

文章编号:1672-9331(2018)03-0071-08

T梁桥在建设期碳排放模型的建立与分析

张振浩¹, 谭荣平^{1,2}, 方明¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.江西工程学院 土木工程学院, 江西 新余 338000)

摘要: 为了对桥梁的低碳施工提供理论依据, 首先对桥梁建设期碳排放计算的边界进行了界定, 将建设期划分成材料生产、材料运输和机械施工三个阶段, 应用因素分解理论及碳排放系数法建立了桥梁建设期的碳排放模型。然后以益阳至娄底高速公路的一段预制 T 梁桥作为研究对象, 通过清单、计价文件和施工图纸确定了各种碳排放因子, 计算出了该上部结构的碳排放量, 基于此计算方法计算出了 T 梁桥各部位的碳排放量并进行了对比分析。最后将此碳排放模型中影响因素的不确定性也考虑进来, 进行了参数敏感性分析。分析结果表明, T 梁桥建设期的碳排放从结构考虑主要来源于桩基工程和上部工程; 从建设期阶段考虑主要来源于生产阶段; T 梁桥建设期的碳排放参数敏感性强度排序为: 水泥碳排放因子 > 钢材碳排放因子 > 电力碳排放因子 > 柴油碳排放因子。

关键词: T 梁桥; 建设阶段; 碳排放模型; 碳排放因子; 不确定性; 参数敏感性分析

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

Establishment and analysis of carbon emissions model of T-beam bridge during construction

ZHANG Zhen-hao¹, TAN Rong-ping^{1,2}, FANG Ming¹

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. College of Civil Engineering, Jiangxi University of Engineering, Xinyu 338000, China)

Abstract: The analysis of carbon emissions during the construction period of T-beam bridges can provide theoretical basis for low-carbon construction of bridges. This paper first defines the boundary of carbon emissions calculation during the bridge construction period, and divides the construction period into three stages: material production, material transportation, and mechanical construction. The carbon emission model of the bridge construction period is established by using the factor decomposition theory and the carbon emission coefficient method. Taking a section of prefabricated T-beam Bridge from Yiyang to Loudi Expressway as the research object, various carbon emission factors were determined through inventory, valuation documents and construction drawings, and the carbon emissions of the superstructure were calculated. Based on this calculation method, T-beam bridge was calculated. The carbon emissions of various parts of the bridge were compared and analyzed. Finally, the uncertainties of the influencing factors in this carbon emission model were also taken into account. The sensitivity analysis of the parameters was per-

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 湖南省交通科技计划项目(201419)

通讯作者: 张振浩(1980-), 男, 广西南宁人, 长沙理工大学副教授, 博士, 主要从事桥梁动力可靠度方面的研究。

E-mail: zzh1949@163.com

formed. The results show that: During the construction period of T-beam bridges, the main sources of carbon emissions are the main source of the structure, the pile foundation works and the upper part of the project; at the construction phase, they mainly come from the production phase; the carbon emission parameters of the T-beam bridge construction period are sensitive to the intensity: cement carbon Emission Factor > Steel Carbon Emission Factor > Electricity Carbon Emission Factor > Diesel Carbon Emission Factor. The conclusion of this paper provides a reference calculation model for the carbon emissions generated by the T-beam bridge and provides a reference for the construction of low-carbon bridges.

Key words: T beam bridge; construction phase; carbon emission model; carbon emission factor; uncertainty; parameter sensitivity analysis

高速公路在设计、施工及运营过程中的能源消耗及产生的环境污染已成为一个严峻的问题。在经济高速发展的当代,桥梁作为高速公路的重要组成部分,怎样在桥梁施工过程中减少能源消耗、减少温室气体的排放,也越来越受到人们的关注。因此,推进高速公路建设的节能减排研究,对实现建设低碳高速公路的目标,具有非常重要的现实意义。

近年来,刘木宇^[1]分析了桥面铺装的环境影响因素,提出了各阶段的计算模型。武文杰^[2]考虑了LCA及LCC的不确定性,通过定量评价分析桥梁对社会、环境、经济的影响。潘美萍^[3]通过建立高速公路能耗和碳排放计算模型,量化分析了不同路面高速公路全寿命各阶段的能耗和碳排放的差异。孙晓燕^[4]根据桥梁特点建立了碳强度指标,应用改进的层次分析法对桥梁进行了多级模糊综合评价。庞博^[5]建立了桥梁生命周期环境影响终点破坏模型和中点破坏模型,对白果渡嘉陵江特大桥进行了分析。作者在他们的模型基础上,利用因素分解理论及碳排放系数法来确定T梁桥各个部位的碳排放模型,对T梁桥建设期碳排放进行量化和对比分析,并对碳排放量影响较大的几个参数进行敏感性分析。

1 碳排放模型的确定

1.1 碳排放计算范围的界定

碳排放是关于温室气体排放的一个总称,土木工程中主要包括CO₂、CH₄、N₂O这三种温室气体。不同温室气体可通过一种以CO₂辐射强迫为依据的通用换算方法表示这些变暖影响的程度,

即全球变暖潜势(GWP)。表1为温室气体全球变暖潜能值^[6]。

表1 温室气体的当量因子潜值

Table 1 Equivalent potential of greenhouse gases

物质	全球变暖(CO ₂ -eq)/(kg CO ₂ /kg)		
	20年	100年	500年
CO ₂	1.0	1.0	1.0
CH ₄	72.0	25.0	7.6
N ₂ O	289.0	298.0	153.0

对高速公路桥梁建设期碳排放计算边界作如下界定。

1) 建材生产阶段。

在建筑工程中,主要用到的建筑材料有钢筋、水泥、砂石等,对于量很少的建筑材料本研究不予考虑。

2) 桥梁施工阶段。

从材料厂到现场的所有环节,包括了柴油汽车的运输和不同种类的机械施工。

1.2 碳排放模型的确定

排放系数法^[7]是指物质的碳排放系数与活动数据的乘积。

1) 材料生产加工阶段。

单位建筑材料生产加工过程中产生的碳排放量称为碳排放系数。根据碳排放系数法,材料生产阶段碳排放模型为:

$$C_{CO_2-e} = \sum_i [M_i (\sum_j \lambda_{j,i} \times GWP_j)] \quad (1)$$

式中: M 为建筑材料的耗用量; i 为建筑材料的种类; $\lambda_{j,i}$ 为建筑材料 i 温室气体 j 的排放系数; GWP_j 为温室气体 j 的全球变暖潜势。

2) 施工阶段。

桥梁施工过程中的碳排放主要包括建材运输的碳排放及机械施工的碳排放两个部分。根据因素分解理论,得到的建材运输阶段碳排放模型为:

$$C_{\text{CO}_2-\text{e}} = \sum_i M_i \times L_i \times C_i \quad (2)$$

式中: M_i 为施工阶段第 i 种材料的用量, kg 或 m^3 ; L_i 为运输距离, 包含往返过程, km; C_i 为运输车辆单位质量单位运输距离的碳排放, $\text{kg CO}_2/\text{kg} \cdot \text{km}$ 。

根据因素分解理论及碳排放系数法建立的机械施工碳排放模型为:

$$C_{\text{CO}_2-\text{e}} = \sum_a \left[E_a \times \left(\sum_j \lambda_{j,i} \times GWP_j \right) \right] + P \times \eta \quad (3)$$

式中: E 为施工设备的能源消耗量, kg; a 为燃料类别; P 为耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; η 为电力平均碳排放系数, $\text{kg CO}_2-\text{eq}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

1.3 清单分析

1) 能源碳排放系数。

桥梁建设过程中的化石能源主要有汽油和柴油, 柴油碳排放系数为 $3.1 \text{ kg CO}_2/\text{kg}^{[8]}$, 汽油碳排放系数为 $2.93 \text{ kg CO}_2/\text{kg}^{[8]}$ 。电力由化石燃料或其他燃料源转化而来, 根据不同电源结构在我国的分布, 得出我国电力平均碳排放系数为 $1.062 \text{ kg CO}_2-\text{eq}/\text{kW} \cdot \text{h}^{[9]}$ 。

2) 材料碳排放系数。

水泥生产过程中所产生的二氧化碳来自两个部分: 一是燃料的燃烧; 二是熟料形成阶段的排放。不同等级水泥碳排放如表 2^[10] 所示。

表 2 水泥生产 CO_2 排放量

Table 2 Cement production of CO_2 emissions

($\text{kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$)

	水泥等级		
	P.I.52.5	P.O.42.5	P.S.32.5
CO_2 排放量	0.894	0.792	0.629

炼钢过程的碳排放大部分(约 72%~73%)在炼铁以前的工序上, 碳排放系数如表 3^[10] 所示。

虽然钢材生产是高耗能高排放, 但钢材可回收性高, 因此钢材的清单数据应考虑其回收率的影响。我国钢材回收加工的能耗为钢材原始生产

能耗的 20%~50%^[11], 故本研究取 40%。钢材生产的碳排放计算公式为:

$$\begin{aligned} & \text{回收时钢材生产碳排放量} = \\ & \text{建材的单位排放量} \times (1 - \text{可回收系数}) + \\ & \text{回收再生产排放量} \times \text{可回收系数}。 \end{aligned}$$

计算所得到的不同种类钢材碳排放因子见表 4。

表 3 钢材生产的 CO_2 排放量

Table 3 Steel productions of CO_2 emissions

建材	CO_2 排放量/ ($\text{kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	适用范围
大型钢材	3.744	型钢
中小型钢材	3.003	角钢、扁钢、钢模板、钢支架等
热轧带钢	3.154	螺纹钢、圆钢
冷轧带钢	3.938	冷拔钢丝

表 4 考虑回收时钢材生产的 CO_2 排放量

Table 4 Consider the CO_2 emissions from steel production when recycling

建材	CO_2 排放量/ ($\text{kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	适用范围
大型钢材	1.722	型钢
中小型钢材	1.381	角钢、扁钢、钢模板等
热轧带钢	2.208	螺纹钢、圆钢
冷轧带钢	2.757	冷拔钢丝

铁生产是钢材生产工序中的一个环节, 碳排放大部分(约 72%~73%)在炼铁以前的工序上, 故取未考虑回收时中小型钢材清单数据的 73%作为铁的碳排放系数, 即 $2.192 \text{ kg CO}_2/\text{kg}^{[12]}$ 。由于铁容易生锈, 导致二次利用率低, 故基本不考虑它的回收。

水碳排放系数为 $0.213 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3^{[13]}$, 砂、碎石碳排放系数为 $0.002 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$, 涂料碳排放系数 $0.89 \text{ kg CO}_2/\text{kg}^{[14]}$, 木材的碳排放系数为 $73.9 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3^{[15]}$ 。

3) 机械碳排放系数。

施工机械碳排放系数是指单位台班能源消耗量与能源碳排放系数的乘积。单位机械台班所消耗的能源类型和用量可以查询《全国统一施工机械台班费用定额》^[16]。

施工机械碳排放如表5所示。

表5 不同施工机械碳排放系数
Table 5 Different construction machinery
carbon emission factor

机械	汽油/ (kg/台班)	柴油/ (kg/台班)	电/ (kW·h/ 台班)	碳排放系数/ (kg CO ₂ /台班)
75 kW 以内履 带式推土机	—	54.97	—	170.407
1.0 m ³ 履带式 单斗挖掘机	—	64.53	—	200.043

2 T 梁桥建设期碳排放的计算与分析

2.1 工程概况

湖南省益阳至娄底高速公路第11合同段,起点位于湘潭市湘乡市壶天镇大塘村 K85+400,终点位于娄底市大埠桥镇白鹭湾村 K93+600,路线总长8.2 km,全线采用双向四车道,路基宽26.0 m。本研究选取其中一段长196 m的预制T梁桥作为研究对象。

首先收集此工程实际所发生的工程量,采用工程量清单、计价文件和施工图纸中的数据来统计分析桥梁各个施工阶段的机械台班使用量、能源消耗量以及建筑材料消耗量,使最终计算的碳

排放更加真实地反应实际排放情况。

2.2 桥梁上部结构碳排放计算

桥梁的碳排放为扩大基础工程、桩基工程以及桥台、桥墩、上部结构等各部分产生的碳排放的总和。由于各部分产生的碳排放计算方法相同,故以上部结构产生的碳排放计算为例。

1) 上部结构材料生产的碳排放。

上部结构施工包括T梁预制、轨道拖车牵引、T梁安装等工程项目。现列举几种上部结构所用材料加工阶段的碳排放量计算过程:

碳排放量=材料数量×碳排放系数。

原木的碳排放量为:

$$73.9 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 \times 2.466 \text{ m}^3 = 182 \text{ kg CO}_2。$$

光圆钢筋的碳排放量为:

$$2.208 \text{ kg CO}_2/\text{kg} \times 64.536 \text{ t} \times 1\,000 = 142\,495 \text{ kg CO}_2。$$

32.5级水泥的碳排放量为:

$$0.629 \text{ kg CO}_2/\text{kg} \times 70.114 \text{ t} \times 1\,000 = 44\,102 \text{ kg CO}_2。$$

中(粗)砂的碳排放量为:

$$0.002 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 \times 1.45 \text{ t}/\text{m}^3 \times 1\,000 \times 514.746 \text{ m}^3 = 1\,493 \text{ kg CO}_2。$$

故上部结构全部材料加工阶段的碳排放如表6所示。

表6 上部结构材料碳排放表
Table 6 Carbon superstructure materials

材料	数量	碳排放系数/ (kg CO ₂ ·m ⁻³)	碳排放量/ kg	材料	数量	碳排放系数/ (kg CO ₂ ·m ⁻³)	碳排放量/ kg
原木/m ³	2.466	73.900	182	组合钢模板/t	0.218	1.381	301
锯材木中板/m ³	5.011	73.900	370	门式钢支架/t	0.007	1.381	10
光圆钢筋/t	64.536	2.208	142 495	铁件/kg	1 164.129	2.192	2 550
带肋钢筋/t	164.290	2.208	362 752	8~12号铁丝/kg	20.090	2.192	44
钢绞线普通,无松弛/t	32.212	2.757	88 808	20~22号铁丝/kg	847.349	2.192	1 857
波纹管钢带/t	2.367	1.381	3 269	铸铁管/kg	1 064.000	2.192	2 332
型钢/t	0.447	1.722	770	桥面防水涂料/kg	4 170.000	0.890	3 711
钢板/t	18.261	1.381	25 218	32.5级水泥/t	70.114	0.629	44 102
钢管/t	0.007	1.381	10	42.5级水泥/t	517.666	0.792	409 991
钢丝绳/t	0.008	2.757	22	水/m ³	1 719.150	0.213	366
钢纤维/t	0.031	2.757	85	中(粗)砂/m ³	514.746	0.002	1 493
电焊条/kg	3 459.170	1.381	4 777	碎石/m ³	877.051	0.002	2 386
钢模板/t	7.932	1.381	10 954	合计	—	—	1 108 859

由表 6 可知,钢筋碳排放最大,占 46%;水泥碳排放也比较大,占 41%;钢绞线碳排放次之,占 8%;钢板等其他钢材碳排放相对较小,占 4%;其余材料碳排放可以忽略不计。

2) 上部结构材料运输的碳排放。

公路运输消耗^[17]一级标准为:汽油货车 5.6 L/($\times 10^2$ t · km),柴油货车为 3.8 L/($\times 10^2$ t · km);二级标准为:汽油货车 5.8 L/($\times 10^2$ t · km),柴油货车为 4.4 L/($\times 10^2$ t · km)。桥梁工程运输方式主要还是以公路运输为主,此次研究中主要采用公路运输消耗一级标准,载重汽车一般使用柴油,因此本次计算材料运输均使用柴油。由于平均运输距离在国内缺乏统计数据,而且材料的运输均采用就近原则,当平均运距为 60 km 时,比较符合实际情况,故假定所有材料运距为 60 km^[6]。通过换算,材料总量为 2 835 t,材料运输阶段碳排放为:2 835 ÷ 100 × 60 × 3.8 × 0.85 × 3.10 ÷ 1 000 = 17.032 t,其中,砂石运输的碳排放量最大,其次是水泥运输、钢材运输的碳排放。

3) 上部结构机械使用的碳排放。

以电动混凝土切缝机和 20 t 汽车式起重机为例,通过查询《全国统一施工机械台班费用定额》,得到单位台班分别消耗 20.16 kW · h 和 56 kg 柴油,乘以能源碳排放系数可换算成碳排放量。

电动混凝土切缝机:

$$13.994 \text{ 台班} \times 20.16 \text{ kW} \cdot \text{h/台班} \times 1.062 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/kW} \cdot \text{h} = 300 \text{ kg CO}_2。$$

20 t 汽车式起重机:

$$10.777 \text{ 台班} \times 56 \text{ kg/台班} \times 3.1 \text{ kg CO}_2/\text{kg} = 1 871 \text{ kg CO}_2。$$

同理可得机械施工阶段碳排放如表 7 所示。

机械施工包括 T 梁的输送与安装、预应力钢绞线、接缝混凝土及伸缩缝等,其中,电弧焊机碳排放为 53 t,占 64%;电动卷扬机碳排放为 24 t,占 29%;起重机与对焊机碳排放相当,占 2%;钢绞线拉伸设备碳排放相对较少,只占 1%;其他机械碳排放可以忽略不计。

2.3 桥梁各部位碳排放分析

上部结构总碳排放为 1 209.074 t,其中,材料生产阶段碳排放为 1 108.859 t,占 92%;运输阶段碳排放为 17.032 t,占 1%;机械施工阶段碳排放

为 83.183 t,占 7%;其他部位碳排放同理可得。桥梁各部位碳排放如图 1 所示。

表 7 上部结构机械碳排放表

Table 7 Superstructure mechanical carbon emission

机械	台班	碳排放量/kg
4 000 L 以内沥青洒布车	0.200	20
电动混凝土切缝机	13.994	300
250 L 以内强制式混凝土搅拌机	5.660	317
油泵、千斤顶钢绞线拉伸设备	44.794	772
含钢带焊机波纹管卷制机	8.050	191
1.0 t 以内机动翻斗车	19.255	537
30 kW 轨道拖车头	7.145	443
12 t 以内汽车式起重机	0.383	53
20 t 汽车式起重机	10.777	1 871
30 kN 以内单筒慢动电动卷扬机	134.349	5 362
50 kN 以内单筒慢动电动卷扬机	323.577	18 939
32 kV · A 交流电弧焊机	567.870	52 846
100 kV · A 交流对焊机	4.561	875
150 kV · A 交流对焊机	2.274	657
合计	—	83 183

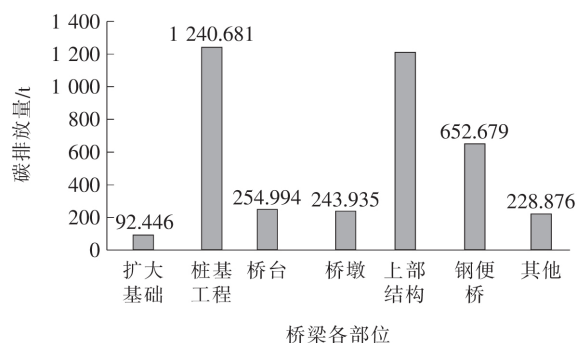


图 1 T 梁桥建设各部位碳排放图

Fig. 1 T beam bridge construction of various parts of carbon emissions

从图 1 可以看出,桥梁建设碳排放来源主要是桩基工程和上部结构,桩基工程碳排放占全桥的 31.6%,上部结构碳排放占全桥的 30.8%,其他部位碳排放相对较少。

将各部位建设材料生产阶段碳排放相加,得到全桥材料生产阶段碳排放量。同理可得全桥运输阶段和机械施工阶段碳排放,T 梁桥建设不同阶段碳排放量如表 8 所示。

从表 8 可以看出,T 梁桥建设碳排放主要来源于材料生产阶段,其次是机械施工阶段,运输阶段较少,主要来自砂石等材料的运输。

表8 桥梁建设碳排放量表

Table 8 Bridge construction carbon emission

建设期	碳排放量/t	占比/%
材料生产阶段	3 271.797	83
运输阶段	112.556	3
机械施工阶段	536.171	14
合计	3 920.524	100

通过对全桥使用的材料和施工机械进行汇总,得到各种材料碳排放如图2所示,柴油机械碳排放如图3所示,电力机械碳排放如图4所示。

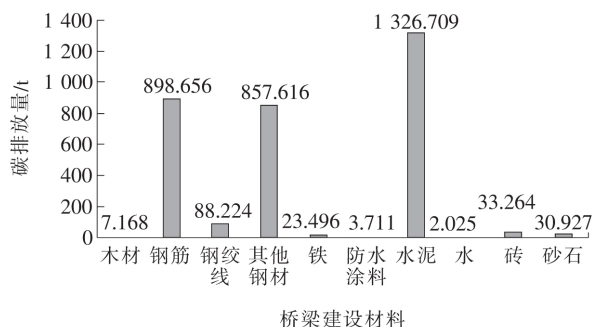


图2 T梁桥建设材料碳排放量

Fig. 2 T beam bridge construction materials carbon emissions

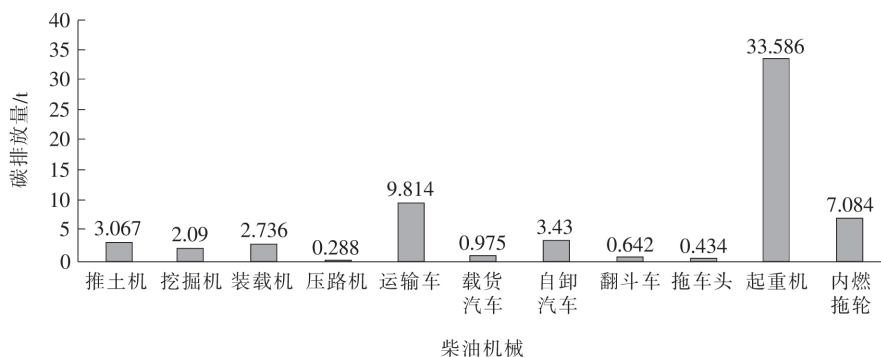


图3 柴油机械碳排放量

Fig. 3 Diesel mechanical carbon emissions

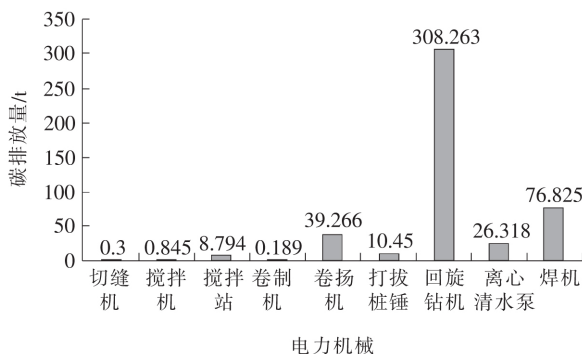


图4 电力机械碳排放量

Fig. 4 Electric machinery carbon emissions

从图3可知,水泥碳排放量最大,其次是钢筋、钢绞线及其他钢材。它们的碳排放量占材料碳排放总量的97%,其他材料碳排放仅占3%。从图3和图4可以看出,电力碳排放明显多于柴油碳排放,其主要来自于回旋钻机,占机械施工碳排放的57.5%;其次是电弧焊机,占机械碳排放的14%;电动卷扬机占机械碳排放的7.3%;起重机占机械碳排放的5.4%;其他施工机械碳排放相对

较少。

3 参数敏感性分析

桥梁建设期碳排放计算模型中包括建材碳排放因子、化石能源碳排放因子和电力碳排放因子等参数。由于影响因素的复杂性及发展的不确定性,建设期内各因子的取值仍有可能发生变化。如:电力碳排放因子、柴油碳排放因子和钢材水泥碳排放因子等,这些参数的变化对建设期碳排放值影响较大,需要进行敏感性分析。将这些参数敏感性分析设为碳排放因子上升10%,20%和碳排放因子下降10%,20%,分别计算建设期碳排放,结果如表9所示。

从图5可以看出,水泥碳排放因子敏感性最强。故材料生产阶段碳减排主要应从水泥生产技术上改进,如采用环保的高性能水泥。在机械施工阶段,碳减排主要从电力消耗上考虑,应从电力生产方式上进行优化。

表 9 电力、柴油、钢材及水泥碳排放因子敏感性分析

Table 9 Sensitivity analysis of carbon emission factor of diesel electric steel and cement t

碳排放因子	碳排放量			
	电力	柴油	钢材	水泥
增加 20%	3 360.659	3 302.989	3 514.917	3 534.533
增加 10%	3 315.151	3 286.316	3 392.280	3 402.088
基值	3 269.643	3 269.643	3 269.643	3 269.643
减小 10%	3 224.135	3 252.970	3 147.006	3 137.198
减小 20%	3 178.627	3 236.296	3 024.369	3 004.753

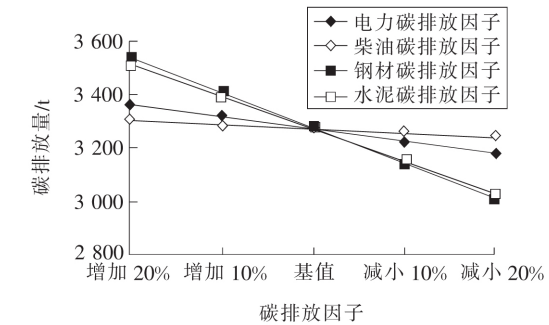


图 5 电力、柴油、钢材及水泥碳排放因子敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of carbon emission factor of diesel electric steel and cement

4 结论

通过对水泥、钢材和机械碳排放因子进行清单分析,并依据整理的清单数据和所建立的碳排放模型,作者对 T 梁桥从基础、桥墩桥台、上部结构等不同部位分为材料生产、运输、机械施工三个阶段进行了核算分析,找出了不同部位不同阶段的碳排放主要来源,得出如下结论。

1) T 梁桥建设碳排放来源主要是桩基工程 and 上部结构,桩基工程碳排放占全桥的 31.6%,上部结构碳排放占全桥的 30.8%,其他部位碳排放相对较少。

2) T 梁桥建设碳排放主要来源于材料生产阶段,占 83%,其次为机械施工阶段,占 14%,运输阶段相对较少。水泥碳排放量最大,其次是钢筋、钢绞线及其他钢材。T 梁桥机械施工碳排放、电力碳排放明显多于柴油碳排放,其主要来自回旋钻机,占机械施工碳排放的 57.5%;其次是电弧焊机,占机械碳排放的 14%;电动卷扬机占机械碳排

放的 7.3%;起重机占机械碳排放的 5.4%;其他机械碳排放相对较少。

3) T 梁桥建设期碳排放影响较大的参数敏感性强度排序为:水泥碳排放因子>钢材碳排放因子>电力碳排放因子>柴油碳排放因子。

建设过程中温室气体排放的定量估算结果表明,主要应从桩基工程、上部结构和材料的生产方面来考虑低碳环保,优化施工工艺,建立低碳施工方案。

〔参考文献〕

[1] 刘沐宇,吴志强,王铨铨.桥面铺装结构与材料生命周期环境影响研究[J].武汉:武汉理工大学学报,2014,38(1):46-50
LIU Mu-yu, WU Zhi-qiang, WANG Cheng-cheng. Study on the impact of bridge pavement structure and material life cycle environment[J]. Wuhan: Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 38(1): 46-50.

[2] 武文杰.基于不确定性的钢筋混凝土桥梁量化可持续性评价[D].北京:北京交通大学,2013.
WU Wen-jie. Quantitative sustainability evaluation of reinforced concrete bridges based on uncertainty [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[3] 潘美萍.基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法的研究及应用[D].广州:华南理工大学,2011.
PAN Mei-ping. Research and application of expressway energy consumption and carbon emission calculation method based on LCA[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[4] 孙晓燕,董伟伟,王海龙.桥梁全寿命周期碳强度指标模糊综合评估[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(4):735-747.
SUN Xiao-yan, DONG Wei-wei, WANG hai-long. Fuzzy comprehensive evaluation of bridge life cycle carbon intensity index[J]. Journal of Basic Science and Engineering Science, 2013, 21(4): 735-747.

[5] 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[J].北京:北京交通大学,2011.
PANG Bo. Environmental impact analysis of prestressed reinforced concrete continuous rigid frame bridge based on LCA[J]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[6] A Mackay. Contribution of working groups I, II and

- III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 37(6): 2407.
- [7] 李煜, 李慧, 李颖. 炼厂温室气体排放核算研究[J]. 广州化工, 2014, 42(19): 138—141.
- LI Yu, LI Hui, LI Ying. Study on greenhouse gas emission accounting in refinery[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(19): 138—141.
- [8] 贺晓彤. 城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- HE Xiao-tong. Analysis of carbon emission calculation and main influencing factors in construction of urban rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [9] 刘沐宇, 欧阳丹. 桥梁工程生命周期碳排放计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S1): 125—129.
- LIU Mu-yu, OUYANG Dan. Bridge engineering life cycle carbon emission calculation method [J]. Civil Engineering and Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 125—129.
- [10] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和二氧化碳排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- YAN Yan. Study on consumption and CO₂ emissions of construction life cycle in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2011.
- [11] 赵平. 建筑材料环境负荷指标及评价体系的研究[J]. 中国建材科技, 2004, 13(6): 1—7.
- ZHAO Ping. Research on environmental load indicators and evaluation system of building materials[J]. China Building Materials Technology, 2004, 13(6): 1—7.
- [12] 苏醒, 张旭, 张荣鹏. 钢结构建筑用钢的生命周期评价[A]. 第三届宝钢学术年会[C]. 上海: 科学技术文献出版社, 2008: 65—73.
- SU Xing, ZHANG Xu, ZHANG Rong-peng. Life cycle assessment of steel for steel structure construction [A]. The Third Baogang Academic Annual Meeting[C]. Shanghai: Science and Technology Literature Publishing House, 2008: 65—73.
- [13] 国家温室气体清单特别工作组. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[M]. 神奈川: 日本全球环境战略研究所, 2006.
- National Greenhouse Gas Inventory Task Force. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: Japan Institute of Global Environmental Strategy, 2006.
- [14] 张又升. 建筑物生命周期二氧化碳减量评估[D]. 台南: 国立成功大学, 2002.
- ZHANG You-sheng. Assessment of life cycle carbon dioxide emissions from buildings [D]. Tainan: National Cheng Kung University, 2002.
- [15] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- YANG Qian-miao. Quantitative evaluation of environmental impact of construction products life cycle [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [16] 中华人民共和国建设部. 公路工程机械台班费用定额[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Highway construction machinery class costs fixed[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [17] 王贤卫, 吴灵生. 高速公路建设 CO₂ 排放计算分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 150—158.
- WANG Wei-xian, WU Ling-sheng. Calculation and analysis of CO₂ emission in expressway construction [J]. Road Traffic Technology, 2014, 31(2): 150—158.