

# 椰壳灰对混凝土工作性、机械性能和碳体现的影响

桑托什-阿德西纳, 阿德耶米-贝勒

所属单位: 巴基斯坦土木工程系

**摘要:** 波特兰水泥是混凝土中使用的主要粘合剂, 它的生产对二氧化碳排放的贡献很大, 因此迫切需要寻找环境友好型材料作为替代品。大多数发展中国家都有大量的农业废弃物, 如椰子壳, 这为探索如何将材料作为粘合剂成分回收并到混凝土中开辟了一条道路。大多数固体农业废弃物的燃烧会产生灰烬, 可以用来替代波特兰水泥作为混凝土的粘合剂。本文介绍了椰壳灰对混凝土的工作性、机械性能和含碳量的影响的实验研究结果。作者用椰壳灰代替波特兰水泥共制作了五种混合物, 比例最高为20%。本文的结果表明, 椰壳灰可以被纳入混凝土混合物以减少其内含碳。当用椰壳灰代替20%的波特兰水泥时, 实现了约15%的内含碳减少。在混凝土混合物中加入椰壳灰也导致了机械性能的提高, 最高可替代10%的波特兰水泥。用10%的椰壳灰替代硅酸盐水泥的混合物的抗压、抗拉和抗折强度比没有椰壳灰的对照混合物高12%、10%和9%。

**关键词:** 混凝土; 硅酸盐水泥; 椰壳灰; 可加工性; 机械性能; 碳的体现

## Influence of coconut shell ash on workability, mechanical properties, and embodied carbon of concrete

Santosh Adesina, Adeyemi Bheel

Affiliation: Department of Civil Engineering, Pakistan

**Abstract:** The significant contribution of the carbon dioxide emission from the production of Portland cement which is the main binder used in concrete has called for an imminent need to find environmentally friendly materials as alternatives. The availability of large quantities of agricultural wastes such as coconut shell in most developing countries opens a pathway to explore how these materials can be recycled into concrete as the binder composition. The combustion of most solid agricultural wastes results in the production of ash which can be used to replace Portland cement as a binder in concrete. This paper presents the results from the experimental investigation of the effect of coconut shell ash on the workability, mechanical properties, and embodied carbon of concrete. A total of five mixtures were made with coconut shell ash replacing Portland cement up to 20%. Results from this paper showed that coconut shell ash can be incorporated into concrete mixtures to reduce its embodied carbon. A reduction in embodied carbon of about 15% was achieved when 20% of Portland cement was replaced with coconut shell ash. The incorporation of coconut shell ash into concrete mixtures also resulted in an increase in the mechanical properties up to 10% replacement of Portland cement. The compressive, tensile, and flexural strength of mixtures incorporating 10% coconut shell ash as replacement of Portland cement is 12%, 10%, and 9% higher than that of the control mixture without coconut shell ash.

**Keywords:** Concrete; Portland cement; Coconut shell ash; Workability; Mechanical properties; Embodied carbon

### 引言:

混凝土作为首选的建筑材料一直占据着主导地位, 这是由于其强度、耐久性、多功能性和可持续性。但是, 这种材料的大量消耗给其可持续性带来了危险, 因为每年要消耗大量的自然资源。此外, 混凝土及其组件的生

产是非常密集的能源, 并向环境排放大量的二氧化碳。随着世界各地快速的城市化进程, 以及人口的增加, 预计混凝土的需求和生产将随之增加。混凝土生产的进一步增加将导致更多资源的消耗和环境的污染。为了确保在满足混凝土的持续需求的同时恢复混凝土的可持续完

整性,关键是要找到方法来消除对这种独特材料构成可持续性威胁的因素。

此外,用于制造混凝土的波特兰水泥(PC)的需求和生产不断增长,导致了大量的二氧化碳排放到环境中,并且由于对原材料的过度开采而导致环境的恶化。PC的生产已被发现是世界上人类引起的碳排放的主要贡献者,导致约7%的碳排放总量。这导致了混凝土内含碳的相应增加。由于预计未来几年会有更多的PC需求和生产,因此必须找到可用于替代PC的替代材料,以减少二氧化碳排放和对自然再资源的压力。另一方面,世界各地产生的数百万吨废物可以作为粘合剂或骨料成分回收至混凝土中,以减少其碳足迹。这些废物包括工业废物等。

由于农业废弃物的化学成分和它们在世界各地的可用性,它们作为一种可行的材料被回收至混凝土中。椰子壳就是这样的废物,它是在椰子果实被从其外壳中取出后产生的。由于每年生产超过5000万吨的椰子,因此会产生相应的椰子壳作为废物。由于椰子壳没有经济价值,它们最终被公开丢弃在环境中,对环境造成安全和美观上的威胁。因此,可能使用这些椰子壳作为混凝土中PC的替代品,也将为这些废物的有效管理开辟一条道路。为了在混凝土中使用椰壳作为PC的替代品,需要对椰壳进行研磨以减小尺寸,并通过燃烧来改变所产生的产品的化学成分。当粉碎的椰壳被燃烧时,产生的产品是椰壳灰(CSA),由于其硅酸盐和铝酸盐含量高,可用作混凝土的粘合剂成分。大多数关于椰子壳使用的研究只探讨了它在混凝土中作为骨料的使用。然而,为了更多地减少混凝土的内含碳,必须把重点放在替代PC上,因为它在混凝土的所有成分中具有最高的内含碳。因此,对椰子壳进行加工以获得CSA,并相应地将其作为混凝土中PC的部分替代物,预计将导致混凝土的整体减少。关于将CSA作为混凝土中的粘结剂成分,几乎没有广泛的研究。然而,Ikponmwosa等人能够将CSA作为铝硅酸盐前体加入到碱活性混凝土中。然而,该研究只使用了10%的CSA,并且没有评估弹性模量和CSA的可持续效益等性能。为了弥补这一知识差距,提高混凝土的可持续性,我们进行了这项研究。因此,本研究旨在研究在混凝土混合物中使用CSA的可持续优势及其对混凝土的新鲜和硬化性能的相应特性。在用CSA替代PC的情况下,共制作了五种混凝土混合物,其中CSA的替代率高达20%。评估的性能包括工作性、密度、弹性模量、抗压强度、分裂抗拉强度和抗折强度。还使用了一种简化的方法来评估混合物的碳含量。

## 材料

本研究使用I型硅酸盐水泥(PC)和椰壳灰(CSA)作为粘合剂。本研究中使用的CSA是通过加工来自巴基斯坦海德拉巴的椰子壳获得的。椰子壳首先被烘干,然后被粉碎成非常细小的尺寸。破碎的椰子壳在500到550℃的高温下燃烧约6小时,以获得灰烬(即CSA)。对CSA进行冷却和研磨,使其颗粒更细。在CSA冷却后,将CSA放入粉碎机中进行研磨,以减少CSA的颗粒大小。在研磨过程之后,CSA被过筛,只有通过325号筛的CSA(即小于45微米)被用来替代PC。所使用的CSA的平均粒径为30 $\mu$ m。当地采购的细集料和粗集料的最大集料尺寸为4.75毫米和19毫米。所有的混合物都使用了饮用水。混合物设计、搅拌和样品制备 本研究的目的是研究CSA对混凝土各种性能的影响。在所有其他成分保持不变的情况下,用CSA取代不同比例的PC,总共制作了五种混合物,其中CSA的比例最高为20%。本文使用的混合物名称代表了用CSA取代PC的百分比。例如,将CSA作为PC的15%替代品的混合物被指定为15CSA。所有的混合物都是先将粘结剂和碎石混合三分钟,然后再加水。在所有的水都加入后,混合物再混合两分钟。混合后,立即对混合物的新鲜特性进行评估,然后将混合物放在为评估硬化特性而准备的各种模具中。将新鲜的混合物放入模具后,用塑料布覆盖模具以避免水分的流失。

## 结果和讨论

### 可操作性

本研究中评估的混凝土混合物的可操作性是以坍落度来评价的。根据CSA含量对混凝土混合物坍落度的影响,可以看出,作为PC的部分替代品,CSA的加入导致了混合物坍落度的降低。加入5%、10%、15%和20%的CSA作为PC的替代物的混合物的坍落度比没有CSA的混凝土混合物低15%、29%、42%和58%。随着CSA的加入,坍落度的减少可以归因于CSA较高的吸水率。这一观察结果与Ikponmwosa等人的观察结果一致,当CSA被加入到碱活性混凝土中时,观察到坍落度的减少。Islam等人Foong等人的研究分别使用了棕榈油燃料灰和稻壳灰,也显示了加入这些生物废渣后混凝土混合物的坍落度下降。尽管如此,由于所有混合物的坍落度都在20毫米以上,它们仍然适用于实际应用。然而,在需要更高的可操作性的情况下,可以加入化学掺合物,如高范围的减水剂,以改善混合物的可操作性。

### 密度

降低混凝土的密度在成本、热性能和耐火性方面是

有益的。所评估的混凝土混合物的密度显示，混凝土混合物的密度随着CSA含量的增加而增加。用20%的CSA替代PC的混凝土混合物的密度比没有CSA的控制混合物的密度大约低10%。混合物的密度随着CSA的加入而降低，这是因为CSA的比重较低（即CSA和PC的比重分别为2.25和3.14），导致混凝土的密度相应降低。这一观察结果与Ikponmwoşa等人的观察结果一致，即在碱活化混凝土中引入10%的CSA导致密度下降。一些研究也表明，加入辅助材料来替代PC会导致密度下降。引入CSA后混凝土密度的降低表明，CSA是一种可行的材料，当需要降低混凝土结构的死负荷时，可以用来替代PC。

#### 机械性能：抗压强度

根据CSA对混凝土抗压强度的影响，可以看出，所有混合物的抗压强度都随着龄期的增加而增加。加入20%CSA的混合物在14天和28天时的抗压强度分别比7天时高24%和36%。混凝土抗压强度随龄期的增加可归因于波特兰水泥的持续水化和CSA的缓慢沸石反应，这导致了微观结构的更多致密化。然而，在所有的龄期中，CSA的最佳含量是10%，因为CSA含量高于10%（即15%至20%）时，混合物的抗压强度会下降。用CSA替代PC达到10%时，混合物的抗压强度增加，可归因于其孔隙填充作用，以及CSA可能产生的沸石反应。然而，在更高的CSA含量下，抗压强度的降低可能与CSA对PC的稀释作用有关，这导致了可用于产品形成的氢氧化钙减少。这一观察结果与Mo等人和Islam等人的观察结果相似，后者报告的偏高岭土和棕榈油燃料灰的最佳用量分别为10%。尽管如此，由于所有混合物在28天时的抗压强度都大于25兆帕，含有CSA的混凝土混合物可以用于结构应用。

#### 弹性模量

根据所调查的五种混合物的弹性模量（MOE），与CSA对抗压强度的影响相反，混合料的MOE增加到用CSA替代PC的20%。用5%、10%、15%和20%的CSA替代波特兰水泥的混凝土混合物的MOE比只用PC作为粘合剂的混凝土混合物高5%、7%、10%和13%。混凝土混合物的MOE随着CSA的加入而增加，这可以归因于CSA可能对改善界面过渡区的贡献。这一观察结果与Ul Islam等人的观察结果相矛盾，他们发现棕榈油燃料灰不会改善ITZ，从而导致混凝土的MOE下降。然而，Foong等人的研究表明，将稻壳灰作为PC的部分替代物的混凝土的MOE达到了15%，导致混凝土的MOE增加了约15%。尽管如此，本研究的结果表明，通过加入CSA作为PC的

部分替代物，可以提高混凝土的MOE。由于与抗压强度的对比结果，建议进行更多的测试，以便对这一现象有更多的了解。本研究中评估的混凝土混合物的MOE和28天的抗压强度之间的比较，可以看出，抗压强度和混合物的MOE之间没有线性关系。然而，存在一些多指标关系。这一观察结果可能与PC的替代率超过20%后抗压强度降低而MOE增加到20%有关。尽管如此，还是进行了相关和回归分析，得出的方程被用来计算所调查的五种混合料的抗压强度的MOE。从实验结果和公式中得到的MOE，可以看出，IS 456和EN 1992与实验结果有更好的相关性，因为在所有CSA含量下的最大差异大约为3 GPa。这些结果还表明，BS 8110在计算混凝土混合物的MOE方面并不有效。尽管如此，这些公式的有效性可以通过考虑混凝土中所有成分的影响而不是仅仅使用抗压强度来提高。值得一提的是，这些计算是基于假设所有规范都使用相同类型的样品尺寸。

#### 劈裂拉伸强度

根据CSA含量在不同龄期对劈裂抗拉强度的影响，与抗压强度类似，可以看出所有混合物的抗压强度都随着龄期的增加而增加。这也可能与复合材料中粘结剂成分与水的持续反应有关。此外，还可以看出，在所有龄期中CSA的最佳含量为10%。在14天和28天时，含有CSA的混凝土混合物的分裂抗拉强度比7天时的分裂抗拉强度分别高20%和47%。这一观察结果与Subaşı的观察结果相似，在该观察中，发现重新放置10%的PC与FA会导致轻质骨料混凝土的分裂抗拉强度增加约10%。Mo等人和Al Sibahy和Edwards也报告说，当使用偏高岭土作为PC的部分重新放置时，分裂抗拉强度增加。在CSA含量较高的情况下，劈裂抗拉强度的降低可能是由于CSA的稀释效应导致复合材料中的氢氧化钙降低，从而导致强度降低。尽管如此，CSA仍然可以在混凝土混合物中使用到20%，因为与只用PC作为粘结剂的混凝土相比，分裂抗拉强度的差异很低（即0.25MPa）。根据劈裂抗拉强度和抗压强度之间的关联性，可以看出，在所有年龄段，劈裂抗拉强度和抗压强度之间都有很强的相关性。

#### 弯曲强度

混凝土的抗弯强度在用于建造将承受弯曲力的结构时对其性能至关重要。根据不同龄期评估的混合物的抗弯强度，可以看出，与其他机械性能类似，抗折强度随着龄期的增长而增加。此外，与抗压强度和分裂抗拉强度类似，CSA的最佳含量为10%。这一观察结果与

Türkmén和Findik以及Mo等人的观察结果相关,在他们的报告中,将矿渣和偏高岭土分别作为PC的替代品,最高可达10%,从而提高了混凝土的抗弯强度。尽管如此,本研究中评估的所有混凝土混合物都可以用于结构性应用,因为加入20%CSA的混凝土混合物的抗折强度与仅用PC作为粘合剂的混凝土混合物的抗折强度没有明显区别。根据抗折强度和其他机械性能之间的相关性,可以看出,这些性能之间存在着良好的线性关系。然而,与抗压强度相比,抗折强度和抗拉强度之间有更多的线性相关关系。

#### 体现碳的评估

由于CSA含量是混合物中唯一的变量,可以看出,加入CSA作为PC的替代品,会导致体现碳的减少。加入5%、10%、15%和20%CSA的混凝土混合物的内含碳比对照组低4%、7%、11%和15%。这些观察结果与Turner和Collins的观察结果相关,后者发现仅将PC作为粘合剂的混凝土的碳含量为354 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。这些结果表明,除了CSA对机械性能的好处外,将其加入到混合物中还能提高其可持续性。

#### 结论

在这项研究中,CSA被用作PC的部分替代品,以提高混凝土的可持续性。CSA被用来替代PC的20%,并对相应的新鲜和硬化性能进行了评估。使用一种简化的方法评估了CSA对混合物的碳含量的可持续效益。基于这项研究的结果,可以得出以下结论:

1. 使用CSA作为混凝土中PC的替代品,由于CSA的吸水率较高,导致混合物的坍落度下降。然而,由于所有含有CSA的混凝土混合物的坍落度都超过了20毫米,它们仍然可以在各种应用中轻松地放置。

2. 加入CSA的混凝土混合物的密度低于未加入CSA的对照混合物的密度。加入CSA后,密度的降低是由于其较低的比重导致了混凝土密度的相应降低。

3. 用CSA代替10%的PC时,混凝土混合物的抗压强度、抗拉强度和抗折强度分别提高了12%、10%和9%。强度的提高可以归因于CSA的孔隙填充效应和沸石反应。然而,当CSA的用量较高时(即大于10%),由于CSA对PC的稀释作用,这些机械性能出现了下降。

4. 与其他力学性能相反,加入CSA作为PC的替代品,最高可达20%,从而提高了MOE。混凝土混合物的MOE比只用PC作为粘合剂的混合物高13%。不同标准的方程式之间的相关性也表明,IS 456和EN 1992在预测本研究中评估的混合物的MOE方面更为有效。

5. 将CSA纳入混凝土混合物中,导致了约15%的能源体现。这表明CSA不仅在提高机械性能方面有好处,而且还能提高混凝土的可持续性。

#### 参考文献:

[1]Andrew RM (2018) Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. *Earth Syst Sci Data* 10:195 - 217.

[2]Arena N, Lee J, Clift R (2016) Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. *J Clean Prod* 125:68 - 77.

[3]Collins F (2010) Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: Influence on their carbon footprint. *Int J Life Cycle Assess* 15:549 - 556.

[4]Foong KY, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Mo KH (2015) Enhancement of the mechanical properties of lightweight oil palm shell concrete using rice husk ash and manufactured sand. *J Zhejiang Univ Sci A* 16:59 - 69.

[5]Gunasekaran K, Annadurai R, Kumar PS (2012) Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete. *Constr Build Mater* 28:208 - 215.

[6]Hammond GP, Jones CI (2008) Embodied energy and carbon in construction materials. *Proc Inst Civ Eng Energy* 161:87 - 98.

[7]Ikponmwoosa EE, Ehikhuenmen S, Emeshie J, Adesina A (2020) Performance of coconut shell alkali-activated concrete: experimental investigation and statistical modelling.

[8]Turner LK, Collins FG (2013) Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Constr Build Mater* 43:125 - 130.

[9]Uday Bhaskar M, Manasa S, Anith Kumar T (2019) Concrete mix using solid waste aggregates (Coconut shell concrete). *Int J Innov Technol Explor Eng*.