

增强纤维对再生细骨料混凝土力学性能和收缩开裂的影响

英克崔, 金亨吉, 圭勇, 金杰澈, 庆南, 崔洪燮

隶属机构: 韩国建筑工程系

摘要: 本文介绍了一项实验研究, 旨在研究纤维增强材料对含有两种纤维聚乙烯醇 (PVA) 和尼龙的再生细骨料混凝土 (RFAC) 的力学性能和收缩开裂的影响。在具有聚乙烯醇或尼龙纤维的RFAC中, 使用少量的纤维体积分数, 例如0.05%或0.1%, 以在最少量的情况下获得最佳效率。此外, 为了对力学性能和收缩开裂进行比较评估, 我们还检查了天然细骨料混凝土。试验结果表明, 纤维和细骨料的添加对提高所研究混凝土试件的力学性能以及控制其开裂行为具有重要作用。纤维增强RFAC的抗压强度、劈裂抗拉强度和弯曲强度等力学性能略优于非纤维增强RFAC。使用平板环型和板型试验检查收缩开裂行为。与非纤维增强混凝土相比, 纤维增强RFAC的表面裂缝减少幅度更大。在RFAC中添加少量体积分数的纤维对于干燥收缩裂缝比改善机械性能更有效。

关键词: 纤维增强混凝土 (FRC); 机械性能; 再生细骨料; 收缩开裂; 小纤维体积分数

Effectiveness of Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties and Shrinkage Cracking of Recycled Fine Aggregate Concrete

Youngduck Choi, Hyeonggil Kim, Gyuyong Yoo, Jaechul Kim, Gyeong Nam, Hongseop Choi

Affiliation: Department of Architectural Engineering, Korea

Abstract: This paper presents an experimental study conducted to investigate the effect of fiber reinforcement on the mechanical properties and shrinkage cracking of recycled fine aggregate concrete (RFAC) with two types of fiber-polyvinyl alcohol (PVA) and nylon. A small fiber volume fraction, such as 0.05% or 0.1%, in RFAC with polyvinyl alcohol or nylon fibers was used for optimum efficiency in minimum quantity. Additionally, to make a comparative evaluation of the mechanical properties and shrinkage cracking, we examined natural fine aggregate concrete as well. The test results revealed that the addition of fibers and fine aggregates plays an important role in improving the mechanical performance of the investigated concrete specimens as well as controlling their cracking behavior. The mechanical properties such as compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of fiber-reinforced RFAC were slightly better than those of non-fiber-reinforced RFAC. The shrinkage cracking behavior was examined using plat-ring-type and slab-type tests. The fiber-reinforced RFAC showed a greater reduction in the surface cracks than non-fiber-reinforced concrete. The addition of fibers at a small volume fraction in RFAC is more effective for drying shrinkage cracks than for improving mechanical performance.

Keywords: Fiber-reinforced concrete (FRC); mechanical properties; recycled fine aggregate; shrinkage cracking; small fiber volume fractions

引言:

混凝土由于其优越的强度和耐久性, 是建筑材料中使用最广泛的材料。在韩国, 在过去的几十年里, 混凝土为国家发展和经济增长做出了重大贡献, 并在社会基础设施和私人住宅建设中积极使用。但是, 当使用大量混凝土时, 必须考虑建筑垃圾的处理。根据韩国环境部

的报告, 2012年建筑垃圾量为每天186,629吨, 每年都在增加。混凝土废物的贡献是所有其他建筑废物中最大的。因此, 废混凝土的回收利用对于实现可持续建筑业至关重要, 废混凝土回收利用的研究引起了全球的关注。这些研究大多集中在再利用由废弃混凝土制成的骨料。许多研究人员试图确保再生骨料建筑材料具有足够

的性能。Zaharieva 等人研究了再生骨料混凝土在冻融作用下的耐久性和力学性能。100%再生粗骨料替代率试件的耐久性和力学性能均低于使用天然骨料冻融后的试件。Pedro 等人研究了从不同来源获得的再生粗骨料对再生骨料混凝土的力学性能、耐久性和收缩率的影响。在他们的研究中发现,含有再生粗骨料的混凝土经过一次和二次破碎过程的性能优于仅经过一次破碎过程的混凝土;这归因于初级和次级破碎过程有效去除砂浆。然而,再生粗骨料混凝土的耐久性和抗收缩性低于天然粗骨料混凝土。值得注意的是,在过去的几十年里,各种类型的再生骨料被用于建筑材料;再生骨料来自不同的来源。因此,再生骨料混凝土的力学性能和耐久性取决于混凝土中使用的再生骨料的质量。建筑材料中使用的再生骨料受各国质量标准的影响;一般来说,再生骨料的性能不如天然骨料。特别是,在先前的研究中,与天然骨料混凝土相比,再生骨料混凝土被证明具有较低的强度和较大的干燥收缩率。这种行为归因于粗细再生骨料特性的影响,例如较高的吸收率和杂质含量。再生骨料混凝土的大干燥收缩抑制了强度发展并增加了裂缝。

已考虑将化学外加剂或增强纤维与再生骨料混凝土一起使用,以减轻再生骨料混凝土的缺点。尽管已有关于再生骨料混凝土的研究,但针对纤维增强再生骨料混凝土性能改进的研究非常有限。Carneiro 等人用钩端钢纤维对建筑和拆除废混凝土的力学性能进行了实验研究。具有钩端钢纤维的再生骨料混凝土表现出比天然骨料混凝土更好的力学性能,体积分数为 0.75%。Akça 等人研究了聚丙烯纤维再生骨料混凝土的弯曲和劈裂抗拉强度。从实验来看,弯曲拉伸强度和劈裂抗拉强度分别增加了 1.0% 和 1.5% 的纤维体积分数。Mesbah 和 Buyle-Bodin 研究了聚丙烯和金属纤维在控制再生骨料砂浆收缩开裂方面的效率。分别添加最大体积分数为 0.5% 和 1.0% 的聚丙烯和金属纤维时,再生骨料砂浆的裂缝宽度小于天然骨料砂浆。Richardson 等人研究了聚丙烯纤维增强混凝土与可回收拆除骨料的冻融耐久性。根据研究结果,在 56 次冻融循环前后,使用 1.0% 体积分数的聚丙烯纤维可以抑制再生骨料混凝土的抗压强度和质量损失的降低。综上所述,再生骨料混凝土中的纤维增强材料对提高混凝土的力学性能和耐久性以及控制收缩开裂行为具有重要作用。尽管如此,关于纤维增强再生骨料混凝土的力学性能、耐久性和收缩裂缝的研究仍然很少。此外,大多数研究调查了纤维含量相对较高的纤维增强再生骨料混凝土。但是,考虑到再生骨料混凝土的经济效益,需要通过使用少量纤维进行纤维增强,以尽量减少成本的增加。因此,本研究的目的是通过实验研究以小体积分数添加纤维对再生细骨料混凝土(RFAC)的力学性能和

收缩开裂的有效性。研究了纤维增强 RFAC 与机械性能和收缩开裂有关的各种特性,包括抗压强度、弹性模量、劈裂拉伸强度、弯曲强度、干燥收缩和表面开裂。获得的结果为提高纤维增强 RFAC 承受机械降解和减少收缩开裂的能力提供了有价值的信息,特别是从在建筑行业领域使用再生骨料材料的角度来看。

一、测试方法

根据 ASTM C143 标准测试测量新拌混凝土的流动性。新鲜混凝土的空气含量按照 ASTM C231 标准测试的定义进行测量。抗压强度是根据 ASTM C39 标准测试,使用直径为 100 毫米、高度为 200 毫米的圆柱形混凝土试件测量的。分别按照 ASTM C496 和 ASTM C78 标准测试的定义对混凝土试样的劈裂抗拉强度和抗弯强度进行了实验研究。脱模后立即使用嵌入式应变计进行干燥收缩试验。为了研究混凝土试件的收缩开裂行为,采用板环型和板型试验。如果试样的厚度和宽度比环式和板式试验方法中的标准试样更薄和更宽,则无法确定开裂的时间;但是,可以获得混凝土试件的表面裂缝面积。因此,在本研究中,基于几个初步的收缩开裂试验,我们采用板环式和板式试验方法定量评估混凝土试件表面产生的减裂效果。板环型试验是根据 ASTM C1581 标准试验设计的,作为参考。为观察受约束的干燥收缩引起的混凝土表面裂缝的数量,板环型试样比参考试样薄约三倍,宽约两倍。参考样品的厚度为 150 ± 6 mm,宽度为 38 ± 3 mm。以往对混凝土板环式试验的研究中,内钢环的约束应力大于外钢环的约束应力,影响了混凝土的约束收缩。因此,混凝土试样中的表面裂缝数量取决于混凝土的收缩能力。为了加速干燥收缩,在浇筑混凝土试样后,在干燥室中,在温度为 36 ± 3 °C 和相对湿度为 $30\% \pm 10\%$ 的条件下进行了板环式试验。此外,我们对无图案的表面裂纹进行了线性化,以测量裂纹的长度和宽度。混凝土试件表面裂缝的长度和宽度通过每个线性化截面的裂缝尺度来测量。此外,板式试验是根据 ASTM C1579 标准试验设计的,作为参考。板型试样比参考试样薄大约三倍,宽大约两倍。参考试样的厚度为 100 ± 5 mm,长度为 560 ± 10 mm,宽度为 355 ± 10 mm。由于约束应力集中在立管中,三个高度为 15 mm 的应力立管引起混凝土表面开裂。此外,为了确认长期收缩开裂的行为,在室外环境中进行了 16 周以上的板式试验。

二、新拌混凝土的特性

添加高效减水剂后,所有混凝土混合物的流动性都达到了 180 ± 20 mm 的目标坍落度。混凝土拌合物坍落度的目标值范围是根据从 N-0 和 R-0 得到的值来设定的。还调整了纤维增强 RFAC 混合物,以使坍落度在基于非纤维增强混凝土混合物的坍落度设定的目标值范围

内。当比较 N-0 和 R-0 混合物的坍落度值时, 观察到在添加相同数量的 SP 时, R-0 的流动性低于 N-0 的流动性。这可以解释为再生细骨料的吸收率较高, 与天然细骨料相比具有相当大的吸收率。与 R-0 相比, 在 RFAC 混合物中添加 PVA 和尼龙纤维会降低它们的可加工性, 根据添加的纤维类型和添加的 SP 会产生一些差异。在纤维增强 RFAC 混合物的坍落度测试结果中, 在 0.05% 的纤维体积分数下, R-PVA005 的坍落度值高于 R-Ny005; 此外, 在纤维体积分数为 0.1% 的范围内, R-Ny01 的坍落度值高于 R-PVA01。这些结果旨在表明混凝土混合物的坍落度值取决于 SP 的添加量。在相同 SP 添加量下比较 R-PVA01 和 R-Ny005, 虽然 R-PVA01 的体积分数比 R-Ny005 大, 但坍落度值比 R-Ny005 高。这种结果的原因可以通过纤维的特性来解释, 例如直径和密度。由于 PVA 纤维的直径和密度比尼龙纤维大, 因此添加的 PVA 纤维的数量比尼龙纤维的少。可以推断, PVA 纤维对加工性影响不大。R-0 的空气含量比 N-0 略有增加; 然而, 这并不是一个显著的结果。此外, 空气含量随着纤维的添加而增加, 因为纤维增强会导致新拌混凝土中的混合错误。将大量 SP 添加到纤维增强 RFAC 混合物中以达到目标坍落度; 与添加到纤维增强 RFAC 混合物中的量相比, 添加到非纤维增强混凝土混合物中的 SP 量较少。

三、抗压强度

为了研究混凝土的抗压强度, 测试了三个重复样品。对于非纤维混凝土试件, R-0 的抗压强度低于 N-0。在以前的研究中, 这种行为的原因是由于再生骨料和水泥浆之间的弱机械结合的影响。认为再生细骨料与天然细骨料相比, 杂质含量为 0.07%; 这会抑制 R-0 试样的强度发展和有效的机械粘合。未发现纤维增强混凝土的抗压强度值与非增强 RFAC 的抗压强度值有显著差异。江等人 and 博格等人先前报道了类似的观察结果。纤维的添加对混凝土试件的抗压强度没有影响。关于纤维增强 RFAC 的抗压强度, R-Ny01 的抗压强度略低于其他试件。可以推断, 新鲜混合物中较高的 R-Ny01 空气含量对抗压强度的降低有影响。

四、弹性模量

对于每种混凝土混合物, 在浇注后 28 天测试三个重复样品。所有 RFAC 试样的弹性模量均小于 N-0。Evangelista 和 de Brito 报告说, RFAC 弹性模量的降低高度依赖于再生细骨料的置换率; 在比较参考混凝土的弹性模量时, 更换率为 30% 的试件与参考混凝土相比减少了 3.7%, 而更换率为 100% 的试件与参考混凝土相比减少了 18.5%。对于 RFAC 试件, 除 R-Ny01 外, 纤维增强 RFAC 试件的弹性模量均高于 R-0。与 R-0 相比, R-Ny01 的弹性模量略低。这可以通过 R-Ny01 较高的空

气含量来解释, 这会对混凝土的抗压强度和弹性模量产生影响。此外, 弹性模量取决于混凝土的密度, 这也被 R-Ny01 的密度降低所证明。

五、劈裂抗拉强度和抗弯强度

R-0 试样的劈裂抗拉强度和抗弯强度分别比 N-0 试样低 26.1% 和 18%。再生细骨料较高的吸水率会降低再生骨料与水泥浆体之间的界面结合能力。此外, 虽然细骨料在饱和和表面干燥 (SSD) 条件下使用, 但 RFAC 样品可能比 NFAC 样品含有更多的水, 因为与天然细骨料相比, 再生细骨料的吸水率高约 3.5%。由此可以推断, 再生细骨料的特性对混凝土中孔隙的产生有影响, 导致其力学性能降低。一般来说, RFAC 的抗拉强度随着 RFA 置换率的增加而降低。当使用少量合成纤维时, RFAC 试样的劈裂拉伸强度和弯曲强度略有提高。在纤维体积分数为 0.1% 的纤维增强 RFAC 的情况下, 劈裂拉伸强度和弯曲强度与 N-0 相似。可以推断, 与 R-0 相比, RFAC 中添加少量纤维的混凝土有助于提高界面结合能力。在所有研究的混凝土试件中, 劈裂抗拉强度和抗弯强度之间的关系表现出较高的相关性。从图中可以明显看出, 回归公式得出的 R² 值为 0.8978, 表明所研究的混凝土试件的劈裂抗拉强度和抗弯强度呈比例关系。回归分析结果表明, 抗弯强度随着劈裂抗拉强度的增加而增加。

六、收缩开裂行为

为了进行干燥收缩测试, 制备了三个重复样品并在 20℃ 和 60% 相对湿度下进行测试。据观察, 无论纤维增强如何, 所有含有 RFA 的试样的干燥收缩率都高于 N-0。这可归因于再生细骨料的较高孔隙率, 这可能会对混凝土中水分的快速蒸发产生影响。对于 RFAC 试件, 纤维增强 RFAC 试件的干燥收缩率略小于 R-0。此外, 通过增加纤维体积分数, 干燥收缩率降低。对于纤维增强 RFAC, 0.1% 纤维体积分数的试样的干燥收缩率略小于 0.05% 纤维体积分数的试样。此外, 在相同的纤维体积分数下, 尼龙纤维增强 RFAC 的干燥收缩率略小于 PVA 纤维增强 RFAC。认为在混凝土体积比较小的情况下, 分布纤维与混凝土基体之间的比表面积可能会影响混凝土的干缩性能。众所周知, 尼龙纤维的直径比 PVA 纤维的直径小 10 倍左右。因此可以推断, 尼龙纤维比表面对混凝土基体干燥收缩的影响大于 PVA 纤维。

基于上述讨论, 我们发现 100% 替代的再生细骨料影响混凝土较低的力学性能和较高的收缩开裂。此外, 可以得出结论, 在 RFAC 中添加少量体积分数的纤维对于减少表面裂纹比提高机械性能更有效。在目前的研究中, RFAC 的表面裂纹可以通过小于 0.1% 的小体积分数的合成纤维增强来控制。在以往的研究中, 体积分数为 0.1%、0.2% 和 0.3% 的聚丙烯纤维增强材料有助于在干

缩环境下减小混凝土的表面裂缝面积或表面裂缝宽度。这归因于由于添加纤维而改善了水泥基体和粗骨料之间的结合。添加的纤维会影响纤维增强 RFAC 中由表面裂纹产生的拉伸应力的抵抗力。因此,与 N-0 相比,具有小体积分数的纤维增强 RFAC 不具有更好的机械性能和更低的干燥收缩率,这是通过有效减少表面收缩裂缝提供的。

结论

本研究的目的是通过与 NFAC 和非纤维增强 RFAC 的比较,通过实验研究以小体积分数添加纤维对纤维增强 RFAC 的机械性能和收缩开裂的有效性。根据实验结果,本研究的主要发现有助于描述机械性能和收缩开裂能力控制,如下所示:

1. 所有 RFAC 试件的抗压强度均低于 N-0,与纤维增强无关。这种行为可以归因于再生骨料和水泥浆之间的弱机械结合的影响。未发现纤维增强混凝土的抗压强度值与非增强 RFAC 的抗压强度值有显著差异。

2. R-0 试样的劈裂抗拉强度和抗弯强度分别低于 N-0 试样——26.1% 和 18%。然而,在纤维体积分数为 0.1% 的纤维增强 RFAC 的情况下,劈裂拉伸强度和弯曲强度与 N-0 相似。可以推断,RFAC 中少量的纤维增强有助于提高水泥基体和骨料之间的界面结合能力。

3. 无论添加纤维,RFAC 的干燥收缩率均高于 N-0。这一结果可归因于再生细骨料较高孔隙率的影响。RFAC 在干燥收缩方面的这一缺点通过添加 0.1% PVA 和尼龙纤维得到改善,其值分别低于 R-0 的干燥收缩率,在测试的最终年龄分别为 8.7% 和 11.6%。这种行为的原因可以通过添加纤维改善水泥基体和粗骨料之间的结合来解释。

4. 与 N-0 相比,随着纤维体积分数的增加,纤维增强 RFAC 的表面裂纹面积显著减小。在室内加速板环型试验和长期户外暴露板型试验中都观察到了这些结果。R-0 在开裂行为方面的结果通过 PVA 和尼龙纤维的有效增强而得到改善。RFAC 中体积分数较小的纤维增强材料有助于混凝土试件的表面抗裂性。

5. 已确定,在具有 100% 细骨料替代物的 RFAC 中添加少量纤维的效果对于减少表面裂纹而不是改善机械性能具有显著意义。然而,为了阐明具有小体积分数的纤维增强材料对收缩开裂性的影响,需要在未来的工作中进一步研究各种添加的纤维性能(如纵横比、有机或无机)的影响。

参考文献:

[1]Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: Influence of the crushing process. *Mater. Struct.* 2015, 48, 3965 – 3978.

[2]Manzi, S.; Mazzotti, C.; Bignozzi, M.C. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Compos.* 2013, 37, 312 – 318.

[3]Duan, Z.H.; Poon, C.S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Mater. Des.* 2014, 58, 19 – 29.

[4]Evangelista, L.; de Brito, J. Criteria for the use of fine recycled concrete aggregate in concrete production. In *Proceedings of the International RILEM Conference: The Use of Recycled Materials in Building and Structures*, RILEM, Barcelona, Spain, 8 – 11 November 2004; pp. 503 – 510.

[5]Zega, C.J.; Di Maio, Á.A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Manag.* 2011, 31, 2336 – 2340.

[6]Yildirim, S.T.; Meyer, C.; Herfellner, S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2015, 91, 288 – 296.

[7]Khatib, J.M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 763 – 769.

[8]Behnood, A.; Olek, J.; Glinicki, M.A. Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M51 model tree algorithm. *Constr. Build. Mater.* 2015, 94, 137 – 147.

[9]Ho, N.Y.; Lee, Y.P.K.; Lim, W.F.; Zayed, T.; Chew, K.C.; Low, G.L.; Ting, S.K. Efficient utilization of recycled concrete aggregate in structural concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013, 25, 318 – 327.

[10]Carneiro, J.A.; Lima, P.R.L.; Leite, M.B.; Filho, R.D.T. Compressive stress – strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2014, 46, 65 – 72.

[11]Akça, K.R.; Çakır, Ö.; Ipek, M. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2015, 98, 620 – 630.

[12]American Society for Testing Materials. *Standard Specification for Concrete Aggregates*; ASTM C33; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.

[13]Korean Standards Association. *Recycled Aggregate for Concrete*; KS F 2573; Korean Industrial Standards: Seoul, Korea, 2011. 23.

[14]American Society for Testing Materials. *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*; ASTM C143; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.