

# 回收编织塑料袋废料和PET瓶废料作为再生骨料 混凝土中的纤维：一项实验研究

高桥智明，里美博

隶属机构：日本大学院环境研究科

**摘要：**本研究的目的是研究再生PET瓶废料（RPET）和再生编织塑料袋废料（RWS）纤维增强再生骨料混凝土（RAC）的潜在工程。目前，建筑和拆除垃圾（CDW）和塑料垃圾的数量正在迅速增加，并成为许多国家的负担。目前的研究是努力减少固体废物的数量，作为废物管理和保护环境的良好解决方案。基于混凝土的力学性能和耐久性评估RWS和RPET纤维对RAC的影响，实验结果表明，RPET和RWS纤维在碱性环境中具有很高的耐碱性，并且在90天后在RAC中没有表现出可检测到的降解。与不含纤维的RAC样品相比，硅灰（SF）和RPET纤维的组合使RAC的抗压强度提高了3.6–9%，弹性模量提高了16.9–21.5%，劈裂拉伸强度提高了11.8–20.3%，剪切强度提高了7–15%，而RWS纤维增强型RAC中的这些值较低。RWS和RPET纤维增强了RAC的后开裂行为。RPET对改善RAC性能的贡献优于RWS纤维，尽管RWS纤维比RPET纤维具有更高的拉伸强度。此外，SF和所提出的混合技术提高了100%粗RCA的RAC的性能，并补偿了RPET和RWS纤维造成的抗压强度损失。

**关键词：**机械性能；再生PET瓶纤维；再生骨料混凝土；再生编织塑料袋纤维

## Recycling Woven Plastic Sack Waste and PET Bottle Waste as Fiber in Recycled Aggregate Concrete: An Experimental Study

Tomoaki Takahashi, Hiroshi Satomi

Affiliation: Graduate School of Environmental Studies, Japan

**Abstract:** The objective of this study was to investigate the potential engineering of Recycled PET Bottles Waste (RPET) and Recycled Woven Plastic Sack Waste (RWS) fiber reinforced Recycled Aggregate Concrete (RAC). Currently, the amount of Construction and Demolition Waste (CDW) and plastic waste are rapidly increasing and becoming a burden for many nations. The present research is an effort to reduce the amount of solid waste as a good solution for waste management and preserve the environment. The effects of RWS and RPET fibers on RAC were evaluated based on mechanical properties and durability of concrete. The experimental results indicated that RPET and RWS fibers have high alkali resistance in alkaline environments and showed no detectable degradation in RAC at 90 days. The combination of Silica Fume (SF) and RPET fiber increased 3.6-9% compressive strength, 16.9-21.5% elastic modulus, 11.8-20.3% splitting tensile strength, 7-15% shear strength of RAC in comparison with RAC samples without fiber, while these values in RWS fiber reinforced RAC were lower. RWS and RPET fiber enhanced the post-cracking behavior of RAC. The contribution of RPET in the improvement of the RAC properties was better than that of RWS fiber although the RWS fiber has higher tensile strength than that of RPET fiber. Furthermore, SF and the proposed mixing technique increased the performance of RAC with 100% coarse RCA and compensated the loss of the compressive strength due to RPET and RWS fiber.

**Keywords:** Mechanical properties; recycled PET bottle fiber; recycled aggregate concrete; recycled woven plastic sack fiber



## 引言:

建筑业的显著增长,近几十年来,对混凝土的需求已上升到每年约150亿吨,每年需要消耗约200亿吨骨料。快速的城市化、基础设施服务的终止、战争、自然灾害和人类活动产生了大量的建筑和拆除废物(CDW)。大量CDW的增加会导致环境问题。据估计,CDW的数量约占世界垃圾总量的40%,这正在成为许多国家的负担和废物管理的挑战。因此,回收CDW作为一种新的混凝土骨料来源(即再生混凝土骨料(RCA))因其可行性以及环境和经济效益而受到越来越多的关注。

成千上万的研究人员提供了将CDW回收到混凝土产品中的潜力的证据。一般来说,再生骨料混凝土(RAC)的缺点是与天然骨料混凝土(NAC)相比,其力学和耐久性能较弱。为提高RAC的质量,已经开发了許多提高RAC质量的解决方案,例如添加外加剂、增加水泥用量、使用纤维、去除粘附砂浆、加固粘附砂浆等。许多方法确实提高了RAC的抗压强度,可与NAC相媲美。尽管抗压强度有所提高,但与抗压强度相比,RAC的抗拉强度的提高仍然较低。这是将RAC应用于建筑结构的障碍之一。此外,混凝土是一种脆性材料,抗拉强度低,RAC往往比NAC更脆。

为了提高混凝土的抗拉强度,可以使用钢纤维作为遍布水泥基体的增强材料。纤维可以有效地控制裂缝的扩展,增强混凝土的脆性。在某些情况下,在RAC中使用纤维不仅可以增强混凝土,还可以提高其延展性,并提高混凝土的抗拉强度、弹性模量和韧性。有四种主要类型的纤维可用于增强混凝土:钢纤维、玻璃纤维、天然纤维和合成纤维。塑料纤维是合成纤维,如PP、HDPE、PET、尼龙、PE、PVC、PVA或混合纤维(塑料纤维和钢纤维的组合),可替代钢纤维。塑料纤维可以是新鲜生产的或回收的纤维。

PET是最受欢迎的塑料,广泛用于瓶子、容器和食品包装。每年的瓶子处理量约为五万亿;全世界每分钟丢弃一百万瓶,到2021年将增加20%。不幸的是,PET瓶的丢弃率大于其回收率。此外,编织塑料袋在工业产品包装、食品、住房和其他物品(如大米、小麦、豆类、茶、咖啡、豆类、花生、糖、水泥、肥料、尿素)的保存和分配中的使用稳步增加、塑料、聚合物、塑料颗粒等。编织塑料袋的生产远远超过回收利用的努力。PET瓶和编织塑料袋等塑料垃圾由于乱扔垃圾、非法填埋和焚烧,逐渐导致严重的环境问题。减少塑料废物量的一种解决方案是将PET瓶废物和编织塑料袋废物作为混

土中的纤维进行回收。

由于其环境效益,NAC中回收PET瓶纤维(RPET纤维)的可能性一直很有趣。PET瓶需要100多年才能完全降解,因此,使用PET纤维增强混凝土是对环境保护的宝贵贡献。Ochi等人发现PET纤维在水泥砂浆中具有良好的耐碱性。然而,Won等人揭示了再生PET纤维增强的混凝土的抗压强度在碱性或硫酸环境中降低。含有再生PET纤维的混凝土的抗压强度和弹性模量随着纤维含量的增加而降低,但含有再生PET纤维的混凝土梁的极限强度和相对延性明显高于不含纤维的梁。增强NAC的PET瓶纤维可以提高混凝土的延展性。RPET纤维增强NAC的基本特性已得到充分检验,但考虑到100%粗RCA的使用,很少有研究人员关注含RPET纤维的RAC的性能。尽管如此,这些研究人员还没有考虑通过矿物掺合和混合技术来改善RAC性能的方法,这极大地影响了含RPET纤维的RAC的性能。同时,含有100%天然骨料和100%RCA的RPET增强聚合物混凝土在压缩行为上表现出不同的破坏机制。随着RAC在建筑工地应用的发展趋势,有必要研究含RPET纤维的RAC和矿物外加剂的性能。纤维增强混凝土的贡献之一是纤维在破裂的表面上形成了一座桥梁。因此,本研究考虑了RPET纤维增强的RAC的开裂后性能。

编织塑料袋可以由耐碱、酸和脱脂剂的聚乙烯(PE)或聚丙烯(PP)制成。编织塑料袋的强度和耐用性为容纳和携带各种材料创造了可靠性。通常,编织塑料袋废料像其他种类的塑料废料一样通过复杂的过程进行收集、清洁和回收。然而,这项工作可能会被更简单的回收过程所取代,将其作为混凝土材料中的纤维进行回收。研究了用钢纤维、用回收钢纤维、用PP纤维或用玻璃纤维增强的RAC。对再生编织塑料袋纤维(RWS纤维)、增强型RAC性能能力的正面评价仍然很少受到关注。因此,目前的工作建议将回收的编织塑料袋废料作为用于建筑材料(如RAC)的新型纤维。

研究发现,硅灰(SF)可以填充RCA的裂缝,将RAC中的氢氧化钙(CH)转化为C-S-H凝胶,从而改善RAC的性能。此外,SF可以控制和抵消碱-二氧化硅反应,抑制混凝土的膨胀,这已在长期的现场观察中得到证明。因此,尽管SF的成本超过了波特兰水泥,但使用SF来提高RAC的性能正在被认真考虑。Corinaldesi和Moriconi指出,SF提高了RAC的抗压强度约30.95%,其中15%的SF水泥替代了RAC中的细骨料。Katz用SF处理RCA,在RCA表面形成一层,这导致28天的抗压

强度增加了 15%。Bui 等人研究了 RAC 中 SF 的各种百分比 (3、5、7%)。在处理方法中, SF 与硅酸钠相结合, 显著提高了 RAC 的机械性能和耐久性能。迪尔巴斯等人。已发现 RAC 混合物中 5% SF 更有利于增强 RAC 的这些性能。此外, 为了提高 RAC 的性能, 还开发了改进的混凝土混合物与 SF 混合技术, 在 RCA 表面涂上一层薄薄的 SF 作为处理 RCA 的方法, 以获得更好的 RAC 强度和耐久性。因此, 这项工作试图确定添加 5% SF 和新的混合技术对含有 RPET 和 RWS 纤维的 RAC 的影响。

本研究的目的是通过回收 CDW 作为骨料、回收塑料废物作为纤维以及在 RAC 中使用硅灰以作为矿物混合物来减少固体废物的数量。本研究评估了 RPET 或 RWS 纤维与 100% 粗 RCA 增强的 RAC 的机械和耐久性能, 以有助于了解 RPET 和 RWS 纤维在不同纤维含量下的 RAC 性能。考虑到改进的混合程序, 使用硅灰于 RAC 混合物中, 具有增强 RAC 性能的作用。基于韧性特性评估含有再生纤维的 RAC 的后开裂行为。此外, 该研究还检验了 RPET 和 RWS 纤维在不同碱性溶液和 RAC 中的耐碱性。

### 一、再生塑料纤维的特性

RPET 纤维是由不同的瓶子通过手工方法直接制备的, 因此它们呈现出可变的纤维厚度、宽度和长度。对超过 1000 根 RPET 纤维的样品进行了详细的几何表征, 以评估 RPET 纤维的厚度、长度和宽度。纤维的几何特性以毫米为单位, 以微米为单位进行测量。纤维厚度在 0.1 和 0.52 毫米之间。尽管如此, 纤维长度和纤维宽度表现出均匀分布。结果的均匀分布可能是由于切割过程。RPET 纤维的宽度为 1.9–3.0 毫米, 长度为 55 至 63 毫米。与 RPET 纤维不同, RWS 纤维的几何形状和尺寸显示出均匀的宽度、长度和厚度。RWS 纤维的厚度为 0.02–0.035 mm, RWS 纤维的宽度为 2.6–2.8 mm, 长度为 55–60 mm。RPET 纤维的比重为 1.30, RWS 纤维的比重为 0.82。

对再生塑料纤维的耐碱性进行了评估, 以评估 RPET 和 RWS 纤维在 RAC 中可能发生的降解。将 RPET 和 RWS 纤维浸入三种不同的水合混凝土溶液中, 这些溶液的 pH 值分别为 12.43、12.61 和 12.79。此外, RPET 和 RWS 纤维还浸泡在其他碱性溶液中, 例如 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液 (pH = 12.30) 和 NaOH 溶液 (pH = 13)。RPET 和 RWS 纤维在浸入碱性环境之前的拉伸试验中, RPET 纤维的拉伸试验为 121.96 MPa, 低于 RWS 纤维的 256.44 MPa。从图 5d 可以看出, 在碱性溶液中浸泡 28 天后,

与浸泡前相比, RPET 和 RWS 纤维的拉伸强度均略有下降约 3–4%。浸泡 180 天后, 与 28 天相比, 纤维的拉伸强度下降了约 0.07–0.6%, 可以忽略不计。这表明 RPET 和 RWS 纤维具有较高的耐碱性。然而, 由于不同的碱性溶液具有不同的 pH 值, 因此纤维的拉伸强度在碱性溶液中的变化是不同的。NaOH 溶液和水合混凝土溶液 (pH = 12.79) 比其他溶液更能降低纤维的拉伸强度, 因此可以合理地认为它们比其他溶液具有更高的 pH 值。

### 二、抗压强度

含有 100% 粗 RCA 的 RAC 的抗压强度为 NAC 的 72.26%。RAC-5SF 混合物的抗压强度与 RAC 相比显著提高了约 16.5%, 仅比 NAC 低 18.7%。这可以通过添加 SF 来增加 RAC 的抗压强度来解释, 因为这与 Corinaldesi 和 Moriconi 的研究结果一致。SF 可以填充被粘砂浆的裂缝和孔隙, 以及与新旧砂浆中的氢氧化钙 (CH) 反应, 在 RAC 中形成 C-S-H。另一个原因可以看出, 与传统混合程序相比, 在 RCA 颗粒上涂有一层薄薄的 SF 的混合技术有助于提高强度。此外, 随着 RPET 和 RWS 纤维在 RAC 中的加入, RAC 的抗压强度显著降低。RAC 含 RWS 纤维的抗压强度降低幅度大于 RPET 纤维。0.5% 和 0.75% 的 RWS 纤维分别使 RAC 的抗压强度降低了 5% 和 16%。RPET 纤维增强的 RAC 的抗压强度随着纤维用量的增加而降低, 这与 NAC 的结论吻合较好。这之前关于 RPET 纤维在 NAC 上提高抗压强度的结论不同。以往的研究认为混凝土抗压强度的提高是基于骨料强度、水泥浆强度和界面过渡区, 而纤维对抗压强度的影响很小。然而, 与没有纤维和 SF 的 RAC 试样相比, 具有 SF 的 RPET 纤维增强 RAC 的抗压强度略有增加约 3.6–9%, 这表明 SF 补偿了 RPET 纤维在 RAC 中引起的强度降低。

### 三、应力-应变关系

关于应力-轴向应变曲线上分支的形状, 可以得出结论, 所有试样都呈现出非常相似的曲线。RAC 的应力-轴向应变曲线的斜率远低于 NAC。RCA 中粘附砂浆的存在很可能增加了上行分支中的应变。RAC 中添加 5%SF 显著增加了应力-轴应变曲线上分支的斜率, 与 NAC 接近, 这与 SF 对 RAC 刚度增加的作用有关。再生塑料纤维含量对 RAC 应力-轴向应变曲线上分支的影响没有明显差异, 但在峰值应力后变得明显。RPET 纤维增强 RAC 的应力-应变曲线下分支斜率低于 RWS 纤维增强 RAC。对于应力-应变曲线的下降分支, RPET 纤维增强 RAC 比 RWS 纤维增强 RAC 产生更大的应变。对于 NAC、RAC 和 RAC-5SF 等不含纤维的样品, 在达到峰值应力

后, 应力轴向应变曲线随之下降至零。因此, 可以清楚地看到 RPET 纤维和 RWS 纤维增强的 RAC 的峰后行为和延展性的增强。从应力-侧应变曲线的形状看, NAC 的应力-侧应变曲线上分支的斜率大于 RAC, 这与粘结砂浆增加了 RAC 的侧应变有关。另一方面, 该曲线的斜率值随着 RAC 中 5% SF 的存在而增加。在纤维对应力-横向应变曲线的影响方面, RWS 纤维增强的 RAC 在相同应力下表现出比 RPET 纤维增强的 RAC 更高的横向应变。应力-横向应变曲线的斜率随着纤维含量的增加而增加, 这是由于纤维在 RAC 中的架桥作用。体积应变 ( $e_v$ ) 根据轴向应变 ( $e_1$ ) 和横向应变 ( $e_2$ ) 确定, 公式如下:  $e_v = e_1 + 2e_2$ 。与来自 RCA 中粘附砂浆的 NAC 相比, 混凝土中 100% 粗 RCA 增加了体积应变并降低了斜率值, 但在 RAC-5SF 中添加 5% SF 会降低该值。RWS 纤维增强的 RAC 比 RPET 纤维增强的 RAC 产生更大的体积应变。

#### 四、韧性 (能量吸收能力)

混凝土的韧性定义为混凝土的能量吸收能力, 用应力-应变曲线下面积表示, 反映了纤维耗能的性能。应力-应变曲线下面积被确定为之前研究中使用的规定应变值的 1.5%。但是对于没有纤维的样品, 由于在达到峰值应力后, 应力-应变曲线下降到零, 因此计算韧性值直到峰值应力对应的应变值。添加再生塑料纤维, 包括 RPET 和 RWS 纤维, 增强了 RAC 的韧性。RPET 纤维比 RWS 纤维更好地提高了 RAC 的韧性。因此, RWS 纤维在 RAC 中的开裂后性能低于 RPET 纤维。NAC 的韧性在应力峰值前超过 RAC, 但由于无纤维混凝土的脆性特性, 达到峰值后荷载降至零。因此, 再生塑料纤维改善了 RAC 的延展性和后开裂行为。不含纤维和 SF 的 RAC 峰值应力韧性为 NAC 的 79.4%。SF 显著提高了 RAC 的韧性值, 接近 NAC 的值 (RAC-5SF 的韧性值为 NAC 的 95.7% 韧性)。这一结果与先前研究中关于 SF 对提高混凝土韧性的影响的结果一致。RAC 中添加 RWS 纤维降低了 RAC 峰值应力处的韧性值; 该值随着纤维含量的增加而降低。RPET 纤维增强 RAC 的韧性大于 RWS 纤维增强的 RAC。这表示为前 RAC 发生故障所需的能量高于后者。

#### 五、最大应力应变

应力应变关系上的最大应力对应的应变, 可以用来评价混凝土的变形能力。RAC 的临界应变比 NAC 高 18.62%, 略低于前次结果。RAC 临界应变较高的主要原因是孔隙率较大和 RCA 密度较低。由于 RAC-5SF 的抗压强度大于 RAC, 因此 RAC-5SF 的临界应变略高于

RAC, 这与之前的报道一致。与不含纤维的 RAC 相比, RPET 和 RWS 纤维降低了 RAC 的临界应变。这意味着含有再生塑料纤维的 RAC 比不含纤维的 RAC 表现出更好的延展性, 尽管它降低了强度和刚度。

#### 六、最大体积应变

RAC 的最大体积应变由应力-体积应变曲线确定。RAC 的最大体积应变比 NAC 大 31.38%。当在 RAC 中添加 SF、RWS 和 RPET 纤维时, RAC 的最大体积应变略微减小, 接近 NAC。可以推断, SF 和再生塑料纤维有助于降低 RAC 的最大体积应变值。

#### 七、临界压力

临界应力对应于应力的最大体积应变——体积应变曲线。临界应力代表不稳定裂纹扩展的开始。从临界应力值来看, 载荷的增加将产生非常高的应变。裂纹系统将不稳定, 裂纹扩展速度将迅速增加。临界应力结果表明, RCA 使混凝土的临界应力比 NAC 降低了 24.3%。在含有 5% SF 的 RAC 中, 与不含 5% SF 的 RAC 相比, 临界应力增加了 13% 左右。随着 RAC 中再生塑料纤维的加入, 临界应力显著降低。RWS 纤维引起的临界应力降低幅度高于 RPET 纤维, 这与抗压强度值的趋势相似。

#### 结论

该研究调查了 RWS、RPET 纤维和 SF 对 RAC 的机械性能和耐久性的影响。SF 和提出的混合技术在改善含有 100% 粗 RCA 的 RAC 的性能方面发挥了重要作用, 并补偿了由于回收塑料纤维造成的抗压强度损失, 而 RPET 和 RWS 纤维增强了开裂后的性能、剪切强度、劈裂拉伸 RAC 的强度。RPET 和 RWS 纤维增强 RAC 的潜在工程可以解决当前的环境问题。从结果中得出的结论如下:

- RWS 和 RPET 纤维在碱性环境中具有高耐碱性。RWS 和 RPET 纤维在不同的碱性溶液中浸泡 180 天后的拉伸强度与 28 天相比下降了约 0.07-0.6%, 可以忽略不计。此外, SEM 图像证实再生塑料纤维在 RAC 环境中没有发生降解。

- 建议的混合程序和 SF 使含有 RPET 纤维的 RAC 的抗压强度提高了约 3.6-9%。强度随着纤维含量的增加而降低。然而, 在 RAC 中添加 SF 逆转了由再生塑料纤维引起的强度降低。

#### 参考文献:

[1] Bui, N.K., Satomi, T., Takahashi, H., 2017. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. *Constr. Build. Mater.*

148, 376 – 385.

[2]Butera, S., Christensen, T.H., Astrup, T.F., 2015. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Manage.* 44, 196 – 205.

[3]Caggiano, A., Gambarelli, S., Martinelli, E., Nisticò, N., Pepe, M., 2016. Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 125, 1035 – 1043.

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

[5]Fraternali, F., Farina, I., Polzone, C., Pagliuca, E., Feo, L., 2013. On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars. *Compos. Part B Eng.* 46, 207 – 210.

[6]Frigione, M., 2010. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Manage.* 30, 1101 – 1106.

[7]Gao, D., Zhang, L., Nokken, M., 2017a. Compressive

behavior of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete designed with equivalent cubic compressive strength. *Constr. Build. Mater.* 141, 235 – 244.

[8]Puthussery, J.V., Kumar, R., Garg, A., 2017. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: an experimental study. *Waste Manage.* 60, 270 – 276.

[9]Sadrumontazi, A., Tahmouresi, B., Saradar, A., 2018. Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *Constr. Build. Mater.* 162, 321 – 333.

[10]Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S., 2017. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 84, 214 – 221.

[11]Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, M., Sivakugan, N., 2016. Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fibre reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 114, 134 – 141.