

# 再生混凝土全生命周期评价

杨林羲<sup>1</sup>, 邹毅松<sup>1</sup>, 李王鑫<sup>2</sup>, 吴萍<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆交通大学, 重庆

<sup>2</sup>浙大宁波理工学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2021年10月15日; 录用日期: 2021年11月8日; 发布日期: 2021年11月15日

## 摘要

工程建设的需求促进了混凝土行业快速发展, 2019年混凝土产量突破24亿立方米, 并保持年产量2%~3%的增速, 如此巨大的混凝土产量势必会消耗较多的天然骨料。采用再生骨料生产混凝土, 不仅可以减少天然骨料的开采量, 还可以减少废弃混凝土的填埋对土地的永久占用以及相应的环境污染。本文通过运用生命周期评价技术, 对再生混凝土制备、使用、拆除废弃等阶段建立了环境影响评价模型。通过收集各阶段数据得到, 修筑一段长1000米, 宽3米, 厚20厘米的路面所需的再生混凝土量与使用天然混凝土相比, 对环境产生的影响明显减小, 且随着再生骨料替代率的提高, 所制成的再生混凝土对环境产生的影响整体减小。

## 关键词

再生混凝土, 生命周期, 环境影响评价

# Life Cycle Assessment of Recycled Concrete

Linxi Yang<sup>1</sup>, Yisong Zou<sup>1</sup>, Wangxin Li<sup>2</sup>, Ping Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Jiaotong University, Chongqing

<sup>2</sup>Ningbo Tech University, Ningbo Zhejiang

Received: Oct. 15<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 15<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The demand of engineering construction promotes the rapid development of concrete industry, In the year of 2019, the concrete output will exceed 2.4 billion cubic meters and maintain an annual growth rate of 2%~3%, such a huge concrete output is bound to consume more natural aggregate. Using recycled aggregate to produce concrete can not only reduce the mining amount of natural aggregate, but also reduce the permanent occupation of land and corresponding environmental

**pollution caused by the landfill of waste concrete. Using life cycle assessment technology, an environmental impact assessment model is established for the preparation, use, demolition and waste of recycled concrete. According to the data collected at each stage, the amount of recycled concrete required to build a section of pavement with a length of one kilometer, a width of three meters and a thickness of twenty centimeters is significantly reduced compared with the use of natural concrete, and the impact of recycled concrete on the environment is reduced as a whole with the increase of the replacement rate of recycled aggregate.**

## Keywords

Recycled Concrete, Life Cycle, Environmental Impact Assessment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国城市建设的更新换代，混凝土作为一种无可替代的建筑基础性材料被大规模的消耗着。据统计，目前世界上总体砂石骨料年消耗量达到 400 亿吨以上[1]，而我国是世界上砂石骨料消耗量最大的国家，其砂石骨料年消耗量达到 200 亿吨以上[2]。如此巨大的砂石骨料需求量，必然导致大量的山石开采而造成资源枯竭。以废弃混凝土经过破碎、清理和分级处理并按一定级配混合后形成的骨料来生产再生混凝土，不仅可以减少天然骨料的开采，还可以减少废弃混凝土填埋对土地的永久占用以及相应的环境污染[3] [4]。

混凝土生产的环境问题程度如何，以及通过再生技术能够解决和缓解环境问题程度如何，可以通过全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法进行分析。目前，国内外开始研究再生混凝土全生命周期内的环境影响，在进行混凝土原材料的准备过程中，为了寻找和选择能够替代传统集料的不同来源，已经进行了大量的研究，如用高炉矿渣、废石料、粉煤灰等替代天然材料及使用这些替代材料对环境产生的潜在影响[5]-[14]。在进行混凝土的运输时，不同的运输距离对环境产生的影响不同[15]。除了原材料的来源及运输距离不同，不同的配合比制成的混凝土对环境的影响也不同。

必须指出的是，目前国内针对再生骨料替代天然粗骨料制成的混凝土对环境产生的影响已有研究，但针对再生骨料替代天然粗细骨料制成的混凝土的 LCA 研究则尚不多见。针对上述问题，本文通过比较普通混凝土、再生粗骨料混凝土及再生粗细骨料混凝土进行全生命周期评价，根据 LCA 比较的结果，作为再生混凝土污染源分离、废物处理和混凝土回收技术的环境影响指标。

## 2. 研究方法

LCA 是指“对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价，具体包括互相联系、不断重复进行的四个步骤：目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。生命周期评价是一种用于评估产品在其整个生命周期中，即从原材料的获取、产品的生产直至产品使用后的处置，对环境影响的的技术和方法。主要是为了找出最适宜的预防污染技术，尽可能减少环境的污染，保护生态系统；同时达到合理开发和利用资源、节约不可再生的资源和能源、最大限度地进行原料和废物的循环利用的目的，实现经济、社会的可持续发展。

### 3. 原材料用量

实验过程采用的水灰比为 0.44, 砂率为 0.33。根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)计算出天然混凝土的配合比, 即空白对照组 C<sub>0</sub>, 如表 1 所示。

**Table 1.** Natural concrete C<sub>0</sub> raw material benchmark match ratio (kg/m<sup>3</sup>)

**表 1.** 天然混凝土 C<sub>0</sub> 原材料基准配合比(kg/m<sup>3</sup>)

水泥	砂子	碎石	水
461	512	1252	175

根据基准配合比, 采用再生骨料取代率分别为 30%、50%和 100%, 对应的编号分别为 C<sub>0</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>, 其中 C<sub>0</sub> 为不使用再生骨料制备的基准混凝土, C<sub>1</sub>~C<sub>3</sub> 为使用再生骨料替代碎石制备的再生混凝土, C<sub>4</sub>~C<sub>6</sub> 为使用再生骨料替代碎石及砂子制备的再生混凝土。制备的各类再生混凝土具体的配合比, 如表 2 所示。

**Table 2.** The ratio of recycled concrete raw materials (kg/m<sup>3</sup>)

**表 2.** 再生混凝土原材料配合比(kg/m<sup>3</sup>)

原材料	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
水泥	372.8	372.8	372.8	372.8	372.8	372.8
砂子	571	571	571	399.7	285.5	0
碎石	810.6	579	0	810.6	579	0
水	205	205	205	205	205	205
再生骨料	347.6	579	1158	518.7	864.5	1729

选取每立方米天然混凝土假定质量为 2400 kg。选取每立方米再生混凝土假定质量为 2300 kg。假设修筑一段长 1000 米, 宽 3 米, 厚 0.2 米的公路, 则所需混凝土的量为  $1000 * 3 * 0.2 = 600 \text{ m}^3$ 。各类混凝土所需原材料用量如表 3 所示。

**Table 3.** The amount of all kinds of concrete raw materials (kg)

**表 3.** 各类混凝土原材料用量(kg)

原材料	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
水泥	1106400	894720	894720	894720	894720	894720	894720
砂子	1228800	1370400	1370400	1370400	959280	685200	0
碎石	3004800	1945440	1389600	0	1945440	1389600	0
水	420000	492000	492000	492000	492000	492000	492000
再生骨料	0	834240	1389600	2779200	1244880	2074800	4149600

## 4. 全生命周期评价

### 4.1. 生产阶段

根据整理的数据库, 建立各类混凝土生产阶段的生命周期模型。根据建立的模型进行软件的计算, 可

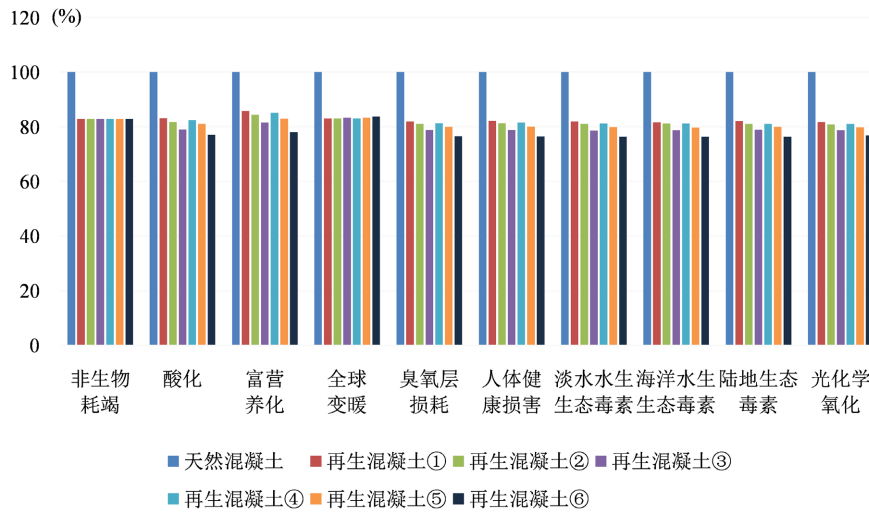
以得到生产 2400 m<sup>3</sup> 各类混凝土的碳排放贡献率，如表 4 所示。

**Table 4.** Carbon contribution rate in all types of concrete production stage  
**表 4.** 各类混凝土生产阶段碳排放贡献率

混凝土编号	CO <sub>2</sub> 排放量(tn.lg)	占比
C <sub>0</sub>	294	16.7%
C <sub>1</sub>	244	13.8%
C <sub>2</sub>	244	13.8%
C <sub>3</sub>	245	13.9%
C <sub>4</sub>	244	13.8%
C <sub>5</sub>	245	13.9%
C <sub>6</sub>	245	13.9%

由上表可以看出，与天然混凝土相比，再生混凝土在生产阶段碳排放量有所下降，碳排放量随再生骨料替代率的变化不明显。

各类混凝土在原材料生产阶段环境特征化图如图 1 所示。特征化分析结果用柱状图来表示每种环境影响类型下的各类混凝土环境贡献率。



**Figure 1.** Environmental characteristics of various types of concrete during the production phase of raw materials

**图 1.** 各类混凝土在原材料生产阶段环境特征化图

将特征化树状图整理得到各类混凝土生产阶段特征化清单和各混凝土对环境的贡献率，如表 5 和表 6 所示。

由下表可以看出，在混凝土的生产阶段，随着再生骨料的替代率增大，所生成的再生混凝土对环境的影响减小。其中，除非生物耗竭及全球变暖外，其他各类因素对环境的影响都随着再生骨料替代率的提高而明显减小。

**Table 5.** A list of the characteristics of various types of concrete production stages  
**表 5.** 各类混凝土生产阶段特征化清单

影响因素	单位	天然混凝土	再生混凝土	再生混凝土	再生混凝土	再生混凝土	再生混凝土	再生混凝土
			①	②	③	④	⑤	⑥
非生物耗竭	Kg·Sb·eq	2210	1830	1830	1830	1830	1830	1830
酸化	Kg·SO <sub>2</sub> ·eq	1480	1230	1210	1170	1220	1200	1140
富营养化	Kg·PO <sub>4</sub> ·eq	141	121	119	115	120	117	110
全球变暖	Kg·CO <sub>2</sub> ·eq	307000	255000	255000	256000	255000	256000	257000
臭氧层损耗	Kg·CFC-11·eq	0.00694	0.00569	0.00563	0.00547	0.00564	0.00555	0.00531
人体健康损害	Kg·1,4-DB·eq	33100	27200	26900	26100	27000	26500	25300
淡水水生生态毒素	Kg·1,4-DB·eq	7030	5760	5700	5530	5710	5620	5370
海洋水生生态毒素	Kg·1,4-DB·eq (*10 <sup>5</sup> )	207	169	168	163	168	165	158
陆地生态毒素	Kg·1,4-DB·eq	190	156	154	150	154	152	145
光化学氧化	Kg·C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	56.5	46.2	45.7	44.5	45.8	45.1	43.4

**Table 6.** Environmental emission contribution rate in all kinds of concrete production stage (%)  
**表 6.** 各类混凝土生产阶段环境排放贡献率(%)

影响因素	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
非生物耗竭	16.76	13.87	13.87	13.87	13.87	13.87	13.87
酸化	17.11	14.22	13.99	13.53	14.10	13.87	13.18
富营养化	16.73	14.35	14.12	13.64	14.23	13.88	13.05
全球变暖	16.68	13.85	13.85	13.91	13.85	13.91	13.96
臭氧层损耗	17.25	14.14	13.99	13.60	14.02	13.80	13.20
人体健康损害	17.23	14.16	14.00	13.59	14.06	13.79	13.17
淡水水生生态毒素	17.26	14.15	14.00	13.58	14.02	13.80	13.19
海洋水生生态毒素	17.28	14.11	14.02	13.61	14.02	13.77	13.19
陆地生态毒素	17.26	14.17	13.99	13.62	13.99	13.81	13.17
光化学氧化	17.27	14.12	13.97	13.60	14.00	13.78	13.26

## 4.2. 使用阶段

在混凝土的使用阶段，由于各种混凝土所达到的强度相同，其耐久性一致，故各种混凝土之间的差距不大，且对环境产生的影响差距较小。

## 4.3. 废弃回收阶段

由于本文针对 2400 m<sup>3</sup> 各类混凝土进行全生命周期评价。故在废弃回收阶段各类混凝土的拆卸量相同，所做功相同，对环境产生的影响也大体相同。

## 4.4. 再生混凝土全生命周期影响评价

建立各类混凝土全生命周期研究模型，根据建立的模型进行软件的计算，可以得到各类混凝土全生

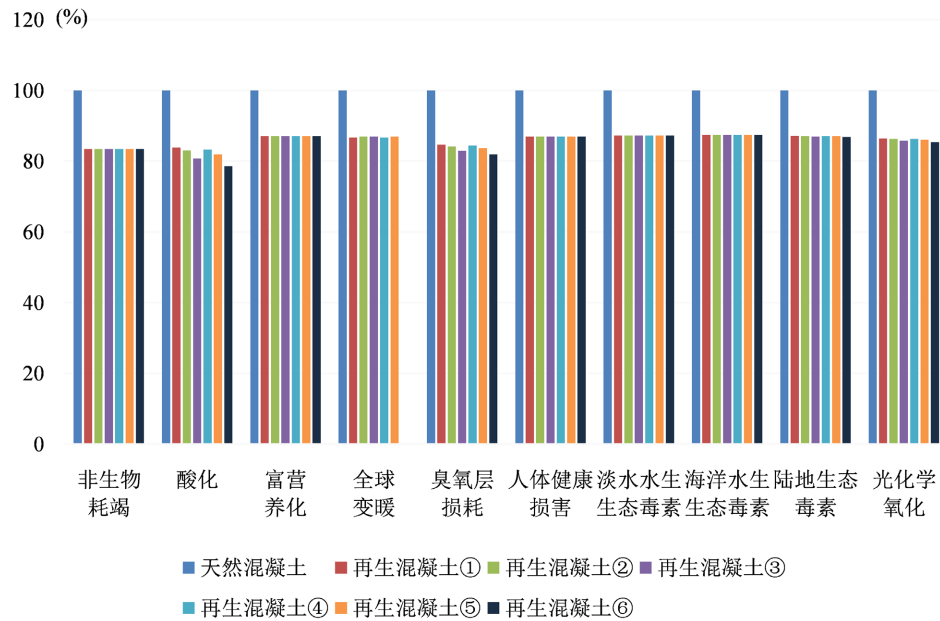
命周期的碳排放贡献率，如表 7 所示。

**Table 7.** Carbon contribution rate for all types of concrete throughout its life cycle  
**表 7.** 各类混凝土全生命周期阶段碳排放贡献率

混凝土编号	CO <sub>2</sub> 排放量(tn.lg)	占比
C <sub>0</sub>	883	16.7%
C <sub>1</sub>	733	13.8%
C <sub>2</sub>	733	13.8%
C <sub>3</sub>	735	13.9%
C <sub>4</sub>	733	13.9%
C <sub>5</sub>	734	13.9%
C <sub>6</sub>	736	14.0%

建上表可以看出，与天然混凝土相比，再生混凝土在全生命周期碳排放量有所下降，碳排放量随再生骨料替代率的变化不明显。

各类混凝土全生命周期环境特征化图如图 2 所示。特征化分析结果用柱状图来表示每种环境影响类型下的各类混凝土的环境贡献率。



**Figure 2.** All kinds of concrete full life cycle environmental characteristic map  
**图 2.** 各类混凝土全生命周期环境特征化图

将特征化树状图整理得到各类混凝土全生命周期特征化清单和各类混凝土对环境的贡献率，如表 8 和表 9 所示。

由下表可以看出，在混凝土的全生命周期，随着再生骨料替代率的增加，所生成的再生混凝土对环境的影响减小。随着再生骨料替代率的变化，酸化和臭氧层损耗对环境产生的影响最明显，酸化潜力从

4450 (Kg·SO<sub>2</sub>·eq)降到 4170 (Kg·SO<sub>2</sub>·eq)，臭氧层损耗潜力从 0.0337 (Kg·CFC-11·eq)降到 0.0326 (Kg·CFC-11·eq)。

**Table 8.** A list of all types of concrete full life cycle features

**表 8.** 各类混凝土全生命周期特征化清单

影响因素	单位	天然混凝土	再生混凝土①	再生混凝土②	再生混凝土③	再生混凝土④	再生混凝土⑤	再生混凝土⑥
非生物耗竭	Kg·Sb·eq	7490	6250	6250	6250	6250	6250	6250
酸化	Kg·SO <sub>2</sub> ·eq	5310	4450	4410	4290	4420	4350	4170
富营养化	Kg·PO <sub>4</sub> ·eq	13200	11500	11500	11500	11500	11500	11500
全球变暖	Kg·CO <sub>2</sub> ·eq (*10 <sup>4</sup> )	526	456	457	457	456	457	457
臭氧层损耗	Kg·CFC-11·eq	0.0398	0.0337	0.0335	0.033	0.0336	0.0333	0.0326
人体健康损害	Kg·1,4-DB·eq (*10 <sup>4</sup> )	122	106	106	106	106	106	106
淡水水生生态毒素	Kg·1,4-DB·eq (*10 <sup>5</sup> )	110	96	96	96	96	96	96
海洋水生生态毒素	Kg·1,4-DB·eq	4.06	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
陆地生态毒素	Kg·1,4-DB·eq	8200	7150	7140	7130	7140	7140	7120
光化学氧化	Kg·C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	821	709	708	704	708	706	701

**Table 9.** All kinds of concrete full life cycle environmental emission contribution rate (%)

**表 9.** 各类混凝土全生命周期环境排放贡献率(%)

影响因素	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
非生物耗竭	16.65	13.89	13.89	13.89	13.89	13.89	13.89
酸化	16.91	14.17	14.04	13.66	14.08	13.85	13.28
富营养化	16.06	13.99	13.99	13.99	13.99	13.99	13.99
全球变暖	16.11	13.96	13.99	13.99	13.96	13.99	13.99
臭氧层损耗	16.62	14.07	13.99	13.78	14.03	13.90	13.61
人体健康损害	16.09	13.98	13.98	13.98	13.98	13.98	13.98
淡水水生生态毒素	16.03	13.99	13.99	13.99	13.99	13.99	13.99
海洋水生生态毒素	16.01	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
陆地生态毒素	16.07	14.01	13.99	13.97	13.99	13.99	13.96
光化学氧化	16.23	14.02	14.00	13.92	14.00	13.96	13.86

## 5. 结论

本文根据再生混凝土全生命周期评价步骤，通过对混凝土生产、施工建造、拆除废弃等过程对环境影响因素进行计算，建立了生命周期下的再生混凝土环境影响量化模型。结果表明，随着再生骨料替代率的提高，在混凝土的生产阶段环境影响变化最明显，当粗细骨料替代率为 100%时，所生成的再生混凝土对环境的影响最小；在混凝土的使用阶段，由于所制成的各类混凝土强度及耐久性相似，对环境产生



影响变化差异无明显变化；在混凝土的废弃回收阶段，由于所拆卸的各类混凝土的量相同，故各类机械做功相同，对环境产生的影响相同。综上所述，与天然混凝土相比，再生混凝土对环境产生的影响较小，且随着再生骨料替代率的提升，所生成的再生混凝土对环境产生的影响减小。故使用再生混凝土进行建设施工可以达到节能减排的效果，推广再生混凝土将产生一定的环境价值。

## 致 谢

感谢宁波市公益类科技计划项目(202002N3121)的资助。

## 参考文献

- [1] 胡幼奕. 转型中的中国砂石工业——谈砂石行业未来发展大趋势[J]. 中国建材, 2018(7): 36-38.
- [2] 马腾飞, 史秀芳. C30 细石再生混凝土配合比设计方案研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2021, 31(3): 14-16.
- [3] 章玉容, 徐雅琴, 姚泽阳, 王龙龙. 配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(6): 648-653.
- [4] 高唱. 基于 LCA 的再生混凝土环境影响评价研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [5] Colangelo, F., Messina, F. and Cioffi, R. (2015) Recycling of MSWI Fly Ash by Means of Cementitious Double Step Cold Bonding Pelletization: Technological Assessment for the Production of Lightweight Artificial Aggregates. *Journal of Hazardous Materials*, **299**, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.018>
- [6] Ferone, C., Colangelo, F., Messina, F., Santoro, L. and Cioffi, R. (2013) Recycling of Pre-Washed Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash in the Manufacturing of Low Temperature Setting Geopolymer Materials. *Materials*, **6**, 3420-3437. <https://doi.org/10.3390/ma6083420>
- [7] Colangelo, F., Cioffi, R., Montagnaro, F. and Santoro, L. (2012) Soluble Salt Removal from MSWI Fly Ash and Its Stabilization for Safer Disposal and Recovery as Road Basement Material. *Waste Management*, **32**, 1179-1185. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.013>
- [8] Ferone, C., Colangelo, F., Messina, F., Iucolano, F., Liguori, B. and Cioffi, R. (2013) Coal Combustion Wastes Reuse in Low Energy Artificial Aggregates Manufacturing. *Materials*, **6**, 5000-5015. <https://doi.org/10.3390/ma6115000>
- [9] Colangelo, F. and Cioffi, R. (2013) Use of Cement Kiln Dust, Blast Furnace Slag and Marble Sludge in the Manufacture of Sustainable Artificial Aggregates by Means of Cold Bonding Pelletization. *Materials*, **6**, 3139-3159. <https://doi.org/10.3390/ma6083139>
- [10] Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F. and Cioffi, R. (2013) Recycled Plastic Aggregate in Mortars Composition: Effect on Physical and Mechanical Properties. *Materials & Design*, **52**, 916-922. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>
- [11] Liguori, B., Iucolano, F., Capasso, I., Lavorgna, M. and Verdolotti, L. (2014) The Effect of Recycled Plastic Aggregate on Chemico-Physical and Functional Properties of Composite Mortars. *Materials & Design*, **57**, 578-584. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.006>
- [12] Colangelo, F., Cioffi, R., Liguori, B. and Iucolano, F. (2016) Recycled Polyolefins Waste as Aggregates for Lightweight Concrete. *Composites Part B: Engineering*, **106**, 234-241. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.041>
- [13] Seungjun, R., Rakhyun, K., Jun, P.W. and Hoki, B. (2020) Environmental Evaluation of Concrete Containing Recycled and By-Product Aggregates Based on Life Cycle Assessment. *Applied Sciences*, **10**, 7503. <https://doi.org/10.3390/app10217503>
- [14] Xia, B., Ding, T. and Xiao, J.Z. (2020) Life Cycle Assessment of Concrete Structures with Reuse and Recycling Strategies: A Novel Framework and Case Study. *Waste Management*, **105**, 268-278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015>
- [15] Colangelo, F., Navarro, T.G., Farina, I. and Petrillo, A. (2020) Comparative LCA of Concrete with Recycled Aggregates: A Circular Economy Mindset in Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **25**, 1790-1804. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01798-6>