

循环经济的绿色混凝土：可持续性、耐久性和结构特性综述

阿巴塔尔·库库克瓦尔，穆拉特·哈姆拉尼，瓦尔马赫迪，埃尔萨迪格·阿尔纳哈尔
卡塔尔大学土木工程学院，卡塔尔

摘要：传统波特兰水泥混凝土（PCC）的一个主要问题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，如磨碎的高炉矿渣（GGBFS）、粉煤灰（FA）、硅灰（SF）和偏高岭土（MK），或用再生粗骨料代替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施GC的重要性。因此，本文通过同行评议文献数据库Scopus进行了系统的文献回顾。共审查了114篇论文，涵盖以下领域：（1）GC的可持续性优势，（2）GC在抗压强度方面的机械性能，（3）GC在多种环境暴露下的耐久性能，（4）结构GC在剪切和弯曲下的大型钢筋梁中的性能，以及（5）将先前测试的梁的GC剪切能力与主要设计规范和推荐模型进行比较的分析研究。根据这篇综述，读者将能够选择使用其中一种SCM的最佳水泥替代水平，以达到适合特定混凝土应用的特定混凝土强度范围。此外，耐久性性能分析表明，不建议在暴露于高于400°C的温度下的混凝土中添加SCM。此外，注意到在混凝土混合物中将GGBFS与FA结合在长期抵抗硫酸盐侵蚀方面优于PCC。从实验测试的梁与可用的混凝土抗剪设计方程的数据比较中得出的最引人注目的观察结果是，梁具有高达70%的FA替代OPC或高达100%的RCA替代NCA由日本土木工程师协会（JSCE-1997）、美国混凝土协会（ACI318-19）和加拿大标准协会（CSA-A23.3-14）的方程式保守地预测。

关键词：绿色混凝土；水泥；粒状高炉矿渣；粉煤灰；硅灰；偏高岭土

Green Concrete for a Circular Economy: A Review on Sustainability, Durability, and Structural Properties

Abathar Kucukvar, Murat Al-Hamrani, Wael Mahdi, Elsadiq Alnahhal
Faculty of Civil Engineering, Qatar University, Qatar

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) mechanical behavior of GC in terms of compressive strength, (3) durability properties of GC under several environmental exposures, (4) structural performance of GC in large-scale reinforced beams under shear and flexure, and (5) analytical investigation that compares the GC shear capacities of previously tested beams with major design codes and proposed models. 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. Also, the analysis of

durability performance revealed that the addition of SCMs is not recommended in concrete exposed to a higher temperature than 400 °C. Moreover, combining GGBFS with FA in a concrete mix was noticed to be superior to PCC in terms of long-term resistance to sulfate attack. The single most striking observation to emerge from the data comparison of the experimentally tested beams with the available concrete shear design equations is that the beams having up to 70% of FA as a replacement to OPC or up to 100% of RCA as a replacement to NCA were conservatively predicted by the equations of Japan Society of Civil Engineers (JSCE-1997), the American Concrete Institute (ACI 318-19), and the Canadian Standards Association (CSA-A23.3-14).

Keywords: green concrete, cement, ground granulated blast furnace slag, fly ash, silica fume, metakaolin

引言:

与钢铁等其他建筑材料相比,混凝土在能源消耗和单位体积碳排放方面更具可持续性。然而,与其他建筑材料相比,混凝土的大量消耗已经消除了这种可持续优势。普通硅酸盐水泥(OPC)是混凝土中的主要粘合剂,其生产占世界人为碳排放量的8%左右,消耗了世界能源的3%左右。此外,混凝土行业是天然骨料和淡水的最大消耗者。未来使用的更高产量的混凝土将导致这些自然资源的显著枯竭和环境污染。因此,必须拥有绿色混凝土,以满足未来对混凝土的需求,同时保护自然资源。与传统的OPC混凝土相比,绿色混凝土可以归类为具有更少能量和碳的任何混凝土。此外,生混凝土基本上包含不同的废料作为粘合剂或/和骨料。

因此,绿色混凝土可以有多种类型;例如部分或全部替代OPC作为粘合剂的混凝土,或/和将废物和回收材料作为骨料的混凝土。除了可持续性外,对坚固耐用的混凝土的必要性推动了绿色混凝土的发展,该混凝土可以抵抗环境中的负荷和各种有害作用力。与传统的OPC混凝土相比,绿色混凝土生产出优异的新拌和硬化性能的前景将确保低维护成本、快速完成施工和延长使用寿命。尽管作者在一篇尚未发表的文章中介绍了当前与混凝土行业相关的可持续性,但本文探讨了用于实现绿色混凝土的主要发展。讨论了使用不同的替代成分来生产绿色混凝土以及它们对绿色混凝土性能的影响。希望本文能为建筑行业的利益相关者提供指导,以提高混凝土的可持续性。还预计本文将为进一步改进和优化当前的绿色举措创造一条途径,并将促进新举措的发展。

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,广泛用于不同的结构应用,原材料丰富。全球每年生产超过60亿吨混凝土,相当于地球上的1吨/人。先前的研究报告称,在1立方米的混凝土中,10%的重量含有水泥,每1吨水泥会产生约0.9吨的碳足迹。在水泥的制造过程中,两种基本原料,即

钙质材料(即石灰石)和一种泥质材料(即粘土),在1400至1650°C的高温下熔化,转移到水泥熟料中。因此,这个过程消耗大量的化石燃料,导致巨大的碳足迹。这不包括将石灰石(CaCO_3)分解成($\text{CaO} + \text{CO}_2$)所涉及的化学反应所引起的碳足迹。国际能源署(World Energy Outlook 2016)估计全球碳足迹为216亿吨,其中水泥生产占总碳足迹的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。同时,最近的统计数据表明,全球每年产生的矿渣和飞灰(FA)废物分别约为270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 2×10^5 至 5×10^5 吨。在土耳其,Baspınar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(RHA)是另一种高活性火山灰材料,是从稻谷的豆荚中获得的残余物,全球总量高达1.56亿公吨。

与水泥问题相伴的是,全球范围内因拆除和重建旧结构而产生的大量建筑和拆除(C&D)废物,是另一个环境负担来源。此前曾观察到,全球每年产生超过5亿吨的拆建垃圾。最近,Akhtar和Sarmah表示,全球每年产生超过30亿吨的C&D废物,其中中国、印度和美国是这些废物的主要贡献者。随后,在将拆建废物填埋时,更多的土地被占用和污染。考虑到这一点,全球天然粗骨料(NCA)的年消费量已达到400亿吨,并且每年以5%的速度增长,而消费量最高的地区则集中在亚太地区。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消耗中起着至关重要的作用。因此,绿色混凝土(GC)自上个世纪以来一直是研究的对象。它通常被称为有助于更好地利用废料、减少自然资源消耗和减少碳足迹的混凝土。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。一是通过用C&D废物产生的再生粗骨料(RCA)部分替代NCA来减少自然资源的消耗。另一种方法是用废物补充胶凝材料(SCM)部分替代普通硅酸盐水泥(OPC),根

据 Liew 等人将其分为三类：1—工业废物，如磨碎的高炉矿渣（GGBFS）、飞灰（FA）和硅灰（SF），2—农业废弃物，例如 RHA、玉米芯灰（CA）和锯末灰（SA），以及 3—城市废弃物，例如玻璃和塑料。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 替代时，可以显著减少二氧化碳消耗，同时提高混凝土的抗压强度和断裂性能。

一、新颖性和研究目标

知道 PCC 生产是全球变暖的主要原因之一，并且全世界都在努力实现可持续环境，本研究旨在通过对可持续性、强度和 GC 的耐久性特性，以检查其作为环保和结构材料代替 PCC 的可行性。本研究中的 GC 将仅限于将 RCA 作为 NCA 的替代品，以及将 GGBFS、FA、SF 或偏高岭土（MK）作为 OPC 的替代品的混凝土。这篇评论文章将允许用户通过确定从 Scopus 数据库中的若干研究中获得的特定年龄的高于或低于 40 MPa 的强度范围来选择适合低强度或高强度应用的推荐 GC 成分，用其中一种 SCM 替代水泥的水平和水粘合剂（W/b）比率。此外，本文还将深入了解 GC 在高温、硫酸盐侵蚀、氯离子渗透以及冻融暴露方面的性能。此外，本研究将分析说明现有设计规范和指南在预测先前测试的 GC 梁的实验剪切能力方面的准确性。因此，本次审查研究旨在达到以下目标：

- 讨论 GC 对环境的可持续性益处，然后概述与 GC 在抗压强度方面的机械性能相关的最突出发现。

- 研究了 GC 在不同恶劣环境暴露下的耐久性能，然后讨论了大型加筋 GC 梁的剪切和弯曲行为的结构发现。

- 收集所有部分包含 RCA 或 SCM 以分别替代 NCA 或 OPC 的剪切行为研究，然后将它们的具体剪切能力与可用的设计规范和推荐的剪切方程进行分析比较。

二、文献综述

审查方法

在开始分析之前，通过同行评审的文献数据库 Scopus 收集了几篇研究论文。收集的论文总数为 1279 篇。收集是基于五个搜索类别完成的：（1）GGBFS 混凝土，（2）FA 混凝土，（3）SF 混凝土，（4）MK 混凝土，和（5）RCA 混凝土。在每个搜索类别下，确定了与四个主题中的任何一个相关的一组关键字，即可持续性效益、抗压强度、耐久性行为和增强 GC 梁的结构行为。这些主题下的子类别指的是论文中讨论和审查的要点。每个搜索类别的关键字块是在 Scopus 中提炼作者关键字或索引关键字后指定的。逻辑运算符“OR”用于组合每个搜

索块中的不同搜索词。这些搜索块分别在文章标题、摘要和关键字搜索词中进行搜索。在抗压强度类别下，仅包括关于用 GGBFS、FA、SF 和 MK 等 SCM 替代 OPC 的研究，而 RCA 混凝土论文被排除在外。然而，RCA 具体论文被包括在其余类别中。此外，所有非英语、数字和纤维增强混凝土文章都被排除在外。根据这一选择标准，在筛选论文摘要以检查相关研究后，共收集了 114 篇论文用于本综述研究。

GC 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，将其视为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消耗，减少碳足迹并消除浪费。在初始阶段，RC 的成分是在向工厂提供推荐的原材料后制造的，以及 GGBFS、FA 和 SF 等废物副产品以部分替代 OPC 并避免将其丢弃到垃圾填埋场。其次是施工过程和建筑物的使用寿命。每当需要时，应对建筑物进行翻新和维修以延长其使用寿命。在某个阶段，建筑物将达到其使用寿命，拆除行动将发生，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中，GC 一直被认为是改善三个可持续发展支柱：环境、经济和社会的关键因素。这是由于 GC 技术中发现的循环特性，这将为 NCA 节省水泥和自然资源，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，并通过减少碳足迹来减少碳足迹。水泥需求，这减少了水泥制造过程中的化石燃料消耗。此外，利用 GC 可以节约地面的蓄水能力，保护自然栖息地。这是因为骨料沉积物充当地下水库，当通过采矿过程提取时，地面的存储容量将丢失。此外，由于土地和植被坡度的变化，排水方式也会发生变化[34]。因此，使用使用 RCA 代替 NCA 的环保混凝土，或利用废 SCM 作为其成分之一来部分替代水泥，可能在创建设施以提高结构知识和维护安全的生态和经济的解决方案。此外，将这些副产品处理到垃圾填埋场是一个重大的环境问题，因为它们含有大量可浸出的有毒元素，会对水、土壤和空气造成生态危害。

迄今为止，一些研究已经在 PCC 和 GC 之间进行了比较生命周期评估（LCA）。例如，Knoeri 等人使用 RCA 分析了 12 种混凝土混合物的 LCA，发现与使用 NCA 的对应传统混凝土（CC）相比，环境影响减轻了 30%。这种缓解是由于避免了垃圾填埋场中的 C&D 废物处置以

及从钢筋中回收的废铁。这与 Yazdanbakhsh 等人的研究结果非常吻合, RCA 的酸化和烟雾形成两个环境影响指标分别比 NCA 低 16% 和 17%。此外, 在他们的研究中, Yazdanbakhsh 等人证明, 将 RCA 运输到预混工厂比运输 NCA 对环境的影响低 35%。Faleschini 和 Pellegrino 还表明, 用混凝土中的电弧炉 (EAF C) 炉渣代替 NCA 可使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 具有降低成本的另一个优势, 因为骨料是在本地获得的, 而不是从偏远地区拖运的。Shan 等人的 LCA 与之前的研究结果一致, 他们的结果表明, 当地 RCA 的环境负荷明显低于从海外进口的 NCA。Turk 等人用三种工业副产品制备了 GC 混合物, 它们是 (1) 铸造砂、(2) EAF S (用作人造骨料) 和 (3) FA (用作矿物掺合料)。他们的结果表明, FA 对环境的影响减少了 25%, 铸造砂减少了 15%, EAF S 减少了 5% 到 35%。关于 CO₂ 排放, EAF S 的情况仅显示很小改善, 同时它在富营养化方面表现出非常大的改善。Gursel 等人通过 LCA 方法研究了 RHA 和 FA 混合混凝土混合物的全球变暖潜能值 (GWP)。与导致 GWP 为 544 kg CO₂-eq/m³ 的 CC 相比, 他们的分析表明, 与 40% OPC、40% FA、15% RHA 和 5% 石灰石粉的混合物显示出最低的 GWP 284 kg CO₂-eq/m³ 对抗压强度没有显著影响。这一发现也得到了 Thomas 的支持, 他提出了一种环保、经济、耐用的混凝土, 用 RHA 部分替代了 OPC。虽然 Flower 和 Sanjayan 发现普通混凝土强度混合物的碳足迹为 263 至 290 kg CO₂-eq/m³, 但在一种混合物中用 25% FA 和在另一种混合物中用 40% GGBFS 替代 OPC, 表明碳足迹分别减少 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, 生产水泥所需的能源不到五分之一。在 Yu 等人最近的一项研究中, OPC 被不少于 80% 的 FA 取代, 目标是 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, 即隐含能源和隐含碳含量。有趣的是, 观察到 GC 混合物显示出传统 M30 混凝土混合物的隐含能量和隐含碳足迹的 1/4 到 1/3。这种环境改善伴随着 M30 混合物 35% 的成本降低。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% 到 80% 的 OPC 被 GGBFS 替代。用 GGBFS 制成的混凝土混合物的测试结果表明, 碳足迹减少了 60%, 因此, 80% GGBFS 和 20% OPC 的混合物被提名用于马斯达尔城的未来建设。

GC 的强度特性

在本节中, 将研究和分析 GC 的抗压强度特性, 其中包括 GGBFS、FA、SF 或 MK 等工业 SCM 作为其替代 OPC 的成分之一。本节中收集的大部分压缩测试都是在 100 mm × 200 mm 圆柱体上进行的, 其余的一些是 150 mm × 300 mm 圆柱体、100 mm 立方体和 150 mm 立方体。

- 带有磨碎粒状高炉渣的混凝土 (GGBFS) 渣是钢铁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, 并将其转化为尺寸小于 4.75 毫米的细玻璃状和粒状颗粒。然后将颗粒状产品研磨成细粉以获得 GGBFS。

在补充文件的表 S1 中列出了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。据记录, 与具有 100% OPC 的对照混合物相比, 当 GGBFS 部分掺入混凝土时, 7 天的抗压强度较低。然而, 更换 25% 的 GGBFS 混合物试样的抗压强度在 28 天时更高。对于 55% 的 GGBFS 替代品, 分别在 56 天和 90 天获得了与对照样品相似且更高的抗压强度, 而当使用 60% 的 GGBFS 替代品时, 两个年龄都获得了更高的抗压强度。Oner 和 Akyuz 发现产生最高抗压强度的最佳 GGBFS 替代水平为 55%。有趣的是, Oner 和 Akyuz 注意到, 对于相同的混凝土和易性, 水粘合剂 (W/b) 比率随着 GGBFS 替代量的增加而降低, 因此 GGBFS 对和易性具有积极影响, 因为可以通过更低的耗水量实现更高的抗压强度。对于抗弯强度, Khatib 和 Hibbert 表明, 在固化 90 天后, 与对照样品相比, 60% GGBFS 样品的强度提高了 19.6%。请记住, 弯曲行为对微裂纹很敏感, GGBFS 的细颗粒以及二次火山灰反应可以降低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抗压强度和断裂抗拉强度, 更换水平为 GGBFS 的 60%。

GGBFS 混凝土早期强度较低的主要原因是 GGBFS 缓慢的火山灰反应, 这取决于后期氢氧化钙 Ca(OH)₂ 的有效性形式。通过火山灰反应, 会生成额外的水合硅酸钙 (C-S-H) 凝胶, 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。为了提高 GGBFS 混凝土的早期强度并进一步生成 (C-S-H) 凝胶, 一些研究建议添加 Ca(OH)₂ 作为熟石灰。尽管 GGBFS 混凝土的早期强度较低, 但在添加低 W/b 比的高效减水剂 (SP) 时可能会消除这一缺陷。Johari 等人获得的 20% 替

代 GGBFS 的结果显示, 当以 0.28 W/b 的比率加入 14 Kg/m³ 的 SP 时, 7 天抗压强度 (79.6 MPa) 高于对照试样 (74.8 MPa)。而在第 28 天和第 90 天, 在 60% 的更换水平下获得了相当的和更高的强度。

GC 的持久性能

持久性是混凝土最常提及的问题之一, 因为 RC 元件的劣化最多可能与恶劣的环境暴露有关。因此, 本节将介绍几项耐久性研究来讨论 GC 的耐久性能。

- 温度升高

Poon 等人评估了高达 800 °C 的高温对八种普通和高强度混凝土混合物性能的影响, 其中 MK 在 0%、5%、10% 和 20% 时取代了 OPC。为了实现高温暴露, 将测试样品放置在自动电炉中。与含有 OPC、FA 和 SF 的混凝土相比, MK 混凝土混合料在高达 400 °C 时获得更高的抗压强度, 而超过 400 °C 时, 抗压强度急剧下降, 随后出现严重开裂和爆炸剥落, 这是归因于其致密的微观结构, 允许通过蒸汽建立孔隙压力。然而, 含有 5% MK 的混凝土混合物在所有温度下都表现出比相应混凝土更好的性能, 而不会在失效时剥落。

参考文献中探讨了混凝土的力学行为, 其中 OPC 被 20%、40% 和 60% 的 GGBFS 取代, 并暴露在高达 350 °C 的温度下。作者在分析中指出, GGBFS 混凝土在所有高温 (100、200 和 350 °C) 下的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量的劣化在 28 天和 56 天时均保持在 40% 以下。在室温 27 °C 下混合。在所有 GGBFS 混合中, 20% 的 GGBFS 混合提供了最佳性能, 并且可以在核结构中适当地实施。

Li 等人还利用 GGBFS 在混凝土中以 10%、30% 和 50% 重量的 OPC 替代率来评估其在 150 至 700 °C 高温暴露 90 天后的性能。具有较高 GGBFS 含量的混合物显示出较高的碳化深度, 并且与具有 100% OPC 的对照混合物相比, 当温度升高到 300 °C 以上时, GGBFS 混凝土中的深度被测量为两倍。抗压强度随温度升高而降低, 这在高于 400 °C 的温度下更为明显。例如, GGBFS 为 0%、10%、30% 和 50% 的混凝土在 500 °C 下的抗压强度降低分别为 40%、38%、56% 和 59%, 与未加热的试样。此外, 对于具有 10%、30% 和 50% GGBFS 的混凝土, GGBFS 混凝土的弹性模量劣化比未加热的试样更严重, 保留百分比分别为 22%、25% 和 27%。

在参考文献中, 还研究了含有 5% 至 20% 的 MK 和 20% 至 60% 的 FA 的高性能混凝土混合料的机械性能和耐久性能。混凝土混合物暴露在 27 至 800 °C 的温度范

围内, 然后在空气中缓慢冷却或在水中快速冷却。通常, 观察到暴露于 400 °C 后快速冷却会导致抗压强度更严重的下降。从耐久性的角度来看, 由于在较高温度下孔隙面积分数增加, 所有混合物在 400 至 600 °C 之间的吸附性和氯化物渗透性值均显着增加。然而, 在常温下, MK 试样表现出比 FA 和 CC 试样更高的抗水渗透性。另一方面, 在 600 °C 及以上温度下, 20% FA 混合物的吸附性最低。

最近, Rashad 和 Sadek 试图提高 70% GGBFS 浆料在高温下 (即 400、600、800 和 1000 °C 下 2 小时) 的抗压强度。作者建议添加 2% 到 10% 的 MK 作为 GGBFS 的重量替代比例。他们的结果表明, 在暴露于高温之前和之后, 抗压强度随着 MK 含量的增加而增强。在 800 至 1000 °C 时, MK 含量为 2%、4%、6%、8% 和 10% 的浆料的残余抗压强度分别高出 10%、15%、20%、27% 和 35%, 比含 0% MK 的对照混合物。

GC 在大型 RC 梁中的结构性能

- 用 SCM 部分替代 OPC 如前几节所述, 许多研究已经分析了 GC 的抗压强度; 然而, 仅发表了有限数量的关于其结构行为的研究。例如, Yoo 等人评估了 35% 和 50% 的 OPC 替代率的高容量 FA (HVFA) 对 RC 梁弯曲行为的影响。他们的结果表明, 在开裂载荷、极限载荷、屈服载荷和应变方面, 与没有 FA 的 RC 构件的行为类似, 但是, 结果显示 HVFA 梁的弹性模量略低, 跨中挠度较高。没有 FA 的控制光束。这可以通过已知的 FA 密度比水泥材料低 25% 来证明, 这导致混凝土的单位重量减少 2% 到 3%。Hashmi 等人注意到了类似的观察结果, 其中 60% FA 的 RC 梁的最终和屈服状态与没有 FA 的 RC 梁相同, 但是具有 FA 的 RC 梁表现出更高的偏转和应变值, 这归因于较低的 FA 混凝土的弹性模量和劈裂抗拉强度。Sangeetha 和 Joanna 观察到, 在 28 天时, 更换率为 40% 的 GGBFS 的 RC 梁的弯矩容量与没有 GGBFS 的对照 RC 梁相当, 然而, 有趣的是, 在 56 天时它增加了 21%。这可以通过 GGBFS 的细玻璃状颗粒增强的耐用性和耐腐蚀性来证明, 这降低了氯离子的渗透性, 并增加了颗粒之间的结合。此外, Sangeetha 和 Joanna 报告说, 在使用载荷下的裂缝宽度被发现在 0.17 到 0.2 毫米的范围内, 这在 IS 456-2000 规定的限制范围内。Hawileh 等人最近的一项研究涉及 GGBFS 的更高替代水平 70% 和 90%。他们的结果表明, GGBFS 为 90% 的梁的强度和刚度分别降低了 6% 和 16%, 但发现 GGBFS 为 50% 和 70% 的梁是实用的, 并且极限承载能力增加了 3% 和

9%，分别。虽然90%的GGBFS在一定程度上牺牲了抗弯强度和刚度，但它增加了RC梁的延性。

-另一方面，Rao 等人研究了当50%的OPC被FA取代时RC梁的剪切行为。他们的实验结果表明，FA梁的抗剪强度略低于传统的混凝土(CC)梁。相反，Arezoumandi 和 Volz 测试了12根具有两种FA含量(按重量计50%和70%)的全尺寸梁，并指出FA梁在开裂荷载、荷载-挠度图方面与CC梁几乎相同，然而，在失效模式和失效模式下，注意到与没有FA的梁相比，具有FA的梁超过了规范预测的抗剪能力。这可归因于在FA的胶结基质中形成的断裂能比传统的OPC更高。Alghazali 和 Myers 研究了具有三种重量替代水平(50%、60%和70%)和两种不同纵向配筋率 ρ (1.59%和2.71%)的大型梁的剪切行为。FA梁在1.59%的较低 ρ 下表现出比CC梁更高的剪切强度，而在2.71%的较高 ρ 下没有观察到极限抗剪能力明显增加，但对角剪切裂纹扩展延迟了10%到24%。这一观察是指使用10毫米的小骨料尺寸，这会降低裂缝表面的粗糙度，并最大限度地减少纵向钢筋防止滑移的效果。

结论：

在这篇综述中，首先讨论了GC的可持续性优势，然后分析了在不同替代水平、不同年龄和不同W/b比下加入GGBFS、FA、SF或MK作为水泥的部分替代材料时的机械性能在抗压强度方面。讨论了GC在不同环境暴露下的耐久性能。在此之后，分析了GC在大型RC梁中的结构行为，并将其混凝土抗剪能力与现有的设计规范进行了分析比较，例如JSCE-1997、ACI 318-2019、AASHTO LRFD-2012和CSA-A23.3-2014，以及Xu等人提出的方程。基于以上回顾，主要成果总结如下：

-SF和MK在获得比100%OPC的对照混合物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40MPa，但GGBFS为80%且W/b为0.5的混凝土除外。

-分析表明，当W/b范围为0.5至0.6或0.24至0.45且FA的替代水平为10%至30%或40%至60%时，可实现20至35MPa的28天强度，分别。

-当W/b范围为0.27至0.4和0.24至0.36并且FA的替代水平为10%至55%和分别为10%至40%。

-在28天龄时，当W/b在0.35到0.5和0.26到0.4范围内，当SF的置换比在5%至20%和5%至25%。

-对于具有MK的混凝土，在W/b为0.3至0.36且替

换水平在10%至20%范围内时，可实现60至80MPa的28天强度。在0.27到0.33的较低W/b下，在5%到15%的更换水平下分别实现了80到100MPa的强度范围。

-在高于400℃的高温下，与GGBFS、FA或SF混合的混凝土的抗压强度急剧下降。

-火山灰水泥浆体的吸附性明显低于波特兰水泥浆体。

-观察到结合GGBFS和FA的混凝土对硫酸盐侵蚀的长期抵抗力优于CC混合料和大体积FA混凝土混合料。此外，前一种混合物的重量变化较小。

-碳化深度随着SCM含量的增加而增加，并且无论混凝土中的SCM类型如何，碳化深度都高于对照混合料(没有SCM)。

-二氧化硅纳米粒子(SNP)的掺入可导致碳化深度和硫酸盐侵蚀的显著降低。

-尽管RCA混凝土具有比NCA混凝土更透水的结构，但加入FA、GGBFS或SF可以显著提高抗氯离子渗透性。

-JSCE-1997、ACI 318-19和CSA-A23.3-14的混凝土抗剪强度模型显示了对FA或RCA混凝土梁的非常保守的预测，而AASHTO LRFD-2012高估了预测。

-在所有模型中，Xu等人的模型揭示了最准确的预测，对于具有FA或RCA的梁， $V_{exp}/V_{pred} = 1.2 \pm 0.22$ 和 1.11 ± 0.29 ，分别。

需要继续努力来确定GC的应力应变行为，以考虑所需的设计考虑。此外，还可以进行进一步的研究，以确定在剪切和弯曲下的梁和板等大型试样中的GC行为，以了解GC、钢筋和箍筋的组合如何创建一个系统功能和安全。另一个可能产生惊人发现的重要研究方面是研究GC与传统钢或纤维增强聚合物(FRP)钢筋的粘合效率。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，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中其他类型替代品的基础，例如农业和城市垃圾。

参考文献：

[1]Blomsma F., Brennan G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *J. Ind. Ecol.* 2017;21:603 - 614. doi: 10.1111/jiec.12603.

[2]Deschamps J., Simon B., Tagnit-Hamou A., Amor B. Is open-loop recycling the lowest preference in a circular

economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. *J. Clean. Prod.* 2018;185:14 – 22. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.021.

[3]Khan A.A., Arshad S., Mohsin M. Population Growth and Its Impact on Urban Expansion: A Case Study of Population Growth and Its Impact on Urban Expansion: A Case Study of Bahawalpur, Pakistan. *Univers. J. Geosci.* 2014;2:229 – 241. doi: 10.13189/ujg.2014.020801.

[4]Guney T. Population Growth and Sustainable Development in Developed– Developing Countries: An Iv (2sls) Approach. *J. Fac. Econ. Adm. Sci.* 2017;22:1255 – 1277.

[5]Tafheem Z., Khusru S., Nasrin S. Environmental Impact of Green Concrete in Practice ICMERE2011–PI–069; Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy (ICMERE); Chittagong, Bangladesh. 22 – 24 December 2011.

[6]B.V.V. Reddy, K.S. Jagadish, Embodied energy of common and alternative building materials and technologies, *Energy Build.* 35 (2003) 129 – 137, [https://doi.org/10.1016/](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4)

S0378-7788(01)00141-4.

[7]J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, Sustainable development and climate change initiatives, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 115 – 127, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>.

[8]S. Karthik, P. Rao, P. Awoyera, R. Gobinath, R. Karri, Alkalinity and strength properties of concrete containing macro silica and ground granulated blast furnace slag, *IET Digit. Libr.* (2018) 4.

[9]P. Murthi, P. Awoyera, P. Selvaraj, D. Dharsana, R. Gobinath, Using silica mineral waste as aggregate in a green high strength concrete: workability, strength, failure mode, and morphology assessment, *Aust. J. Civ. Eng.* (2018) 1 – 7, <https://doi.org/10.1080/14488353.2018.1472539>.

[10]V. Karthika, P.O. Awoyera, I.I. Akinwumi, R. Gobinath, R. Gunasekaran, N. Lokesh, Structural properties of lightweight self–compacting concrete made with pumice stone and mineral admixtures, *Rev. Rom. Mater. Rom. J. Mater.* 48 (2018).