

基于确定性的桥梁环境影响中点模型评价

杜攀,张元恒,甘又月,吴雨航,曾菲圆

(成都市市政工程设计研究院有限公司,四川 成都 610023)

摘要:为研究桥梁结构生命周期的环境影响,基于生命周期评价(LCA)方法选取了全球增温潜势(GWP)、初级能源消耗(PED)、非生物资源消耗潜值(ADP)、水资源消耗(WU)、酸化潜值(AP)、富营养化潜值(EP)、可吸入无机物(RI)、消耗臭氧潜值(ODP)、臭氧合成(POFP)等9类环境影响因素,建立基于确定性的桥梁全生命周期环境影响中点模型,并选取1座典型桥梁进行案例分析,研究桥梁在生命周期内基于中点模型的环境影响。结果表明:采用不同建材的桥梁环境影响差异较大,其中混凝土、钢材、沥青等3类建材环境影响最大;在桥梁各生命周期阶段对环境产生的影响不一,其中建筑材料的生产以及桥梁现场施工过程对环境的影响最大,其他阶段环境影响相对较少。

关键词:桥梁;生命周期评价;环境影响;中点模型

中图分类号:U442

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)09-0074-04

0 引言

根据交通部《2019年交通运输行业发展统计公报》,截至2019年末,全国公路桥梁总数达87.83万座,总长达6063.46万m^[1]。桥梁作为重要交通基础设施,与可持续发展密切相关,在其建设及运营中不仅会消耗大量的能源和资源,而且CO₂等温室气体以及污染物的排放对自然环境的影响也较为显著。

研究桥梁工程领域的可持续发展问题,非常重要。特别是对土木工程结构从材料开采、运输,到建造、运营,直至废弃处理的整个生命周期过程中的资源消耗、CO₂等温室气体以及污染物排放进行能量化衡量,以便制定科学合理、促进可持续发展的对策^[2]。这对完善我国碳排放评价理论体系具有重要意义。

目前,国内外学者针对桥梁工程生命周期的环境影响进行了较多研究。刘沐宇等^[3]对桥梁生命周期的环境影响和碳排放进行了研究;杨朋超^[4]针对桥梁在运营维护阶段采用的加固方案对环境的影响进行了评价;徐双^[5]针对不同建筑材料桥梁的生命周期碳排放进行了研究;谭荣平^[6]分析了公路桥梁建设阶段的碳排放。

然而,对桥梁生命周期的环境影响研究还处于探索阶段,尚无成熟的计算方法。因此,有必要对桥

梁生命周期的环境影响进行系统分析,发展相应的定量计算方法。

1 LCA方法概述

LCA(生命周期评价)方法是目前唯一被国际标准化认定,基于环境影响评价的分析工具。生命周期评价法是系统地定量描述研究对象在整个生命周期中消耗的能源与资源,并评价其环境影响的方法^[7]。

LCA法分为4个步骤:目标和范围定义、单元过程数据收集和计算分析、环境影响评价、结果分析。其中环境影响评价的方法有中点模型和终点模型。中点模型侧重于环境的影响,评价指标主要包含GWP(全球增温潜势)、PED(初级能源消耗)、ADP(非生物资源消耗潜值)、WU(水资源消耗)、AP(酸化潜值)、EP(富营养化潜值)、RI(可吸入无机物)、ODP(消耗臭氧潜值)、POFP(臭氧合成)这9种因素;终点模型评价指标主要集中于对人的健康、生态系统质量、资源消耗这3种影响类型。中点模型偏重于研究环境影响及其机理,终点模型则侧重于分析环境影响的后果^[8]。本文主要研究中点模型。

2 基于确定性的桥梁生命周期评价方法

2.1 目标和范围的定义

模型建立的目标是为了得到桥梁在生命周期内产生的环境影响的量化结果,从而为桥梁的建设提供支持。

收稿日期:2023-08-11

作者简介:杜攀(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

根据 LCA 理论框架,需要先对桥梁的边界和研究范围进行确定,包括桥梁工程从“摇篮”到“坟墓”各个过程中的输入和输出数据,进而进行量化分析,以达到环境影响评价的目标^[8]。

桥梁整个生命周期主要包括建筑材料生产、现场施工、运维、拆除回收 4 个阶段。

桥梁生命周期过程树见图 1。

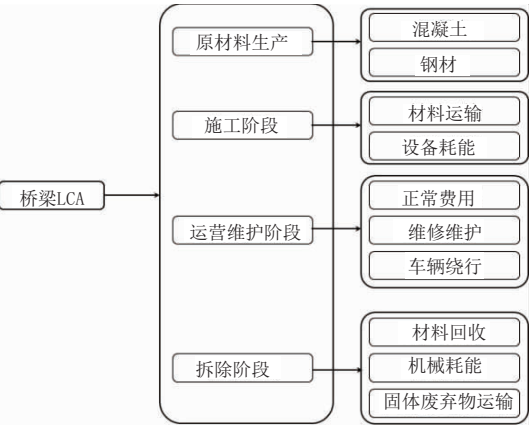


图 1 桥梁生命周期过程树

2.2 数据清单分析

生命周期数据清单分析是对桥梁在全部生命周期内能源、资源的消耗量和污染物排放量进行汇编、整理的过程。

对于建筑材料在生产阶段的影响评价主要考虑建筑材料在生产和加工过程中消耗的资源、能源以及污染物的排放。目前,混凝土和钢材是建设桥梁的 2 种最主要的建筑材料。在建造施工过程中,主要是施工设备、机械等消耗电能、柴油、水等造成的环境影响;在运维阶段则存在诸多不确定性,因此该阶段的清单数据需根据运营维护周期进行预估^[9]。

2.3 影响评价

对桥梁在建筑材料生产、施工和运维阶段消耗的资源、能源和主要排放物进行数据收集和整理,并按照 9 种环境影响因素进行分类和特征化^[10]。

环境影响物质分类和特征化见表 1。

根据桥梁常用建材资源、能源的消耗及污染物排放数据清单,对相关数据进行特征化计算,可得到混凝土、钢材、汽油、柴油、电、自来水等的特征化环境影响结果,从而可以得到桥梁在各个阶段的环境影响。

2.4 结果解释

通过对桥梁环境影响的定量分析,可以得到桥梁在整个生命周期内的环境影响评价报告。报告主要有 4 部分:各个阶段对环境产生的主要影响、各类

表 1 环境影响物质分类和特征化

编号	环境影响类型指标	特征化当量	环境影响物质
1	全球增温潜势(GWP)	CO ₂ e/kg CO ₂ eq	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, …
2	初级能源消耗(PED)	MJ	硬煤、褐煤、天然气, …
3	非生物资源消耗潜值(ADP)	kg Sb eq	铁、锰、铜, …
4	水资源消耗(WU)	kg	淡水、地表水、地下水, …
5	酸化潜值(AP)	kg SO ₂ eq	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , …
6	富营养化潜值(EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq	NH ₃ , NH ₄ -N, COD, …
7	可吸入无机物(RI)	kg PM _{2.5} eq	CO, PM ₁₀ , PM _{2.5} , …
8	消耗臭氧潜能值(ODP)	kg CFC-11 eq	CCl ₄ , C ₂ H ₃ Cl ₃ , CH ₃ Br, …
9	臭氧合成(POFP)	kg NMVOC eq	C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , …

环境影响因素的主要占比、评估与评价、减少桥梁对环境影响的措施和建议。

3 计算案例

3.1 目的和范围确定

3.1.1 工程概况

本案例以成都金牛区新泉路跨府河桥工程为研究对象。跨府河桥结构设计年限为 50 a, 桥跨总长 50 m, 桥宽 20 m, 桥面布置为双向 2 车道 + 两侧人行道。上部结构为 2 跨 25 m 简支小箱梁;下部结构桥台为桩接盖梁, 桥墩为盖梁柱式墩;附属结构桥面铺装为 10 cm 沥青 + 8 cm 混凝土调平层, 人行道包括 40 cm 路缘石、人行道板和人行栏杆。

3.1.2 研究目的

通过建立本桥生命周期内各个阶段环境影响模型, 并对其进行量化分析, 评价各阶段的环境影响, 最后提出建议。

3.1.3 边界和范围

该桥整个生命周期过程考虑材料生产、施工、运维、拆除 4 个阶段。其中原材料生产阶段包括混凝土、钢材、砂石、水等建材在其生产阶段的环境影响; 建材运输及机械设备产生的影响均在施工阶段分析; 在运营维护阶段考虑的环境影响, 主要包括路灯照明的能耗、日常维护、桥面铺装整治、结构加固等建材消耗及机械施工对环境的影响; 拆除阶段考虑的环境影响主要包括桥梁拆除机械消耗的能源、固体废弃物运输和处理废弃物消耗的能源、污染物排放。

3.1.4 基本假定

根据相关规定, 当某项环境影响排放量小于总

量的1%时,可忽略该排放的影响。由于桥梁构件较多、大小不一,本次清单数据输入暂不考虑预应力锚具、橡胶减震块、伸缩缝、排水管等微小构件,暂不考虑粉尘和噪声排放影响。

3.2 数据清单分析

数据清单分析依靠于案例桥梁主要工程数量表,对建筑材料以及能源消耗量进行整理、分析,进而得到桥梁工程在整个生命周期内的建筑材料、资源、能源消耗的清单和污染物的排放清单。

3.2.1 原材料生产阶段

根据桥梁设计图,得到桥梁主要工程数量表,见表2。

表2 案例桥梁主要工程数量表	
材料	数量
钢材 /kg	16 687.4
C20 混凝土 /m ³	7
合格土 /t	7 151
C35 混凝土 /m ³	588.3
HPB300 钢筋 /kg	27 343.7
防水 /m ²	1 000
C50 混凝土 /m ³	574.7
HRB400 钢筋 /kg	160 406.7
钢绞线 /kg	18 529
波纹管 /kg	1 661
沥青 /kg	236 250
砂卵石 /t	1 801

3.2.2 施工阶段

依据工程概预算表得到施工阶段材料运输和资源消耗清单,见表3。

表3 施工阶段材料和资源清单表	
材料和资源	数量
建材(运输)/(t·km)	10 000
乙炔 /kg	54.054
电力 /(kW·h)	10 000
模板(木)/m ³	156.9
机械柴油 /kg	20 533
梁体(运输)/(t·km)	12 000
水 /m ³	2 147.6
汽油 /kg	229.8
煤 /kg	864.8
模板(钢)/kg	35.1

3.2.3 运营维护阶段

根据桥梁运营期间维护、加固方案,得到该桥运营维护阶段材料和资源清单,见表4。

表4 运营维护阶段材料和资源清单表	
材料和资源	数量
路面整治(沥青)/t	500
加固(钢板)/kg	10 000
加固(钢筋)/kg	4 000
加固、路面整治机械(柴油)/kg	10 000
货物运输 /(t·km)	5 000
加固(混凝土)/m ³	40
照明(电力)/(kW·h)	100 000

3.3 桥梁环境影响中点模型 LCA 结果

3.3.1 LCA 结果

依据中点模型计算方法,可得案例桥梁全生命周期各阶段环境影响潜值,结果见表5。

表5 案例桥梁 LCA 结果		
环境影响类型	影响类型和单位	LCA 结果
GWP	kg CO ₂ eq	1.69 × 10 ⁶
PED	MJ	1.85 × 10 ⁷
ADP	kg antimony eq	8.99
WU	kg	7.53 × 10 ⁶
AP	kg SO ₂ eq	1.07 × 10 ⁴
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq	1 461.66
RI	kg PM _{2.5} eq	3 357.85
ODP	kg CFC-11 eq	0.04
POFP	kg NMVOC eq	3 616.78

桥梁建设需要耗费大量建材,不同建材的环境影响差异也比较大。本桥在整个生命周期内,环境影响占比最大的几类建材的环境影响潜值如表6所示。

表6 新泉路跨府河桥建材环境影响潜值			
名称	混凝土	钢材	沥青
GWP(kg CO ₂ eq)	2.25 × 10 ⁵	5.76 × 10 ⁵	3.85 × 10 ⁵
PED(MJ)	3.00 × 10 ⁶	8.53 × 10 ⁶	9.40 × 10 ⁵
ADP(kg antimony eq)	3.59 × 10 ⁻¹	6.32 × 10 ⁰	2.25 × 10 ⁻¹
WU(kg)	7.92 × 10 ⁵	3.98 × 10 ⁶	9.21 × 10 ⁵
AP(kg SO ₂ eq)	1.18 × 10 ³	2.38 × 10 ³	3.32 × 10 ³
EP(kg PO ₄ ³⁻ eq)	1.61 × 10 ²	2.24 × 10 ²	4.63 × 10 ²
RI(kg PM _{2.5} eq)	4.49 × 10 ²	1.43 × 10 ³	5.06 × 10 ²
ODP(kg CFC-11 eq)	6.57 × 10 ⁻³	5.35 × 10 ⁻³	3.06 × 10 ⁻³
POFP(kg NMVOC eq)	1.35 × 10 ³	8.49 × 10 ²	8.55 × 10 ²

3.3.2 过程累积贡献分析

过程累积贡献是该过程中的直接贡献与其所有上游过程中的贡献的累加值。根据分析结果,得到新泉路跨府河桥各个阶段 LCA 累积贡献结果,见表 7。

表 7 新泉路跨府河桥 LCA 累积贡献结果

名称	生产施工阶段	使用阶段	废弃阶段
GWP(kg CO ₂ eq)	1.22×10^6	4.33×10^5	3.57×10^4
PED(MJ)	1.52×10^7	2.88×10^6	4.14×10^5
ADP(kg antimony eq)	8.05×10^0	7.96×10^{-1}	1.46×10^{-1}
WU(kg)	6.24×10^6	1.25×10^6	3.58×10^4
AP(kg SO ₂ eq)	6.54×10^3	3.53×10^3	6.06×10^2
EP(kg PO ₄ ³⁻ eq)	8.84×10^2	4.74×10^2	1.03×10^2
RI(kg PM _{2.5} eq)	2.51×10^3	7.20×10^2	1.30×10^2
ODP(kg CFC-11 eq)	2.48×10^{-2}	7.25×10^{-3}	3.69×10^{-3}
POFP(kg NMVOC eq)	2.75×10^3	7.88×10^2	8.11×10

3.4 结果分析

通过分析可以得出,在整个生命周期中,各类环境影响潜值能级不尽相同,不同建材环境影响差异较大,在生命周期各阶段环境影响也有较大的区别。其中在气体排放物层面,以 CO₂ 为当量的 GWP 影响潜值(温室气体排放)占比最大,达到了 98.9%。

针对桥梁各类使用建材的环境影响,占比前三的为混凝土、钢材和沥青。以 GWP 影响潜值为例,三者总量占比达到了 70.2%,原因主要是这几类材料使用量较大,同时这几类材料排放因子较大,在生产阶段的能源消耗和环境污染排放物较多。

在桥梁整个生命周期中,桥梁建材生产、现场施工阶段产生的环境影响占比最大。以 GWP 影响潜值为例,其占比达到 72.2%,原因是桥梁建筑材料在生产 and 现场施工阶段需要消耗大量的上级原材料和能源,并排放大量污染物,同时上级原材料在生产过程中又需要消耗能源并排放污染物,且这些建筑材料的用量都较大;相比较之下,桥梁废弃阶段的环境影响要小很多,原因一方面是该阶段建材使用量很少,主要是机械破除、运输的耗能带来的环境影响;另一方面是本研究暂未考虑建筑废弃物、建渣材料降解过程中对环境带来的影响。

4 结 语

(1)对桥梁工程生命周期中点模型理论进行了详尽分析,并采用了一个实际工程案例建立清单分析模型,对桥梁全生命周期 LCA 环境影响进行了分析评价。结果表明,桥梁工程建造采用的建材不同,其环境影响差异也较大。

(2)生命周期的不同阶段对环境的影响有所不同。其中在建筑材料生产和建造施工阶段能源、资源的消耗最大,对生态系统造成的破坏影响也最大;桥梁废弃拆除阶段使用能源、资源相对较少,在各阶段的环境影响中占比最小。

(3)在桥梁建设过程中,应积极采取相应的减排措施,例如减少高能耗、高排放物建筑材料的使用量,多利用可回收、可持续使用的建筑材料。

(4)在施工过程中,应提高施工质量和效率,减少施工过程中的资源浪费以及后期的维护工程量。通过针对性的措施,可以大大减少桥梁建设对环境的影响,推动加快实现“双碳”战略目标,促进人与自然和谐共生。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.2019 年交通运输行业发展统计公报 EB/OL[2020-05-12]2020-07-011http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content5510817.htm.

[2] 王元丰.土木工程结构生命周期环境影响评价[M].北京:科学出版社,2022.

[3] 刘沐宇,高宏伟,林驰.基于生命周期评价的桥梁环境影响对比分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(6):108-111.

[4] 杨朋超.考虑不同加固方法的桥梁全生命周期环境影响评价[D].北京:北京交通大学,2013.

[5] 徐双.不同结构材料的桥梁生命周期碳排放研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[6] 谭荣平.公路桥梁建设阶段碳排放分析[D].长沙:长沙理工大学,2012.

[7] 王一帆.公路桥梁生命周期环境影响评价分析——以广东某高速公路桥梁为例[D].广州:华南理工大学,2017.

[8] 庞博.基于 LCA 的预应力钢筋混凝土连续刚构桥的环境影响分析[D].北京:北京交通大学,2011.

[9] 王龙龙.基于中点破坏模型的本土化桥梁全生命周期环境影响评价[D].北京:北京交通大学,2014.

[10] 赵鑫.波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的全生命周期环境影响评价[D].成都:西南交通大学,2016.