

孟加拉国路用砖骨料环境及经济效益分析研究

刘志方,柳刚,徐金龙,张静波*

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430056)

摘要:为应对孟加拉国石料匮乏,依赖进口导致公路建设成本较高的问题,同时基于该国黏土烧结砖产量大、建筑固废量多的现状,研究利用砖渣骨料和再生骨料替代级配碎石对降低公路建设成本具有重要意义。该文采用生命周期分析方法,建立了级配碎石、砖渣骨料和再生骨料的环境影响清单,应用BEPAS模型量化分析了两种替代方案的环境影响,综合评价了环境及经济效益。结果显示:砖渣骨料的环境收益代价比为0.017,而再生骨料为3.762,表明砖渣骨料的环境收益远低于其产生的环境代价,而再生骨料的环境收益明显高于环境代价,环境效益显著。经济效益方面,砖渣骨料替代方案的路面建设成本下降28.40%,而再生骨料成本可进一步降低至10%以下,经济效益更为显著。

关键词:道路工程;黏土烧结砖;砖渣骨料;再生填料;路面底基层;生命周期分析;经济效益;环境效益

中图分类号:U414

文献标志码:A

Environmental and Economic Benefits of Brick Aggregate for Road Applications in Bangladesh

LIU Zhifang, LIU Gang, XU Jinlong, ZHANG Jingbo*

(CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: In response to the shortage of stone materials in Bangladesh, which leads to higher costs for road construction due to reliance on imports, this study investigated the significant potential of utilizing brick slag aggregate and recycled aggregate as substitutes for graded gravel. This approach was particularly relevant given the country's large production of clay-fired bricks and substantial construction waste. Using a life cycle analysis (LCA) method, the study established environmental impact inventories for graded gravel, brick slag aggregate, and recycled aggregate. The BEPAS model was employed to quantitatively analyze the environmental impacts of the two alternative solutions, providing a comprehensive evaluation of their environmental and economic benefits. The results show that the environmental benefit-to-cost ratio for brick slag aggregate is 0.017, while for recycled aggregate it is 3.762. This indicates that the environmental benefits of brick slag aggregate are far lower than the environmental costs incurred, whereas the environmental benefits of recycled aggregate are clearly higher than the associated environmental costs, demonstrating notable environmental advantages. In terms of economic benefits, the use of brick slag aggregate in pavement construction reduces costs by 28.40%, while costs for recycled aggregate can be further decreased to below 10%, delivering even more significant economic benefits.

Keywords: road engineering; clay brick; brick slag aggregate; recycled filler; pavement subbase; life cycle analysis; economic benefit; environmental benefit

0 引言

孟加拉国是共建“一带一路”倡议的重要国家之

一,公路建设活动频繁,需要消耗大量石料。然而孟加拉国石料资源匮乏,所需石料依赖国外进口,导致道路建设成本较高,不利于经济发展。同时,孟加拉

收稿日期:2025-04-08 修回日期:2025-07-09

基金项目:中交第二公路勘察设计研究院有限公司科技专项(编号:KJFZ-2022-001);中交第二公路勘察设计研究院有限公司科技项目(编号:KJFZ-2022-029)

作者简介:刘志方,男,硕士,助理工程师.E-mail:1079051333@qq.com

*通信作者:张静波,男,硕士,正高级工程师.E-mail:zhangjingbo@ccccltd.cn

国盛产黏土烧结砖,高峰时期拥有砖厂超过7 000家,年产量约170亿块,并以每年5%的速度持续增长,成为孟加拉国建筑和道路行业的重要组成部分^[1]。将当地常见的黏土烧结砖破碎加工的砖渣骨料替代级配碎石作为路面底基层填料,可有效缓解石料压力。范学勇等^[2]将砖渣混合料应用在港区重载铺面结构底基层中,分析加州承载比、无侧限抗压强度和干燥收缩等材料性能,符合孟加拉国规范要求。另外,孟加拉国建筑固废中的大量废弃黏土砖也可用于制备路用再生填料^[3]。为提高项目的经济环保性,在公路建设中采用建筑固体废弃砖渣与黏土混合作为换填材料^[4-5]。Liang等^[6]以废弃黏土砖取代水泥稳定碎石中的细骨料,确定了最佳取代率为50%,水泥稳定碎石的7 d无侧限抗压强度达到5.46 MPa;赵曙光等^[7]在高等级公路软土路基处理中应用砖渣骨料,既解决了软土路基施工处理的问题,节约了施工成本,又减少了环境污染,实现了资源循环利用。因此,探究两种路用砖骨料替代级配碎石的经济效益及环境效益,对孟加拉国公路建设具有重要意义。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为一种重要的环境分析工具,它通过对公路建设全生命周期内的资源与能源的流动以及环境排放进行量化分析,在公路工程研究领域得到了广泛应用^[8-9]。李世华等^[10]应用LCA方法编制了干法、湿法两种改性工艺生产的沥青混合料的生命周期清单,并对比分析了两种工艺的环境影响差异;陈诗泉等^[11]基于LCA方法,建立了利用地材及普通混凝土生产工艺的粗骨料UHPC生命周期系统,对比分析了不含粗骨料UHPC预混料的碳排放量;刘曙光等^[12]建立了桥梁全生命周期维护决策的多目标优化模型,分析归纳出桥梁最优维护策略集。建筑固废方面,陈妍希等^[13]通过LCA方法,比较了废弃混凝土采用传统填埋、就地利用和回收再生处理3种处置方式的碳排放量,量化了上海市建筑废弃混凝土再生骨料的总体减碳效益;王婷^[14]研究了深圳市建筑固废中的混凝土、黏土砖、砂浆以及金属的再生利用过程与填埋处理的环境影响,评估了不同处理方式的环境收益或环境代价,为建筑废弃物管理策略的制定提供参考。

建筑环境绩效分析系统(Building Environmental Performance Analysis System, BEPAS)是一种基于LCA框架的工具,其依据不同环境影响类型的社会

支付意愿,以货币的形式量化表征环境影响^[15]。王立^[16]通过BEPAS模型对建筑环境影响进行了归类,并生成了建筑工程的环境影响社会支付意愿值;刘勇超^[17]应用BEPAS评价方法,定量评价了废弃黏土砖在市政道路工程中再生利用的经济效益与环境效益。

在此基础上,本文依托孟加拉达卡市RAD快速路PPP项目,针对级配碎石、砖渣骨料和再生骨料3种路面底基层填料,基于LCA理论,建立生命周期清单,应用BEPAS模型,量化分析了3种填料的环境影响,综合评价其经济效益及环境效益。

1 经济及环境效益分析方法

1.1 生命周期分析

1.1.1 目标与范围

公路工程的生命周期包括原材料、施工、运营和拆除4个阶段,其中原材料阶段是污染物排放的主要阶段^[18]。3种填料应用情景下的施工、运营、拆除阶段的过程较为一致,系统边界的输入、输出的差异较小。因此,本文重点分析了3种路面底基层填料在原材料阶段的环境影响。这些填料的生命周期评价系统边界如图1所示。

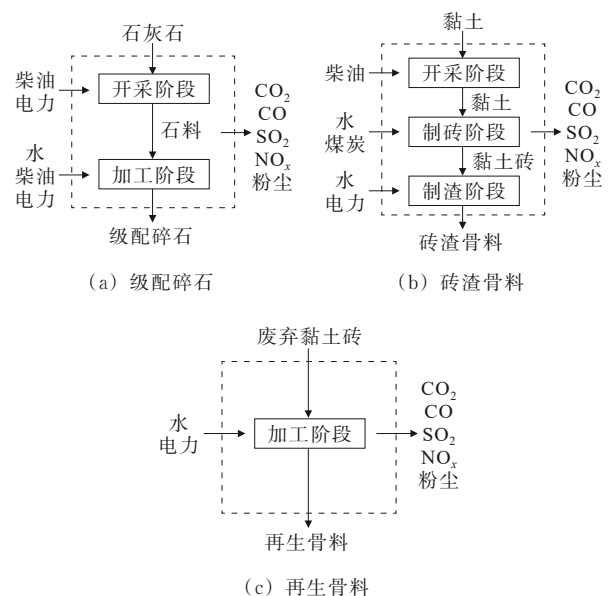


图1 生命周期评价系统边界

Figure 1 Boundary of LCA system

1.1.2 评价功能单元

孟加拉国要求路面结构设计采用美国各州公路运输工作者协会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)

1993版路面结构设计指南^[19],该规范采用累计轴载次数、路面性能服务指数、路面结构数三者关系式进行设计。在AASHTO设计方法中,为使公路在寿命期间提供等效的服务,即累计轴载次数、路面性能服务指数二者保持不变,就要求采用碎石和砖渣的基层填料的路面结构数 S_N 相等。结构数 S_N 的计算公式为:

$$S_N = \sum a_i \cdot D_i \cdot m_i \quad (1)$$

式中: a_i 为层位系数; D_i 为路面结构层厚度; m_i 为排水系数。

层位系数用于度量某种材料作为路面的结构组成部分时,其单位厚度具有的相对功能。该系数与材料的回弹模量存在函数关系。例如:根据参考文献^[20],其粒料底基层的层位系数 a_3 为:

$$a_3 = 0.227 \log E_3 - 0.839 \quad (2)$$

式中: E_3 为粒料基层回弹模量(psi)。

综上,可得:

$$\frac{D_{\text{砖}}}{D_{\text{石}}} = \frac{0.227 \log E_{3\text{石}} - 0.839}{0.227 \log E_{3\text{砖}} - 0.839} \quad (3)$$

式中: $D_{\text{砖}}$ 为砖渣底基层厚度; $D_{\text{石}}$ 为碎石底基层厚度; $E_{3\text{石}}$ 为级配碎石回弹模量; $E_{3\text{砖}}$ 为砖渣骨料回弹模量。

根据现场试验,砖渣骨料回弹模量为110 MPa,级配碎石回弹模量为200 MPa,代入式(3),可得:

$$\frac{D_{\text{砖}}}{D_{\text{石}}} = \frac{0.17}{0.11} \quad (4)$$

根据设计文件,砖渣底基层厚度 $D_{\text{砖}}$ 为25 cm,代入式(4),等效的级配碎石底基层厚度 $D_{\text{石}}$ 为16 cm。以1 km主线新建路面为基本单元,根据设计文件,平均消耗砖渣骨料和再生骨料体积为5 164 m³,消耗级配碎石体积为3 341 m³。

1.2 环境效益分析方法

1.2.1 环境影响类型

在生命周期分析的基础上,归纳出3种填料的主要环境影响类型为资源消耗、能源消耗和生态破坏。资源消耗表现为水资源、石灰石和黏土的消耗;能源消耗表现为煤炭、柴油和电力的消耗。在生态破坏方面,参考通用过程排放清单^[17],结合孟加拉国的主要环境问题^[21],生态破坏以大气环境影响为主,包括气候变化(CO₂、CO)、酸雨(SO₂、NO_x)、雾霾(颗粒物)3种类型。

1.2.2 环境影响权重

基于孟加拉国对各类环境影响的社会支付意愿,应用BEPAS模型,建立基于环境税的环境影响

权重系统,以各种环境影响类型的社会支付意愿为权重指标来表达环境影响值。每类环境影响类型通常由多项指标引起,该环境影响的权重是其包含的所有指标的加权平均值。权重因子的计算公式为:

$$w_i = \sum_j (e_{ij} \cdot c_{ij}) \quad (i, j=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

式中: w_i 为环境影响的权重因子; e_{ij} 为指标的影响潜力系数; c_{ij} 为指标的货币因子,即该指标的社会支付意愿(排污费、资源价格等)。

污染物类型指标的影响潜力系数 e_{ij} 值与污染物的污染能力和排放总量相关,计算公式为:

$$e_{ij} = \frac{f_i \cdot a_j}{\sum_j (f_i \cdot a_j)} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

式中: f_i 为单位污染物的效应当量因子; a_j 为污染物的年平均排放量。

孟加拉国国情较为特殊,水资源价格与用户的社会阶层相关^[22]。结合当地特殊的收费机制,水资源指标的权重因子为:

$$w_i = \sum_j (e_i \cdot c_i) \quad (7)$$

式中: w_i 为水资源的权重因子(BDT/m³); e_i 为社会阶层 i 的平均水费影响潜力系数; c_i 为社会阶层 i 的平均水费(BDT/m³)。

影响潜力系数 e_{ij} 值与污染物的人口占比和平均占比相关,计算公式如下:

$$e_i = \frac{p_i \cdot c_i}{\sum_i (p_i \cdot c_i)} \quad (8)$$

式中: p_i 为社会阶层 i 的人口占比(%); c_i 为社会阶层 i 的平均水费(BDT/m³)。

黏土和石灰石指标以孟加拉国资源税额为社会支付意愿,即货币因子。经当地调研,孟加拉黏土的平均价格为125 BDT/m³,税率为5%,则货币因子为5.95 BDT/m³;进口石灰石的平均价格为445.26 BDT/m³,税率为5%,则货币因子为21.06 BDT/m³。黏土和石灰石的环境影响相互独立,影响潜力系数均为1.00,则黏土和石灰石指标的权重因子分别为5.95 BDT/m³和21.06 BDT/m³。另外,煤炭、柴油的权重因子以孟加拉国对煤炭和柴油征收税额作为社会支付意愿。电力用户以缴纳电费作为社会支付意愿。

综上所述,3种填料的环境影响类型及指标权重因子如表1所示。

表1 3种填料的环境影响类型及权重因子

Table 1 Environmental impact types and weight factors of three types of fillers

环境影响类型	指标	单位	权重因子
资源消耗	石灰石		5.95
	黏土	BDT/m ³	21.06
	水资源		19.23
能源消耗	煤炭		6.24×10 ⁻⁷
	柴油	BDT/MJ	1.86×10 ⁻⁴
	电力		1.96
生态破坏	气候		
	CO ₂		3.29
	CO		0.01
	SO ₂	BDT/kg	8.00
	NO _x		2.29
雾霾	颗粒物		3.05

1.2.3 环境效益评价

基于3种填料的环境影响类型及指标权重因子,集合生命周期清单分析结果,量化评价级配碎石、砖渣骨料、再生骨料的环境影响。设置环境收益代价比 e 作为评价指标。

e 为砖渣骨料或再生骨料的环境收益与环境代价的比值,即:

$$e = \frac{\text{环境收益}}{\text{环境代价}} \quad (9)$$

$e > 1$,说明环境收益可以弥补产生的环境代价,为环境做出了积极的贡献;如果 $e = 1$,说明环境收益与环境代价相抵,没有产生环境效益;如果 $e < 1$,说明环境收益不足以弥补环境代价,对环境产生了不利影响。

1.3 经济效益分析方法

经调研,孟加拉国的进口石料的平均进口价格为11 826 BDT/m³;孟加拉国的黏土砖平均价格为4 943 BDT/m³,黏土砖破碎成砖渣的价格为536 BDT/m³,合计为5 479 BDT/m³。以此为基础计算出级配碎石、砖渣骨料和再生骨料3种路面底基层填料在1 km主线新建路面的经济成本。

2 结果与讨论

2.1 环境影响清单

级配碎石、砖渣骨料和再生骨料的环境影响清单及各环境指标影响值如表2所示。在1 km主线新建路面中,砖渣骨料的环境影响值为7.17×10⁷ BDT,相比级配碎石增加了7.04×10⁷ BDT;再生骨料的环

境影响值为-2.86×10⁴ BDT,相比级配碎石减少了1.27×10⁶ BDT。砖渣骨料替代情景下,资源消耗环境影响减小了38.98%,但是黏土砖生产过程需要燃烧大量煤炭维持高温环境,能耗急剧升高,且燃烧过程产生大量的温室气体(CO₂)和污染物(CO、SO₂、NO_x、颗粒物)排放,加剧气候变化、酸雨、雾霾等一系列环境问题。再生骨料替代情景下,资源消耗环境影响降低了52.31%,能源消耗和生态破坏的环境影响值均小于0,有效节能减排,缓解气候变化压力,降低酸雨、雾霾等环境风险,有效改善孟加拉国当地的大气环境质量。因此,砖渣骨料替代方案的资源消耗降低但能耗提高,环境问题加剧,环境影响显著增加;再生骨料替代方案可有效降低资源和能源的消耗,减少环境污染,总体上改善当地生态环境。

表2 1 km 主线新建路面3种填料的环境影响值

Table 2 Environmental impact values of three types of fillers for 1 km newly constructed mainline pavement

类型	指标	环境影响值/BDT		
		级配碎石	砖渣骨料	再生骨料
资源消耗	石灰石	7.39×10 ⁴	0.00	0.00
	黏土	0.00	3.57×10 ⁴	0.00
	水资源	4.34×10 ⁵	2.75×10 ⁵	2.42×10 ⁵
	合计	5.08×10 ⁵	3.10×10 ⁵	2.42×10 ⁵
能源消耗	煤炭	0.00	6.17×10 ⁷	0.00
	柴油	2.12×10 ⁵	8.18×10 ⁴	-1.70×10 ⁵
	电力	1.41×10 ⁵	7.06×10 ⁴	7.06×10 ⁴
	合计	3.53×10 ⁵	6.18×10 ⁷	-9.99×10 ⁴
生态破坏	CO ₂	2.24×10 ⁵	8.60×10 ⁶	-6.07×10 ⁴
	CO	1.88×10 ²	1.36×10 ⁴	2.54×10 ³
	气候			
	变化	2.24×10 ⁵	8.62×10 ⁶	-5.82×10 ⁴
	SO ₂	1.44×10 ⁵	3.24×10 ⁵	-1.14×10 ⁵
	NO _x	1.28×10 ³	1.58×10 ⁵	2.51×10 ³
	酸雨	1.45×10 ⁵	4.82×10 ⁵	-1.12×10 ⁵
	颗粒物	1.43×10 ⁴	4.23×10 ⁵	-7.92×10 ²
合计	3.84×10 ⁵	9.52×10 ⁶	-1.71×10 ⁵	
合计		1.24×10 ⁶	7.17×10 ⁷	-2.86×10 ⁴

2.2 环境效益

砖渣骨料和再生骨料替代级配碎石的 e 如表3所示。砖渣骨料的 e 仅为0.017,说明砖渣骨料的环境收益远低于其产生的环境代价,总体上对环境产生了不利影响。再生骨料的 e 为3.762,表示再生骨料

的环境收益明显高于环境代价,对孟加拉国环境质量产生了积极的影响。

表3 两种砖渣填料环境收益代价比

Table 3 Environmental benefit-to-cost ratio of two brick slag fillers

骨料类型	环境代价/ BDT	环境收益/ BDT	环境收益 代价比
砖渣骨料	7.17×10^7	1.24×10^6	0.017
再生骨料	4.61×10^5	1.73×10^6	3.762

2.3 经济效益

级配碎石、砖渣骨料和再生骨料在1 km主线新建路面的经济成本如表4所示。砖渣骨料的成本为 2.83×10^7 BDT,相比级配碎石,平均每公里可节省经济成本约 1.12×10^7 BDT,减少28.40%;再生骨料的成本为 2.77×10^6 BDT,相比级配碎石,平均每公里可节省经济成本约 3.67×10^7 BDT,减少92.99%。因此,砖渣骨料替代级配碎石作为路面基层填料,可有效降低建设成本,经济效益显著;而应用再生骨料,道路建设成本可进一步降低,经济效益相比砖渣骨料更为显著。

表4 3种填料在1 km主线新建路面的经济成本

Table 4 Economic costs of three types of fillers for 1 km of newly constructed mainline pavement

填料类型	工程用量/ m^3	价格/ (BDT $\cdot m^{-3}$)	经济成本/ BDT
级配碎石	3 341	11 826	39.515×10^6
砖渣骨料	5 164	5 479	28.293×10^6
再生骨料	5 164	536	2.768×10^6

3 结论

(1) 环境效益方面,砖渣骨料替代方案的总体资源消耗下降,但煤炭的大量燃烧,导致能耗增加,且排放大量的大气污染物和温室气体,加剧气候变化和大气污染,环境收益代价比小于1,环境效益不足。再生骨料替代方案的资源消耗大幅减少,总体能耗 <0 ,且有效减少温室气体和大气污染物的排放,推动孟加拉国公路的绿色低碳建设。

(2) 经济效益方面,砖渣骨料替代级配碎石作为路面基层填料,在1 km主线新建路面中的建设成本下降28.40%,而再生骨料替代级配碎石的经济成本进一步降低至10%以下,经济效益更为显著。

综上所述,替代级配碎石时,砖渣骨料虽然节

省了工程建设成本,但黏土砖生产过程的能耗较高,大气污染和温室效应显著;再生骨料在降低公路建设成本的同时,有效降低了资源和能源的消耗,减少了污染物和碳排放,改善了当地环境,缓解了气候压力,推动孟加拉国经济发展与环境保护的协同并进。

参考文献:

References:

- [1] 许彦明,鲁伟. 孟加拉国砖瓦市场分析[J]. 砖瓦世界, 2016(2): 17-28, 58.
XU Yanming, LU Wei. Analysis of brick and tile market in Bangladesh[J]. Brick & Tile World, 2016(2): 17-28, 58.
- [2] 范学勇,马强,邓雪莹. 基于孟加拉国规范砖渣混合料在港区重载铺面结构中的应用[J]. 水运工程, 2024(8): 301-306.
FAN Xueyong, MA Qiang, DENG Xueying. Application of brick slag mixture in heavy duty pavement structure based on Bangladesh standard[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(8): 301-306.
- [3] ALAM K. An economic analysis of a public-private-community partnership: The case of solid waste management in Dhaka, Bangladesh[J]. World Review of Science, Technology and Sustainable Development, 2011, 8(2/3/4): 166.
- [4] 袁喜魁,杨皓天,李雨润. 砖渣土与土工格栅界面作用力学特性研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 170-174.
YUAN Xikui, YANG Haotian, LI Yurun. Study on mechanical properties of interfacial interaction between brick slag soil and geogrid[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 170-174.
- [5] 袁开新,何永健,张来君,等. 地聚合物稳定建筑固废再生集料力学特性研究[J]. 中外公路, 2024, 44(6): 75-89.
YUAN Kaixin, HE Yongjian, ZHANG Laijun, et al. Mechanical properties of geopolymer-stabilized recycled aggregates from construction solid wastes[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(6): 75-89.
- [6] LIANG C Y, WANG Y, SONG W Z, et al. Potential activity of recycled clay brick in cement stabilized subbase[J]. Applied Sciences, 2019, 9(23): 5208.
- [7] 赵曙光,李桂花,王坤. 城市建筑砖渣在高等级公路软基处理中的应用[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(8): 163-164.
ZHAO Shuguang, LI Guihua, WANG Kun. Application of urban building brick dregs in soft foundation treatment of high grade highway[J]. Building Technique Development, 2019, 46(8): 163-164.
- [8] 张倩,徐剑,张金喜. 路面工程生命周期评价(LCA)方法应用研究[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 346-350.
ZHANG Qian, XU Jian, ZHANG Jinxi. Study on the application of life cycle assessment (LCA) method in pavement engineering[J]. Journal of China & Foreign

- Highway, 2015, 35(5): 346-350.
- [9] 游生洁, 胡永刚, 刘信所, 等. 基于BIM的路面LCCA与LCA方法研究综述[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 85-94, 103.
YOU Shengjie, HU Yonggang, LIU Xinsuo, et al. Review on LCCA and LCA methods for pavement based on BIM[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3): 85-94, 103.
- [10] 李世华, 白玉铎, 唐国奇. 基于LCA的干法湿法SBS改性沥青工艺技术评估分析[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 221-225.
LI Shihua, BAI Yuduo, TANG Guoqi. Evaluation and analysis of dry wet SBS modified asphalt technology based on LCA[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 221-225.
- [11] 陈诗泉, 徐英喧, 田世宽. 基于地材及普通混凝土生产工艺的粗骨料UHPC碳排放分析[J]. 公路, 2025, 70(4): 384-389.
CHEN Shiquan, XU Yingxuan, TIAN Shikuan. Carbon emission analysis of coarse aggregate UHPC based on ground materials and ordinary concrete production technology[J]. Highway, 2025, 70(4): 384-389.
- [12] 刘曙光, 刘军, 刘咏华, 等. 基于LCA和LCC的桥梁全生命周期维护决策优化[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 124-130.
LIU Shuguang, LIU Jun, LIU Yonghua, et al. Optimization of bridge life cycle maintenance decision based on LCA and LCC[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 124-130.
- [13] 陈妍希, 黄蓓佳, 晏华, 等. 上海市建筑废弃混凝土回收利用碳效益分析[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(3): 102-105.
CHEN Yanxi, HUANG Beijia, YAN Hua, et al. Carbon benefit analysis of recycled utilization of construction waste concrete in Shanghai[J]. New Building Materials, 2025, 52(3): 102-105.
- [14] 王婷. 基于LCA的拆除建筑废弃物处理处置的环境影响评价[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
WANG Ting. Environmental impact assessment of demolition construction waste treatment and disposal based on LCA[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
- [15] 王秦裕, 黄蓓佳, 王钰越, 等. 生命周期视角下中国环境影响货币化方法构建及其应用[J]. 环境工程学报, 2025, 19(10): 2671-2682.
WANG Qinyu, HUANG Beijia, WANG Yuyue, et al. Construction and application of monetization method of environmental impact in China from the perspective of life cycle[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(10): 2671-2682.
- [16] 王立. 建筑工程可持续性评价信息系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
WANG Li. Research on information system for sustainability assessment of building project[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [17] 刘勇超. 再生填料在市政道路的应用研究及生命周期评价[D]. 南京: 东南大学, 2020.
LIU Yongchao. Application research of recycled fillers in municipal roads and life cycle assessment[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [18] HAN Y Z, LI H, LIU J W, et al. Life cycle carbon emissions from road infrastructure in China: A region-level analysis[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 115: 103581.
- [19] 肖将. 美国AASHTO柔性路面结构设计方法在孟加拉某项目中的应用[J]. 汽车画刊, 2024, 12: 47-49.
XIAO Jiang. Application of flexible pavement structure design method of AASHTO in a project in Bangladesh[J]. Auto Bild, 2024, 12: 47-49.
- [20] 尤鸿波, 姚永丁, 刘长宝, 等. AASHTO柔性路面结构设计方法及应用[J]. 工程建设, 2023, 55(12): 45-49.
YOU Hongbo, YAO Yongding, LIU Changbao, et al. AASHTO flexible pavement design methodology and its application[J]. Engineering Construction, 2023, 55(12): 45-49.
- [21] RAHMAN M M, MAHAMUD S, THURSTON G D. Recent spatial gradients and time trends in Dhaka, Bangladesh, air pollution and their human health implications[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019, 69(4): 478-501.
- [22] SHUVO R M, CHOWDHURY R R, CHAKROBORTY S, et al. Geospatially informed water pricing for sustainability: A mixed methods approach to the increasing block tariff model for groundwater management in arid regions of northwest Bangladesh[J]. Water, 2024, 16(22): 3298.