

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.064

# 基于 BIM 的物化阶段碳排放简化计算方法

李 晓, 许 怡, 孔维耀, 赵一婕

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘 要:**“十四五”时期是我国持续推进节能减排、持续向双碳目标迈进的重要时期,建筑业作为我国碳排放的重要来源,必须在设计阶段就进行碳排放的计算,实现以减少碳排放为目标的设计。为了在结构设计中实现物化阶段碳排放量的快速统计和优化设计,提出综合碳排放因子的概念以简化碳排放计算。与此同时,为了达到碳排放量自动统计及便捷优化设计的目的,尝试将综合碳排放因子同 BIM 软件结合起来,利用 BIM 中明细表功能,实现基于构件类别的碳排放自动统计,以达到节能减排的目标。

**关键词:** 碳排放;简化计算;BIM;优化设计;节能减排

**中图分类号:** TU2

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2023)04-0238-04

## 0 引言

在全球气候变化的大背景下,中国作为全球二氧化碳排放量最大的国家,力争于 2030 年前达到碳排放峰值,努力争取在 2060 年实现碳中和。建筑业作为碳排放的重要来源,占社会总排放量的三分之一<sup>[1]</sup>,为了适应环保战略的不断升级,我国建筑设计行业需要积极响应碳减排号召,量化结构碳排放评价指标,实现结构方案碳排放优化,降低结构工程碳排放量,推动低碳技术在工程中的应用。

建筑生命周期碳排放<sup>[2]</sup>是指建筑物在与其相关的建材生产和运输、建筑施工、建筑运行、建筑拆除、废料回收和处理五个阶段产生的温室气体排放的总和。对设计而言,建筑运行阶段所产生的碳排放量与建筑功能和后期使用有关,难以从调整结构形式和布置的角度进行优化;建筑日后拆除和回收利用中的碳排放过于遥远,难以估计其何时、是否会发生。因此,设计中应以衡量并减少结构物化阶段碳排放为主。建筑物化阶段碳排放主要包括建材的生产、运输和建筑建造过程的碳排放,该阶段施工规模大、建材数量多、建设周期时间集中,造成了大量的碳排放。

《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)<sup>[3]</sup>是现行计算碳排放的主流依据,其统计方法是基于各种材料、施工方式等所产生工程量计算的,这种方式更适用于工程完工以后的碳排放统计,不便于

在设计阶段进行优化,也难以满足快速统计碳排放的需求。

## 1 碳排放简化计算方法

为此我们提出了基于结构构件的碳排放计算方法,即以综合碳排放因子为基础的碳排放简化计算方法。考虑到 BIM 中可以方便地提取各构件的体积,因此将其与 BIM 相结合,令各构件不同阶段排放因子统一量纲,以构件体积( $m^3$ )为单位进行碳排放的统计。通过对  $i$  阶段的排放因子进行量纲调整得到该阶段调整后碳排放因子  $Y_i$ ,乘以该阶段的修正系数  $\gamma_i$ ,再将各个因子求和,就得到综合碳排放因子  $Y_z$ ,见式(1):

$$\sum_{i=1}^n Y_i \gamma_i = Y_z \quad (1)$$

由于不同构件综合碳排放因子  $Y_z$  有所不同,所以需要构建一个用于统计排放总量的综合碳排放因子库。

## 2 物化各阶段简化计算过程

### 2.1 建材生产阶段

《建筑碳排放计算标准》(GBT 51366—2019)中规定建材生产阶段碳排放计算方法如式(2):

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i F_i \quad (2)$$

式中: $C_{sc}$  为建材生产阶段碳排放( $kg CO_2 e$ ); $M_i$  为第  $i$  种主要建材的消耗量; $F_i$  为第  $i$  种主要建材的碳排放因子( $kg CO_2 e/$  单位建材数量),按此标准附录 D 取值,其中部分碳排放因子(节选)见表 1。

收稿日期: 2022-12-07

作者简介: 李晓(1995—),男,工程硕士,助理工程师,从事结构设计工作。

表1 规范中建筑材料碳排放因子(节选)

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子
C30 混凝土	295 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
C50 混凝土	385 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
热轧碳钢小型钢	2 310 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢中型钢	2 365 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢 H 钢	2 350 kg CO <sub>2</sub> e/t
热轧碳钢钢筋	2 340 kg CO <sub>2</sub> e/t
混凝土砖(240 mm × 115 mm × 90 mm)	336 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
蒸压粉煤灰砖(240 mm × 115 mm × 53 mm)	341 kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>

需要注意的是,规范中所列出的碳排放因子并不完备,无法覆盖工程中的各种情况,尚需参考国内外相关文献的研究结果。俞海勇<sup>[4]</sup>及其团队针对现浇混凝土碳排放因子做了详实的研究,提供了各种强度等级、各种材料的碳排放因子,可以作为标准计算过程中的重要补充。

不同材料的碳排放因子单位并未统一,可以通过不同材料的密度将其统一为单位体积的建材生产调整后排放因子  $Y_1$ (见表2)。从表2中数据可以看出,在建筑材料生产阶段,混凝土及砌体的调整后碳排放因子较钢材要小很多,大约仅为钢材建材生产调整后碳排放因子的 1.94%。

表2 建材生产调整后碳排放因子  $Y_1$  单位:kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup>

建筑材料类别	建材生产调整后排放因子 $Y_1$
C30 混凝土	295
C35 混凝土	342
C40 混凝土	391
C45 混凝土	378
C50 混凝土	385
热轧碳钢小型钢	18 134
热轧碳钢中型钢	18 565
热轧碳钢 H 钢	18 448
热轧碳钢钢筋	18 252
混凝土砖(240 mm × 115 mm × 90 mm)	336
蒸压粉煤灰砖(240 mm × 115 mm × 53 mm)	341

## 2.2 建材运输阶段

《建筑碳排放计算标准》(GBT 51366—2019)中规定建材运输阶段碳排放计算方法如式(3):

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i \quad (3)$$

式中: $C_{ys}$ 为建材运输阶段碳排放(kg CO<sub>2</sub> e); $M_i$ 为第  $i$  种主要建材的消耗量; $D_i$ 为第  $i$  种建材平均运输距离(km); $T_i$ 为第  $i$  种建材的运输方式下,单位重量运输

距离的碳排放因子[kg CO<sub>2</sub> e/(t·km)]可按该标准附录 E 取值。

根据标准规定,无运距信息时可取混凝土的默认运输距离值为 40 km,其他建材的默认运输距离值取 500 km 进行计算。根据工程经验,预拌混凝土每车可运输混凝土 10 m<sup>3</sup>(即 25 t),其余建材的运输大多采用柴油货车(载重 30 t),故各类材料可简化统一柴油货车(载重 30 t)碳排放因子 0.078 kg CO<sub>2</sub> e/(t·km)进行计算。按以上原则进行简化,并将建材运输中的碳排放因子替换为单位体积计量的建材运输调整后碳排放因子  $Y_2$ (见表3)。不同密度的材料会产生不同的调整后建材运输碳排放因子,需要分别计算考虑。

表3 建材运输调整后碳排放因子  $Y_2$  单位:kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup>

建筑材料类别	建材运输碳排放因子 $Y_2$
混凝土	8
钢筋	304
钢材	304
混凝土实心砖	82
蒸压粉煤灰砖	57

## 2.3 建筑建造阶段

《建筑碳排放计算标准》(GBT 51366—2019)中规定建材运输阶段碳排放计算方法如式(4):

$$C_{jz} = \sum_{i=1}^n E_{jz,i} EF_i \quad (4)$$

式中: $C_{jz}$ 为建材建造运输阶段碳排放(kg CO<sub>2</sub> e); $E_{jz,i}$ 为第  $i$  种能源用量(kWh 或 kg); $EF_i$ 为第  $i$  类能源的碳排放因子(kg CO<sub>2</sub>/kWh 或 kg CO<sub>2</sub>/kg),按该标准附录 A 确定。

规范中计算方法尚存在以下问题需要解决:

(1)规范附录 A 中未给出以电能作为能源时的碳排放因子,为此崔鹏<sup>[5]</sup>及其团队参考了《2013 年中国区域电网基准线排放因子》中的计算方法和计算结果,将电网边界统一划分,得到了电能碳排放因子(见表4)。

表4 不同电网区域电能碳排放因子 单位:kg CO<sub>2</sub> e/kWh

电网区域	电能碳排放因子
华北	1.03
东北	1.11
华东	0.81
华中	0.98
西北	0.97
南方	0.92

(2)规范附录 C 中给出了常用施工机械台班能源用量,但仍需明确单位台班施工机械所能完成的工程量,此时就需要将规范与各地住建有关单位给出的定额结合起来。以《江苏省建筑与装饰工程计价定额》<sup>[6]</sup>为依据,现浇混凝土建造过程主要涉及到的施工措施包括:钢筋工程、脚手架工程、模板工程、现浇混凝土工程,其中脚手架工程可忽略其机械用量,各工程每台班各机械能源用量均可查得。

以各地住建有关单位给出的定额为依据可以得到每台班机械可以完成的生产量及能源的消耗量,即可将其换算为建筑施工调整后碳排放因子  $Y_3$ 。表 5、表 6 和表 7 分别给出了现浇混凝土梁(钢模板)中混凝土、钢筋以及热轧 H 型钢梁构件的建筑施工调整后碳排放因子。

表 5 现浇混凝土梁中混凝土施工调整后碳排放因子  $Y_3$   
单位:kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup>

机械	每 m <sup>3</sup> 台班	能源	每台班能耗 (kg,kWh)	能源碳排放因子	碳排放量	总计 $Y_3$
振捣器	0.114	柴油	29	3.67	12	
泵车	0.011	柴油	306	3.67	12	27
汽车吊	0.026	柴油	28	3.67	3	

表 6 现浇混凝土梁中钢筋施工调整后碳排放因子  $Y_3$   
单位:kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup>

机械	每 m <sup>3</sup> 台班	能源	每台班能耗 (kg,kWh)	能源碳排放因子	碳排放量	总计 $Y_3$
卷扬机	0.928	电	33	0.81	25	
切断机	0.749	电	32	0.81	19	
弯曲机	1.529	电	13	0.81	16	425
弧焊机	3.814	电	97	0.81	300	
对焊机	0.655	电	122	0.81	65	

表 7 热轧 H 型钢梁施工调整后碳排放因子  $Y_3$  单位:kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup>

机械	每 m <sup>3</sup> 台班	能源	每台班能耗 (kg,kWh)	能源碳排放因子	碳排放量	总计 $Y_3$
汽车吊	1.014	柴油	38	3.67	141	270
弧焊机	1.638	电	97	0.81	129	

从表中数据可以看出,在建筑施工阶段,施工每立方米钢筋的碳排放量大于施工每立方米热轧型钢梁的碳排放量,而施工每立方米混凝土的碳排放量最小。钢筋工程中造成碳排放最大的施工机械为交流弧焊机,其碳排放量所占比重为 70.6%。

### 3 综合碳排放因子计算

如前所述,通过将不同阶段的碳排放因子统一单位,以构件体积(m<sup>3</sup>)为单位,并对其计算方法加以

简化得到不同阶段的调整后碳排放因子  $Y_i$ 。不同阶段、不同构件可以通过乘以该阶段的修正系数  $\gamma_i$  使得理论计算更加符合实际工程情况,其取值主要可以从以下方面进行考虑。

(1)建材生产阶段:由于需要考虑在施工过程中的材料损耗,因此尚需根据其损耗率对调整后建材生产碳排放因子  $Y_1$  进行放大,可参考地方定额要求。以现浇混凝土为例,若其损耗率为 1.5%,即可取  $\gamma_1=1.015$  进行计算。在焊接工艺中,可以假定焊条的碳排放量与其母材相同,则只需要利用地方定额将所使用焊条考虑进入修正系数  $\gamma_1$  即可。

(2)建材运输阶段:由于按照规范要求时所计算出的调整后建材运输碳排放因子  $Y_2$  对于混凝土材料和其他材料有较大差异,因此需要根据实际工程情况对其予以调整。如果除混凝土以外的其他建材实际运输距离小于规范假定的 500 km,则可以通过实际运输距离同 500 km 的比例关系计算出该阶段的修正系数  $Y_2$ 。

(3)建筑施工阶段:在现浇混凝土结构中,在施工过程中模板若采用木模板,则可以通过地方定额估算不同构件每立方米所需模板数量。木模板虽然可以循环使用,但往往使用次数仍然受限,故需要对其碳排放量予以考虑。当将此部分碳排放量作为施工阶段排放量时,则需要运用上节的方法计算出每立方米混凝土所消耗木模板碳排放量,然后将此部分增加量通过修正系数  $\gamma_3$  予以考虑。

通过不同阶段修正系数,即可利用式(1)得到不同构件的综合碳排放因子  $Y_z$ 。当考虑施工中采用钢模板进行现浇混凝土梁浇筑,取钢筋运距 100 km、热轧型钢梁运距 200 km 时的综合碳排放因子  $Y_z$  计算见表 8。

表 8 综合碳排放因子  $Y_z$  单位:kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup>

构件	材料分类	调整后碳排放因子			综合碳排放因子 $Y_z$
		建筑材料	建材运输	建筑施工	
现浇混凝土梁	C35 混凝土	342	8	27	413
	HRB400 钢筋	18 252	304	425	19 103
热轧型钢梁	Q345 钢材	18 448	304	270	18 840

如图 1 所示,从不同阶段的综合碳排放因子可以看出构件各种材料在物化阶段的碳排放特征。

(1)在建筑物化阶段由于建材生产造成的碳排放量较其他阶段最多,均占到了 90%以上。对于现浇

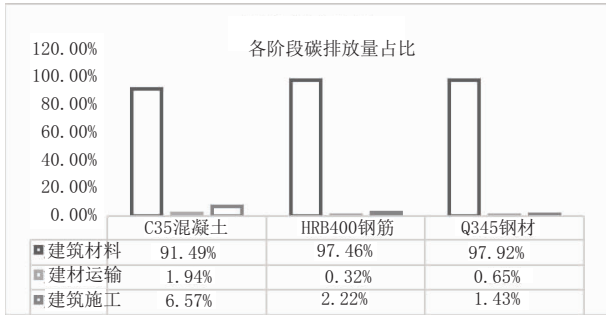


图 1 各阶段不同材料排放占比

混凝土梁中的钢筋部分和热轧型钢梁,其建材生产碳排放量甚至可以占到 97%以上。

(2)在建筑物化阶段由建材运输造成的碳排放量较其他阶段最少,均不超过 2%。

(3)对于现浇混凝土梁中的混凝土部分,其建筑施工过程中产生的碳排放量占其物化阶段碳排放总量的 6.57%,需予以重视和考虑。

#### 4 BIM 中碳排放自动计算

建立实际工程的 BIM 模型,在实现可视化的同时,即能得到其碳排放量结果。以太仓城东水质净化厂项目为例,如图 2 所示,该项目为半地下式污水处理厂,污水处理规模为 15 万 m<sup>3</sup>/d,其综合处理设施箱体为该项目主要部分。综合处理设施箱体长约 238 m,宽约 148.6 m,地下一层,地上一层,其地下部分为钢筋混凝土水池结构,地上部分为钢筋混凝土框架结构。



图 2 太仓城东水质净化厂项目 BIM 模型

利用 BIM 中自带的“明细表”功能,通过读取构件信息,结合不同构件的综合碳排放因子数据库计算出该类构件的碳排放量,进而可得到整个项目的总碳排放量。

(1)在 BIM 中生成按构件分类的明细表,在大类上分为:梁、板、柱、墙等,明细表中会记录构件材料、截面、体积等有关重要信息,并能够自动汇总不同材料不同构件的体积。

(2)优化 BIM 明细表,引入统计汇总的综合碳排放因子库,在明细表中自定义列:综合碳排放因子、碳排放量。

(3)设定明细表中列与列之间的计算关系,根据

构件体积乘以其对应的综合碳排放因子,实现自动计算,并得到其碳排放量和总碳排放量,如图 3 所示。

A	B	C	D	E
族	类型	体积/m <sup>3</sup>	综合碳排放因子/kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	碳排放量/t CO <sub>2</sub> e
混凝土矩形梁	300×400	0.00	413	0
矩形混凝土框架	300×800	2 070.21	413	855
矩形混凝土框架	400×900	1 617.62	413	688.08
混凝土矩形梁	400×1000	2.98	413	1.23
矩形混凝土框架	450×600	14.11	413	5.83
矩形混凝土框架	500×900	50.89	413	21.02
矩形混凝土框架	500×1000	1 790.54	413	739.49
矩形混凝土框架	500×1400	312.16	413	128.92

图 3 利用明细表自动计算碳排放量

以现浇混凝土梁为例,参考江苏省工程定额标准,框架梁及次梁可统一取其钢筋含钢量为 0.143 t/m<sup>3</sup>,则可利用 BIM 明细表功能自动统计得到该类构件碳排放总量(见表 9),现浇混凝土梁中钢筋在物化阶段产生的碳排放量占其碳排放总量的 37.2%。

表 9 混凝土梁碳排放自动计算结果

构件类别	材料分类	体积 / m <sup>3</sup>	综合碳排放因子 / (kg CO <sub>2</sub> e·m <sup>-3</sup> )	碳排放量 / (t CO <sub>2</sub> e)	总计 / (t CO <sub>2</sub> e)
现浇混凝土梁	C35 混凝土	5 859	413	2 420	4 472
	钢筋	107	19 103	2 052	

因此,若在 BIM 中调整结构形式、布置便可通过自动实时更新的碳排放量,分析比较不同设计方案的结构碳排放总量。

#### 5 结 语

本文通过研究碳排放简化计算及利用 BIM 进行碳排放自动统计,实现了以碳排放为出发点进行设计的目标。除此之外,在研究中还得出以下结论:

(1)在建材生产阶段,混凝土及砌体建筑材料的调整后碳排放因子较钢材要小很多,大约仅为钢材建材生产调整后碳排放因子的 1.94%。与此同时在建筑物化阶段中,由建材生产造成的碳排放量较其他阶段最多,均占到了 90%以上。

(2)在建材运输阶段,建筑物化阶段中由建材运输造成的碳排放量较其他阶段很少,对于混凝土和钢材来说均不超过 2%。

(3)在建造施工阶段,施工每立方米钢筋的碳排放量大于施工每立方米热轧型钢梁的碳排放量,而施工每立方米混凝土的碳排放量则最小。

(4)通过将实际工程 BIM 模型与综合碳排放因子相结合,利用 BIM 明细表功能可以实现结构碳排放量的自动统计。若在 BIM 中调整结构形式、布置便能自动更新总排放量,以实现设计优化。

(下转第 249 页)

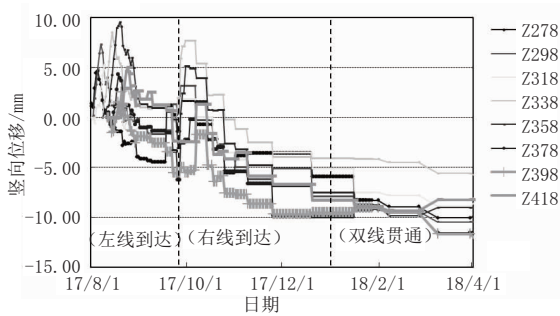


图5 左线盾构轴线处地面变形曲线图

地表沉降趋于稳定,最终沉降范围在 6.5~11.68 mm,最大沉降 -11.68 mm,与根据 PECK 公式计算出的双线沉降数值 7.7 mm 比较接近。绝大部分测点沉降均小于 10 mm,满足设计要求。

此外,根据监测数据,盾构通过一般区段时,盾构轴线处地面沉降稳定值约 10~20 mm,表明盾构二次注浆等措施对控制沉降起到了显著的作用。

### 3.4 沉降控制措施

根据对一些实际工程的观测资料以及盾构推进过程的分析可知,在盾构推进过程中,引起土体位移和地面沉降的主要因素有开挖面土体的三维移动、盾构壳与土体之间的摩擦、盾构超挖、土体挤入盾尾空隙、土体次固结、孔隙水的流动、开挖面压力变化量、注浆率等。为此,针对盾构掘进下穿滑行道区域时,应采取严格、有效的施工措施:

(1)盾构施工前,应核对隧道沿线地质资料、物探资料。同时,详细排摸沿线地下管线、构筑物及临近建筑物基础类型、埋深。对此,在施工中采取相应的保护措施。

(2)应建立完整的测量和监控量测系统,控制隧道轴线偏差,对地层及结构进行监测,并及时反馈信息,实行信息化施工。

(3)盾构掘进速度,应与地表控制的隆陷值、进出土量、正面土压平衡调整值及同步注浆等相协调。一旦停歇时间较长时,必须及时封闭正面土体。

(4)盾构推进时,须对盾构外径及衬砌外径间的环形空隙进行同步压注单液浆。

(5)不断完善施工工艺,严格控制盾构推进地层损失率。

## 4 结论

以某机场捷运工程为背景,通过对地面超载的合理确定,确定合适的隧道埋深,并采取针对的结构构造及施工措施,有效降低了工程风险,保证机场运营安全。

(1)应针对地下隧道形式的不同合理确定滑行道下的飞机荷载。对于浅埋工程,飞机荷载产生的荷载效应较大。对于该工程盾构隧道,当埋深大于 11 m 时,地面超载以一般超载控制。

(2)盾构隧道穿越滑行道等风险点时,隧道埋深宜尽量深埋,以降低飞机荷载的影响,保证管片结构的耐久性。同时也可显著减小道面沉降,保证机场运营安全。

(3)盾构推进中应严格控制地层损失率,建立完善实时沉降监测体系,不断完善施工工艺措施,控制地表沉降。

### 参考文献:

- [1] 孙璋,廖少明,米思兴.下穿上海虹桥机场飞行区的三项隧道工程简介[J].地下工程与隧道,2010(3):10-14.
- [2] 马栋,黄立新.首都机场下穿跑道隧道施工道面沉降修复技术[J].铁道建筑技术,2016(8):31-35+54.
- [3] 田小芳.地下结构下穿机场设计中飞机荷载计算研究[J].现代隧道技术(增刊2),2019(12):532-537.
- [4] 童建军,桂登斌,王力,等.下穿飞机跑道地铁区间隧道附加荷载计算方法[J].隧道建设(中英文),2020,40(9):1292.
- [5] 刘子钰,赵鸿铎.A380-800 飞机荷载作用下复合道面的结构响应分析[J].西部交通科技,2014(2):69-74.
- [6] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [7] 游庆龙,凌建明,赵鸿铎,等.考虑飞机制动力的机场沥青道面力学响应分析[J].同济大学学报(自然科学版),2012(4):223-227.

(上接第 241 页)

### 参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2015[M].北京:建筑工业出版社,2015.
- [2] 关军,储成龙,张智慧.基于投入产出生命周期模型的建筑业能耗及敏感性分析[J].环境科学研究,2015,28(2):297-303.
- [3] GB/T 51366—2019,建筑碳排放计算标准[S].
- [4] 俞海勇,王琼,张贺,等.基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J].粉煤灰,2011,23(6):5.
- [5] 崔鹏.建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D].南京:东南大学,2015.
- [6] 江苏省住房和城乡建设厅.江苏省建筑与装饰工程计价定额[M].南京:江苏科学技术出版社,2014.