

超高层建筑结构优化过程中的环境成本计算

赵 昕^a, 方 朔^b

(同济大学 a. 建筑设计研究院(集团)有限公司; b. 土木工程学院, 上海 200092)

摘 要:近年来中国大陆掀起了超高层建筑的兴建热潮。超高层建筑体量巨大,其碳排放和能源消耗对环境有显著影响。在评估和优化超高层建筑的全生命周期环境成本时,提出了一个全新的全生命周期模型。新模型有两大特征:首先,同时考虑了建筑材料的空间分布与时间特征;其次,把单尺度生命周期概念拓展到多尺度生命周期概念,以从更多角度来研究碳排放情况。建立了一个基准超高层建筑模型来阐释对新模型的应用。根据初步研究结果,应用新方法可以选择出更优化的结构设计方法,以最大程度减少碳排放量。

关键词:超高层建筑;结构设计;环境影响评估;全生命周期设计

中图分类号:TU972+.9

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S2-0004-07

Calculation of environmental cost in the structural optimization of super tall buildings

ZHAO Xin^a FANG Shuo^b

(a. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd.,

b. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Chinese mainland has seen a rapid construction speed of super tall buildings in recent years. Due to its huge quantity material and energy assumption, the super tall buildings exert great impact on the environment. An innovative new life cycle model is proposed for assess and optimize the life cycle environmental cost of super tall buildings. The new life cycle model has two features. Firstly the space distribution of the building materials is considered besides the time dimension, and secondly the single life cycle concept is extended to multiple life cycles to investigate the carbon footprint from the perspective of more than one life cycle. A benchmark super tall building is established to illustrate the application of the proposed new life cycle model. According to the case study results, a remarkable difference would be made in carbon emissions if the life cycle environmental cost based structural optimization method could be applied.

Key words: super tall buildings; structural design; environmental impact assessment; integrated life cycle design

近年来,人们越来越关注气候变暖问题。2009年,世界气候大会在丹麦哥本哈根召开,与会者讨论了全球瞩目的气候变化对地球和人类的潜在影响,深化了有关共识。2007年中国在发展中国家中第一个制定并实施了应对气候变化国家方案,2009年确定了到2020年单位国内生产总值温室气体排放比2005年下降40%~45%的行动目标^[1]。

截至2012年5月初,大陆规划、在建和建成的超过300m的超高层建筑数量超过40座,超过600m的有3座(上海中心、武汉绿地中心、深圳平安国际金融大厦)。我国建筑总能耗占全国总能耗的20%~30%^[2]。大陆的超高层建筑建设热潮必将会对环境产生巨大的影响(见图1),制定相应的环境成本评估和计算方法势在必行。

气候变暖是人们最关心的议题。全生命周期的环境成本(见图2)中重要的气体参数有二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、六氟化硫、全氟碳化物以及氢氟碳化物等。笔者仅以二氧化碳为例,分析其与超高层建筑结构优化的关系,其他GHG气体排量乘以相应的GWP值即可得出相关影响。笔者只涉及

了结构工程师能够直接接触到的设计领域,即直接与结构相关的碳排放^[3](见图3)。

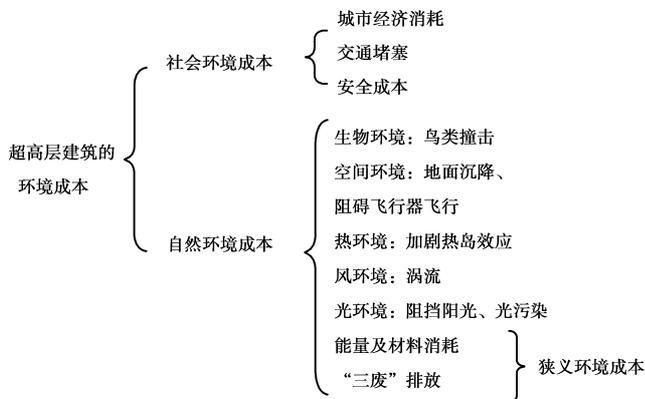


图1 超高层建筑对环境的影响

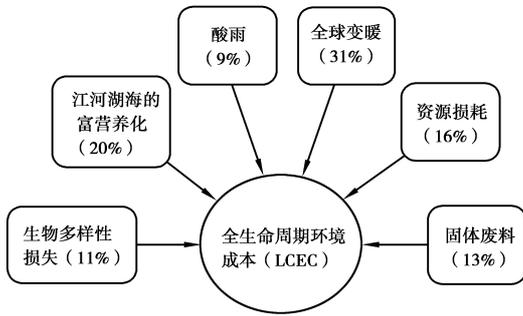


图 2 生命周期环境成本^[3]

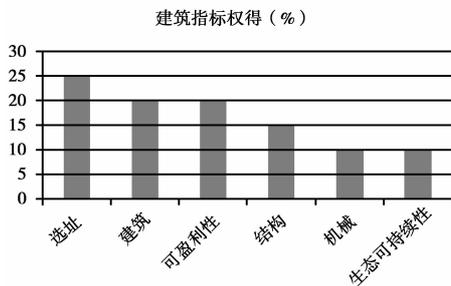


图 3 结构与建筑整体的关系^[4]

1 基于生命周期时空模型 (Time-space based life cycle model, TSLCM) 的结构优化设计方法

1.1 生命周期盘查

1.1.1 范围与系统边界

从材料和能源的角度,建筑的生命周期是指从生产材料的开采,构件的加工制造(包括运输过程)、施工、运行与维护直到建筑的拆除与处理(废弃、再循环和再利用等)。

1) 盘查范围

为计算方便及明晰概念,很多材料并不考虑其完整的使用寿命。做出以下假设。

a) 能源:只考虑工厂一级的能源输入,不向上追溯;不计能源损耗,假设在使用过程中全部按照一定的氧化规律转化成了二氧化碳。

b) 生产阶段:考虑主要供应工厂,从其他工厂补充的少量材料的碳排放以主要工厂的标准计算。对于粉煤灰、高炉矿渣等工业副产品,隐含碳数值很大,但由于是发电厂的废弃资源分选而成,故不计入建筑生命周期的碳排放。

c) 固化碳、生物质能燃料和可再生能源不进行碳排放计算,但是会被列为重要的参考变量。

2) 系统边界

现在主要有 3 种统计范围^[6]:“从摇篮到大门(cradle-to-gate)”包括原料开采及生产的阶段;“从摇篮到坟墓(cradle-to-grave)”包括了从原料开采、加工生产、安装、使用及处理等阶段;“从摇篮到摇篮(cradle-to-cradle)”就是把“从摇篮到坟墓”的评价方式拓展到回收阶段,但对于可回收材料的表述并不明确,见图 4。

提出 cradle-to-cradle-to-gate 新边界。末段的 cradle-to-gate 阶段考虑了可回收材料的运输并进行二次加工的碳排

放。这种做法考虑了可回收材料的效用,提高回收利用的积极性。回收再生产阶段不但包括对材料的回收利用,还包括对余能余热的回收利用。

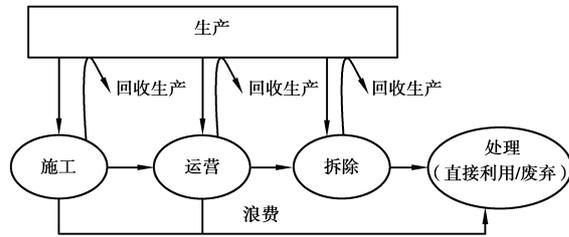


图 4 边界模型

1.1.2 隐含碳与隐含能

隐含能和隐含碳分别用 MJ/kg 和 kg · CO₂/kg 作为各自的单位。对同种材料来说,采用不同的生产商或供应商会显著影响隐含能与隐含碳的数值;不同的规格特性也会使结果不同,如碳素钢与不锈钢,胶合木与锯材。

$$C = kE_i + xL_i \quad (1)$$

其中:C 为碳排放;k 为二氧化碳排放因子;E 为能量量;x 为生产过程中化学反应产生二氧化碳的系数(无化学反应时取为 1.0);L 为材料量。

隐含碳包括材料相关(material-related)碳足迹和非材料相关(non-material-related)碳足迹。材料相关碳足迹计算直接生产原料有关(如石灰石、砂石的生产加工运输等)的碳排放,不考虑间接使用的材料有关(如制造施工机械)的碳排放,还包括能源转移成物质材料(如原油可以制成塑料和橡胶)的碳排放。非材料相关碳足迹主要是运营阶段暖通电气耗能引起碳排放,与材料无关。

建筑能量消耗包括运营能和隐含能。隐含能包括必要隐含能(包括生产和施工阶段)和随机隐含能(包括维修和运营阶段)^[7]。钢材的隐含能数值是 18.130 7 MJ/kg,水泥熟料为 3.512 4 MJ/kg^[8]。

$$C = \left[\sum_{n=1}^N X_n \right] / A + \left[\underbrace{\left[\sum_{p=1}^P y_p / l_p \right]}_{\text{独立构件}} + \left[\sum_{q=1}^Q \left(\sum_{i=1}^T y_i / l_{\min} \right)_q \right] \right] / A \quad (2)$$

其中:C 为建筑碳排放总量;A 为建筑使用面积;X 为引起运营碳排放的构件;Y 为引起隐含碳排放的构件;l 为构件生命;N 为引起运营碳排放的构件种类;P 为独立构件种类;Q 为连接构件系统种类;T 为构成单个连接系统的构件种类。

1.2 基于时空的生命周期模型 (TSLCM)

1.2.1 模型与时空因素

1) 材料分布、生命周期对碳排放的影响

a) 材料空间分布

如果材料分布在生命短、可更换构件上,要考虑它的回收再利用性及可降解性,并采用隐含碳数值小的材料;如果材料分布在使用生命长的结构或构件上,应考虑在功能可改变(拓展)性和具有高耐久性^[9]。

超高层建筑的结构体系与基本的结构体系相同,具体构件会有所不同(如图 5 中第 3 级),如环带桁架、伸臂桁架、钢管(骨)混凝土柱,体量更大。材料组合方式更加复杂、多样化。

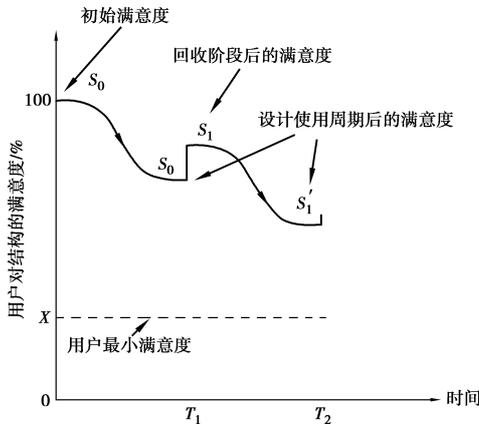


图5 用户满意度-时间曲线

b) 材料时间维度

由于超高层建筑体量大,施工时间长,要考虑时间因素^[10](建筑设计年限)及面积,碳排放单位为/(a·m²)。

根据边际效应递减规则,随着建筑生命周期的延伸,单位维修翻新或变更结构用途所带来的满意度和建筑结构修复度会越来越小,只有不断增加维修的强度或是变更结构用途(即增加材料和能源的消耗)才能维持满意额度^[11]。另外,如果在初始阶段未考虑到后期的结构变化和需要,投入没有达到要求,后期倍增投入量才能满足满意额度。

有关生产、运输等技术会随着时间进步,同等情况下(产品量或是生产工艺),二氧化碳的排放量会减少,要进行折减;由于汇率等影响,不同时期的经济代价也要换算到同一时期。

$$S = \sum_{j=1}^n (S_0 \prod_{i=1}^n \xi_i) \quad (3)$$

其中: S 为生命周期内建筑碳排放总量; S_0 为第一个时间段的碳排放量; n 为建筑设计生命周期; ξ_i 为因技术进步、产业结构调整等社会因素造成的碳排放量的年降低率。

2) 模型中分离的时空因素

以往的设计不考虑时间和地点的因素(Tukker, 2000)。现在引入新的基于时间与地点的模型,这样不会遗漏必要的碳排放过程(如在工地内发生的生产过程)。

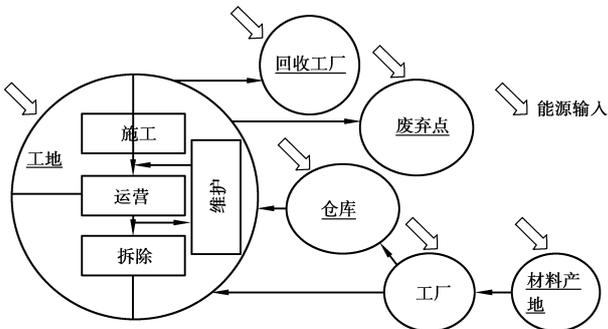


图6 时间-地点全生命周期模型

$$C = \sum_{i=1}^n (\text{Transportation}_i + \text{Origin}_i + \text{Factory}_i + \text{Site}_i + \text{Deposition}_i + \text{Recyclingfactory}_i) \quad (4)$$

其中: C 为碳排放总量; i 为建筑生命周期第 i 阶段(从 1 到 n), Transportation 、 Origin 、 Factory 、 Site 、 Deposition 、 Recycling factory 分别对应运输过程、原料开采地、工厂、工地、废

弃点和回收工厂的碳排放量。

1.2.2 回收处理阶段

很多研究尝试用严格而有逻辑的方法^[12]考虑回收阶段的影响,但很多开发出的方法都还没有得到大众的认同。下面提出一种适用于超高层建筑的新方法。

1) 回收利用和直接利用

A material is "recycled" if it is used, reused (直接利用)^[13], or reclaimed (回收利用)^[13]。这里的直接利用和回收利用都是在经过这一过程后,材料的类型或规格都不发生变化(例如,混凝土仍然以混凝土的形式被直接利用,或经历回收再生后仍是同种规格的混凝土)。

回收利用即将材料粉碎、融化后作为生产环节原料投入再生产(如可再生混凝土、大部分钢材等)。直接利用即对材料简单加工后直接用于房屋建造(如某些砖瓦)。

$$p_i = L_G / L_i \quad (5)$$

$$q_i = L_{U_i} / L_i \quad (6)$$

其中, p_i 为回收利用率; q_i 为直接利用率; L_G 为工厂重新利用的材料量, kg; L_{U_i} 为回收后可直接利用不用进入工厂再加工的材料量, kg; L_i 为材料在拆除前的总量, kg; i 为材料种类。

2) 补贴方法

独栋建筑拆除后在原址建设,直接利用和回收利用阶段的碳排放都采用累加方式,属于同一建筑周期循环,即封闭环。若进入其他建筑周期中,则属于开放环^[14]。超高层建筑属于开放环范畴,以下方法适用于开放环。

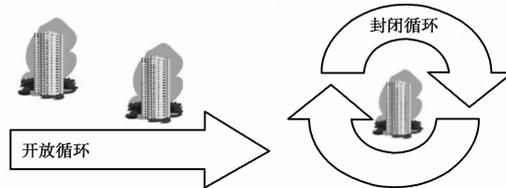


图7 回收处理阶段开放环(open-loop cycle)和封闭环(closed-loop cycle)

回收利用和直接利用过程主要发生在广义的生产阶段,包括生产和回收再生,以及运营和拆除阶段涉及的生产。定义直接利用材料在第一次建筑周期中碳排放为 $(A+0)/2$; 在下一周期,不计碳排放。回收利用材料在第一次建筑周期中,计算为 $(A+A')/2$, 传送到下一周期的为 $A'/2$, 以此类推(A 为材料生产阶段的碳排放, A' 为材料回收再生阶段的碳排放)。

$$P = \sum_{i=1}^n B_i \times [X_i \times (1 - p/2 - q/2) + X_{r_i} \times p/2] / S/Y \quad (7)$$

其中, P 为考虑回收利用与直接利用的碳排放, kg; X_i 为第 i 种建筑材料生产过程中碳排放, t/t; B_i 为第 i 种建筑材料的质量总和, t; S 为建筑面积, m²; Y 为目标使用时间与施工周期的和, year; p 为第 i 种建筑材料的回厂再利用率; q 为第 i 种建筑材料的直接利用率; X_{r_i} 为第 i 种建筑材料的回厂再加工过程碳排放, t/t; n 为建筑材料的种类。

1.3 结构优化设计目标

1.3.1 结构优化与隐含碳

结构优化目标: 在满足结构性能的基础上, 在合理时间

投入材料,合理位置分布材料,减小材料用量以带来最小环境成本。结构优化在很大程度上就是隐含碳的优化。

结构一般占建筑整体隐含能的 15%~50%^[15],结构构件与建筑其他构件间存在潜在的相互影响。例如,表面平整的结构混凝土能减少粉刷层的使用。在最小化隐含碳的过程中,结构工程师应有效控制各结构指标,不对其他的可持续性指标产生不利影响。

1.3.2 超高层建筑结构设计与隐含碳

在结构初算中,结构自振周期、位移变形(如顶点位移和层间位移)、内力分布(轴压比限值)等结构指标受到设计人员的经验和具体的地区规范的影响,由于超高层建筑的体量很大,这些微小的指标改变会对碳排放有很大影响。

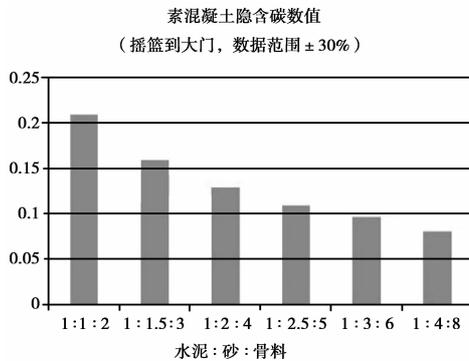


图8 不同规格素混凝土的隐含碳数值

另外,超高层建筑使用的材料规格种类繁多。对工程师来说,不应当采用材料的普适值,而应该根据不同的规格采用相应的数值。Arup 的研究^[16]表明,混凝土的数据需要反映水泥的配合比与强度,先张法预应力混凝土和预拌混凝土应与普通钢筋混凝土单元区别对待。

2 超高层结构算例

2.1 数据来源

需要获取大量宏观与微观数据:动态数据如材料及能源

表1 运输方式单位能耗

运输方式	公路			
	铁路 /(tce/100t·km)	/(L/100t·km)		水路 /(kg/1000t·km)
		汽油货车	柴油货车	
单位能耗	5.6	8.3	6.3	12
				航空 /(kg·t ⁻¹ ·km ⁻¹)
				0.309

(数据来源:①2008年铁路统计公报;②中国交通年鉴2008卷)

2.2 超高层建筑算例

结构高度500m,层高均为5m,共100层,设计使用周期(包含施工周期)100年。整个建筑接近圆形布置,建筑平面沿高度缩进。结构采用“巨型框架—核心筒—外伸臂”结构体系,以混凝土核心筒为主要抗侧力体系,巨型框架为次要抗侧力体系,外伸臂桁架将巨型框架与核心筒相连,使两者能有效协同工作。

假设所有原料均为一次性从工厂运输到工地,距离500km。运营维护阶段材料量取可更换构件的材料量及所有非结构材料用量的20%。施工和拆除阶段的机械能耗量取为相应阶段材料生产能耗的1/10。根据截止到2012年4月底

输入量,直接利用材料含量(直接利用率),可回收材料含量(回收利用率),材料运输方式及里程,施工机械量及方法等;静态数据如燃料热值、生产行业的基准数据等。

1) 生产阶段

对于超高层建筑,主要计算受力单元的碳排放,再进行归并累加。以1kg钢筋混凝土空心板算例为例,消耗石灰170g,骨料850g,铁矿石14g。燃料消耗0.93MJ,电力消耗0.2MJ。产生CO₂120g,NO₂0.55g,SO₃0.14g,CH₄0.13g,VOC_n0.18g,粉尘0.023g,重金属20g。

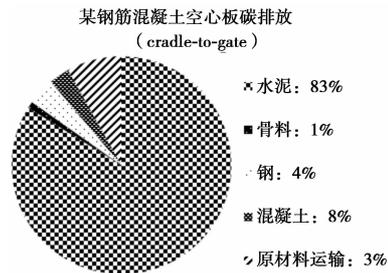


图9 钢筋混凝土空心板的碳排放

算例中使用的材料生产碳排放核心数据库是碳与能源盘查^[17]。

2) 运输过程

3) 施工运营及拆除阶段

根据IPCC统计报告(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy,第1章21~24页的表1.3和表1.4)和“中国能源统计年鉴2009”,可以得到原煤、焦炭、煤气、原油、汽油和柴油等主要燃料的含碳量(tc/TJ)及平均低位发热量(MJ/(t·km³)),进而算出单位燃料的碳排放。

4) 回收处理阶段

有研究显示86%的钢材进入回收阶段,只有1%被废弃^[18]。我国回收钢材重新加工的CO₂排放量为原始生产排放量的20%~50%,可取40%计算^[19]。

的价格走势,假定型钢价格12000元/t,钢筋价格4500元/t,混凝土价格500元/m³。钢材密度取为7.85t/m³,钢筋混凝土密度取为2.5t/m³。

1) 比较方法

采用在碳排放评价中常用的不同方案的比较方法。首先根据经验取两片在几何和受力上相似但却具有不同材料组成的剪力墙单元,分别计算它们的控制指标并调整材料配合比使控制指标相同或在5%的误差之内。这样就考虑了碳排放指标和经济指标,还可以酌情考虑结构单元和其他构件间的互相作用,如剪力墙的墙重对可利用空间大小及基础桩数的影响,见图10。



图 10 计算剪力墙墙肢

2) 第 1 种受力结构单元

a) 初始设计参数

墙肢截面宽 1 600 mm, 长 5 000 mm, 高 5 000 mm, 混凝土 C70, 钢材 Q345GJ, 钢筋 HPB400。设计水平分布钢筋为 6 排直径 20 mm, 沿竖向每 250 mm 均匀布置, 配筋率为 0.47%, 满足最小配筋率 0.4% 的要求; 纵向受力钢筋, 暗柱区钢筋直径 28 mm, 间距 200 mm; 其余钢筋直径 20 mm, 间距 250 mm。经济花费为 48 779 元, 其中钢筋消耗 0.268 9m³, 混凝土消耗 78.44m³, 见图 11。

b) 验算结果(X、Y 向抗剪均为中震弹性控制)

表 2 计算结果

斜截面最大负荷率		轴压比
抗剪截面条件	抗剪承载力	
0.237	0.337	0.436

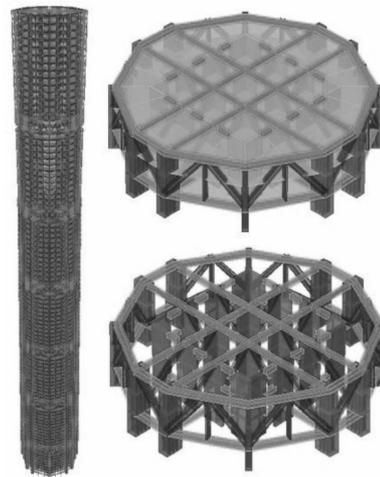


图 11 结构整体及截面模型

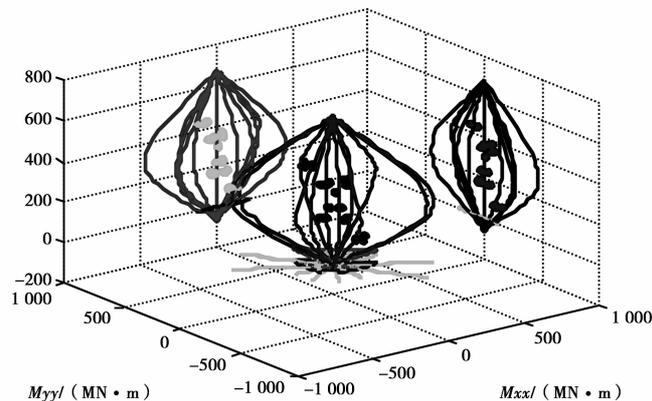
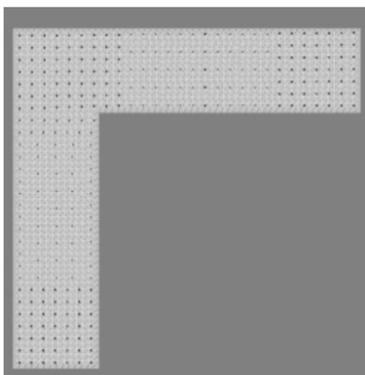


图 12 剪力墙截面压弯验算(XTRACT v3.0.9)

c)碳排放统计

碳排放根据上述假设、数据和方法进行计算,范围仅涵盖材料相关的碳排放,数据单位是 kg/m^2 。

3)第 2 种受力结构单元

a)初始设计参数

墙肢截面宽 900 mm,长 5 000 mm,高 5 000 mm,混凝土 C70,钢材 Q345GJ,钢筋 HPB400。设计水平分布钢筋为 5 排直径 20 mm,沿竖向每 250 mm 均匀布置,配筋率为 0.50%,满足最小配筋率 0.4% 的要求;纵向受力钢筋,钢筋 20 mm,间距 250 mm;钢骨尺寸为 $\text{H}560 \times 250 \times 60 \times 80$,钢板厚 20 mm,总含钢率为 4.24%。经济花费为 105 702 元,其中钢筋消耗 0.1137 m^3 ,混凝土消耗 35.64 m^3 ,型钢消耗 1.16 m^3 。

表 3 计算结果

斜截面最大负荷率		轴压比
抗剪截面条件	抗剪承载力	
0.380	0.364	0.473

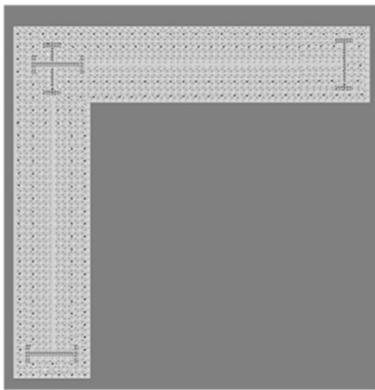


图 14 剪力墙截面压弯验算(XTRACT v3.0.9)

b)验算结果(X、Y 向抗剪均为中震弹性控制)

c)碳排放统计

碳排放根据上述假设、数据和方法进行计算,范围仅涵盖材料相关的碳排放,数据单位是 kg/m^2 。

4)结 论

总之,第 1 种结构单元花费是第 2 种的近一半,但碳排放量多出近 60%。考虑到费用计算方法中忽略了施工、维护及运输等费用,这种简化方法使花费的差距显得不如碳排放的差距那么重要和难以修正。当然,碳排放评估方法中存在不确定性,这需要在后续的方法优化中进行关注。随着炼钢产业的技术进步和对钢材回收利用程度的提高,两种方案的经济性差距会缩小。从墙体重量来看,第 2 方案很有优势,无疑会减少下部承载构件的尺寸或数量,进而对经济性和低碳性都有所贡献。总之,从环境角度来看,选择第 2 种结构方案。

表 4 两种结构单元方案的比较

剪力墙结构方案	无钢骨	含钢骨
经济成本/ $(\text{Yuan} \cdot \text{m}^{-2})$	949.44	2 114.04
环境成本/ $(\text{kg CO}_2 \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	34.77	20.78
墙体重量/t	200.00	111.66

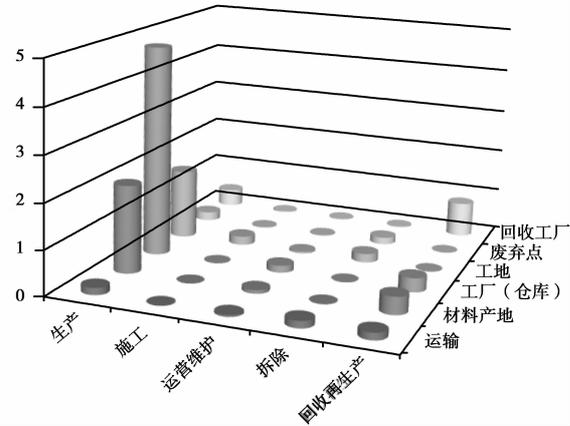


图 13 生命周期内的材料相关碳足迹排放

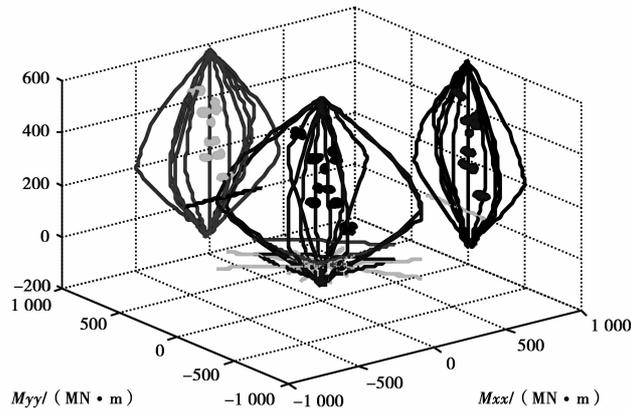


图 14 剪力墙截面压弯验算(XTRACT v3.0.9)

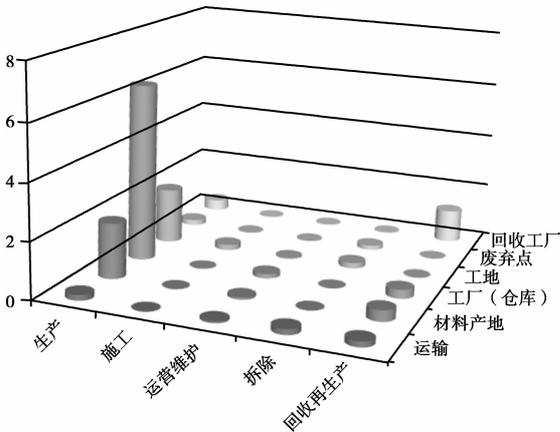


图 15 生命周期内的材料相关碳足迹排放

要在第 1 种方案的基础上进行更多的细节优化,具体参照上述方法。在确定初始方案以后,要开始新一轮的优化以进一步控制材料用量并优化相关的生产过程,采集更为详细的数据并建立更为精确的模型。在后续设计中,要坚持对不同方案的比较方法以最大程度减小碳排放。

3 结 语

有必要在大陆建立关于不同建筑材料及不同结构体系计算模型的基准数据库并及时更新。需要考虑到对碳排放出现高估(考虑到新技术的采用)或低估(考虑到社会成本)的情况,数据精确度受制于数值采集的规模与分布范围,这在结构工程师的控制范围之外,要与其他专业的人员紧密合作。随着全球对环境变化的关注度日益上升,结构层面的碳排放评估要与建筑、暖通等专业在方法及细节设计等层面上进行有效结合,共同发展。

需要建立等价受力单元的碳排放数据库。现在很多评估和软件都是建立在材料或是构件层面上的,对于超高层建筑的计算往往显得臃肿繁杂。要注意不同材料的荷载承受能力不一样,以往这是在结构设计领域人们更为关注的。在未来,整合碳排放评估和结构分析,将整体结构按结构体系或是楼层根据不同的碳排放等级进行分类归并与计算碳排放,这就为超高层建筑的碳排放计算提供了快速方便的方法。在分析中最重要的就是分类和比较的思想。

参考文献:

- [1] 国务院新闻办公室. 中国应对气候变化的政策与行动(2011)[R]. 北京:2011.
- [2] 黄煜镔,范英儒,钱觉时. 绿色生态建筑材料[M]. 北京:化学工业出版社,2011:5.
- [3] Asko Sarja. Integrated Life Cycle Design of Structures[M]. London: Spon Press, 2002: 28.
- [4] The European Group of Valuers Association's (TEGoVA) property and market rating (TEGoVA, 2003).
- [5] The Institution of Structural Engineers. A short guide to embodied carbon in building structures[R]. London,2011:1.
- [6] Dr. Charlene Bayer, Michael Gamble, Russell Gentry, et al. AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice[R]. Washington, DC: The American Institute of Architects, 2010:182.
- [7] Raymond J. Cole, Paul C. Kernan. Life-Cycle Energy Use in Office Buildings[J]. Building and Environment, 1996(31):315-317.
- [8] 国家发展和改革委员会. 中国应对气候变化的政策与行动—2010 年度报告[R]. 北京:2011.
- [9] 陈艾荣. 基于给定结构生命的桥梁设计过程[M]. 北京:人民交通出版社,2009:105-106.
- [10] Appu Haapio, Pertti Viitaniemi. Environmental effect of structural solutions and building materials to a building[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2008(28):598.
- [11] Catarina Thormark. A low energy building in a life cycle-its embodied energy, energy need for operation and recycling potential[J]. Building and Environment, 2002(37):434.
- [12] Jones, C. I. 'Embodied impact assessment: the methodological challenge of recycling at the end of building lifetime'[J]. Construction Information Quarterly, 2009,11(3):140-146.
- [13] The U. S. Government Printing Office via GPO Access. Code of Federal Regulations[Z]. 2005, 25(40):33.
- [14] Catarina Thormark. A low energy building in a life cycle-its embodied energy, energy need for operation and recycling potential[J]. Building and Environment, 2002(37):431.
- [15] Symons, K. and Symons, D. 'Embodied energy and carbon-what structural engineers need to know'[J]. The Structural Engineer, 2009, 87(9):19-23.
- [16] Kaethner, S. C. and Yang, F. 'Environment impacts of structural materials: finding a rational approach to default values for software'[J]. The Structural Engineer, 2011,89(13): 24-30
- [17] Inventory of carbon and energy (ICE) version 1. 6a(2008): Geoff Hammond & Craig Jones, Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK.
- [18] J Ley, M Samson and A S Kwan. Material Flow Analysis of the UK Steel Construction Sector [C]. Luxembourg: Processing of Steel in Sustainable Construction, International Iron and Steel Institute World Conference, 2002.

(编辑 王维朗)