

粉煤灰和铜尾矿在混凝土中作为水泥部分替代品的利用潜力及生命周期评估

阿吉特·丹达提亚, 拉胡尔·辛格

所属单位: 印度土木工程部

摘要: 粉煤灰 (FA) 和铜尾矿 (CT) 都是人类活动产生的废物, 由于火力发电厂的快速增长和铜需求的逐步增加, 它们遍布全球。本研究通过评估抗压强度、成本和环境影响, 研究了在混凝土中联合利用 FA 和 CT 作为水泥的部分替代品的可行性。本文先确定了 FA 和 CT 的形态和组成矿物以了解其利用潜力, 随后, 对不同比例的 FA 和 CT 的混凝土进行了设计, 以达到 30MPa 的目标强度。在 10% 的 FA 和 5% 的 CT 的联合替代下, 已经观察到抗压强度的提高 (与对照组相比, 最高可达 8.27%)。在不影响其抗压强度的情况下, 混凝土的成本也可以降低 16%。改良后的混凝土混合比例的环境影响评估也已使用生命周期评估 (LCA) 来进行。在 LCA 中, 一立方米的混凝土被作为一个功能单位。在所选择的中点类别中, 作者观察到气候变化的显著减少达 38%, 人类毒性的减少达 32.6%, 臭氧消耗的减少达 33.6%, 农业土地占用的减少达 31.9%, 水的消耗达 34.3%, 化石的消耗达 34.8%, 微粒物质的消耗达 35.4%, 金属的消耗达 25.2%。

关键词: 铜尾矿; 环境影响; 粉煤灰; 生命周期评估; 可持续利用

Utilization Potential of Fly Ash and Copper Tailings in Concrete as Partial Replacement of Cement along with Life Cycle Assessment

Ajit Dandautiya, Rahul Singh

Affiliation: Civil Engineering Department, India

Abstract: Fly ash (FA) and copper tailings (CT) both are, anthropogenic wastes, spread all over the globe due to rapid growth in thermal power plants and progressive increase in the demand of copper. This study examines the feasibility of combined utilization of FA and CT in concrete as a partial replacement of cement by assessing compressive strength, cost, and environmental impact. Morphology and constituent minerals of FA and CT have been identified to understand the utilization potential. Subsequently, the concrete has been designed for 30 MPa target strength for different mix proportions of FA and CT. Improvement (up to 8.27% compared to the control mix) in the compressive strength has been observed at combined replacement of 10% FA and 5% CT. The cost of concrete can also be reduced up to 16% without compromising its compressive strength. The environmental impact assessment of the modified concrete mix proportions has also been performed using life cycle assessment (LCA). Effect of all raw materials, electricity, and water consumption have been considered from their cradle to grave approach. One cubic meter concrete has been taken as a functional unit in LCA. Notable reduction has been observed in the chosen midpoint categories up to 38% in climate change, up to 32.6% in human toxicity, up to 33.6% in ozone depletion, up to 31.9% in agriculture land occupation, water depletion up to 34.3%, fossil depletion up to 34.8%, particulate matter up to 35.4%, and metal depletion up to 25.2%.

Keywords: Copper tailings; Environmental impacts; Fly ash; Life cycle assessment; Sustainable utilization

引言:

近年来,全球水泥生产增长迅速,继化石燃料和土地利用变化之后,它是人类活动中二氧化碳的第三大排放源。每生产一吨水泥,就会排放大约900公斤的二氧化碳,约占全球人为二氧化碳排放量的5-7%。2000年至2006年间,全球水泥产量增加了54%。自2006年以来,由于人口的预期增长和全球对混凝土作为主要建筑材料的需求,预计水泥产量也将每年增加0.8至1.2%,在2050年达到37至44亿吨。由于水泥产量的大幅增长,二氧化碳排放量也急剧上升。1990年全球水泥厂的二氧化碳排放量为5.76亿吨,而2006年的排放量几乎增加了两倍,达到了18.8亿吨。如果这个趋势继续下去而不采取任何行动,预计到2050年全球水泥行业的二氧化碳排放量将达到23.4亿吨。然而,在一个理想的目标中,通过应用适当的策略,如能源效率、利用替代燃料和熟料替代,这种排放量可能会减少,最终在2050年达到15.5亿吨。

混凝土,在微观层面上,被认为是水泥、沙子、骨料和水的异质混合物,是仅次于水的全球第二大人均消耗材料。由于对基础设施增长的严重需求,发展中国家正在急剧投资,而发达国家正在努力升级他们现有的老旧基础设施,使其更具有可持续性,并应对当前的结构要求。水泥是混凝土混合物中最重要的成分,它在有水的情况下结合并固化骨料。在制造水泥的过程中,石灰石和粘土需要被加热到1450℃,并释放出大量的二氧化碳(900-1000公斤/吨的水泥生产)。

铜是一种耐用和多功能的金属,自古以来就是一种非常有用的材料。目前,铜和铜合金产品在建筑施工、工业机械、交通运输、一般消费品、电信、电气和电子产品中的应用越来越多。铜被广泛使用,因为它还具有高导电性、导热性和低腐蚀性。它以其制造合金的能力和高延展性而闻名。作为使用最多的金属,其需求随着人口的增加而增加。这种持久和不断增长的需求使铜的制造升级,2017年全球纯铜的产量为1970万吨。CT是铜制造过程中产生的主要废物之一,一般由铁、硅、铝、镁、锌、铅、镉、不同的氧化物、氢氧化物和其他材料组成的不同化合物,可能对倾倒地点附近的环境和人类健康产生负面影响。

Onuaguluchi和Eren用CT替代水泥,制成高导电性混凝土,并推荐用于制作易除冰道路。Gupta等人测试了CT的粘土稳定特性,认为30%的CT和70%的粘土的混合物具有良好的承载力。此外,FA在水泥生产过程中被广泛使用,并被广泛用于部分替代混凝土中的水泥。它还被证明可以应用于土壤稳定,作为垃圾填埋场的衬垫,

制造砖块,作为吸附剂,回填矿井和路基,增强农业的土壤特性等。Wang等人将FA与煤矸石一起用在混凝土中,并认为当这种改性混凝土用于农田排水沟时,渗透性明显降低。Kurda等人还利用高含量的粉煤灰和不同比例的再生混凝土骨料,发现在低水粘合剂比率下,与高水粘合剂比率相比,两者都显示出更好的效果。

Nisbet等人定义了不同种类的波特兰水泥混凝土的生命周期清单并进行了LCA分析。Knoeri等人利用LCA研究了各个混凝土生产单位在运输、制造、使用和拆除方面的影响。该研究清楚地表明,不可再生的能源消耗如何成为受影响最大的类别之一。

FA被广泛地用作水泥的替代品,各种标准都建议混凝土中水泥的最大替代限度为30%。利用CT和FA在混凝土中部分替代水泥,将减少水泥生产过程中释放到大气中的大量二氧化碳,并有助于减少全球范围内FA和CT的堆积对环境造成的不利影响。在目前的研究工作中,LCA已被应用于所有混凝土的混合比例,它们对环境的影响已被评估,同时还有抗压强度和成本分析。

材料

在本研究中,FA、CT、普通硅酸盐水泥(OPC)、细骨料和粗骨料被用于制备混凝土和外加剂。硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铝酸铁氧体四钙是OPC中的主要矿物相。OPC的硬化过程是由于这些化合物与水的反应而发生的。在水化过程中,石灰被释放出来,这是多余的,在硬化过程中没有被利用。这种过剩的石灰由于形成微裂缝和削弱与混凝土的结合而对硬化后的混凝土的耐久性产生不利影响。

添加沸石材料可以解决这个问题,因为这种材料会与多余的石灰发生反应,并提供类似于水泥的结合性能。因此,在本研究中,重点是引入最佳数量的沸石材料,以便改善/保持混凝土的强度,特别是当这种沸石材料与剩余的石灰发生反应时。材料(FA和CT)被收集起来,并根据ASTM的要求对样品的可行性进行评估。

生命周期评估(LCA)分析

为了进行生命周期评估分析,我们了解了混凝土中替代FA和CT可能产生的环境影响。ISO 14040:2006被认为是分析的准则。LCA过程分为四个部分:(a)确定分析的目标和范围;(b)清单分析;(c)过程的影响评估;以及(d)结果分析。目标是评估在混凝土中用FA和CT以不同比例部分替代水泥对环境的影响,并与对照组进行比较。

UMBERTO NXT工具已被用于进行LCA分析。该软件有助于计算由于产品的不同阶段对环境的潜在影响。

在软件的帮助下进行图形建模,以分析材料的生命周期。这有助于以不同的中点和终点形式分析、获取和可视化环境影响的选定类别。最初,生命周期模型是以过程图的形式绘制的,然后需要定义过程和活动的规格。软件中的附加数据集被用来评估能源和材料流以及相应的对环境的影响评估。这一分析的结果以表格和图表的形式表示。

一种主要的通用LCA方法包括原材料的提取、能源利用的量化、材料的生产、利用、回收和最后的处置,这适合于文献中推荐的混凝土的分析。气候变化、人类毒性、臭氧消耗潜能、农业土地占用、水消耗、化石消耗、颗粒物和金属消耗潜能被认为是改性混凝土LCA分析的中间点类别。UMBERTO NXT工具提供的生态库存3.0数据集被用来考虑水泥、砾石、沙子、水、惰性废物和发电的库存数据。

FA和CT都被认为是惰性材料。假设混凝土的密度保持一致,在其使用寿命结束后,整个质量被认为是惰性废物。在所有的计算中,一立方米的混凝土被作为功能单位。对所有的混合比例(M1-M6和控制混合)和每个w/c比率(0.45和0.5)都进行了分析。用于LCA分析的生命周期清单(LCI)模型分为三个部分,即原材料、制造过程和废物处理。在原材料部分,水泥、沙子(细骨料)和砾石(粗骨料),用于生产混凝土。粉煤灰、铜尾矿和外加剂被认为是惰性材料,是原材料的重要组成部分。该模型的下一步是制造部分,在该部分中,根据混凝土的混合设计,将适当数量的原材料与水混合。在这个过程中,电力的消耗是均匀的,因为它只用于混凝土的搅拌,所有混合比例的搅拌时间相等。最后,混凝土被生产出来,在使用寿命结束后,它被作为惰性废物在废物处理部门进行处理。

结果和讨论

材料特性

FA和CT都是由波状纤维材料(SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3)加上少量的 CaO 、 MgO 和其他化合物组成。在CT和FA中,波状纤维材料的综合重量分别为其重量的86.93%和96.1%。它们大大高于ASTM C618-19中给出的推荐值(70%)。燃烧损失和水分值也被发现低于ASTM C618-19指南,这使得它们适合在混凝土中部分替代水泥使用。

在SEM图像中,FA的颗粒是球形的,表现得像一个球轴承,在混凝土中产生了油腻的效果。它使混凝土更易操作,更容易泵送,因为这些球形的颗粒减少了混凝土成分之间的摩擦。用相同重量和较小密度的FA代替水

泥,由于所需的水较少,细颗粒的体积较大,导致混凝土的出血量减少。CT颗粒的形状不是片状的,当它与水泥和FA颗粒结合时,可能会表现出更高的互锁能力,增加混凝土的密度并赋予额外的强度。因此,这些材料的颗粒大小几乎相同,可以有效地用作水泥替代品。

抗压强度

在7天、28天和56天后的抗压强度测试中,本文对所有混合比例的浇筑立方体的变形和应力进行了测量。每张图都显示了与不同的w/c比例相对应的特定时间间隔后的应力应变曲线。这些应力应变曲线显示了所有混合比例的非线性行为,这可能是由于混凝土质量的非均质性,并导致结合材料和骨料之间的差动。

弹性模块在研究中被定义为正切模量。据观察,随着w/c比率的增加,混凝土的强度下降,并可能导致由于收缩过大而产生裂缝。混合比例为M1至M6的立方体(w/c比为0.45)显示出比w/c比为0.5的立方体更高的强度。混合比例M1(w/c比0.45)的立方体的应力应变比已被发现,随着混凝土持续时间的增加而增加(即56天的应力应变比>28天的应力应变比>7天的应力应变比),这与w/c比为0.45的控制混合料中发现的梯度模式相似。

在w/c比为0.5的情况下,也观察到类似的模式。据观察,混合料M1和混合料M2在w/c比为0.45和0.50时的抗压强度差距较大,与其他混凝土混合料不同。从正切模量的结果可以看出,尽管M1和M2的FA含量/数量相似(即10%的水泥),但CT的用量不同,M1为5%的水泥,M2为10%的水泥,这是导致不同w/c比率下抗压强度差异的主要原因。六种不同的FA和CT组合的7天、28天和56天的抗压强度已经与各自的对照混合样品的抗压强度进行了比较。抗压强度结果的标准偏差非常小。结果显示,7天抗压强度的标准偏差为0.18 N/mm²至1.4 N/mm²,28天抗压强度的标准偏差为0.19 N/mm²至1.27 N/mm²,56天抗压强度的标准偏差为0.12 N/mm²至2.22 N/mm²。混合物M1的7天抗压强度在0.45 w/c比率下是其他混合样品中最高的。除了对照组(C-Mix)比M1略低外,其他混合设计样本的7天抗压强度逐渐降低。28天的抗压强度结果表明与7天的趋势几乎相似,但M1、M2、M3和M4在0.45 w/c比率下的强度高于目标强度。需要注意的是,除了对照组(C-Mix)接近目标强度外,所有的混合设计样品在0.5 w/c比率下都无法达到28天的目标强度。

另一方面,56天非限制性压缩试验的结果非常令人鼓舞,证明了CT和FA在混凝土中部分替代水泥的综合

利用。在56天的结果中,除了M6以外,水灰比为0.45的所有试样的抗压强度都高于目标强度。对于0.5的水灰比,M1、M2和M3的抗压强度明显高于目标强度,M4和M6只是接近目标强度。在0.45和0.5w/c比率下,M1的抗压强度分别比对照组高8.27%和1.75%。尽管M2和M3的抗压强度相对低于对照组,但在两种w/c比率下都高于目标抗压强度(30MPa)。

经济可行性

本文评估了用FA和铜尾矿部分替代水泥的混凝土的经济可行性。每种材料的费率取自印度中央邦Gwalior地区的费率表,并对每公斤原材料进行计算。所有建议的组合的最终成本与控制组合的成本进行了比较。从成本分析中可以看出,用CT和FA部分替代水泥,可以大大降低混凝土的成本。在重量/体积比为0.45的情况下,M1、M2、M3、M3、M4、M5和M6的一立方米混凝土的生产成本与对照组相比,分别减少了约6.72%、8.81%、11.36%、13.44%、16%和18.08%。同样,在重量/体积比为0.5的情况下,混合成分M1、M2、M3、M4、M5和M6的生产成本分别比对照组减少约6.50%、8.51%、10.97%、12.98%、15.45%和17.46%。

结论

本研究通过评估抗压强度、成本 and 环境影响,研究了联合利用CT和FA作为混凝土中部分替代水泥的可行性。对FA和CT进行了初步表征,并通过XRF和SEM确定了它们在混凝土中部分替代水泥的适用性。合成了各种用于部分替代的混合设计比例,并制备了试样。从强度、经济可行性和环境可持续性方面对改性混凝土比例的性能进行了评估。以下是本研究得出的结论性意见:

1) 在FA和CT中发现的火山灰化合物高于ASTM的要求。因此,两者都可以作为混凝土中水泥的替代品。

2) 在重量/体积比为0.45的情况下,用5%的CT替代20%的FA,56天后的抗压强度高于目标强度。超过这个限度,抗压强度就会下降,这是由于没有胶结材料可以与沸石化合物反应。

3) 这种替代也有助于降低混凝土生产的成本,从6.5%到18.08%。研究发现,为了获得更好的抗压强度和比较经济性,在w/c比为0.45的情况下,10%的FA和5%的CT替代水泥是最有利的。在不影响抗压强度的情况下,20%的FA和5%的CT替代水泥是最经济的混合材料。

4) 通过LCA工具中广泛的固有数据集得到的LCA分析结果表明,温室气体排放明显减少,这对终端环境

影响(生态系统质量、人类健康和资源)产生了积极的影响。

5) 通过降低水泥消耗量来减少二氧化碳的排放,导致全球变暖潜能值(GWP)的逐步下降。如在中间点,环境影响评估气候变化、人类毒性、臭氧层破坏等都会随着FA和CT对水泥的更高替代率而降低。

参考文献:

[1]Bhakar P, Singh AP. Groundwater quality assessment in a Hyper-arid region of Rajasthan. India. Nat. Resour. Res. 2019; 36 (2): 505 - 522.

[2]Borm PJA. Toxicity and occupational health hazards of coal fly ash (CFA). A review of data and comparison to coal mine dust. Ann. Occup. Hyg. 1997; 41: 659 - 676.

[3]Castilla JC. Copper mine tailing disposal in northern Chile rocky shores: *Enteromorpha compressa* (Chlorophyta) as a sentinel species. Environ. Monit. Assess. 1996; 40 (2): 171 - 184.

[4]Onuaguluchi O, Eren Ö. Reusing copper tailings in concrete: corrosion performance and socioeconomic implications for the Lefke-Xeros area of Cyprus. J. Clean. Prod. 2016; 112: 420 - 429.

[5]Papadakis VG. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Lowcalcium Fly Ash. Cement Concrete Res 1999; 29 (11): 1727 - 1736.

[6]Ram LC, Masto RE. Fly ash for soil amelioration: a review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. Earth-Sci. Rev. 2014; 128: 52 - 74.

[7]Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environ Int 2004; 30 (5): 701 - 720.

[8]Vieira PS, Horvath A. Assessing the end-of-life impacts of buildings. Environ. Sci. Technol. 2008; 42 (13): 4663 - 4669.

[9]Walia A, Mehra NK. A seasonal assessment of the impact of coal fly ash disposal on the river Yamuna, Delhi I. chemistry. Water Air Soil Pollut. 1998; 103 (1 - 4): 277 - 314.

[10]Wang J, Qin Q, Hu S, et al. A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas. J. Clean. Prod. 2016; 112: 631 - 638.