.5时具有80%的GGBFS。

- 分析显示, 当实施0.5至0.6或0.24至0.45的W/b范围时, 达到20至35 MPa的28天强度, 而FA的替代水平分别为10%至30%或40%至60%。

- 当W/b范围分别为0.27至0.4和0.24至0.36时, 当FA的替代水平分别为10%至55%和10%至40%时, 可以达到40至60 MPa和60至80 MPa范围内的更高强度等级(28天)。

- 在28天龄时, 当W/b在0.35至0.5和0.26至0.4范围内, 当SF的替代率分别为5%至20%和5%至25%时, 达到40至60 MPa和60至90 MPa的高强度等级。

- 对于MK混凝土, 28天强度为60至80 MPa, 在W/b为0.3至0.36时达到, 更换水平在10%至20%范围内。在0.27至0.33的较低W/b下, 在5%至15%的替代水平下分别实现了80至100 MPa的强度范围。

需要继续努力确定GC的应力-应变行为, 以考虑所需的设计考虑因素。此外, 还可以进行进一步的研究, 以确定大型试样(如梁和板坯)在剪切和弯曲下的行为, 以了解GC, 棒材和马镫的组合如何创建功能性且安全的

系统。研究的另一个重要方面可能产生惊人的发现，是研究GC与传统钢或纤维增强聚合物（FRP）棒材的粘合效率。在更广泛的层面上，需要对GC进行全面、详细和准确的社会、经济和环境可持续性分析，以考虑GC产品从摇篮到坟墓的所有阶段。最后，我们相信我们的研究将作为分析GC中其他类型的替代品的基础，例如农业和城市垃圾。

#### 参考文献:

- [1]Wang D, Zhou X, Meng Y, et al. Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Constr. Build. Mater.* 2017, 147, 398 - 406.
- [2]Uysal M, Akyuncu V. Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. *Constr. Build. Mater.* 2012, 34, 170 - 178.
- [3]Yoo SW, Ryu GS, Choo JF. Evaluation of the effects of high-volume fly ash on the flexural behavior of reinforced concrete beams. *Constr. Build. Mater.* 2015, 93, 1132 - 1144.
- [4]Fuzail Hashmi A, Shariq M, Baqi A. Flexural performance of high-volume fly ash reinforced concrete beams and slabs. *Structures* 2020, 25, 868 - 880.
- [5]Sangeetha SP, Joanna PS. Open Access Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Partial Replacement of GGBS. *Am. J. Eng. Res.* 2014, 3, 119 - 127.
- [6]Arezoumandi M, Volz JS. Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams. *J. Clean. Prod.* 2013, 59, 120 - 130.
- [7]Sunayana S, Barai SV. Shear behavior of fly-ash-incorporated recycled aggregate concrete beams. *ACI Struct. J.* 2020, 117, 289 - 303.
- [8]Alghazali HH, Myers JJ. Shear behavior of full-scale high volume fly ash-self consolidating concrete (HVFA-SCC) beams. *Constr. Build. Mater.* 2017, 157, 161 - 171.
- [9]Bertolini L. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2008, 4, 123 - 137.
- [10]Topçu IB, Bogâ AR. Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete. *Mater. Des.* 2010, 31, 3358 - 3365.
- [11]Barnett SJ, Soutsos MN, Millard SG, et al. Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cem. Concr. Res.* 2006, 36, 434 - 440.