

基于 LCA 的建筑垃圾再生填料回填路基的碳减排效益分析

Carbon Reduction Benefits of LCA-based Recycled Construction Waste Fill Backfill Roadbed

翟兵勇^① ZHAI Bing-yong; 田佳学^② TIAN Jia-xue

(^①华北水利水电大学, 郑州 450046; ^②中铁十七局集团第三工程有限公司, 石家庄 050000)

(^①North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

^②The 3rd Engineering Co., Ltd. of China Railway 17th Bureau Group, Shijiazhuang 050000, China)

摘要: 文章通过测算再生填料替代天然材料回填路基的碳排放情况, 评估了中国郑州市某 10 万 t 建筑垃圾资源化项目的潜在环境影响。采用生命周期评价方法(LCA)测算不同材料进行路基回填的碳排放情况, 并与建筑垃圾直接填埋的环境影响进行对比, 同时分析了施工过程中每个阶段的碳排放贡献。结果表明, 建筑垃圾直接填埋产生的碳排放量是资源化利用的 2.3 倍, 平均每资源化利用 1t 建筑垃圾可减少约 10.5836kgCO_{2e} 的温室气体排放, 该资源化项目预计能减少 1132tCO_{2e} 的温室气体排放。

Abstract: The article assesses the potential environmental impact of a 100,000t construction waste resourceisation project in Zhengzhou, China, by measuring the carbon emissions of recycled fill backfilling the roadbed in place of natural materials. The Life Cycle Assessment (LCA) method was used to measure the carbon emissions of different materials for road base backfilling and to compare the environmental impact with that of direct landfill of construction waste, and to analyze the contribution of carbon emissions at each stage of the construction process. The results show that the carbon emissions from direct landfill of construction waste are 2.3 times higher than those from resource utilisation, with an average reduction of approximately 10.5836kgCO_{2e} of greenhouse gas emissions per 1t of construction waste utilised for resource utilisation, and the resource utilisation project is expected to reduce greenhouse gas emissions by 1,132tCO_{2e}.

关键词: 建筑垃圾; 再生填料; 碳减排; 生命周期评价; 资源化

Key words: construction waste; recycled fill; carbon reduction; life cycle assessment; resource recovery

中图分类号: X799.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-4311(2023)15-065-03 doi:10.3969/j.issn.1006-4311.2023.15.020

0 引言

中国建筑垃圾现状是一个值得关注的问题, 据统计, 自 2015 年起中国建筑垃圾年产量已超过 20 亿 t, 且逐年攀升, 预计到 2022 年, 建筑垃圾年产量将达到 35 亿 t^[1,2], 然而中国建筑垃圾处理现状不尽如人意, 大多数没有得到有效处理, 造成了资源浪费、环境污染和社会安全隐患, 现今中国建筑垃圾资源化利用率仍不足 10%^[3]。

数十年来, 可持续发展理念正逐步深入各国建筑行业, 建筑垃圾资源化是人们追求的共同目标, 可持续发展不仅要求保护自然资源, 环境问题同样不容忽视。作为环境管理工具, 生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法论于上世纪 90 年代快速发展, 至今已经成为各国科学家、市政决策者等进行环境影响评价的重要手段, LCA 能帮助我们更好地了解建筑垃圾处理过程中产生的环境问题。Hossain 等^[4]比较了天然材料和回收材料两种类型骨料生产阶段对环境的影响。Ding 等^[5]对中国再生骨料混凝土利用进行了闭环生命周期评估(LCA)。李树逊等^[6]归纳了生命周期方法在道路改扩建中的资源化利用实例, 指出在道路工程建设中, 废弃物的回收利用可以有效降低建设成本和环境污染。

然而关于建筑垃圾就地利用的案例并不多见, 根据工程实际情况, 设计针对性的建筑垃圾资源化方式, 减少天然材料的开采和运输, 同时也能省去建筑垃圾填埋以及运往填埋点的运输过程, 将会产生相当可观的经济和环

境效益。

1 研究内容

人们对环境问题的思考促进了生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)概念的诞生。生命周期评价理论框架^[7]包括目的和范围的确定、清单分析、影响评价和解释四个阶段, 其相互关系见图 1。

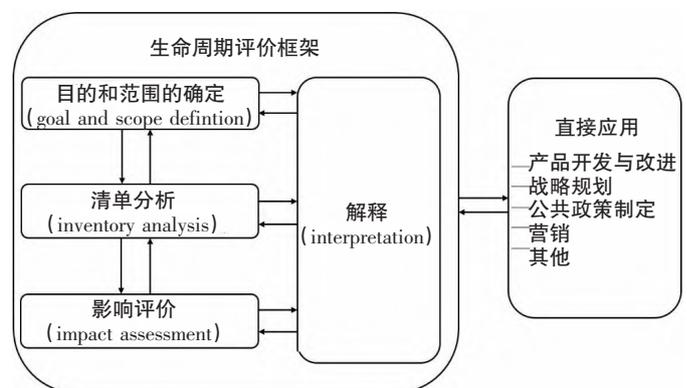


图 1 IOS 生命周期评价技术框架

1.1 研究目的和范围

本研究依托郑州地铁 12 号线河西车辆段建设工程, 场内地形修整后要开展大规模的路基回填工作, 同时原址旧建筑物拆除产生了大量建筑垃圾, 该项目研究出了再生填料替代天然材料回填路基的建筑垃圾资源化利用方式。

为保证生命周期评价的可靠性, 参照“从摇篮到大门”的 LCA 系统边界模式来划定本文的研究范围, 具体包括材料生产、材料运输和回填施工 3 个单元工序。

作者简介: 翟兵勇(1997-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为水文地质工程。

功能单位是针对某个产品系统提供的特定功能或服务的量化表达,让 LCA 的计算趋于标准化^[8]。本文的功能单位设置为处理 1t 的建筑垃圾,有助于使 LCA 结果更加直观。

1.2 材料和场景

该资源化项目要处理的建筑垃圾主要成分是建筑砖块和道路破除混凝土,场段内初步清理后得到约 $1.07 \times 10^5 \text{t}$ (堆积密度 1.6t/m^3) 的待处理废弃物,将其破碎后得到的砖料和混凝土料作为再生填料。

试验段铺筑方案 A——使用再生材料,对照组方案 B——使用天然材料。试验段施工场地设计为两块 $10 \text{m} \times 6 \text{m}$ 大小,中间添加 $6 \text{m} \times 6 \text{m}$ 的缓冲区间,整体表现为 3 部分顺序相接的矩形场段(图 2)。

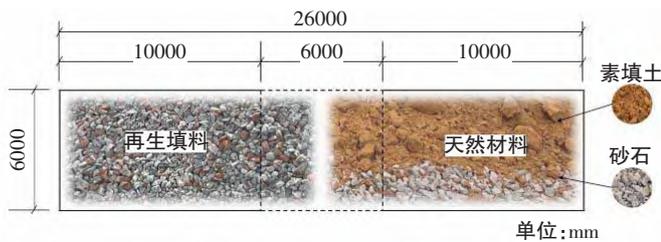


图 2 试验段铺设示意图

1.3 生命周期清单

1.3.1 数据类型及来源

为保证数据准确可靠,试验段的建设施工过程中各个阶段的物资能源消耗都进行了记录。路基铺筑过程中的数据类型主要有工程量清单、物质能源消耗量、施工机械的台班消耗量以及碳排放因子。工程量清单、施工机械台班消耗量,部分资源消耗量由郑州地铁 12 号线河西车辆段工程承建单位提供,关于各个环节能源消耗量及对应的碳排放影响因子,包括汽油、柴油及电能等,主要来源于《中国区域电网基准线排放因子 2019》、《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366—2019 和《河南省统一施工机械台班费用定额》HA JX-31-2017 等国家或地方相关标准,部分缺失数据参照《综合能耗计算通则》GB/T 2589—2020 计算或参考相关文献资料,根据工程实际从中择优选取。

1.3.2 材料生产

该项目建筑垃圾就地进行生产,包括分选—破碎—筛选三个,整套生产装置每天工作 8h,生产能力为 800t/d 。试验段现场记录每种方案的材料使用量见表 1,其中砂石材料场外购买,素填土取自场内,含水率控制在 9%,实测密度 1.6t/m^3 ,假设该工程单位台班挖方量为 1000m^3 ,方案 B 的材料生产阶段能耗表现由砂石开采和土方开挖时的碳排放量共同决定。生产设备每日能耗见表 2。

表 1 试验段施工方案 A/B 中各材料消耗量

材料	方案 A(再生填料)	方案 B(天然材料)	
		砂石	素填土
消耗量(t)	480	144	336

1.3.3 材料运输

再生填料的生产和堆放区域位于场内待回填路段边缘,砂石料场外购买,经重型柴油货车输送到砂石材料仓,素填土取自场内挖方,三种材料的场内运输均由自卸汽车

表 2 材料生产过程设备能耗(d)

材料	序号	设备	单位能耗		消耗量	
			柴油(kg/台班)	电力(kW)	台班	h
再生材料	1	轮胎装载机	58.75	—	2	—
	2	履带式挖掘机	72.7	—	2	—
	3	颚式破碎机	—	120	—	8
	4	500mm 皮带输送机	—	3	—	8
	5	650mm 皮带输送机	—	4	—	16
	6	双层高效振动筛	—	22	—	8
	7	除铁装置	—	1.5	—	8
	8	清水泵	—	5.5	—	2
	总计	—	—	262.9(kg)	1247(kWh)	
素填土	1	履带式挖掘机	72.7	—	366/1000	—

完成。

1.3.4 回填施工

根据段场路基设计要求,与方案 B 相比,方案 A 要达到路基设计要求需要更多的碾压工作量,结合该工程正常施工效率和试验段实际施工进度,统计试验段建设的各施工机械台班及能源消耗见表 3。

表 3 各方案回填过程设备能耗

序号	设备	单机能耗(kg/台班)	消耗量(台班)	
			方案 A	方案 B
1	履带式推土机	66.8	3/4	3/4
2	平地机	54.97	3/4	3/4
3	钢轮振动压路机	106.66	3/4	1/2
4	小型压路机	37	3/4	1/2

1.4 影响评价

本研究选择全球变暖潜能值 GWP (Global Warming Potential) 作为环境影响评价指标,GWP 是衡量某种物质产生温室效应的指数,GWP 越大表示该温室气体在单位质量单位时间内产生的温室效应越大,以二氧化碳被作为参照气体,是因为其对全球变暖的影响最大。

1.4.1 碳排放因子

①能源。施工过程的能源消耗主要包括柴油和电力,碳排放因子统计见表 4。其中电力的碳排放因子采用《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》华中地区(河南省)电网数据。柴油消耗的碳排放因子根据公式(1)计算所得,具体见表 4。

表 4 能源 CO₂ 排放因子统计

能源	平均低位发热量(kJ/单位)	含碳量(kgC/GJ)	碳氧化率(%)	CO ₂ 转化系数	CO ₂ 排放因子(kg CO ₂ e/单位)
柴油(kg)	42705	20.2	98	44/12	3.1
电力(kWh)	—	—	—	—	0.8587

柴油 CO₂ 排放因子=平均低位发热量×含碳量×碳氧化率×CO₂ 转化系数 (1)

②运输。砂石材料的场外运输采用公路柴油货车,运输碳排放因子来源 GB/T 51366—2019 《建筑碳排放计算标准》,三种回填材料在场段内的运输阶段碳排放根据自卸汽车的实际台班消耗量测算,其中砂石料场外运输距离根据该工程所在地域取值为 100km,具体见表 5。

表 5 运输方式及碳排放因子

运输方式	重型柴油货车运输 (载重 30t)	自卸汽车(15t)
碳排放因子	0.078[kgCO ₂ e/(t·km)]	0.8204(kgCO ₂ e/t)

1.4.2 碳排放测算

方案 A 各单元工序碳排放根据再生料消耗量对应的机械设备能源消耗量计算;方案 B 各单元工序碳排放由两种材料共同贡献,其中砂石材料生产碳排放因子取自 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》;方案 C 材料消耗与方案 A&B 取等值进行计算,查阅文献资料可知^[9],平均每填埋 1t 建筑垃圾碳排放量为 10.26kgCO₂e。综上,各方案碳最终排放量按式(2)计算,各方案及每个单元工序中的碳排放量结果呈于表 6。

表 6 各方案单元工序碳排放(kgCO₂e)

单元工序	方案		
	方案 A	方案 B	方案 C
材料生产	1131.456	361.2624	—
材料运输	393.792	1430.592	—
回填施工	617.136	505.92	—
总计	2142.384	2297.774	4924.8

$$CE = \sum_{i=1, j=1}^{a, b} CE_{i, j} \quad (2)$$

CE——碳排放总量;

CE_{i,j}——材料 i 在 j 工序中的碳排放量;

a, b——分别代表材料类型和单元工序。

2 结果与讨论

该建筑垃圾资源化项目提出的是替代方案,用方案 A 代表的再生材料替代方案 B 代表的天然材料。图 3 显示了方案 A&B 在各单元工序碳排放的生命周期评价结果,可以看到方案 A 中再生材料生产阶段的碳排放量最高,占比为 52.8%,其次是回填施工阶段,占比 28.8%,占比最小是运输阶段,仅 18.4%;方案 B 中产生最高碳排放量的是运输阶段,占比为 62.3%,其次是回填施工阶段,占比 22%,生产阶段占比最小,仅 15.7%。

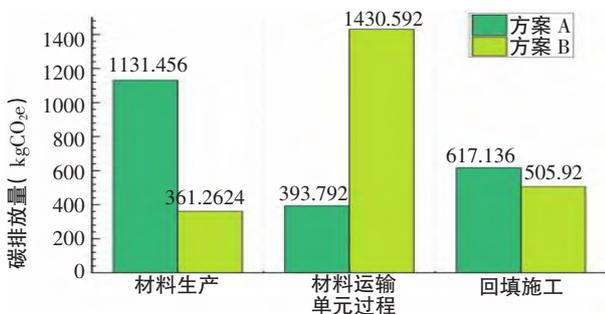


图 3 单元工序碳排放量

方案 A 的碳排放总量为 2142.384kgCO₂e,相比方案 B 2297.774kgCO₂e 的碳排放量降低了 6.8%,生产阶段碳排放方案 A 是方案 B 的 3 倍左右,运输阶段碳排放方案 B 是方案 A 的 3.6 倍,回填施工阶段碳排放方案 A 比方案 B 高出约 22%。

图 4 加入了垃圾填埋方案(方案 C),并显示了三个方案中每种材料在各阶段的碳排放贡献。由于是替代方案,故将方案 B&C 的碳排放量用负值表示,其中砂石和素填

土回填施工部分的碳排放按质量占比分配。

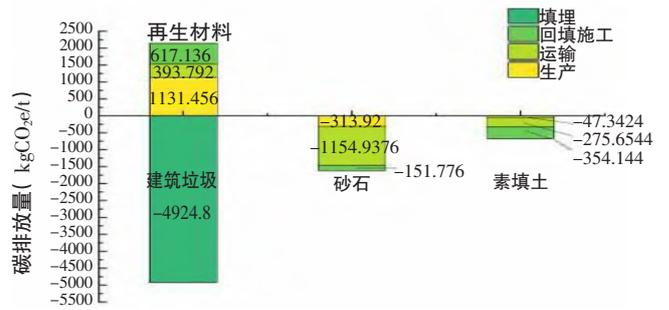


图 4 材料各工序的碳减排贡献

由图 4 可知,方案 C 代表的垃圾填埋情景产生了最高的碳排放量,是代表资源化利用方案 A 的 2.3 倍。试验段使用 480t 再生填料用于路基回填建设,相当于直接减少了 480t 的垃圾填埋,同时替代了 480t 的天然材料,因此方案 A 的碳减排效益得益于方案 B&C 两者之和,共计 5080.13kgCO₂e,平均每处理 1t 建筑垃圾可减少碳排放约 10.5836kgCO₂e,则该工程 1.07×10⁵t 的可利用建筑垃圾全部进行资源化处理后,预计将能减少 1132tCO₂e 的温室气体排放。

3 结论

①LCA 结果显示,建筑垃圾直接填埋产生的碳排放量是资源化利用的 2.3 倍,采用替代方案情况下,每资源化利用 1t 建筑垃圾可减少碳排放约 10.5836kgCO₂e,该 10 万 t 建筑垃圾资源化项目预计能减少 1132tCO₂e 的温室气体排放。②由于建筑垃圾再生填料的生产技术不如天然材料成熟,其生产阶段产生了较高的碳排放量,通过设计更完备有效的建筑垃圾处理系统,将有可能在此基础上创造更高效益。③本研究所依托的地铁车辆段建设项目位于城市内,根据该项目实际情况设计了路基回填的再利用方式,而在研究不同工程背景的建筑垃圾处理情况时,应根据工程实际研究合理的资源化再利用方式。

参考文献:

- [1]张一伟,王章琼,石钊,等.国内外建筑垃圾资源化利用现状及对策分析[J].山西建筑,2022,48(16):173-176,188.
- [2]常纪文,杜根杰,李红科,等.建筑垃圾绿色低碳资源化利用市场空间广阔[J].环境经济,2021(7):38-41.
- [3]郭卫社,王百泉,李沿宗,等.盾渣渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J].隧道建设(中英文),2020,40(08):1101-1112.
- [4]Hossain Md U, Poon C S, Lo I M C, et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 109: 67-77.
- [5]Ding T, Xiao J, Tam V W Y. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China [J]. Waste Management, 2016, 56: 367-375.
- [6]李树逊,罗攀,庞晓明,等.建筑垃圾资源化利用状况及其生命周期评价 [J]. 复旦学报(自然科学版),2013,52(6):817-821,828.
- [7]章玉容.粉煤灰混凝土生命周期环境影响综合评价[D].北京交通大学,2016.
- [8]张智慧,尚春静,钱坤.建筑生命周期碳排放评价[J].建筑经济,2010(02):44-46.
- [9]雷斌,余林杰,张冬,等.基于 LCA 的再生骨料沥青混合料环境效应分析[J].水利规划与设计,2022(9):69-76,100.