

# 混凝土桥梁结构全寿命可持续性成本量化模型

吴柯娴<sup>1,2,3</sup>, 金伟良<sup>1</sup>, 何晓宇<sup>2,3</sup>, 黄跃林<sup>4</sup>, 范雪华<sup>4</sup>

(1. 浙江大学 结构工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030;  
3. 综合交通运输理论交通运输行业重点实验室, 浙江 杭州 310006; 4. 嘉兴滨海控股集团有限公司, 浙江 嘉兴 374200)

**摘要:** 为了在规划设计阶段量化地考虑工程结构的环境和社会影响, 提出一种综合性的全寿命可持续性成本指标框架和计算模型。在环境影响方面, 将空气、水体和土壤污染物的防治成本作为量化指标, 提出工程活动、交通绕行和交通拥堵引起的环境成本模型, 汇总常见建筑材料和燃料动力的环境成本费率。在社会影响方面, 提出社会成本量化模型, 涵盖施工和交通安全、客货运输、区域经济、居住环境和公共服务等方面。以沿海桥梁维护方案比选为例, 说明全寿命可持续性成本的参数取值和计算方法。结果表明, 对于占用车道的桥梁维修方案, 环境和社会成本之和远超直接经济成本, 而不占用车道的维护方案的环境和社会成本很少, 其中环氧涂层方案的可持续性优于电化学除氯方案。

**关键词:** 混凝土桥梁结构; 可持续性; 经济成本; 环境成本; 社会成本

中图分类号: TU 201

文献标志码: A

## Quantitative Models for Life-Cycle Sustainability Cost of Concrete Bridge Structures

WU Kexian<sup>1,2,3</sup>, JIN Weiliang<sup>1</sup>, HE Xiaoyu<sup>2,3</sup>, HUANG Yuelin<sup>4</sup>, FAN Xuehua<sup>4</sup>

(1. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 3. Key Laboratory of Integrated Transportation Theory and Transportation Industry, Hangzhou 310006, China; 4. Jiaxing Binhai Holding Group Co., Ltd., Jiaxing 374200, China)

**Abstract:** To quantitatively consider the environmental and social impacts of engineering structures at the planning and design stage, a comprehensive life-cycle sustainability cost framework and corresponding

computational models are proposed. In terms of environmental impacts, the costs of preventing and controlling air, water, and soil pollutants are used as quantitative indicators, the environmental costs arising from engineering activities, traffic detours and congestion are modelled, and the environmental cost rates of common construction materials and fuels are summarized. In terms of social impacts, social cost calculation models are proposed, covering construction and traffic safety, passenger and freight transportation, regional economy, residential environment, and public services. The parameter values and calculation methods for life-cycle sustainability costs are illustrated with the comparison and selection of maintenance schemes for coastal bridges. For bridge maintenance schemes that occupy lanes, the sum of environmental and social costs far exceeds the direct economic costs, while maintenance schemes that do not occupy lanes have fewer environmental and social costs. Furthermore, among these maintenance schemes, the sustainability of the epoxy coating scheme is superior to that of the electrochemical chloride extraction scheme.

**Keywords:** concrete bridge structures; sustainability; economic cost; environmental cost; social cost

工程结构的全寿命可持续性设计要求在选址规划、设计施工、运营维护、加固改造直至拆除过程中以结构的可持续性为导向, 重点针对工程活动引起的经济、环境和社会影响进行设计、评估、优化与决策<sup>[1]</sup>。目前, 以全寿命成本(life-cycle cost, LCC)为代表的经济影响评估方法发展成熟, 用于确定结构在全寿命周期中由项目业主承担的总成本, 帮助决

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51820105012); 国家自然科学基金面上项目(52178176); 浙江省交通运输厅科技计划(2023007)

第一作者: 吴柯娴, 工学博士, 主要研究方向为结构全寿命设计理论、可持续性评估及优化。

E-mail: wukexianzju@163.com

通信作者: 金伟良, 工学博士, 教授, 主要研究方向为结构全寿命设计理论、结构耐久性和长期性能。

E-mail: jinwl@zju.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

策者选择成本最低的设计方案。但随着资源、环境、人口问题的日益凸显,环境方面的全寿命评估(life-cycle assessment, LCA)和社会方面的社会全寿命评估(social-life cycle assessment, S-LCA)逐渐获得人们的关注。2011年联合国环境署环境毒理学和化学学会提出了全寿命可持续性评估(life cycle sustainability assessment, LCSA)概念性指南<sup>[2]</sup>,建议对产品全寿命周期中的经济、环境和社会影响进行全面评估,并将这3个维度集成为一个综合性的评估指标。

为了提供统一的可持续性评估方法,研究者对经济、环境和社会影响评估的结合进行了尝试。Reich<sup>[3]</sup>提出了一种城市废弃物管理系统的经济评估方法,探讨LCC与LCA联系起来的可能性和局限性;Matthews和Lave<sup>[4]</sup>依据工程设施排放的空气污染物导致的死亡率和支付意愿评估环境破坏成本;Wang等<sup>[5]</sup>针对桥梁结构在建造过程中的空气污染物、水体污染物和固体废弃物提出了环境污染防治成本模型,可较为全面地考虑建筑材料和施工机械的环境成本;Gilchrist等<sup>[6]</sup>针对城市建设项目提出了有关交通运输、经济活动、环境污染、生态健康的13项社会成本指标;Matthews等<sup>[7]</sup>针对城市非开挖管道工程提出了8项社会成本指标;Wu等<sup>[8]</sup>针对建筑工程和桥梁工程明确了主要利益相关者,提出了7类社会影响类别及14项社会成本量化指标,可较为全面地衡量工程项目的社会成本;Kendall等<sup>[9]</sup>开发了一个集成可持续性3个维度的LCSA模型,但模型中的环境和社会影响评估范围不全面,忽略了废水和固体废物的环境成本,缺少对建筑工人、当地社区和公共组织等利益相关者的社会成本评估。可以看出,以上大部分LCSA研究仅包括LCC与LCA或LCC与S-LCA2个维度,对综合3个维度的可持续性成本研究较少,现有包含3个维度的LCSA尚不完善,其综合评估方法和量化模型仍需要进一步研究。

本文针对桥梁结构提出包含经济、环境和社会成本的LCSA指标体系和量化模型,其中环境成本考虑桥梁工程建设、交通绕行和拥堵导致的3类污染物排放成本,社会成本考虑桥梁工程利益相关者的生命安全、收入损失、精神损失、时间损失、运营成本、商业损失、噪声污染、政府损失等多种社会成本。最后通过案例说明全寿命可持续性成本的计算过程,明确环境和社会成本参数取值,为工程结构的可持续性量化分析提供理论和应用指导。

## 1 全寿命可持续性成本指标与量化模型

工程结构全寿命周期包括工程概念的提出、选址、规划、设计、原材料的获取、建筑材料的加工制造、构件的生产、材料和构件的运输、施工安装、使用运营、养护维修、加固、寿命终止后的拆除或弃置以及建筑材料的回收和利用。LCSA通过识别和量化全寿命周期中工程活动消耗的物质和能源以及由此产生的污染物来评估可持续性。混凝土桥梁结构全寿命可持续性成本指标体系如图1所示。该指标体系包括经济、环境和社会3类成本指标,解决了以往可持续性评估指标中概念模糊和指标重复的问题,并将部分难以量化的指标(如时间、生命、生活质量、污染等)转化为可量化指标,实现可持续性3个维度的比较和叠加。混凝土桥梁结构的全寿命可持续性成本 $C_{LCSC}$ 为

$$C_{LCSC} = C_{EC} + C_{EV} + C_{SO} \quad (1)$$

式中: $C_{EC}$ 为经济成本; $C_{EV}$ 为环境成本; $C_{SO}$ 为社会成本。

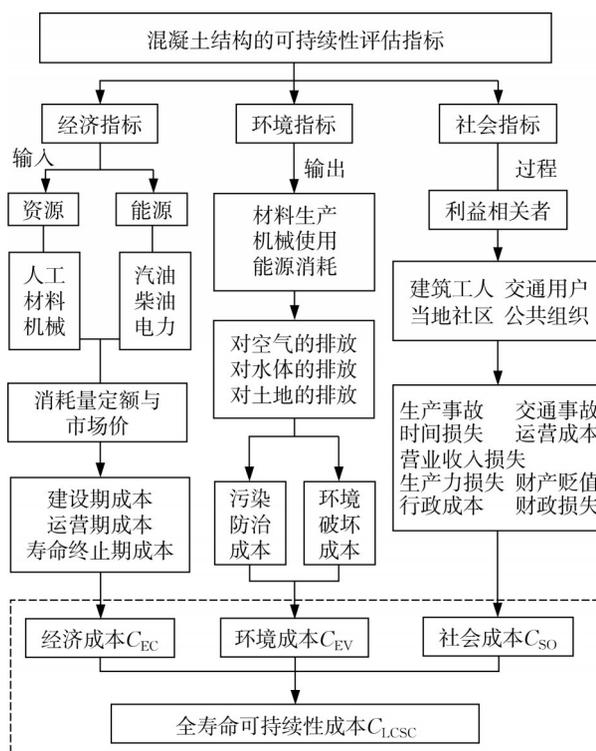


图1 混凝土桥梁结构全寿命可持续性成本指标框架

Fig. 1 Framework of life-cycle sustainability cost indicators for concrete bridge structures

### 1.1 经济成本

混凝土桥梁结构的经济成本是指全寿命周期内

发生的可以直接用货币计量,并用于支付结构资金耗费所投入的成本总和<sup>[10]</sup>。经济成本采用现值或年度成本表示,主要包括建设期成本、运营期成本和寿命终止期成本。一般经济成本数据可以通过概预算分析获得,其中各类材料、机械、能源、人工的消耗量按照工程定额取用,单价按照市场价格取用。

### 1.2 环境成本

混凝土桥梁结构在原材料获取、构件加工制造、运输和施工过程中往往会给周围环境带来土地破坏、水土流失、噪声粉尘、污染物排放等损害,产生直接的环境污染成本。此外,公路桥梁的改扩建项目往往会占用车道,导致车辆行驶缓慢或拥堵,严重的交通堵塞迫使部分用户改变行车路线,而额外的燃料消耗将导致更多的尾气排放,产生间接的环境成本。若日交通流量大,交通绕行或拥堵所产生的间接环境成本可能高于工程结构本身的环境成本,因此不能忽略这部分环境影响。上述各部分环境影响内容如图 2 所示。

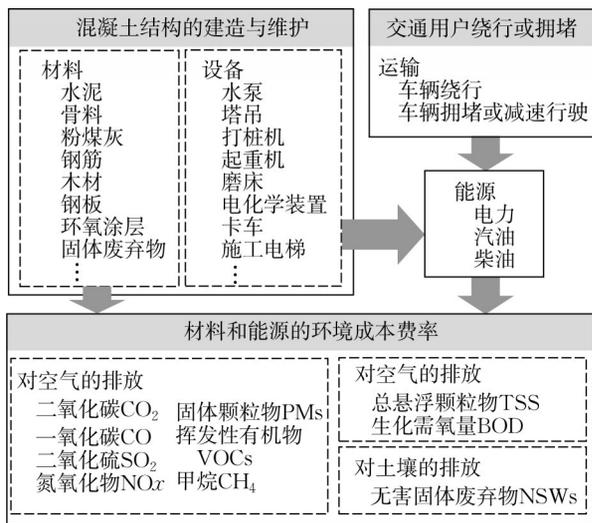


图 2 混凝土桥梁结构的全寿命环境影响

Fig. 2 Environmental impacts of concrete bridge structures throughout their life cycle

混凝土桥梁结构的环境成本包括结构建造相关的直接环境成本以及受影响交通用户绕行或拥堵导致的间接环境成本。桥梁结构建造相关的直接环境成本  $E_{con}$  计算模型<sup>[11]</sup>为

$$E_{con} = \sum_k \left( \sum_i E_{A,ik} \cdot c_{EA,i} + \sum_j E_{W,jk} \cdot c_{EW,j} + \sum_l E_{L,ik} \cdot c_{EL,l} \right) \quad (2)$$

式中:  $E_{A,ik}$  为全寿命周期中第  $k$  项工程活动产生的第  $i$  种空气污染物排放量;  $E_{W,jk}$  为第  $k$  项工程活动产生

的第  $j$  种污水排放量;  $E_{L,ik}$  为第  $k$  项工程活动产生的第  $l$  种固体废弃物排放量;  $c_{EA,i}$  为第  $i$  种空气污染物的环境成本费率;  $c_{EW,j}$  为第  $j$  种污水的环境成本费率;  $c_{EL,l}$  为第  $l$  种固体废弃物的环境成本费率。

交通绕行的环境成本  $E_{tra,dt}$  可按式(3)计算:

$$E_{tra,dt} = \left[ c_{E,car} \cdot (1 - \rho_{trk}) + c_{E,trk} \cdot \rho_{trk} \right] \cdot L_{dt} \cdot (1 - \rho_{dl}) \cdot N_{ADT} \cdot t_c \quad (3)$$

式中:  $c_{E,car}$  和  $c_{E,trk}$  分别为汽车和卡车运营的环境成本费率,可由车辆运营期间的燃料消耗量计算;  $\rho_{trk}$  为卡车在日均车流量中的百分比;  $L_{dt}$  为绕行路线长度;  $N_{ADT}$  为日均车流量;  $\rho_{dl}$  为通过施工影响道路的车辆百分比,  $1 - \rho_{dl}$  为选择绕行的车辆百分比;  $t_c$  为工程活动的持续时间。

由于交通拥堵或减速行驶导致的环境成本  $E_{tra,dl}$  为

$$E_{tra,dl} = \left[ \Delta F_{car} \cdot c_{Ef,car} \cdot (1 - \rho_{trk}) + \Delta F_{trk} \cdot c_{Ef,trk} \cdot \rho_{trk} \right] \cdot L_{dl} \cdot \rho_{dl} \cdot N_{ADT} \cdot t_c \quad (4)$$

式中:  $c_{Ef,car}$  和  $c_{Ef,trk}$  为汽车和卡车燃料的环境成本费率;  $\Delta F_{car}$  和  $\Delta F_{trk}$  为汽车和卡车在拥堵状态下单位里程的额外燃料消耗量,其中  $\Delta F_{car} = F_{car,c} - F_{car,n}$ ,  $F_{car,n}$  和  $F_{car,c}$  分别为汽车以正常平均速率 ( $V_n$ ) 和拥堵平均速率 ( $V_c$ ) 行驶单位里程的燃油消耗量,  $\Delta F_{trk}$  也按类似方法估算;  $L_{dl}$  为受施工影响的道路长度。

单位污染物的环境成本费率是环境成本计算的关键参数,对以往研究中空气、水体和土壤污染物的污染防治成本费率<sup>[5]</sup>进行统计,得到建筑材料和能源的环境成本单价,见表 1。

### 1.3 社会成本

混凝土桥梁结构的社会成本是指由施工现场周围人群承担的多种不利影响的可衡量成本。按照利益相关者分类构建社会成本清单<sup>[24-25]</sup>,如图 3 所示。社会成本  $C_{SO}$  是清单中各部分成本之和。

#### 1.3.1 建筑工人

施工安全事故对建筑工人造成的社会成本主要包括医疗成本、收入损失和精神损失。医疗成本 ( $S_{con,me}$ ) 包含受伤工人的医疗救护费、住院费、残疾康复费等,可根据式(5)估算<sup>[26]</sup>:

$$S_{con,me} = N_{con,inj} \cdot c_{me} \cdot t_c \quad (5)$$

式中:  $N_{con,inj}$  为施工期间的日平均受伤人数,当该项目工伤信息未知时,可以通过区域建筑安全事故工伤数据的均值粗略估算;  $c_{me}$  为受伤工人的平均医疗费用。

收入损失 ( $S_{con,il}$ ) 是工人过早死亡或永久残疾造

表1 常见建筑材料和能源的环境成本  
Tab. 1 Unit environmental costs of common building materials and flues

材料	单位	环境成本	数据来源
水泥	元·t <sup>-1</sup>	2 114.5	文献[12]
骨料	元·t <sup>-1</sup>	2.11	文献[13]
粉煤灰	元·t <sup>-1</sup>	903.04	文献[13]
高炉矿渣	元·t <sup>-1</sup>	326.9	文献[13]
石灰石	元·t <sup>-1</sup>	321.3	文献[14]
钢筋	元·t <sup>-1</sup>	973.16	文献[15-16]
干木材	元·m <sup>-3</sup>	119.21	文献[17]
层压单板木材	元·m <sup>-3</sup>	102.9	文献[17]
环氧涂层	元·kg <sup>-1</sup>	0.55	计算所得 <sup>4)</sup>
电力 <sup>1)</sup>	元·kWh <sup>-1</sup>	0.70	文献[16]
汽油 <sup>2)</sup>	元·kg <sup>-1</sup>	3.80	文献[18-19]
柴油 <sup>3)</sup>	元·kg <sup>-1</sup>	4.46	文献[20-21]
固体废弃物	元·t <sup>-1</sup>	30.94	文献[22]

注: 1)电力的环境成本考虑火力发电的排放;2)汽油的环境成本考虑车用动力汽油的排放;3)柴油的环境成本考虑不同柴油汽车的平均排放;4)根据检测报告<sup>[23]</sup>,水性环氧涂料中挥发性有机物(VOCs)的质量浓度为18g·L<sup>-1</sup>,涂料密度约为1.15kg·L<sup>-1</sup>,VOCs的环境成本为26.52元·kg<sup>-1</sup>,计算得到环氧涂料的环境成本为0.55元·kg<sup>-1</sup>。

成的工资收入损失,可通过重伤和死亡工人从受伤时间到退休的总收入损失计算,如式(6):

$$S_{\text{con,il}} = (N_{\text{con,inj}} \cdot P_{\text{da}} + N_{\text{con,ft}}) \cdot c_w \cdot t_{\text{yr}} \cdot (T_{\text{ret}} - T_{\text{acd}}) \cdot t_c \quad (6)$$

式中: $N_{\text{con,ft}}$ 为施工安全事故造成的日平均死亡人数; $c_w$ 为工人的日平均工资; $t_{\text{yr}}$ 为年工作日总数; $T_{\text{ret}}$ 为工人的平均退休年龄; $T_{\text{acd}}$ 为工人的平均受伤/死亡年龄; $P_{\text{da}}$ 为按收入损失百分比衡量的受伤工人平均残疾水平。

精神损失( $S_{\text{con,psl}}$ )是指伤残或死亡对工人及其家属朋友造成的痛苦、悲伤和生活质量下降的非物质成本。根据欧盟报告<sup>[27]</sup>建议,严重但非致命伤害

的精神损失被设定为统计生命价值( $V_{\text{sl}}$ )的13%。因此,工人伤残或死亡带来的精神损失为

$$S_{\text{con,psl}} = (N_{\text{con,ft}} + 0.13 N_{\text{con,inj}}) \cdot V_{\text{sl}} \cdot t_c \quad (7)$$

式中: $V_{\text{sl}}$ 为统计生命价值。

### 1.3.2 交通用户

交通事故和交通拥堵、绕行对旅客、货运服务商等交通用户造成的社会成本包括交通事故成本、时间延误损失和车辆运营成本。交通事故成本是指交通事故造成的人员伤亡和财产损失,其中人员伤亡相关的医疗成本( $S_{\text{tra,me}}$ )、收入损失( $S_{\text{tra,il}}$ )和精神损失可参照1.3.1节方法计算,财产损失 $S_{\text{tra,pd}}$ 采用式(8)计算:

$$S_{\text{tra,pd}} = c_{\text{vpd}} \cdot N_{\text{vac}} \cdot t_c \quad (8)$$

式中: $c_{\text{vpd}}$ 为交通事故的平均财产损失; $N_{\text{vac}}$ 为由施工干扰引起的日平均交通事故数量,包含由施工干扰引起的绕行车辆和拥堵车辆的新增事故数量。

$$N_{\text{vac}} = r_{\text{ta}} \cdot L_{\text{dl}} \cdot \rho_{\text{dl}} \cdot N_{\text{ADT}} + r_{\text{tn}} \cdot L_{\text{dt}} \cdot (1 - \rho_{\text{dl}}) \cdot N_{\text{ADT}}$$

$$N_{\text{tra,inj}} = r_{\text{inj}} \cdot N_{\text{vac}}$$

$$N_{\text{tra,ft}} = r_{\text{ft}} \cdot N_{\text{vac}} \quad (9)$$

式中: $r_{\text{ta}}$ 为施工占用道路的额外事故率; $r_{\text{tn}}$ 为正常行驶条件下的车辆事故率(即每车每km的事故数量); $N_{\text{tra,inj}}$ 和 $N_{\text{tra,ft}}$ 分别为交通用户的日平均受伤和死亡人数; $r_{\text{inj}}$ 和 $r_{\text{ft}}$ 分别为道路事故的平均受伤率和死亡率。

交通用户的时间延误损失 $S_{\text{tl}}$ 包括客运和货运延误损失<sup>[28]</sup>,可表示为

$$S_{\text{tl}} = [c_{\text{t,car}} \cdot O_{\text{car}} \cdot (1 - \rho_{\text{trk}}) + (c_{\text{t,trk}} \cdot O_{\text{trk}} + c_{\text{t,gds}} \cdot n_{\text{gds}}) \cdot \rho_{\text{trk}}] \cdot \left[ \left( \frac{L_{\text{dl}}}{V_c} - \frac{L_{\text{dl}}}{V_n} \right) \cdot \rho_{\text{dl}} + \frac{L_{\text{dt}}}{V_n} \cdot (1 - \rho_{\text{dl}}) \right] \cdot N_{\text{ADT}} \cdot t_c \quad (10)$$

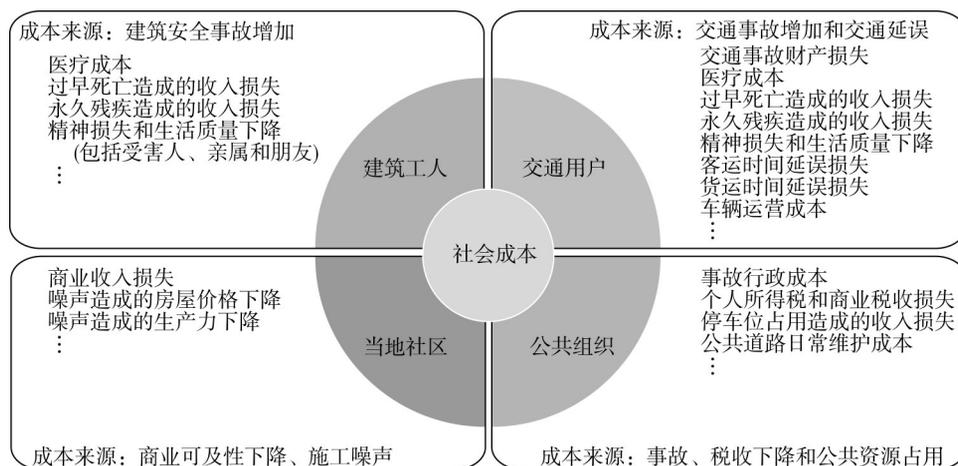


图3 各类利益相关者的社会成本

Fig. 3 List of social costs for different stakeholders

式中: $c_{t,car}$ 和 $c_{t,trk}$ 分别为汽车和卡车中驾驶员和乘客的平均旅行时间价值,通常采用一定比例的用户平均时薪表示; $c_{t,gds}$ 为单位货物的平均延误损失; $O_{car}$ 和 $O_{trk}$ 分别为汽车和卡车的载客量; $n_{gds}$ 为卡车货物的平均质量。

车辆运营成本包括燃料成本、维护费用和轮胎磨损损失<sup>[7]</sup>,绕行车辆和拥堵车辆的额外运营成本 $S_{op}$ 计算式为

$$S_{op} = \frac{\left\{ \left[ c_{r,car} \cdot (1 - \rho_{trk}) + c_{r,trk} \cdot \rho_{trk} \right] \cdot L_{dt} \cdot (1 - \rho_{dl}) + \left[ c_{f,car} \cdot \Delta F_{car} \cdot (1 - \rho_{trk}) + c_{f,trk} \cdot \Delta F_{trk} \cdot \rho_{trk} \right] \cdot L_{dl} \cdot \rho_{dl} \right\}}{N_{ADT} \cdot t_c} \quad (11)$$

式中: $c_{r,car}$ 和 $c_{r,trk}$ 分别为汽车和卡车的平均运营成本; $c_{f,car}$ 和 $c_{f,trk}$ 分别为汽车和卡车的单位燃油价格。

### 1.3.3 当地社区

短期和长期的交通便利性下降会迫使消费者去其他地方获得必要的商品或服务,导致受影响区域的商业收入下降,而长期的施工噪声也会对周围人群的行为、心理和身体健康产生显著影响。因此,与当地社区有关的社会成本主要包括商业收入损失、生产力下降损失和房屋折旧损失。

为了直接反映当地企业的损失,可采用商业影响因子,即通过调查获得受工程施工影响企业的商业收入相对减少率,计算商业收入损失 $S_{br}$ 如式(12):

$$S_{br} = \alpha_b \cdot R_b \cdot t_c \quad (12)$$

式中: $\alpha_b$ 为商业影响因子; $R_b$ 为受影响区域的日平均商业收入。

施工噪声导致的生产力下降损失 $S_{tp}$ 可采用特定生产活动(如制造、零售或办公)的产量损失来表示<sup>[6]</sup>,为

$$S_{tp} = c_{w,ns} \cdot \alpha_{PRF} \cdot N_{ns} \cdot t_c \quad (13)$$

式中: $c_{w,ns}$ 为受噪声影响人员的日平均工资; $\alpha_{PRF}$ 为生产力降低系数,取决于噪声水平和受影响的生产活动类型; $N_{ns}$ 为受噪声影响的劳动力人数。

此外,噪声暴露也会使周围待售或租赁房屋贬值,由施工引起的房屋折旧损失 $S_{hd}$ 可表示为

$$S_{hd} = (N_C - N_N) \cdot \alpha_{NDI} \cdot (c_{hs} \cdot n_{hs} + c_{hr} \cdot n_{hr} \cdot t_c) \quad (14)$$

式中: $N_C$ 和 $N_N$ 分别为有无施工活动时的噪声强度等级,dB; $\alpha_{NDI}$ 为一定时期内的噪声折旧指数; $c_{hs}$ 和 $c_{hr}$ 分别为施工前房屋的平均售价和日租金; $n_{hs}$ 和 $n_{hr}$ 分别为要出售和出租的受影响房屋面积。

### 1.3.4 公共组织

与公共组织有关的社会成本主要包括事故行政成本和市政收入损失。事故行政成本 $S_{ad}$ 是指公共组织为各类事故提供紧急服务的成本,包括出警、消防、法律援助等服务。在事前估算中可采用以往研究中行政成本与事故成本的比值计算,为

$$S_{ad} = \alpha_{con} \cdot (S_{con,mc} + S_{con,il}) + \alpha_{tra} \cdot (S_{tra,mc} + S_{tra,il} + S_{tra,pd}) \quad (15)$$

式中: $\alpha_{con}$ 和 $\alpha_{tra}$ 分别为施工事故和交通事故的行政成本与事故成本的比值。

市政收入损失 $S_{pr}$ 主要来源于停车服务费损失和违章停车罚款损失,可采用该停车位的历史数据估计<sup>[29]</sup>,为

$$S_{pr} = (c_{mtr} \cdot \rho_{occ} + c_{tic} \cdot f_{tic}) \cdot N_{pk} \cdot t_c \quad (16)$$

式中: $N_{pk}$ 为施工占用的日平均停车位数量; $c_{mtr}$ 为停车位平均收费金额; $\rho_{occ}$ 为停车位的平均占用率; $c_{tic}$ 为每张罚单的平均罚款金额; $f_{tic}$ 为每个停车位的罚款频率。

此外,与公共组织有关的社会成本还包括绕道路道的额外维护成本和政府税收损失。绕行的道路由于车流量增大往往会发生加速劣化现象,但由于其维护费用较难与日常维护费用区分统计,目前尚未有合理的量化方法。而个人收入损失和商业收入损失导致的政府税收损失已经包含在收入损失的量化中,不再进行重复计算。

## 2 全寿命可持续性成本案例分析

### 2.1 工程案例概况

案例桥梁位于中国东南沿海地区,连接大陆和离岛。主桥为三跨预应力混凝土双壁墩连续刚构桥,全长124 m + 170 m + 124 m,见图4。该桥于2001年投入使用,设计使用寿命100年。2013年之前,该桥是进入离岛的唯一通道,此后相邻的新桥建成通车。案例桥梁所在地区自然环境较为恶劣,钢筋混凝土结构易受混凝土碳化、氯离子侵蚀、海水冲刷等影响,导致主桥耐久性下降。2016年该桥进行了维修加固,包括主桥及引桥防腐涂装、梁底加固、支座更换、伸缩缝更换、路面和桥面铺装改造等,维护长度约3.79 km,施工持续1年。维护期间,车道半幅封闭,施工区域限速从60 km·h<sup>-1</sup>调整为30 km·h<sup>-1</sup>,车辆进岛绕行相邻桥梁的额外行驶距离为4.4 km。根据桥梁管理员提供的交通信息,维护期间日交通流量从11 736车次减少至6 900车次左右,

约41%的交通用户会因道路维修而选择绕行。项目地处偏僻,桥梁周围没有商户,并且由于绕行通道的存在,此次维修工程对当地社区的影响并不显著。因此,本例中的利益相关者仅包含建筑工人、交通用户和公共组织。

为了保障桥梁的耐久性,设定一系列后续维护措施。1号、2号承台采用替换混凝土修复方法,凿除受氯离子污染的混凝土,清理钢筋表面锈蚀产物,对受损部位进行灌浆,并在承台混凝土表面施加一层20 mm的耐磨环氧砂浆,提升其耐磨耐腐蚀性能。经模拟计算,1号、2号承台在全寿命周期中共需维

护8次,每次维护间隔10年。对连续梁(大气区)、桥墩(大气区)、0号和3号承台(浪溅区)设定2种耐久性维护方案——环氧涂层方案(方案1)和电化学除氯方案(方案2)。方案1:定期更新连续梁、桥墩、0号和3号承台的防腐环氧涂层,其中连续梁共维护6次,维护间隔11年,桥墩维护3次,间隔16年,0号、3号承台维护4次,间隔15年。方案2:定期对连续梁、桥墩、0号和3号承台电化学除氯,其中连续梁共维护3次,维护间隔21年,桥墩维护2次,间隔32年,0号、3号承台维护3次,间隔22年。采用全寿命可持续性成本对2种维护方案进行比选。

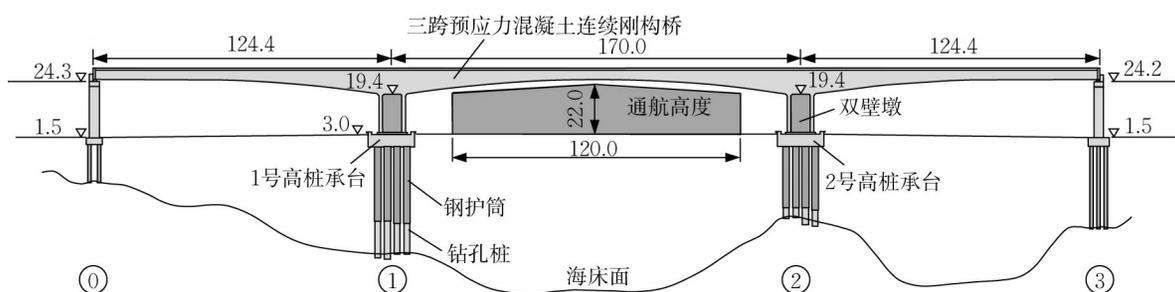


图4 主桥结构(单位:m)

Fig. 4 Structural layout of case bridge (unit: m)

## 2.2 各阶段可持续性成本

案例桥梁的全寿命阶段包括建造期、维修期、未来维护期,其余时间正常运营。建造期的经济成本主要从设计预算文件获得,维修和未来维护期的经济成本则根据维修工程预算文件或公路养护工程预算定额确定。环境成本需汇总建筑材料和燃料动力的消耗量,并依据表1环境成本费率计算得到。社会成本则需确定社会成本参数取值,采用1.3节公式量化工程活动对建筑工人、交通用户和公共组织的社会影响。本案例社会成本参数取值主要来源于工程可行性分析中的交通统计数据、国家统计局编制的《中国统计年鉴》、《中国劳动统计年鉴》、交通运输部发布的《交通运输行业发展统计公报》、国家卫生健康委员会发布的《我国卫生健康事业发展统计公报》、浙江政务服务网提供的年度数据等,见表2。以2018年为基年,折现率为2%,计算案例桥梁全寿命各阶段的经济、环境和社会成本。

### 2.2.1 建造期

案例桥梁1997年4月正式开工建设,2001年2月完工,历时47个月。根据项目投资文件,该桥建造经济成本为25 807.8万元。由于桥梁建成前没有车辆通行,因此无车辆绕行和拥堵的环境成本。根据预算文件统计的建筑材料和施工机械能源消耗

量,采用式(2)计算得到环境成本为3 976.11万元,其中建筑材料产生的环境成本占80.46%,机械能源燃料的环境成本占19.24%。社会成本仅包括建筑工人的施工事故成本和公共组织的行政成本,经计算约为11.89万元。

### 2.2.2 维修期

案例桥梁维修期为2015年12月至2016年12月,共12个月。根据维修工程预算文件,经济成本为3 435.71万元。经计算,维修工程的环境成本共计1 170.16万元,其中车辆绕行引起的额外燃料消耗的环境成本占比81.42%,远高于维修工程本身的环境成本(占比约16%)。此外,该桥维护项目的社会影响显著,经计算,维修工程的社会成本为6 223.81万元,约为经济成本的1.8倍,其中92%为交通绕行和拥堵引起的用户时间损失和车辆运营成本。

### 2.2.3 未来维护期

未来维护期的经济成本包括建筑材料费、设备租赁费、运输成本、能源成本和人工成本,其中材料费、设备租赁费和能源消耗按公路工程机械台班费用定额(JTG/T B06-03—2007)计算,人工成本通过工作时间、工人人数和人均成本估算得到。需要注意的是,维护时可沿主梁下缘平行搭设满堂悬挂脚

表 2 社会成本参数取值  
Tab. 2 Parameters values of social cost

利益相关者	参数	单位	数值	数据来源	
建筑工人	工程持续时间	d	365	案例数据	
	受伤人数与死亡人数的比值		45.11	2015—2018年《中国劳动统计年鉴》	
	受伤年龄	岁	40.29	2015—2018年《中国劳动统计年鉴》	
	日平均死亡率	人·d <sup>-1</sup>	2.04×10 <sup>-6</sup>	由2015—2018年房屋市政工程生产安全事故情况中的数据估算	
	日平均受伤率	人·d <sup>-1</sup>	9.37×10 <sup>-5</sup>	由受伤人数与死亡人数比值估算	
	平均残疾水平	%	20.56	由2015—2018年《中国劳动统计年鉴》中的伤残等级评估得到	
	工作日	d·年 <sup>-1</sup>	251	假设	
	退休年龄	年	65	假设	
	平均工资	元·d <sup>-1</sup>	290.06	2015—2019年浙江统计数据库	
	建筑工人平均工资	元·d <sup>-1</sup>	214.47	2015—2019年浙江统计数据库	
	平均医疗费	元·人 <sup>-1</sup>	9 241.02	2015—2019年《我国卫生健康事业发展统计公报》	
	人类生命统计价值	元·人 <sup>-1</sup>	27 042.55	文献[30]	
	交通用户	日平均车流量	辆·d <sup>-1</sup>	11 736	案例数据
		通过施工道路的车辆百分比	%	59	案例数据
受施工影响道路长度		km	3.79	案例数据	
绕行长度		km	4.4	案例数据	
事故数量		起·年 <sup>-1</sup>	212 153.25	2015—2019年国家统计局交通事故数据	
死亡人数		人·年 <sup>-1</sup>	62 020.25	2015—2019年国家统计局交通事故数据	
受伤人数		人·年 <sup>-1</sup>	223 624	2015—2019年国家统计局交通事故数据	
经济损失		10 <sup>4</sup> 元·年 <sup>-1</sup>	121 054.75	2015—2019年国家统计局交通事故数据	
死亡率		人·起 <sup>-1</sup>	0.292 34	由2015—2019年国家统计局交通事故数据计算得到	
受伤率		人·起 <sup>-1</sup>	1.054 07	由2015—2019年国家统计局交通事故数据计算得到	
年平均日行驶量		10 <sup>4</sup> 辆·km	265 896	2015—2019年《交通运输行业发展统计公报》	
正常行车的事故率		起·辆 <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>	2.186×10 <sup>-7</sup>	由事故数量和行驶量数据计算得到	
施工区域的额外事故率		起·辆 <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>	1.940×10 <sup>-8</sup>	文献[31]	
事故平均经济损失		元·起 <sup>-1</sup>	5 706	由事故数量和经济损失计算得到	
受伤年龄		岁	34.59	文献[32]	
交通用户的平均工资		元·d <sup>-1</sup>	323.44	2015—2019年浙江统计数据库	
交通用户的时间价值		元·h <sup>-1</sup>	33.68	由平均工资和日均工作时间计算得到	
正常行驶速度		km·h <sup>-1</sup>	60	案例数据	
施工区域的行驶速度		km·h <sup>-1</sup>	30	案例数据	
货物延误费用		元·t <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup>	40	文献[33]	
汽车比例		%	68.60	案例数据	
卡车比例		%	31.40	案例数据	
汽车平均载客量		人·辆 <sup>-1</sup>	3.58	案例数据	
卡车平均载客量		人·辆 <sup>-1</sup>	1.26	文献[34]	
卡车平均载货量		t·辆 <sup>-1</sup>	5.33	案例数据	
汽车运营成本		元·km <sup>-1</sup>	0.683 7	文献[29]	
卡车运营成本		元·km <sup>-1</sup>	2.275 8	文献[29]	
汽油单价	元·L <sup>-1</sup>	7.25	市场价		
柴油单价	元·L <sup>-1</sup>	6.8	市场价		
汽车燃油消耗(60km·h <sup>-1</sup> )	L·辆 <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>	0.132 5	案例数据		
汽车燃油消耗(30km·h <sup>-1</sup> )	L·辆 <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>	0.155 7	案例数据		
卡车燃油消耗(60km·h <sup>-1</sup> )	L·辆 <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>	0.212 0	案例数据		
卡车燃油消耗(30km·h <sup>-1</sup> )	L·辆 <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup>	0.248 8	案例数据		
公共组织	施工事故行政成本与事故成本比值	%	57	文献[26]	
	交通事故行政成本与事故成本比值	%	15	文献[35-36]	

手架,不占用桥面空间,因而无需考虑车辆延误的环境成本,社会成本仅考虑建筑工人和公共组织的社会成本。未来维护期的环境成本包括钢材、水泥砂浆、环氧砂浆、燃料动力、固体废弃物等的环境成本,方案1和方案2还分别包括环氧涂层和电化学除氯的环境成本,其中电化学除氯的环境成本应考虑钢

网板、钢预埋件和除氯装置用电的环境成本。1号、2号承台的维护需要约30 d,方案1中0号、3号承台和桥墩环氧涂层处理需要约30 d,主梁环氧涂层需要60 d;方案2中0号、3号承台电化学除氯处理需要约30 d,桥墩和主梁电化学除氯需要约90 d。方案1和方案2首次维护和后续维护的经济、环境和社会成

本见表3和表4。

表3 方案1的经济、环境和社会成本

Tab. 3 Economic, environmental, and social costs of Option 1

维护内容	经济成本/万元		环境成本/万元		社会成本/万元	
	首次	后续每次	首次	后续每次	首次	后续每次
1号、2号承台混凝土修复及环氧砂浆	314.99	34.97	69.29	3.65	0.25	0.25
0号、3号承台环氧涂层	32.56	32.56	1.74	1.74	0.25	0.25
所有桥墩环氧涂层	215.07	207.73	12.50	10.90	0.25	0.25
主梁环氧涂层	427.27	390.10	26.17	18.96	0.51	0.51
小计	989.89	665.36	109.70	35.24	1.26	1.26

表4 方案2的经济、环境和社会成本

Tab. 4 Economic, environmental, and social costs of Option 2

维护内容	经济成本/万元		环境成本/万元		社会成本/万元	
	首次	后续每次	首次	后续每次	首次	后续每次
1号、2号承台混凝土修复及环氧砂浆	314.99	34.97	69.29	3.65	0.25	0.25
0号、3号承台电化学除氯	76.58	76.58	2.89	2.89	0.25	0.25
所有桥墩电化学除氯	596.62	589.27	14.26	12.66	0.76	0.76
主梁电化学除氯	1 249.33	1 056.82	27.14	18.26	0.76	0.76
小计	2 237.51	1 757.65	113.58	37.46	2.02	2.02

### 2.3 全寿命可持续性总成本

汇总案例桥梁全寿命各阶段的可持续性成本得到表5。该桥建造期成本高达全寿命总成本的69%，维修期成本占总成本约25%，未来维护期成本仅占6%，可见建设阶段是资金和资源集中投入的时期。对于3类可持续性成本，全寿命经济成本占总成本的73%左右，环境和社会成本占27%左右，见图5。对于未来维护方案的选择，方案1的可持续性总成本相对较低，尤其是未来维护期经济成本仅为方案2的72%，是优先选择的维护方案。但方案1环境成本较高，主要因为在施工过程中方案1产生了较多的固体废弃物(如水泥、砂浆)，而方案2中采用了一定的可回收材料(如电源、电气设备、防水油布等)，减少了污染物的排放，降低了方案2的环境成本。因此在生态较为脆弱的地区，需要进一步权衡经济成本和环境成本优先级不同所带来的决策差异。

## 3 结论

(1)环境影响包括空气、水体和土壤污染物排放对人类健康、生态系统、不可再生资源、全球气候、种群栖息地等方面的不利影响。混凝土桥梁结构的环境成本是工程活动、车辆绕行和交通拥堵过程中消耗的材料和燃料与其环境成本费率的乘积。

(2)混凝土桥梁结构的社会影响可根据利益相关者进行分类。对建筑工人安全健康的影响可以采

表5 方案1和方案2的全寿命可持续性成本

Tab. 5 Life-cycle sustainability costs of Options 1 and 2

全寿命阶段	经济成本/万元	环境成本/万元	社会成本/万元	阶段成本/万元
建造期	25 807.81	3 976.11	11.89	29 795.81
维修期	3 435.71	1 170.16	6 223.80	10 829.67
未来维护期(方案1)	2 227.03	351.85	8.85	2 587.73
未来维护期(方案2)	3 085.47	288.91	8.60	3 382.98
方案1总成本	31 470.55	5 498.12	6 244.54	43 213.21
方案2总成本	32 328.99	5 435.18	6 244.29	44 008.46

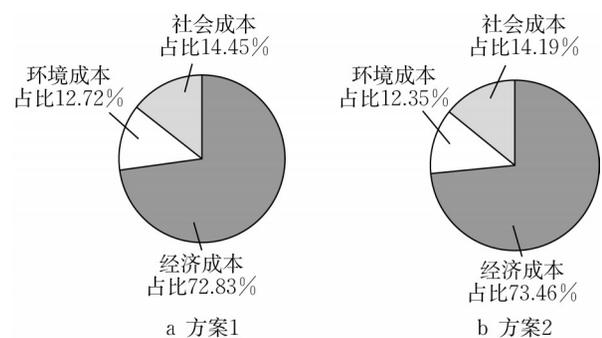


图5 案例桥梁全寿命可持续性成本比例

Fig. 5 Life-cycle sustainability cost proportions of case bridge

用事故成本进行量化,包括医疗成本、收入损失和精神损失。道路封闭、部分封闭或限速对交通用户的影响可采用交通事故成本、客货运延误损失和车辆运营成本衡量。长期的交通便利性下降、施工噪声对当地居民和社区经济活动的影响可以间接地采用

商业收入下降、生产力损失、房屋价格贬值量化。而公共组织的社会成本包括事故行政成本和停车收入损失。

(3)在计算混凝土桥梁结构的可持续性成本时,需要积极利用工程概预算文件、可行性分析报告、预算定额、公共统计数据平台、以往文献等数据来源。经济成本可提取工程概预算数据或依据预算定额和消耗量进行计算。环境成本的计算需要统计建筑材料消耗和施工机械的燃料消耗,并计算对应项目的环境成本。社会成本则更依赖于工程实际数据,若无工程数据时需综合利用多种数据平台获取统计数据。

(4)对环氧涂层和电化学除氯2种预防性维护方案的可持续性成本进行对比分析,结果表明未来维护期环氧涂层方案的可持续性成本仅为电化学除氯方案的76.5%,应为优先选择方案。这2种预防性维护方案的环境和社会成本较小,主要原因是2种方案不占用车道,而对于占用车道的维修工程,环境和社会成本将远超直接经济成本。因此,重要交通基础设施的维修应避免对道路的长期封闭或占用,尽量使用快速施工、夜间施工或采用高耐久性的建筑材料以减少维护维修对交通用户的影响。

#### 作者贡献声明:

吴柯娴:负责可持续性成本理论研究和案例分析,撰写论文。

金伟良:负责全寿命设计与评估理论研究。

何晓宇:论文定稿修改。

黄跃林:提供工程资料。

范雪华:提供案例统计数据。

#### 参考文献:

- [1] 金伟良. 工程结构全寿命设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
JIN Weiliang. Life-cycle design on engineering structures[M]. Beijing: China Science Press, 2020.
- [2] UNEP SETAC. Life cycle assessment initiative. Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products [R/OL]. [2020-12-20]. <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf>.
- [3] REICH M C. Economic assessment of municipal waste management systems—case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(3), 253.
- [4] MATTHEWS H S, LAVE L B. Applications of environmental valuation for determining externality costs [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 24(8), 1390.
- [5] WANG Z, YANG D Y, FRANGOPOL D M, *et al.* Inclusion of environmental impacts in life-cycle cost analysis of bridge structures[J]. Sustainable and Resilient Infrastructure, 2020, 5(4): 252.
- [6] GILCHRIST A, ALLOUCHE E N. Quantification of social costs associated with construction projects: State-of-the-art review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(1): 89.
- [7] MATTHEWS J C, ALLOUCHE E N. A social cost calculator for utility construction projects [J]. North American Society for Trenchless Technology, 2010, 3, Paper F-4.
- [8] WU K, YANG D Y, FRANGOPOL D M, *et al.* Multi-stakeholder framework for assessing the life-cycle social cost of construction projects [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 18(1): 129.
- [9] KENDALL A, KEOLEIAN G A, HELFAND G E. Integrated life-cycle assessment and life-cycle cost analysis model for concrete bridge deck applications [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2008, 14(3): 214.
- [10] 胡江碧. 道路工程全寿命成本分析方法及案例[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
HU Jiangbi. Analysis methods and cases of life-cycle cost of road engineering[M]. Beijing: China Science Press, 2012.
- [11] 王竹君, 徐祖恩, 吴柯娴, 等. 基于全寿命环境成本的工程结构维护方案优化[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 227.  
WANG Zhujun, XU Zuen, WU Kexian, *et al.* Maintenance plan optimization of engineering structures based on life-cycle environmental costs [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 227.
- [12] HUNTZINGER D N, EATMON T D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(7): 668.
- [13] VAN DEN HEEDE P, DE BELIE N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4): 431.
- [14] IPCC. Emission factor database [EB/OL]. [2020-05-01]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.
- [15] MEHAN G T, GRUBBS G H, FRACE S E, *et al.* Development document for final effluent limitations guidelines and standards for the iron and steel manufacturing point source category [R/OL]. [2022-04-10] [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/ironsteel\\_dd\\_2002.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/ironsteel_dd_2002.pdf).
- [16] COSTA M M, SCHAEFFER R, WORRELL E. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems[J]. Energy, 2001, 26(4): 363.
- [17] PUETTMANN M E, WILSON J B. Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-gate LCI of residential wood building materials[J]. Wood and Fiber Science, 2005, 37: 18.
- [18] KATO N, AKIMOTO H. Anthropogenic emissions of SO<sub>2</sub>

- and NO<sub>x</sub> in Asia: Emission inventories [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, 26(16): 2997.
- [19] US EPA. Emission factors for greenhouse gas inventories. U.S. Environmental Protection Agency [EB/OL]. [2017-11-19]. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors\\_2014.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf).
- [20] KUHNS H D, MAZZOLENI C, MOOSMÜLLER H, *et al.* Remote sensing of PM, NO, CO and HC emission factors for on-road gasoline and diesel engine vehicles in Las Vegas, NV [J]. Science of the Total Environment, 2004, 322(1-3): 123.
- [21] RAHEMAN H, PHADATARE A G. Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(4): 393.
- [22] GOV. UK. Landfill Tax: rates, exemptions and taxable activities [M/OL]. [2017-11-25] <https://www.gov.uk/guidance/landfill-tax-rates-exemptions-and-taxable-activities>.
- [23] 上海汉申化工有限公司. 水性环氧涂料 VOC 检测报告[EB/OL]. [2018-08-29] <http://www.hi-zone.cn/coatvoc03.htm>. Shanghai Hanzhong Chemical Co., Ltd. Waterborne epoxy coating VOC test report[EB/OL]. [2018-08-29] <http://www.hi-zone.cn/coatvoc03.htm>.
- [24] 吴柯娴, 王竹君, 金伟良, 等. 装配式混凝土结构可持续成本量化分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 133.  
WU Kexian, WANG Zhujun, JIN Weiliang, *et al.* Quantitative analysis of sustainable cost of prefabricated concrete structures[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 133.
- [25] 吴柯娴, 金伟良, 沈坚, 等. 工程项目社会影响评估和社会成本分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 117.  
WU Kexian, JIN Weiliang, SHEN Jian, *et al.* Social impact assessment and social cost analysis of construction projects[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 117.
- [26] TANG S L, CHAN S S K, SARAM D D D, *et al.* Costs of construction accidents in the social and humanity context - a case study in Hong Kong [J]. HKIE Transactions, 2007, 14(2): 35.
- [27] BICKEL P, HUNT A, DE JONG G, *et al.* Proposal for harmonised guidelines. Deliverable D5. HEATCO project[R]. Leeds: University of Leeds, 2006.
- [28] DECO A, FRANGOPOLO D M. Risk assessment of highway bridges under multiple hazards [J]. Journal of Risk Research, 2011, 14(9): 1057.
- [29] MATTHEWS J C, ALLOUCHE E N, STERLING R L. Social cost impact assessment of pipeline infrastructure projects [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2015, 50: 196.
- [30] 杨宗康. 生命价值评估理论与实证研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.  
YANG Zongkang. Theoretical methods and empirical research of life value assessment [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [31] US Federal Highway Administration. FHWA work zone facts and statistics: work zone safety [EB/OL]. [2020-07-27] [https://ops.fhwa.dot.gov/wz/resources/facts\\_stats/safety.htm](https://ops.fhwa.dot.gov/wz/resources/facts_stats/safety.htm).
- [32] TEFFT B. Rates of motor vehicle crashes, injuries and deaths in relation to driver age, United States, 2014-2015 [R]. Washington D C: AAA Foundation for Traffic Safety, 2017.
- [33] DE JONG G, KOUWENHOVEN M, BATES J, *et al.* New SP-values of time and reliability for freight transport in the Netherlands [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 64: 71.
- [34] YU W D, LO S S. Time-dependent construction social costs model [J]. Construction Management and Economics, 2005, 23(3): 327.
- [35] ISMAIL M A, ABDELMAGEED S M. Cost of road traffic accidents in Egypt [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, 42: 1308.
- [36] MELHUIISH C, ROSS A, GHEE C, *et al.* Road safety guidelines for the Asian and Pacific region [R]. Manila Philippines: Asian Development Bank, 2003.