

在马来西亚粉煤灰基土工合成物混凝土中添加钩状和直状钢纤维对坍落度、密度、吸水率和机械性能的比较

艾哈迈德·阿卜杜拉, 穆斯塔法·法里斯, 穆罕默德·巴克里

所属单位: 马来西亚机械工程技术学院

摘要: 地质聚合物混凝土有可能取代普通波特兰水泥, 从而减少对环境的二氧化碳排放。添加不同数量的钢纤维以及不同类型的端部形状的纤维, 可以改变土工聚合物混凝土的性能。生产土工聚合物混凝土时使用的硅酸铝(粉煤灰)的来源可能导致不同的结果。本研究主要是比较添加了钩状钢纤维的马来西亚粉煤灰土工合成物混凝土和添加了直端钢纤维的土工合成物混凝土的物理和机械性能。马来西亚粉煤灰首先通过X射线荧光(XRF)进行表征, 以确定其化学成分。通过混合粉煤灰、碱性活化剂、骨料和特定数量的钩状或直状钢纤维, 生产出钢纤维增强的土工聚合物混凝土样品。两种类型纤维的钢纤维添加量按体积百分比分别为0%、0.5%、1.0%、1.5%和2.0%。样品在室温下进行了固化。本文研究了增强型土工聚合物混凝土的物理性能(坍落度、密度和吸水率)。同时, 还研究了机械性能, 即抗压以及抗折强度。结果表明, 两种类型的纤维添加在土工聚合物混凝土中的物理性能模式几乎相似, 其中坍落度随着密度的增加而降低, 吸水率随着纤维添加量的增加而增加。然而, 在土工合成物混凝土中加入钩状钢纤维所产生的坍落度比加入直状钢纤维的低。同时, 与加入直钢纤维的样品相比, 加入钩状钢纤维的土工合成物混凝土显示出更高的密度和吸水率。然而, 这种差异并不显著。此外, 与添加直钢纤维的样品相比, 添加钩状钢纤维的样品具有更好的抗压和抗折强度, 其中纤维添加量为1.0%时, 抗折强度最高。

关键词: 土工聚合物; 碱活性材料; 钢筋混凝土; 钢纤维

Comparison of Hook and Straight Steel Fibers Addition on Malaysian Fly Ash-Based Geopolymer Concrete on the Slump, Density, Water Absorption and Mechanical Properties

Ahmad Abdullah, Mustafa Faris, Muhammad Bakri

Affiliation: Faculty of Mechanical Engineering Technology, Malaysia

Abstract: Geopolymer concrete has the potential to replace ordinary Portland cement which can reduce carbon dioxide emission to the environment. The addition of different amounts of steel fibers, as well as different types of end-shape fibers, could alter the performance of geopolymer concrete. The source of aluminosilicate (fly ash) used in the production of geopolymer concrete may lead to a different result. This study focuses on the comparison between Malaysian fly ash geopolymer concrete with the addition of hooked steel fibers and geopolymer concrete with the addition of straight-end steel fibers to the physical and mechanical properties. Malaysian fly ash was first characterized by X-ray fluorescence (XRF) to identify the chemical composition. The sample of steel fiber reinforced geopolymer concrete was produced by mixing fly ash, alkali activators, aggregates, and specific amounts of hook or straight steel fibers. The steel fibers addition for both types of fibers are 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% by volume percentage. The samples were cured at room temperature. The physical properties (slump, density, and water absorption) of reinforced geopolymer concrete were studied. Meanwhile, a mechanical performance which is compressive, as well as the flexural strength was studied. The results show that the pattern in physical properties of geopolymer concrete for both types of fibers addition is almost similar where the slump is decreased with density and water absorption is increased with the increasing amount of fibers addition. However, the addition of hook steel fiber to

the geopolymer concrete produced a lower slump than the addition of straight steel fibers. Meanwhile, the addition of hook steel fiber to the geopolymer concrete shows a higher density and water absorption compared to the sample with the addition of straight steel fibers. However, the difference is not significant. Besides, samples with the addition of hook steel fibers give better performance for compressive and flexural strength compared to the samples with the addition of straight steel fibers where the highest is at 1.0% of fibers addition.

Keywords: Geopolymer; Alkali activated material; Reinforced concrete; Steel fiber

引言:

波特兰水泥是最常见的混凝土用水泥,在建筑业中被广泛使用。然而,波特兰水泥的生产是一个能源密集的过程,消耗了大量的自然资源,并释放出大量的温室气体。水泥行业的二氧化碳排放量约占全球总排放量的7%(按重量计算)。研究显示,必须使用辅助材料来部分替代波特兰水泥和其他形式的胶结材料,以减少波特兰水泥的消耗。粉煤灰、底灰和生物质灰是一些常用的补充材料,用于替代混凝土中的波特兰水泥。然而,这些材料只能部分替代波特兰水泥。

近年来,与由普通硅酸盐水泥组成的传统混凝土相比,地质聚合物混凝土被报道为更环保的建筑技术。地质聚合物混凝土是一种创新的建筑材料,它利用粉煤灰作为煤炭燃烧工业的废料之一,来替代混凝土中的普通波特兰水泥。与普通的波特兰水泥混凝土相比,粉煤灰的使用可以减少对大气的二氧化碳排放,减少粉煤灰废料和成本。地质聚合物还被开发用于其他用途,包括轻质混凝土、计算机数控(CNC)切割工具的材料、管道材料和水处理。

根据以前的研究,使用拉出试验进行的界面粘合表明,普通硅酸盐水泥(OPC)砂浆一般都很好。最近,研究员研究了普通硅酸盐水泥(OPC)复合材料上的钢纤维,包括粉煤灰、稻草皮和硅灰的相关工作。结果表明,OPC复合材料的粘结强度在第28天的老化中得到了改善。

钩状钢纤维被广泛用于OPC混凝土的加固。与粘结剂相比,纤维的材料特性通常在影响增强型土工合成物的性能方面更占优势。纤维的作用非常重要,因为它主要体现在混凝土开始开裂时,由于有纤维桥接的裂缝部分,它还能改善开裂后的性能。据悉,在混凝土中加入钢纤维可以产生更好的裂缝控制效果,提高裂缝开始前后的抗拉强度。钢纤维的加入可以帮助提高混凝土的疲劳强度和动态阻力。然而,随着钢纤维加入量的增加,混凝土的工作性会下降。

混凝土土工合成物在没有任何纤维加固的情况下具有很好的强度和良好的防火性能。在OPC混凝土中加入

纤维是为了克服这一弱点,产生的材料具有更高的抗拉强度、延展性、韧性,并增加了耐久性能。混凝土混合物中的纤维效率取决于一些因素,如纤维基体的特性、纤维的包含量、纤维的几何形状、纤维的类型以及纤维的方向。为了提高硬化混凝土的耐久性、强度和不同的性能,必须研究各种各样的纤维。大多数的纤维是由钢、碳或聚合物制成的。本研究选择了钢纤维,以收集强度数据,以及地质聚合物混凝土的不同性能。

关于在OPC混凝土中添加钢纤维以提高其性能的研究已被世界各地的许多研究人员广泛研究,但对基于粉煤灰的土工聚合物混凝土的研究相当有限。在土工聚合物混凝土的生产中,原材料(即粉煤灰)的化学成分并不统一,尤其是它来自不同的来源。粉煤灰的不同化学成分可能会影响到土工合成物混凝土的不同特性和性能。此外,对以粉煤灰为基础的土工合成物混凝土的机械和物理性能的研究也很有限。本文旨在研究钢纤维作为添加物对马来西亚粉煤灰基土工聚合物混凝土物理和机械性能的影响。

纤维

不同形式的纤维,如线、丝、晶须和纳米颗粒,已被用作土工聚合物复合材料的增强剂,以提高抗弯强度和能量吸收。原则上,在选择纤维作为水泥基和土工聚合物复合材料的加固物时,需要考虑三个主要要求,包括(1)材料性能与应用的兼容性,(2)足够的纤维-基体相互作用以传递应力,以及(3)最佳长宽比以确保有效的后裂缝行为。

由于钢纤维具有较高的机械强度、灵活性和可获得性,因此常用于水泥基复合材料中。ASTM A820-16规定了五种用于特定用途的不同类型的钢纤维,包括(1)光滑或变形的冷拔丝片,(2)光滑或变形的切割片,(3)熔融提取,(4)轧制切割,以及(5)改性冷拔丝钢纤维,这些纤维足够小,可以随机分散在混凝土中。根据材料类型和制造工艺的不同,钢纤维可能具有广泛的抗拉强度和极限伸长率,分别约为310-2850MPa和0.5-3.5%。在ASTM A820-16中规定,十个试样中任何一个的最小强度不应低于310兆帕,平均拉伸强度不应低于345

兆帕。由于可塑性和制造工艺的原因, 金属纤维具有波纹状的表面, 这导致了强烈的纤维与粘合剂的相互作用。尽管有几个实际的优点, 钢纤维的主要问题是腐蚀。为了限制腐蚀, 钢纤维的使用形式通常包括: (1) 不锈钢合金, 即奥氏体、铁素体、马氏体、双相钢和可沉淀硬化钢, 或 (2) 牺牲涂层复合材料, 如铜/锌涂层钢。

材料和测试方法

SFRGC 的制备

钢纤维加固土工聚合物混凝土 (SFRGC) 是在土工聚合物粘合剂 (即粉煤灰)、碱激活剂、骨料和特定数量的钢纤维之间进行混合。首先, 通过将硅酸钠 (Na_2SiO_3) 和氢氧化钠 (NaOH) 以等于 2.5 的比例混合来生产碱性活化剂。 Na_2SiO_3 来自马来西亚檳城的南太平洋化学工业有限公司 (SPCI), 其 SiO 和 Na_2O 的比例等于 3.2。氢氧化钠是以托盘的形式从台湾高雄的 Farmosa 塑料公司购买的。首先将 NaOH 颗粒在蒸馏水中稀释, 结果产生了 12M 的浓度。

粉煤灰取自马来西亚霹靂州的 Manjung 发电厂。骨料是河沙和花岗岩, 其最大尺寸分别为 4.75 毫米和 20 毫米。粉煤灰和碱性活化剂的比例等于 2。本实验中使用的钢纤维是钩状和直端。钢纤维在土工合成物混凝土混合物中的添加比例是根据样品的体积分数设定的, 即 0%、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%。

SFRGC 的样品被浇铸在 100 毫米 \times 100 毫米 \times 100 毫米的模具中, 进行物理 (工作性、密度和吸水率) 和机械 (抗压和抗折) 测试。24 小时后将样品从模具中取出, 在室温下固化 28 天。

坍落度测试

SFRGC 的可操作性是通过坍落度试验测量的。坍落度试验是根据 ASTM C143 标准进行的。搅拌过程结束后, 将新鲜的土工合成物混凝土分三层倒入坍塌锥中。每层都用振捣棒敲打 25 下来压实, 多余的新鲜 SFRGC 被刮掉, 从锥体的顶部刮掉。然后, 将坍落度锥体从新鲜的 SFRGC 上垂直提起, 立即将其移除。坍落度的测量是通过确定坍落度锥体的顶部和新鲜 SFRGC 顶面的原始中心之间的距离进行的。

密度测试

在样品凝固 28 天后进行密度测试。样品在环境温度下浸泡在水中 24 小时。将 SFRGC 样品分别 (无接触) 放在水箱中。样品表面的顶部不低于水面以下 150 毫米。浸入的样品放在一个铁丝网上, 以确保样品和水箱底部之间有一个大约 3 毫米的距离。

对完全浸泡在水中 24 小时的 SFRGC 样品进行称重, 记录为浸泡重量 (W_i)。然后将样品从水箱中取出, 让其干燥 1 分钟, 用湿布除去样品表面的任何可见的水。然后, 对样品进行称重, 记录为饱和重量 (W_s)。之后, 在温度为 110°C 的烘箱中对样品进行 24 小时的干燥, 然后对干燥的样品进行称重, 并将其标记为干燥重量 (W_d)。

抗压试验

SFRGC 样品的抗压强度是按照 BS 1881-116 标准使用万能试验机 (UTM) Automatic Max 测量的。该测试是针对在环境温度下固化了 28 天的样品进行的。负载速度被调整为 0.1 kN/s。

弯曲测试

弯曲试验是为了测量样品的弯曲强度。样品经受 4 点弯曲, 用 UTM 模型 Automatic Max 进行测试。测试是按照 ASTM C1018 标准进行的。本次测试中应用的恒定挠度率在 0.05-0.10 毫米/分钟之间。下部和上部支撑分别为 300 毫米和 100 毫米。样品在环境温度下固化 28 天后进行了测试。

测试结果和讨论

化学成分

SiO_2 和 Al_2O_3 的总量是总成分的 53.5%。本实验中使用的粉煤灰满足了在土工聚合过程中作为前体材料来源的基本要求, 它富含 Si 和 Al, 将被碱溶液激活。这种粉煤灰被 ASTM C618 验证为 F 级。这种验证是基于 CaO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 和 Fe_2O_3 的化学含量。

坍落度

坍落度是通过使用传统的坍落度锥来测量的。本研究中的坍落度测试是为了找到钩状钢纤维和直状钢纤维加固的土工合成物混凝土的一致性和工作性。

没有添加钢纤维的土工聚合物混凝土的坍落度测试结果是 100.67 毫米。随着钢纤维添加量从 0% 到 2% 的增加, 添加钩状钢纤维的土工聚合物混凝土的坍落度下降, 分别为 61 毫米 (0.5% 钢纤维)、48.33 毫米 (1% 钢纤维)、31.5 毫米 (1.5% 钢纤维) 和 17.67 毫米 (2.0% 钢纤维)。同时, 直条钢纤维的坍落度也随着钢纤维添加量的增加而下降, 分别为 63.55 毫米 (0.5% 钢纤维)、51.3 毫米 (1% 钢纤维)、35.88 毫米 (1.5% 钢纤维) 和 20 毫米 (2.0% 钢纤维)。这已经表明, 钢纤维的存在将降低土工合成物混凝土的工作性。由于钢纤维和土工聚合物基体之间的阻力增加, 称为互锁, 混凝土的工作性将明显下降。

同时, 钩状钢纤维的坍落度比直状钢纤维低, 这是因为与直状钢纤维加固的土工合成物混凝土相比, 钩状钢纤维末端的功能对新的土工合成物混凝土产生了更大的流动阻力。OPC混凝土的坍落度测试的中值在50毫米到100毫米之间。根据这一结果, 可以得出结论, 17.67毫米到100毫米的范围可以被认为是低度和中度的工作性能。这表明这些材料的混合过程适合用振动器或人工来生产。

密度

物质的密度是以每单位体积的质量来衡量的。所有的样品在室温下固化28天后, 测量其质量并除以模具的尺寸, 即100毫米×100毫米×100毫米。钩状和直状钢纤维添加量为2%的密度最高, 分别为0.25 kg/m³和0.249 kg/m³。土工合成物的密度随着两种钢纤维添加量的增加而按比例增加。在所有的纤维添加比例中, 添加了钩状钢纤维的土工合成物混凝土的密度似乎都高于添加了直状钢纤维的土工合成物的密度。钢纤维的添加增加了密度, 因为钢纤维的比重不同, 为7800公斤/立方米, 而普通的土工聚合物的比重为2345公斤/立方米, 这对SFRCG的密度值产生了影响。

吸水率

地质聚合物混凝土的吸水率随着两种纤维添加量的增加而增加。添加了钩状钢纤维和直状钢纤维的土工合成物混凝土的最高吸水率为1.35%和1.85%, 是钢纤维添加量的2%。这是由于在本研究获得的钢纤维的添加量使工作性下降, 这可能导致孔隙形成的增加。添加了钩状钢纤维的土工合成物混凝土的吸水率似乎比直状钢纤维高。这是由于添加了钩状钢纤维的土工聚合物混凝土的可操作性比添加了直状钢纤维的土工聚合物混凝土低。

抗压强度

钩状钢纤维和直状钢纤维的添加似乎提高了土工合成物混凝土的抗压强度, 直到纤维添加量为1%时达到最高值。这是由于钢纤维有助于在压缩载荷期间阻止裂缝的扩展。此外, 添加钩状钢纤维的抗压强度似乎比添加直状钢纤维更好。这是由于末端类型的钢纤维的贡献, 与没有锚定的直状钢纤维相比, 钩状钢纤维的锚定在开裂过程中从土工合成物粘合剂中滑出时将产生更高的阻力。

然而, 当纤维的添加量超过1.5%时, 土工聚合物混凝土的抗压强度会下降。这可能是由于从1.5%开始添加钢纤维时, 土工聚合物混凝土的可操作性较差, 对于包含钩状钢纤维和直状钢纤维来说, 其可操作性分别为31.5mm和35.88mm左右。

挠曲强度

钩状钢纤维和直状钢纤维的加入增加了土工合成物混凝土的抗弯强度, 直到加入1.5%的最大纤维, 分别为11.12MPa和9.42MPa。挠曲强度的提高是由于钢纤维的作用, 它在挠曲试验中通过在裂缝区域建立桥接来阻止裂缝的扩展。钢纤维的数量越多, 样品在完全失效之前所能吸收的抗弯负荷就越高。

然而, 当钢纤维的添加量超过1.5%时, 两种类型的纤维的抗弯性能都下降了。这与钢纤维添加量高时样品的可操作性差有关。这种不良的可操作性可能会影响钢纤维的分散, 导致钢纤维不能均匀地分散。因此, 在加载时, 样品内部的吸收能力是不平衡的。因此, 样品倾向于在含有较少纤维的区域开裂。

此外, 在所有的钢纤维添加比例中, 与直状钢纤维相比, 添加钩状钢纤维显示了更高的抗弯强度。这是由于钩状钢纤维的锚定作用, 与直状钢纤维相比, 它在抗弯试验中提供了额外的负载能力。钩状钢纤维的锚定增加了施加载荷时纤维和土工聚合物基体之间的阻力和摩擦。这表明需要更高的能量来使钩端钢纤维从土工聚合物基体中滑出。

结论

通过添加钩状和直状钢纤维对马来西亚粉煤灰基土工聚合物混凝土进行加固, 显示出对物理和机械性能的一些影响, 包括坍落度、密度、吸水率、抗压和抗折强度。总的来说, 添加了钩状和直状钢纤维的土工聚合物混凝土的坍落度、密度和吸水率的变化并不明显, 在正常应用中仍可作为混凝土使用。然而, 两种类型的样品在机械性能方面都有明显的改善, 特别是抗折强度, 这是由于桥接效应造成的。事实证明, 与添加直状钢纤维相比, 添加钩状钢纤维对力学性能的改善更高。总的来说, 与直状钢纤维相比, 钩状钢纤维的类型更适合用作马来西亚粉煤灰基土工聚合物混凝土的加固, 因为其机械性能更好, 物理性能也可以接受。事实证明, 硅酸铝的来源, 也就是马来西亚的粉煤灰, 可以作为生产钢纤维加固土工聚合物混凝土的前体。

参考文献:

- [1]A Hashim MF, Abdullah MMAB, Sandu AV, et al. Advanced glass reinforced epoxy filled fly ash based geopolymer filler: Preparation and characterization on piping materials. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019; 572: 012037.
- [2]Ariffin N, Abdullah MMAB, Zainol MRRMA, et al. Review on Adsorption of Heavy Metal in Wastewater by Using

Geopolymer. *Matec Web Conf.* 2017; 97: 01023.

[3]Bindiganavile V, Banthia N. Impact response of the fiber-matrix bond in concrete. *Can. J. Civ. Eng.* 2005; 32: 924 - 933.

[4]Kim J-I, Gong M-H, Song J-Y, et al. A Study of Waterproof Reinforcement Layers for the Post-Cracking Behavior of Fiber Reinforced Concrete. *Appl. Sci.* 2020; 10: 5762.

[5]Berkowski P, Kosior-Kazberuk M. Effect of Fiber on the Concrete Resistance to Surface Scaling Due to Cyclic Freezing and Thawing. *Procedia Eng.* 2015; 111: 121 - 127.

[6]Frazão CMV, Barros JAO, Camões A, et al. Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. *Cem. Concr. Res.* 2016; 79: 112 - 122.

[7]Qian C, Stroeven P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cem. Concr. Res.* 2000; 30: 63 - 69.

[8]Ranjbar N, Zhang M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cem. Concr. Compos.* 2020; 107: 103498.

[9]Alrshoudi F, Mohammadhosseini H, Tahir MM, et al. Sustainable Use of Waste Polypropylene Fibers and Palm Oil Fuel Ash in the Production of Novel Prepacked Aggregate Fiber-Reinforced Concrete. *Sustainability* 2020; 12: 4871.

[10]Zheng X, Zhang J, Wang Z. Effect of multiple matrix cracking on crack bridging of fiber reinforced engineered cementitious composite. *J. Compos. Mater.* 2020; 54: 3949 - 3965.