

基于混凝土强度等级的结构构件低碳设计研究

高升¹, 赵彦革^{1,2,3,4}, 孙倩¹, 冯鹏⁴, 肖从真¹, 李翠楦¹, 黄存智¹ (1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 3. 北京市绿色建筑设计与工程技术研究中心, 北京 100013; 4. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

[摘要] 本文基于结构材料强度低碳性能, 提出碳强比分析的材料强度低碳设计方法, 以指引钢构件和混凝土构件进行强度低碳设计。此外针对以混凝土为主要材料的板、梁、柱和墙等常用构件进行排放量计算分析, 从而开展混凝土结构构件影响因素研究。结果显示, 构件尺寸及混凝土强度对碳排放量影响程度较大, 钢筋强度影响次之。通过研究成果给出各混凝土常用构件低碳设计方法, 为相关研究提供借鉴参考。

[关键词] 碳强比; 截面尺寸; 强度等级; 低碳性能
[中图分类号] TU317 [文献标识码] A

Research on low-carbon design of structural members based on concrete strength grade

Gao Sheng¹, Zhao Yanke^{1,2,3,4}, Sun Qian¹, Feng Peng⁴, Xiao Congzhen¹, Li Cuixuan¹, Huang Cunzhi¹ (1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Green Building Design Technology, Beijing 100013, China; 4. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the low-carbon performance of structural material strength, this paper proposes a material strength low-carbon design method through carbon-intensity ratio analysis, aiming to guide the low-carbon strength design of steel and concrete components. Furthermore, emission calculations and analyses are conducted for commonly used components such as plates, beams, columns, and walls that primarily utilize concrete, thereby investigating the influencing factors of concrete structural components. The results indicate that the component size and concrete strength have a significant impact on carbon emissions, followed by the steel reinforcement strength. Through the research findings, low-carbon design methods for various commonly used concrete components are presented, providing a reference for related studies.

Keywords: carbon-intensity ratio; section size; strength class; low carbon performance

0 引言

城镇化的进程推动着社会的发展, 同时也因巨大的资源消耗, 引发了温室效应加剧、自然灾害频发等严峻的环境问题。控制全球气温上升, 改善人居环境, 世界各国均采取行动控制碳排放。根据 Energy & Climate Intelligence Unit 发布的《净零排放跟踪表》统计结果显示, 截至目前, 全球已有 136 个

国家制定了碳中和目标^[1]。我国也郑重提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。

建筑行业是我国的碳排放“大户”^[2,3]。根据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗与碳排放研究报告(2021)》显示, 2019 年全国建筑全过程碳排放总量为 49.97 亿 t, 占全国碳排放总量的 50.6%, 其中建材生产碳排放占建筑碳排放的 50% 以上^[4]。根据建筑形式的不同, 结构材料占建筑总材料的重量比例可达 50%~80%, 大量结构材料的使用导致结构材料占建筑隐含碳排放(指建筑材料在生产、加工运输、施工建造、拆除及废弃物回收等建设过程中产生的碳排放)的比重远超 60%, 占到建筑全寿命期总碳排放的 12% 以上^[5-9]。因此, 建筑行业碳

[收稿日期] 2023-09-26

[基金项目] 中国建筑科学研究院有限公司建筑设计院科研基金资助(20240118288010032)

[作者简介] 高升(1976-), 男, 本科, 高级工程师, 一级注册结构工程师

[通讯作者] 孙倩(1995-), 女, 硕士, 工程师

[联系方式] 651231857@qq.com

排放控制将是实现“双碳目标”的关键一步,基于结构材料进行低碳设计则是减少建筑碳排放的切实举措。

结构材料低碳设计主要包含结构强度等级低碳设计和结构材料形式低碳设计。结构材料强度等级是指混凝土、钢筋、钢材、木竹等建筑主体材料强度,是决定结构材料用量的重要因素之一,并对结构材料自身隐含碳排放(包括结构材料生命周期,即材料生产阶段、加工运输、施工建造、拆除及废弃物回收等阶段)有较大影响。而结构材料生命周期内的碳排放量与结构材料用量呈正向关系,且生产阶段的碳排放占比达到70%,各阶段碳排放均与材料用量成正比例关系^[10-13],故选取生产阶段的碳排放作为研究对象进行分析,用来反映建筑全寿命期碳排放趋势。

现阶段,建筑行业对于碳排放的研究尚处于探索阶段,研究多聚焦于建筑运行阶段,如节能设备使用与可再生能源的利用等。对于以降低材料碳排放为目标,对同时满足承载力要求和低碳要求的研究论证相对不足。因此,基于结构材料开展建筑碳排放影响研究是结构强度等级低碳设计研究的核心内容。本文将基于《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019^[14]、《建筑碳排放计量标准》CECS 374-

2014^[15]、《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[16]作为碳排放计算主要计算依据,并满足《混凝土结构通用规范》GB 55008-2021^[17]、《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010^[18]、《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010^[19]、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3-2010^[20]等现行规范的要求,对以混凝土、钢筋和钢材为主要建造材料的建筑碳排放开展研究。文中所涉碳排放均指构件在设计阶段因其自身材料消耗所产生的CO₂排放,不考虑模板支撑架等建造过程碳排放量。

1 结构构件低碳设计考虑因素

1.1 材料碳强比

材料碳强比,即结构材料每单位强度产生的碳排放量。碳强比越小,对应材料的碳排放相对越低。

$$M = C \div f \quad (1)$$

式中: M 为材料碳强比; C 为碳排放因子; f 为材料强度。

材料碳强比基于文献[21]中碳排放因子法,对房屋建筑工程中的常见材料在生产阶段的碳排放量及其强度的关系进行阐述。当采用单一材料进行设计时,即可对建筑材料选取进行低碳设计。

混凝土、钢筋和钢材的碳强比见表1~表3。

表1 混凝土的碳强比

Table 1 Carbon intensity ratio of concrete

| 混凝土强度等级 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 抗压强度设计值 f_c ^[18] /(N/mm ²) | 14.3 | 16.7 | 19.1 | 21.1 | 23.1 |
| 碳排放因子 ^[14,15] /(kg CO ₂ e/m ³) | 295 | 318 | 340 | 363 | 385 |
| 碳强比/(kg CO ₂ e/N · m × 10 ⁻⁶) | 20.63 | 19.04 | 17.80 | 17.20 | 16.67 |

注:混凝土标号为C35~C45,碳排放因子采用插值法求得。

表2 钢筋的碳强比

Table 2 Carbon intensity ratio of rebar

| 钢筋牌号 | HPB300 | HRB400 | HRB500 |
|--|--------|--------|--------|
| 抗拉强度设计值 f_y ^[18] /(N/mm ²) | 270 | 360 | 435 |
| 碳排放因子 ^[14,15] /(kg CO ₂ e/t) | 2229 | 2340 | 2457 |
| 碳强比/(kg CO ₂ e · m ² /N · t × 10 ⁻⁶) | 8.25 | 6.50 | 5.65 |

表3 钢材的碳强比

Table 3 Carbon intensity ratio of steel

| 钢材牌号 | Q235 | Q355 | Q390 | Q420 | Q460 |
|--|-------|------|------|------|------|
| 抗拉强度设计值 f_y ^[21] /(N/mm ²) | 205 | 305 | 330 | 355 | 390 |
| 碳排放因子 ^[14,15] /(kg CO ₂ e/t) | 2350 | 2468 | 2591 | 2720 | 2856 |
| 碳强比/(kg CO ₂ e · m ² /N · t × 10 ⁻⁶) | 11.46 | 8.09 | 7.85 | 7.66 | 7.32 |

由不同强度等级的结构材料碳强比对比情况可见,混凝土、钢筋和钢材的碳强比随着材料强度升高而降低,即当仅考虑单一材料设计时,采用高强度材料进行设计,低碳性能越好。

1.2 结构构件碳排放

结构材料低碳化设计是建筑低碳化的起点,结构构件的碳排放是结构材料低碳设计的最终体现。建筑主体结构构件按受力特征划分为梁、板、柱和墙等构件,按材料划分可分为钢构件和钢筋混凝土构件。因钢结构构件属单一材质材料,故可根据碳强比规律进行低碳设计,本文仅针对混凝土构件的低碳设计进行研究。

混凝土结构构件生产阶段的碳排放量计算方法如式(2):

$$C_{sc} = M_c F_c + M_r F_r + M_s F_s \quad (2)$$

式中: M_c 、 M_r 、 M_s 为混凝土、钢筋、钢材的用量; F_c 、 F_r 、 F_s 为混凝土、钢筋、钢材的碳排放因子。

本文选取常见的 4 种混凝土结构构件,即梁、板、柱和墙,并对其碳排放进行分析研究。

2 结构构件低碳设计

2.1 板构件

1) 参数设置

板构件在实际工程应用中多为计算配筋和构造配筋两种工况,故本文分别对以上两种受力情况下的混凝土板构件进行对比分析。

① 计算配筋工况

混凝土板构件的跨度、厚度及荷载等参数根据实际工程中常用数据进行选取,且为简化计算,本文对于板构件碳排放分析中,支承条件均设定为四边简支。计算配筋工况下板构件分析参数如表 4 所示。

表 4 楼板计算配筋工况参数汇总

Table 4 Summary of working condition parameters of slab reinforcement calculation

| 工况 | 板跨/ m×m | 板厚/ mm | 恒载/ (kN/m ²) | 活载/ (kN/m ²) |
|----|------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 一 | 4.2×8.4 | 110 120 | 3.0 | 3.0 |
| 二 | 4.8×8.4 | 130 140 | | |
| 三 | 5.4×8.4 | 140 150 | | |

② 构造配筋工况

根据楼板所处位置,构造配筋工况下板厚分别取为 180mm(嵌固端区域)和 120mm(普通楼板区域),主要计算参数如表 5 所示。

表 5 楼板构造配筋工况参数汇总

Table 5 Summary of structural condition parameters of slab structure reinforcement

| 板跨/m×m | 板厚/mm | 配筋率 |
|---------|-------|--|
| 6.3×8.4 | 180 | 0.25% |
| 4.2×8.4 | 120 | 按《混凝土结构设计规范》 GB 50010-2010 ^[18] 配置 |

2) 碳排放分析

当处于计算配筋及构造配筋两种不同工况时,以混凝土强度等级为横坐标,碳排放量为纵坐标,绘制混凝土板构件碳排放情况如图 1~图 4 所示,图例中第一变量为板厚,第二变量为钢筋强度等级。

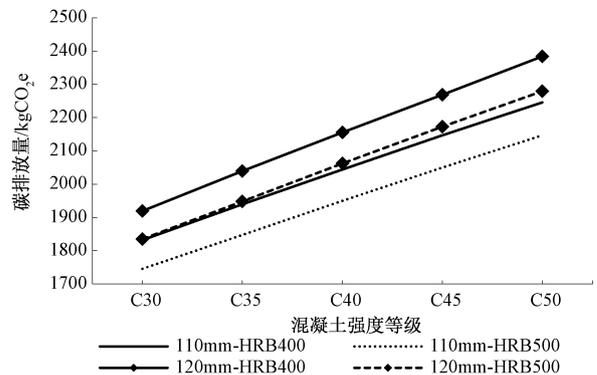


图 1 工况一碳排放情况

Fig. 1 Carbon emission of Condition 1

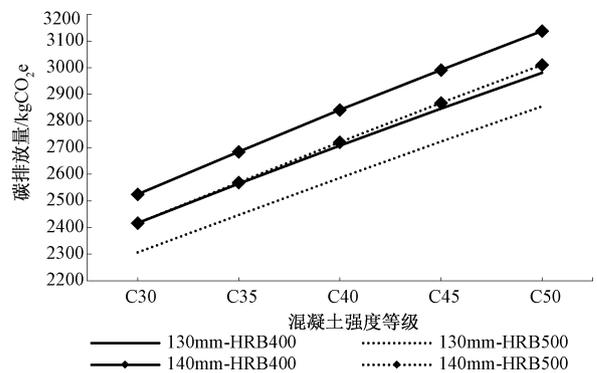


图 2 工况二碳排放情况

Fig. 2 Carbon emission of Condition 2

为确保研究结论的科学性与普适性,同时选取

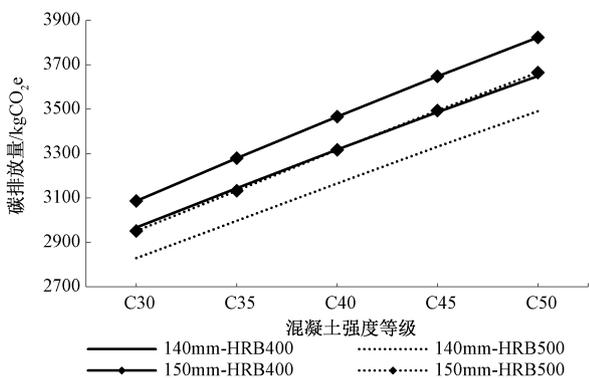


图3 工况三碳排放情况

Fig. 3 Carbon emission of Condition 3

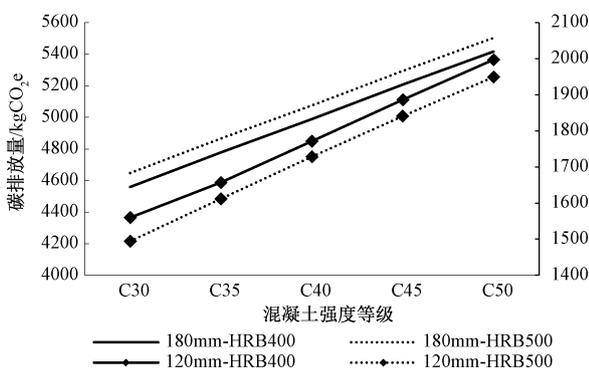


图4 构造配筋工况下板碳排放情况

Fig. 4 Carbon emission of plates under structural reinforcement condition

了以下两组工程常见楼板荷载进行对比分析。荷载组一：恒荷载 3.0kN/m^2 ，活荷载 8.0kN/m^2 ；荷载组二：恒荷载 9.0kN/m^2 ，活荷载 3.0kN/m^2 。其余条件均保持不变。计算结果显示与表4楼板计算配筋工况参数下呈现结论相同，故在此不进行展开描述。

经分析结果可知，当处于计算配筋工况时，混凝土板构件碳排放量随板厚减小、钢筋强度等级提高、混凝土强度等级降低而降低。不同设计因素对于碳排放的影响程度不同，采用单一变量法对不同设计因素变动后碳排放情况进行横向对比分析发现，降低混凝土强度等级对混凝土板碳排放的减少最为有效，减小板厚次之，提升钢筋强度的影响最小。

在构造配筋情况下，按照固定配筋率配置的板构件，因材料用量与楼板尺寸呈线性关系，因此在对这类板构件进行低碳设计时可考虑采用低强度材料以优化碳排放；而按照《混凝土结构设计规范》^[18] 8.5.1条文中配筋率要求控制的板则随着混凝土强

度等级降低或钢筋强度等级的提升，碳排放量有所下降。

2.2 梁构件

1) 参数设置

梁构件碳排放分析选取的计算跨度为 8.4m ，支承条件为两端简支，分析参数详见表6。

表6 梁构件碳排放计算参数汇总

Table 6 Summary of calculation parameters of carbon emission of beam members

| 工况 | 线荷载/(kN/m) | 梁截面/mm×mm |
|----|------------|-----------|
| 一 | 10 | 300×500 |
| | | 300×550 |
| | | 300×600 |
| 二 | 20 | 300×500 |
| | | 300×550 |
| | | 300×600 |

2) 碳排放分析

以混凝土强度等级为横坐标，碳排放量为纵坐标，在不同设计因素下混凝土梁构件碳排放情况如图5、图6所示，图例中第一变量为梁高，第二变量为纵筋强度。

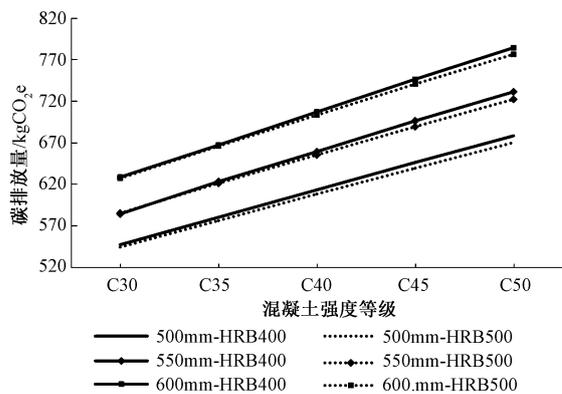


图5 工况一下碳排放情况

Fig. 5 Carbon emission of Condition 1

由分析结果可见，截面尺寸的减小、混凝土强度等级的降低或钢筋强度等级的提高均可使混凝土梁构件的碳排放量降低，其中最大的影响因素是截面尺寸，混凝土强度等级和钢筋强度等级次之。因此，对于混凝土梁构件的低碳设计可优先考虑对其截面尺寸进行合理控制。

2.3 柱构件

1) 参数设置

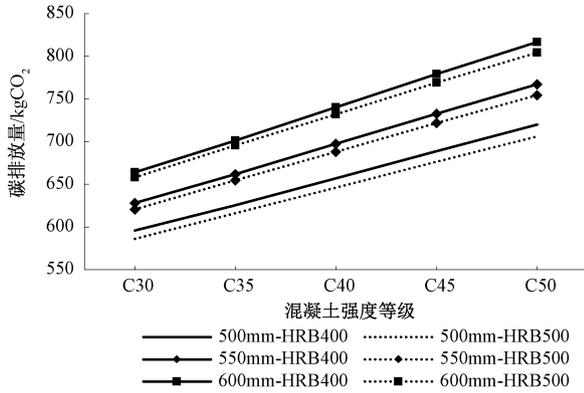


图 6 工况二下碳排放情况

Fig. 6 Carbon emission of Condition 2

对混凝土柱构件碳排放进行分析,根据受力情况分为构造配筋、部分构造部分计算配筋、小偏压计算配筋和大偏压计算配筋工况,设计参数如表 7~表 10 所示。

表 7 构造配筋工况参数汇总

Table 7 Summary of structural reinforcement working condition parameters

| 混凝土强度等级 | 等效截面 /mm | 经验截面 /mm | 轴力 /kN | 弯矩/ kN·m | 剪力/ kN | 纵筋强度 |
|---------|----------|----------|--------|----------|--------|--------|
| C30 | 800.00 | 800 | 5500 | 500 | 300 | HRB400 |
| C35 | 740.29 | 750 | | | | |
| C40 | 692.22 | 700 | | | | |
| C45 | 658.59 | 650 | | | | |
| C50 | 629.44 | 600 | | | | |

表 8 部分构造配筋工况参数汇总

Table 8 Summary of working parameters under part of structural reinforcement

| 混凝土强度等级 | 等效截面 /mm | 经验截面 /mm | 轴力 /kN | 弯矩/ kN·m | 剪力/ kN | 纵筋强度 |
|---------|----------|----------|--------|----------|--------|--------|
| C30 | 800.00 | 800 | 5500 | 800 | 500 | HRB400 |
| C35 | 740.29 | 750 | | | | |
| C40 | 692.22 | 700 | | | | |
| C45 | 658.59 | 650 | | | | |
| C50 | 629.44 | 650 | | | | |

2) 碳排放分析

以混凝土强度等级为横坐标,碳排放量为纵坐标,4 种工况下柱构件碳排放情况如图 7~图 12 所示。

表 9 小偏压工况参数汇总

Table 9 Summary of small bias operating parameters

| 混凝土强度等级 | 等效截面 /mm | 经验截面 /mm | 轴力 /kN | 弯矩/ kN·m | 剪力/ kN | 纵筋强度 |
|---------|----------|----------|--------|----------|--------|--------|
| C30 | 800.00 | 800 | 5500 | 1100 | 500 | HRB500 |
| C35 | 740.29 | 750 | | | | |
| C40 | 692.22 | 700 | | | | |
| C45 | 658.59 | 700 | | | | |
| C50 | 629.44 | 700 | | | | |

表 10 大偏压工况参数汇总

Table 10 Summary of large bias operating parameters

| 混凝土强度等级 | 等效截面 /mm | 经验截面 /mm | 轴力 /kN | 弯矩/ kN·m | 剪力/ kN | 纵筋强度 |
|---------|----------|----------|--------|----------|--------|--------|
| C30 | 800.00 | 800 | 1000 | 1800 | 500 | HRB500 |
| C35 | 740.29 | 750 | | | | |
| C40 | 692.22 | 700 | | | | |
| C45 | 658.59 | 700 | | | | |
| C50 | 629.44 | 650 | | | | |

注:等效截面尺寸由等效轴压比假定计算而得。

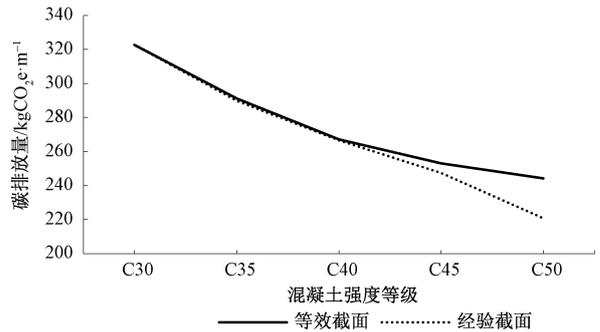


图 7 构造配筋工况碳排放情况

Fig. 7 Carbon emission under structural reinforcement condition

经过上述分析可知,在满足结构刚度等前提下,混凝土柱碳排放有如下规律:

①当柱处于构造配筋工况时:柱构件碳排放量随着混凝土强度等级提高、纵筋强度的降低均呈下降趋势。

②当柱处于小偏心受压工况时:提高混凝土强度等级减小截面或提高钢筋强度等级均对柱构件碳排放产生降低效应。

③大偏心受压计算配筋时:降低混凝土强度等级增加截面或钢筋强度等级的提高,使柱碳排放量有所减少。

④在小偏心受压时:混凝土作为影响柱构件的主要因素,占比可高达 65%,而在大偏心受压工况

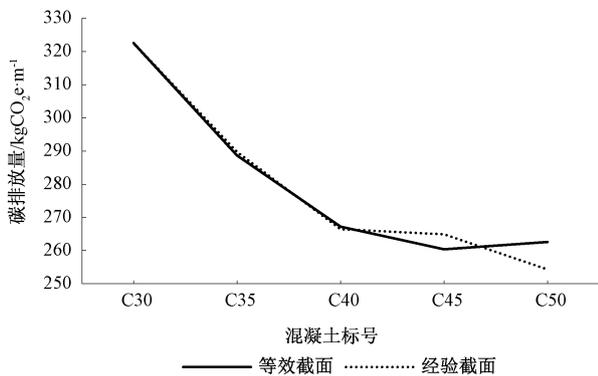


图8 部分构造工况碳排放情况

Fig. 8 Carbon emission under part of structural reinforcement condition

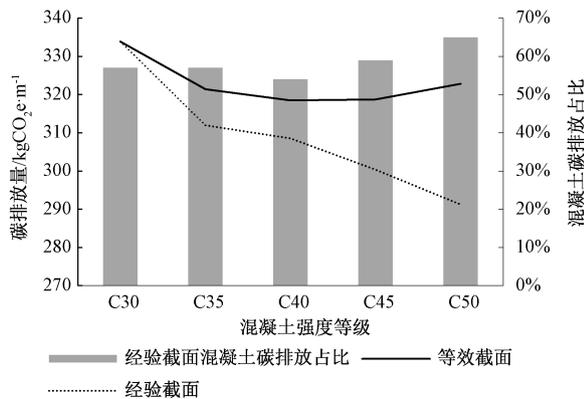


图9 小偏压工况碳排放情况

Fig. 9 Carbon emission under small bias operating condition

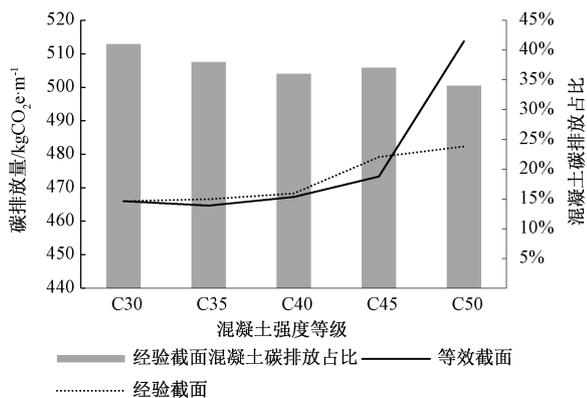


图10 大偏压工况碳排放情况

Fig. 10 Carbon emission under large bias operating condition

下,混凝土材料碳排放占比急剧下降,甚至低至35%。

2.4 墙构件

因地下室外墙和剪力墙的受力形式截然不同,

为确保混凝土墙构件碳排放研究的充分性,对以上两种墙构件分别进行分析。

1) 地下室外墙

① 参数设置

根据工程中地下室外墙常见层高及受力条件,选取单层外墙和双层外墙两种工况进行计算分析,工况参数如表11。

表11 地下室外墙计算参数汇总

Table 11 Summary of basement exterior wall calculation parameters

| 类型 | 墙厚/mm | 层高/m | 支承条件 |
|------|-------|---------|----------------|
| 单层外墙 | 250 | 6 | 下侧固定,上侧简支,边侧自由 |
| | 300 | | |
| | 350 | | |
| | 400 | | |
| 双层外墙 | 300 | 3.6/3.6 | 下侧固定,上侧简支,边侧自由 |
| | 350 | | |
| | 400 | | |

② 碳排放分析

以碳排放量为纵坐标、混凝土等级为横坐标,不同墙厚及钢筋等级下的地下室外墙碳排放情况如图11、图12所示,图例中第一变量为墙厚,第二变量为纵筋强度。

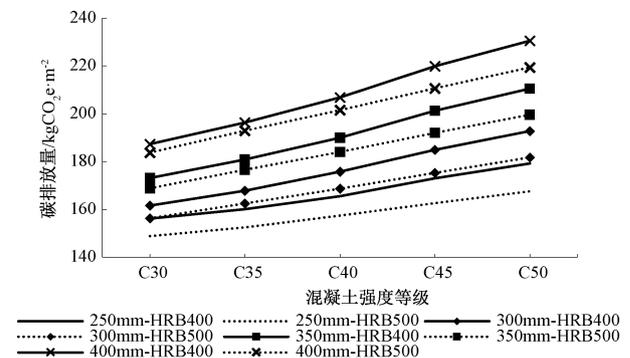


图11 单层外墙碳排放情况

Fig. 11 Carbon emission of single wall

由分析结果可见,无论是单层或多层,地下室外墙碳排放量均随着墙厚减薄、混凝土强度降低、钢筋强度提高而显著降低,且碳排放对墙厚的变化影响最为敏感。因此在进行混凝土外墙低碳设计时,可适当控制墙厚,并采用低强度混凝土和高标高钢筋进行碳排放控制。

2) 剪力墙

① 参数设置

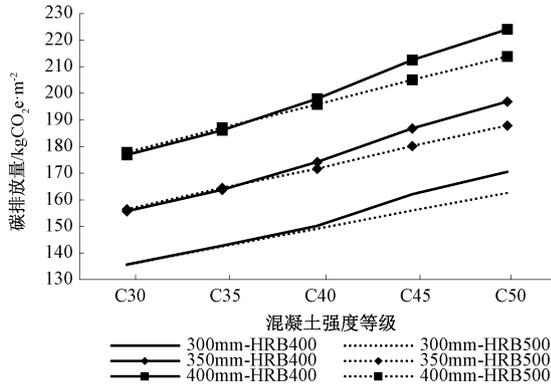


图 12 双层外墙碳排放情况
Fig. 12 Carbon emission of double wall

根据工程中剪力墙常见墙肢长度及《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010^[19]等规范中配筋规定,选取二级抗震等级情况下非底部加强区部位剪力墙构造配筋和计算配筋两种工况进行计算分析,不同工况下剪力墙计算参数如表 12、表 13 所示。

表 12 构造配筋工况计算参数汇总

| 墙长/m | 轴压比 | 墙厚/mm |
|------|-----------|-------|
| 4 | $N < 0.3$ | 200 |
| | $N > 0.3$ | |
| 4.5 | $N < 0.3$ | |
| | $N > 0.3$ | |
| 5 | $N < 0.3$ | |
| | $N > 0.3$ | |

表 13 计算配筋工况计算参数汇总

| 墙长/m | 轴压比 | 墙厚/mm |
|------|-----------|-------|
| 4 | $N < 0.3$ | 200 |
| | $N > 0.3$ | |
| | $N = 0.3$ | |
| 4.5 | $N < 0.3$ | |
| | $N > 0.3$ | |
| | $N = 0.3$ | |
| 5 | $N < 0.3$ | |
| | $N > 0.3$ | |
| | $N = 0.3$ | |

注: $N < 0.3$ 对应墙混凝土等级为 C30 时应力水平; $N > 0.3$ 对应墙混凝土等级为 C50 时应力水平; $N = 0.3$ 对应墙混凝土等级为 C40 时应力水平。

②构造配筋工况碳排放分析

以碳排放量为纵坐标、混凝土等级为横坐标,混凝土剪力墙在构造配筋工况下的碳排放情况如图

13~图 15 所示,图例中第一变量为轴压比,第二变量为纵筋强度。

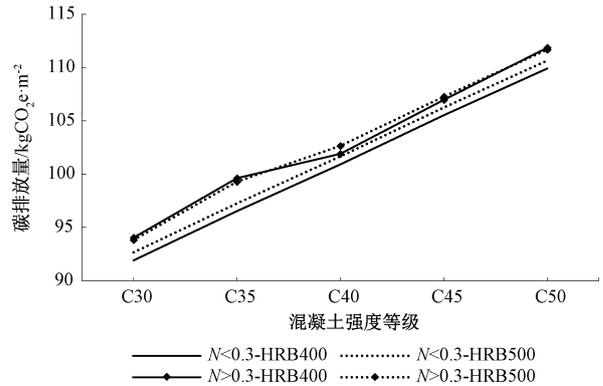


图 13 4m 剪力墙碳排放情况
Fig. 13 Carbon emission of 4m shear wall

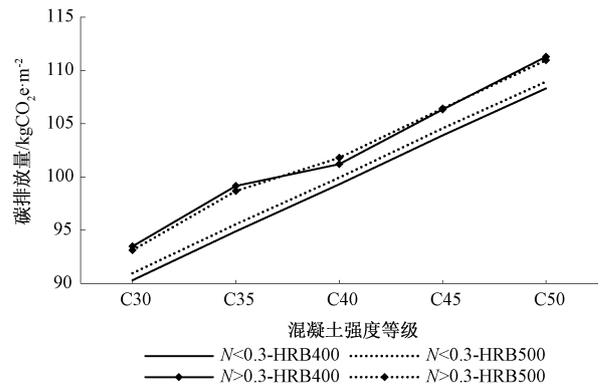


图 14 4.5m 剪力墙碳排放情况
Fig. 14 Carbon emission of 4.5m shear wall

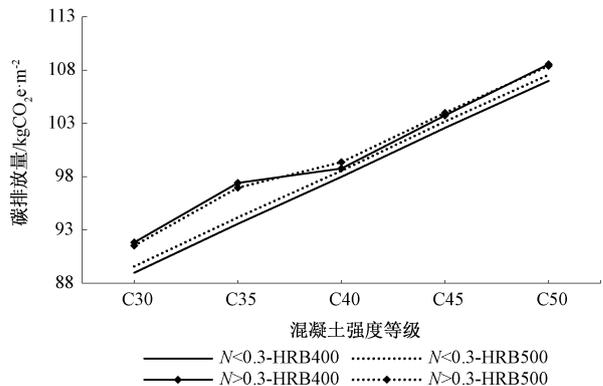


图 15 5m 剪力墙碳排放情况
Fig. 15 Carbon emission of 5m shear wall

经分析可知,剪力墙在配置构造边缘构件时,碳排放随着混凝土强度、纵筋钢筋强度或竖向分布筋配筋率的降低呈现下降趋势;在配置约束边缘构件

时,采用低强度混凝土且纵筋配置 HRB500 强度的剪力墙构件碳排放量较低。

③ 计算配筋工况碳排放分析

以混凝土等级为横坐标、碳排放量为纵坐标,在计算配筋情况下,混凝土剪力墙的碳排放情况如图 16~图 18 所示,图例中第一变量为轴压比,第二变量为纵筋强度。

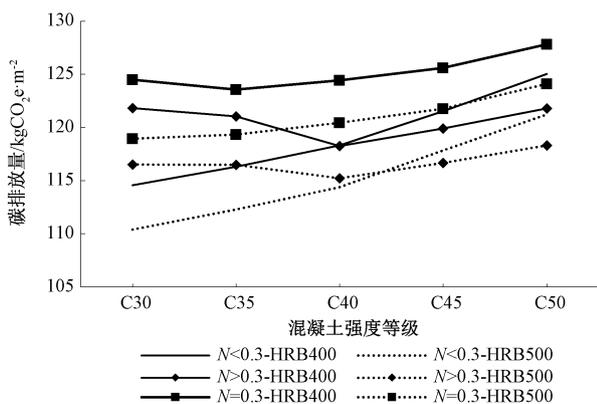


图 16 4m 剪力墙碳排放情况

Fig. 16 Carbon emission of 4m shear wall

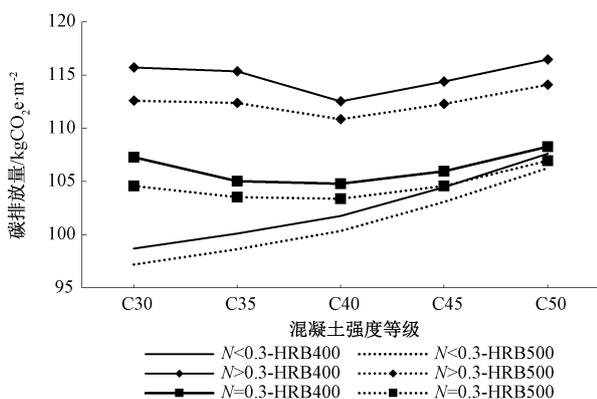


图 17 4.5m 剪力墙碳排放情况

Fig. 17 Carbon emission of 4.5m shear wall

在计算配筋工况下,设置构造边缘构件的剪力墙,其碳排放随着混凝土强度及纵筋钢筋强度降低,碳排放呈现下降趋势;而设置约束边缘构件的剪力墙,其碳排放随着混凝土强度等级的提高先下降再上升,随着钢筋强度等级提高而降低。与此同时,当轴压比无限接近但小于配箍特征值变化点时,碳排放量处于低谷。

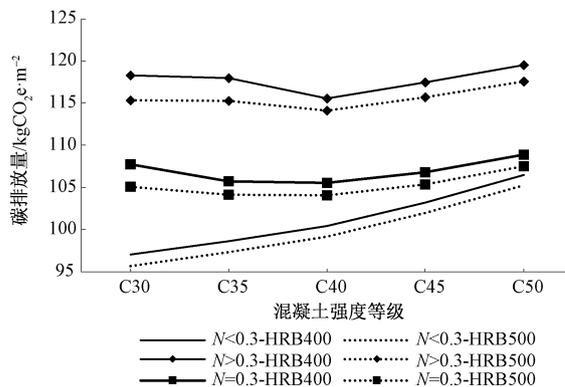


图 18 5m 剪力墙碳排放情况

Fig. 18 Carbon emission of 5m shear wall

3 结论及建议

本文基于国家现行规范,对常见混凝土结构构件碳排放影响因素进行计算分析,并根据分析结果给出如下低碳设计建议:

1) 结构构件可根据碳强比理论进行低碳设计,结构材料碳强比越低,低碳属性越强。对于钢结构而言,由于采用单一材料进行设计建造,无多材料耦合作用影响,在强度控制时,宜采用高强度钢材;刚度控制时,可根据实际情况优先采用低强度钢材进行设计。

2) 处于构造配筋工况下的混凝土构件:在受弯构件中,对于需按固定配筋率配置的板构件,建议采用低强度材料设计降低碳排放,对于其余受弯构件,可采用降低混凝土强度等级或提高配置钢筋标号以降低构件碳排放;对于受压构件而言,柱构件建议采用提高混凝土强度等级减小尺寸、适当降低钢筋强度的设计方式降低碳排放。对于剪力墙构件,则可采取适当选取低强度材料降低碳排放。

3) 处于计算配筋工况下的混凝土构件:在满足使用需求和安全性的前提下,对于受弯构件,宜优先选用低混凝土强度、小尺寸及高强钢筋等方式降低构件碳排放;对于受压构件,为降低碳排放量,小偏压柱构件宜采用高混凝土强度等级小尺寸、高强度钢筋等方式。不同于小偏压柱,大偏压柱构件更宜采用低混凝土强度等级大尺寸、低强度钢筋等方式使碳排放量更低。而对于剪力墙构件,则需结合边缘构件的设置情况,应采用不同的低碳设计方法。在设置构造边缘构件情况下,宜选用低强度钢筋及

低强度等级混凝土。设置约束边缘构件时,宜选用轴压比无限接近但小于配箍特征值变化点时的混凝土

土强度等级和高强度钢筋。

4) 结构构件可参考图 19 进行低碳化设计。

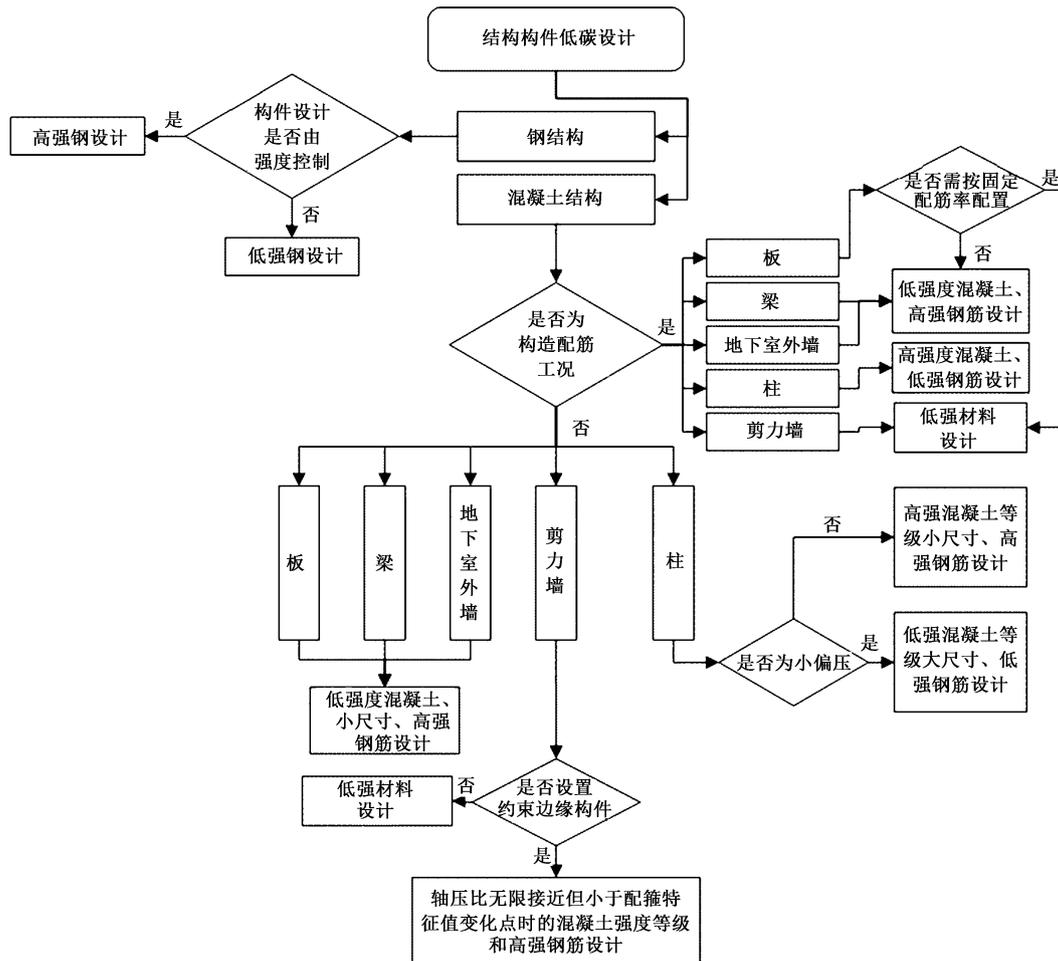


图 19 结构构件低碳设计流程图

Fig. 19 Low carbon design flow chart of structural components

参考文献 (References)

[1] Energy & Climate Intelligence Unit. Net zero emissions race [R]. London, 2022

[2] United Nations Environment Programme. 2021 global status report for buildings and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector [R]. Nairobi, 2021

[3] 王有为. 建设领域双碳实践的若干认知 [J]. 建设科技, 2022, (Z1): 8-12
Wang Youwei. Some cognition of double carbon practice in construction field [J]. Construction Science and Technology, 2022, (Z1): 8-12 (in Chinese)

[4] 中国建筑节能协会能耗统计专委会. 中国建筑能耗与碳排放研究报告 (2021) [R]. 北京, 2021
Professional Committee of Building Energy and Emission . Research report on building energy consumption and carbon emissions in China (2021) [R]. Beijing, 2021 (in Chinese)

[5] Plaza M G, Martinez S, Rubiera F. CO₂ capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations [J]. Energies, 2020, 13 (21): 5692

[6] Serber D, Stein R G. Energy conservation through building design [M]. New York: McGraw Hill, 1979

[7] Urrego J, Resch E, Lousselet C. Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures [J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25 (2): 403-418

[8] Shin Sungwoo, Woo Jeehwan, Sungho Tae. The development of apartment house life cycle CO₂ simple assement system using standard apartment houses of South Korea [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 3 (15): 1454-1467

[9] Wang Fenglai, Zhang Xiaocun. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China [J].

- Building and Environment, 2015, (86):89-97
- [10] 肖建庄,夏冰,肖绪文,等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻[J]. 科学通报, 2022, 67(28-29):3425-3438
Xiao Jianzhuang, Xia Bing, Xiao Xuwen, et al. Prospects for low-carbon design theory of concrete structures[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(28-29):3425-3438(in Chinese)
- [11] 牛凯征,薛东昊,李洁芯. 绿色建材应用碳减排潜力测算研究[J]. 四川建材, 2022, 48(7):3-4
Niu Kaizheng, Xue Donghao, Li Jiexin. Research on carbon emission reduction potential estimation of green building materials[J]. Sichuan Building Materials, 2022, 7(48):3-4(in Chinese)
- [12] 王茂宇,赵昕,方朔. 隐含碳指标在高层建筑结构选型中的运用[A]. 2013年既有建筑功能提升工程技术交流会论文集[C]. 上海:2013
Wang Maoyu, Zhao Xin, Fang Shuo. The application of embodied carbon indicator in high-rise building structural system optimization [A]. Proceedings of the 2013 Technical Exchange Meeting of Existing Building Function Improvement Engineering [C]. Shanghai: 2013(in Chinese)
- [13] 熊宝玉. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D]. 深圳:深圳大学, 2015
Xiong Baoyu. Research on the measurement of carbon emissions in the whole life cycle of residential buildings[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015(in Chinese)
- [14] GB/T 51366-2019, 建筑碳排放计算标准[S]
GB/T 51366 - 2019, Standard for building carbon emission calculation[S](in Chinese)
- [15] CECS 374-2014, 建筑碳排放计量标准[S]
CECS 374 - 2014, Standard for measuring, accounting and reporting of carbon emission from buildings[S](in Chinese)
- [16] 国家发展改革委. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京, 2011
National Development and Reform Commission. Guidelines for the preparation of provincial GHG inventories (Trial) [R]. Beijing, 2011(in Chinese)
- [17] GB 55008-2021, 混凝土结构通用规范[S]
GB 55008 - 2021, General code for concrete structures[S](in Chinese)
- [18] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]
GB 50010-2010, Code for design of concrete structures[S](in Chinese)
- [19] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings[S](in Chinese)
- [20] JGJ 3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]
JGJ 3-2010, Technical specification for concrete structures of tall building[S](in Chinese)
- [21] The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Switzerland, 2019