

引用本文:肖建庄,关湘烁,王佃超,等.再生混凝土碳排放因子研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(4):1-11.

XIAO Jianzhuang, GUAN Xiangshuo, WANG Dianchao, et al. Researches on carbon emission factors of recycled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 1-11.

DOI:10.19815/j.jace.2022.07032

## 再生混凝土碳排放因子研究

肖建庄<sup>1</sup>, 关湘烁<sup>1</sup>, 王佃超<sup>1</sup>, 王 军<sup>2</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 中建西部建设股份有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:**定义了再生混凝土碳排放因子的计算边界,提出了再生粗骨料混凝土(RAC)、再生细骨料混凝土(RFC)、再生粉混凝土(RPC)碳排放因子的计算方法,分析了再生材料取代率与混凝土强度等级对再生混凝土碳排放因子的影响。通过实际案例计算了再生粗骨料混凝土建筑相较于普通混凝土建筑减少的碳排放量,分析了再生混凝土结构的碳排放优势。结果表明:随着再生粗骨料取代率升高,RAC碳排放因子可降低15%;随着再生细骨料取代率升高,RFC碳排放因子可降低8.6%;随着再生粉取代率升高,RPC碳排放因子可降低26.3%;强度C45的RAC碳排放因子高于强度C30的RAC可达11.7%;强度C45的RFC碳排放因子高于强度C40的RFC可达39%;强度C45的RPC碳排放因子高于强度C30的RPC可达10.9%;随着混凝土强度等级从C30提高到C45,碳排放因子逐渐提高;在“建材生产+结构运营”边界内,RAC建筑相较于普通混凝土建筑减少了1.75%的碳排放,就拆除项目而言,避免建筑固废运输与填埋减少的碳排放是“建材生产+结构运营”边界内减少碳排放的3.32倍,这是再生混凝土建筑为环境带来有利影响的主要原因。

**关键词:**再生粗骨料混凝土;再生细骨料混凝土;再生粉混凝土;碳排放因子;示范工程

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)04-0001-11

## Researches on carbon emission factors of recycled concrete

XIAO Jianzhuang<sup>1</sup>, GUAN Xiangshuo<sup>1</sup>, WANG Dianchao<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China West Construction Group Co., Ltd, Chengdu 610017, Sichuan, China)

**Abstract:** The accounting boundary of carbon emission factors of recycled concrete was defined, the calculation methods of carbon emission factors of recycled coarse aggregate concrete (RAC), recycled fine aggregate concrete (RFC) and recycled powder concrete (RPC) were proposed, and the influences of recycled material replacement percentages and concrete strength grades on carbon emission factors of recycled concrete were analyzed. Based on an actual case, the carbon emission reduction of recycled coarse aggregate concrete buildings compared with conventional concrete buildings was calculated, and the carbon emission advantages of recycled structure were analyzed. The results show that with the increase of recycled coarse aggregate replacement rates, the RAC carbon emission factors can be reduced by 15%. With the increase of recycled fine aggregate replacement rates, RFC carbon emission factors can be reduced by 8.6%. With the

收稿日期:2022-07-09

基金项目:中建西部建设科技研发计划项目(ZJXJ-2022-11)

作者简介:肖建庄(1968-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:jzx@mail.tongji.edu.cn。

increase of recycled powder replacement rates, the carbon emission factors of RPC can be reduced by 26.3%. The carbon emission factor of C45 RAC is 11.7% higher than that of C30 RAC, the carbon emission factor of C45 RFC is 39% higher than that of C40 RFC, and the carbon emission factor of C45 RPC is 10.9% higher than that of C30 RPC. As the strength grades of concrete increase from C30 to C45, the carbon emission factors gradually increase. Within the boundary of “building material production + structural operation”, the RAC building reduces carbon emissions by 1.75% compared with the conventional concrete building. As far as the demolition project is concerned, the carbon emission reduced by avoiding the transportation and landfill of demolition waste is 3.32 times as much as the carbon emission reduced within the boundary of “building material production + structural operation”, which is the main reason for the favorable impact of recycled buildings on the environment.

**Key words:** recycled coarse aggregate concrete; recycled fine aggregate concrete; recycled powder concrete; carbon emission factor; demonstration project

## 0 引言

2020 年 9 月 22 日,中国提出“2030 碳达峰,2060 碳中和”目标。中国的二氧化碳排放主要归因于化石能源和制造业为主的工业体系<sup>[1]</sup>,而 90% 以上的二氧化碳排放来自建筑率较高的城市地区<sup>[2]</sup>。建筑的运行耗能占碳排放总量的 28%,若计入其材料与施工过程,则其碳排放占比将提升至 39%<sup>[3]</sup>,建筑生命周期的碳排放则占到 50%<sup>[4]</sup>。

2020 年,中国建筑垃圾排放量约为  $30 \times 10^8$  t,利用建筑固废生产再生混凝土,既可以解决大量废弃混凝土伴随的生态问题,又可以减少天然材料的开采,从而助力“双碳”战略目标的早日达成。

为明确建材(包括混凝土在内)碳排放的度量方法,许多专家学者针对其碳排放因子展开了大量研究。张涛等<sup>[5]</sup>搜集了国内外能源与环境权威研究机构和组织的研究成果,按照数据来源和材料种类收集并分类了建筑常用材料碳排放因子;刘立涛等<sup>[6]</sup>系统梳理了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)、世界可持续发展工商理事会水泥可持续发展自愿性协议(WBCSD/CSI)、中国建筑材料研究总院(CDMA)的水泥生产碳排放因子的计算方法,通过辨析参数选择和不确定性差异揭示其影响因素,讨论各种计算方法在中国的适用性;Dixit 等<sup>[7]</sup>利用燃料的碳强度将一次能源系数(PEF)转化为碳排放因子;《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》<sup>[8]</sup>经 2005 年专家评审及政府与专家联合评审之后颁布;世界资源研究所(WRI)出版的《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南》<sup>[9-11]</sup>提出了各种碳排放因子计算方法;美国能源信息署(EIA)官方

网站每月或每季度公布各行业的二氧化碳排放,且每年公布默认排放因子表。然而,大多数研究只停留在常见建筑材料的碳排放因子上,造成了非常见建筑材料如再生混凝土碳排放研究领域的空白。

为弥补上述空白,针对再生粗骨料混凝土、再生细骨料混凝土、再生粉混凝土,首先指出再生混凝土碳排放的构成,定义计算边界,提出碳排放因子的计算方法。其次,选取不同再生材料取代率、不同混凝土强度等级的再生混凝土案例,研究再生材料取代率以及混凝土强度等级对碳排放因子的影响。最后,针对上海地区一个案例,计算再生混凝土建筑相对于普通混凝土建筑减少的碳排放量。

## 1 再生混凝土碳排放建模

将废弃混凝土碾碎后,利用直径  $4.75 \sim 40$  mm<sup>[12]</sup>的再生粗骨料(RCA)部分或全部替代天然粗骨料(NCA),可制成再生粗骨料混凝土(RAC);利用直径  $0.5 \sim 4.75$  mm<sup>[12]</sup>的再生细骨料(RFA)部分或全部替代天然细骨料(NFA),可制成再生细骨料混凝土(RFC)。废弃混凝土被破碎成粗细骨料的同时,会产生大量对环境有害的粉末,其填埋会对土壤和地下水造成二次污染。用再生粉(RP)生产再生粉混凝土(RPC),既可以节省大量自然资源,又可以充分利用难以填埋的废弃混凝土。

3 种再生混凝土的碳排放因子计算边界如图 1 所示,可以归结为“建材生产+结构运营”。由于再生粉多数采用罐装运输,与外界空气接触机会较少,因此不考虑 RP 在原料储存阶段的碳吸收,RPC 的碳排放因子不考虑图 1 中方框部分。

碳排放因子(CEF)计算方法为:单位体积再生

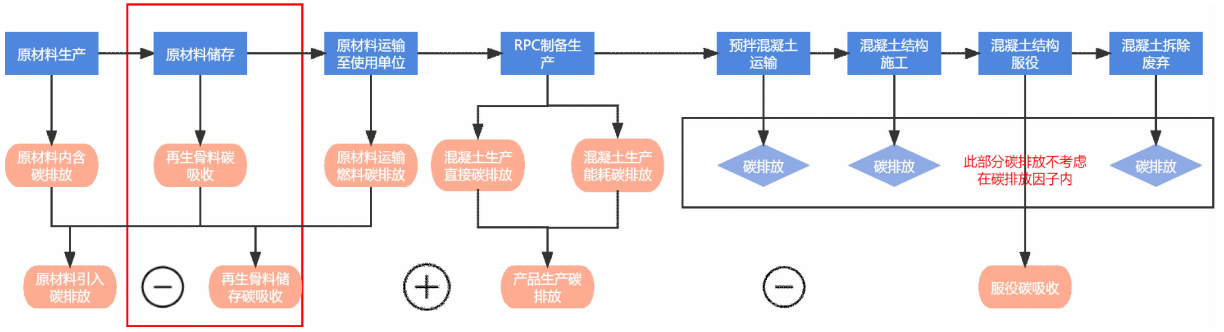


图 1 再生混凝土碳排放因子计算边界

Fig. 1 Accounting boundary for carbon emission factors of recycled concrete

混凝土的碳排放减去碳吸收,即净碳排放量。RAC 与 RFC 碳排放因子计算方法为:  $1 \text{ m}^3$  再生混凝土的原材料引入碳排放  $C_{\text{introduce}}$ ,减去再生骨料储存阶段碳吸收  $C_{\text{uptake}}$ ,加上产品生产碳排放  $C_{\text{produce}}$ ,减去混凝土结构服役阶段的碳吸收  $C_{\text{absorb}}$ ;RPC 碳排放因子无需考虑再生骨料储存阶段碳吸收部分,其余构成与前二者相同。

#### (1) 原材料引入碳排放 $C_{\text{introduce}}$

原材料引入碳排放量  $C_{\text{introduce}}$  包括原材料内含碳排放量  $C_{\text{include}}$  与原材料运输的燃料碳排放量  $C_{\text{transport}}$ 。混凝土配合比不同,则原材料内含碳排放量  $C_{\text{include}}$  的数值不同,其计算公式为

$$C_{\text{include}} = \sum_{i=1}^n c_{\text{raw material},i} E_i \quad (1)$$

式中:  $c_{\text{raw material},i}$  为第  $i$  种原材料的消耗量;  $E_i$  为第  $i$  种原材料的碳排放因子。

混凝土原材料运输导致综合油耗产生的碳排放量  $C_{\text{transport}}$  一般占比重较高,其计算公式为

$$C_{\text{transport}} = \sum_{i=1}^n c_{\text{raw material},i} E_i c_{\text{fuel}} d \quad (2)$$

式中:  $c_{\text{fuel}}$  为运输第  $i$  种原材料时燃料的消耗量;  $d$  为运输第  $i$  种原材料时的运输距离。

因此原材料引入碳排放量  $C_{\text{introduce}}$  的计算公式为

$$C_{\text{introduce}} = C_{\text{include}} + C_{\text{transport}} \quad (3)$$

#### (2) 产品生产碳排放 $C_{\text{produce}}$

混凝土生产过程的碳排放主要来源于能源消耗,更多的是电能消耗,混凝土生产碳排放量  $C_{\text{produce}}$  计算公式为

$$C_{\text{produce}} = \sum_{j=1}^n c_{\text{energy},j} E_j \quad (4)$$

式中:  $j$  为消耗能源的种类;  $c_{\text{energy},j}$  为  $1 \text{ m}^3$  混凝土生产过程中能源  $j$  的消耗量;  $E_j$  为第  $j$  类能源的碳排放因子。

#### (3) 再生骨料储存阶段碳吸收 $C_{\text{uptake}}$

根据文献[13]提出的计算模型,RCA 与 RFA 的碳吸收分为两个部分:一部分为完全碳化区的碳吸收  $C_{\text{uptake1}}$ ,可以认为老砂浆(OHCP)完全碳化;另一部分为非完全碳化区的碳吸收  $C_{\text{uptake2}}$ ,主要发生在 RCA 与 RFA 暴露在空气中的储存阶段。

$$C_{\text{uptake1}} = 0.044 \lambda m q \frac{x_c A_{\text{surface}}}{1} \quad (5)$$

$$C_{\text{uptake2}} = \begin{cases} 0.044 \eta q \rho_s d_c m (1 - \frac{x_c A_{\text{surface}}}{1}) & d_c < d_{\text{cmax}} \\ 0.044 \lambda m q (1 - \frac{x_c A_{\text{surface}}}{1}) & d_c = d_{\text{cmax}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为 OHCP 在 RCA 或 RFA 中占比的统计学数据,对于 RCA 可取 0.41<sup>[14]</sup>,文献[15]利用 X 射线光电子能谱(XPS)评估水泥砂浆表面碳物种的试验结果表明,大多数样品表面的碳酸盐百分比远超 70%,保守估计采用 70%,再考虑  $1.33^{-1} = 0.75$  的修正系数,因此对于 RFA,  $\lambda$  可取  $0.7 \times 0.75 = 0.53$ ;  $m$  为再生混凝土中所有 RCA 或 RFA 的质量;  $q$  为单位质量 OHCP 完全吸收的  $\text{CO}_2$  的量,计算方法参考文献[13];  $x_c$  为 RAC 或 RFC 碳化深度;  $A_{\text{surface}}$  为单位体积 RAC 或 RFC 的外露表面积;  $\eta$  为 RCA 或 RFA 的比表面积;  $\rho_s$  为 OHCP 的密度;  $d_c$  为 RCA 或 RFA 的碳化深度;  $d_{\text{cmax}}$  为 RCA 或 RFA 的最大碳化深度,即 OHCP 最大厚度,计算方法参考文献[13]。

因此,再生骨料储存阶段碳吸收为

$$C_{\text{uptake}} = C_{\text{uptake1}} + C_{\text{uptake2}} \quad (7)$$

#### (4) 混凝土结构服役阶段碳吸收 $C_{\text{absorb}}$

文献[16]中通过 28 组试验数据得出了混凝土碳化深度的回归数学模型,即

$$x_c = 839 g (1-R)^{1.1} \sqrt{\frac{W/(\gamma_c c) - 0.34}{\gamma_{\text{HD}} \gamma_c c}} n_0 t \quad (8)$$

式中: $R$  为相对湿度; $W$  为  $1\text{ m}^3$  混凝土中水的用量; $\gamma_c$  为水泥品种的修正系数,对于 RAC 与 RFC,若为波特兰水泥,则  $\gamma_c=1$ ,若为其他品种水泥,则  $\gamma_c=1-M$ , $M$  为掺合料质量分数; $c$  为  $1\text{ m}^3$  混凝土中水泥的用量; $\gamma_{\text{HD}}$  为水泥水化程度修正系数,若养护 28 d,则  $\gamma_{\text{HD}}=0.85$ ,若养护超过 90 d,则  $\gamma_{\text{HD}}=1$ ,中间养护龄期按照线性插入取值; $n_0$  为  $\text{CO}_2$  的体积浓度; $t$  为碳化时间; $g$  为再生材料影响系数,对于 RCA,当 RCA 取代率为 0 时, $g_{\text{RC}}=1$ ;RCA 取代率为 100% 时, $g_{\text{RC}}=1.5$ ,中间 RCA 取代率按照线性插入取值;对于 RFA,当 RFA 取代率为 0 时, $g_{\text{RF}}=1$ ;RFA 取代率为 100% 时, $g_{\text{RF}}=1.35^{[15]}$ ,中间 RFA 取代率按照线性插入取值;对于 RP,当 RP 取代率为 0 时, $g_{\text{RP}}=1$ ,RP 取代率为 30% 时, $g_{\text{RP}}=1.075^{[17]}$ ,中间 RP 取代率按照线性插入取值。

对于 RPC,需要在  $\gamma_c$  的计算过程中计入 RP 的影响,即

$$\gamma_c=1-\omega\delta\tag{9}$$

式中: $\omega$  为 RP 对水泥水化的影响系数,与 RP 组成有关; $\delta$  为 RP 取代率。

碳化深度是混凝土碳化程度的反映,基于碳化深度等数据,可以根据式(10)计算出混凝土结构的碳吸收量  $C_{\text{absorb}}$ 。

$$C_{\text{absorb}}=0.044m_0\frac{V_c}{V_0}=0.044m_0\frac{x_cA_{\text{surface}}}{1}\tag{10}$$

式中: $V_c$  为碳化深度范围内混凝土体积; $V_0$  为混凝土总体积; $m_0$  为单位体积混凝土完全碳化所吸收的  $\text{CO}_2$  量,RAC 与 RFC 可参考文献[18]中的公式进行计算,RPC 可参考文献[17]中的公式进行计算。

(5)再生混凝土碳排放因子

由图 1 可知,RAC 与 RFC 的碳排放因子为

$$C_{\text{RAC,RFC}}=C_{\text{introduce}}-C_{\text{uptake}}+C_{\text{produce}}-C_{\text{absorb}}\tag{11}$$

RPC 的碳排放因子为

$$C_{\text{RPC}}=C_{\text{introduce}}+C_{\text{produce}}-C_{\text{absorb}}\tag{12}$$

## 2 再生混凝土碳排放因子分析

### 2.1 再生粗骨料混凝土

#### 2.1.1 RCA 取代率的影响

以上海地区 C30 强度等级的 RAC 为例,采用 0、30%、50%、70%、100% 五种 RCA 取代率,RAC 配合比数据、原材料运输距离数据、上海地区环境条件、水泥品种、混凝土结构使用年限、单位体积混凝土外露表面积等均参考文献[19]。查找《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)<sup>[20]</sup> 可获得水泥、砂、自来水的碳排放因子数据,而 RCA、NCA、减水剂等标准中未提及的碳排放因子可通过计算得出(表 1)。由于粉煤灰一般作为工业废料得到,因此可忽略其碳排放量。

表 1 RAC 原材料的碳排放因子

Table 1 Carbon emission factors of RAC raw materials

原材料	电消耗/ [(kW·h)·t <sup>-1</sup> ] <sup>[19]</sup>	煤消耗/ (kg·t <sup>-1</sup> ) <sup>[19]</sup>	柴油消耗/ (L·t <sup>-1</sup> ) <sup>[19]</sup>	碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> )
RCA			0.507	0.507×0.86×3.10=1.35
NCA	1.17		0.723	1.17×0.792 1+0.723×0.86×3.10=2.85
矿粉	76.93	21.66	0.120	76.93×0.792 1+21.66×2.52+0.12×0.86×3.10=115.84
减水剂	2.50	10.00		2.5×0.792 1+10×2.52=27.18

注:柴油密度采用  $0.86\text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;电力碳排放因子采用  $0.792\text{ 1 kgCO}_2\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ (由中华人民共和国生态环境部发布);煤碳排放因子采用  $2.52\text{ kgCO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[8,20]</sup>;柴油碳排放因子采用  $3.10\text{ kgCO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[20-21]</sup>。

制备  $1\text{ m}^3$  RAC 需要消耗  $2\text{ kW}\cdot\text{h}$  的电能<sup>[19]</sup>,计算 RCA 储存阶段的碳吸收时,为简化计算,假设 RAC 中新硬化水泥浆体 NHCP 的配合比与 RCA 中 OHCP 的配合比相同。假定 NHCP 和 OHCP 在标准条件下固化 28 d,其密度均规定为  $2\text{ 000 kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。RCA 储存时间为 30 d。RCA 的颗粒级配参考文献[13],由此得出 RCA 平均粒径  $\bar{d}=16.65\text{ mm}$ 。

通过计算得到  $1\text{ m}^3$  RAC 的原材料引入碳排放  $C_{\text{introduce}}$ 、RCA 储存阶段碳吸收  $C_{\text{uptake}}$ 、产品生产碳排

放  $C_{\text{produce}}$ 、RAC 结构服役阶段的碳吸收  $C_{\text{absorb}}$ ,从而得到 RAC 的碳排放因子,如图 2~4 所示,其中, $C_{\text{CEF}}$  为净碳排放量。

在 50 年生命周期内,C30 RAC 的  $\text{CO}_2$  吸收量随着 RCA 取代率的增加而增加, $\text{CO}_2$  排放量随着 RCA 取代率的增加而减少。与 NAC 相比,RAC 的  $\text{CO}_2$  吸收量更高。当 RCA 取代率为 30%、50%、70%、100% 时,RAC 的  $\text{CO}_2$  吸收量分别为 NAC 的 1.50 倍、1.85 倍、2.19 倍和 2.73 倍。RAC 相较于 NAC 的碳排放更少、碳吸收更多,且 RCA 取代率越

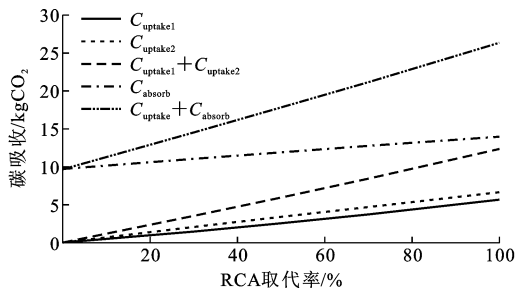


图 2 不同 RCA 取代率的 RAC 碳吸收

Fig. 2 RAC carbon uptake with different RCA replacement percentages

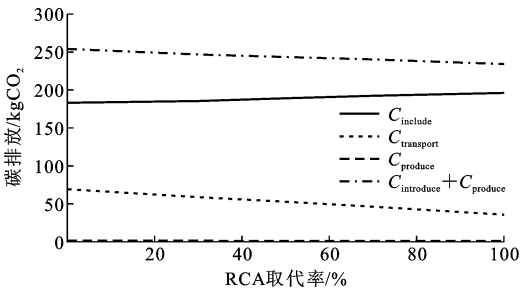


图 3 不同 RCA 取代率的 RAC 碳排放

Fig. 3 RAC carbon emission with different RCA replacement percentages

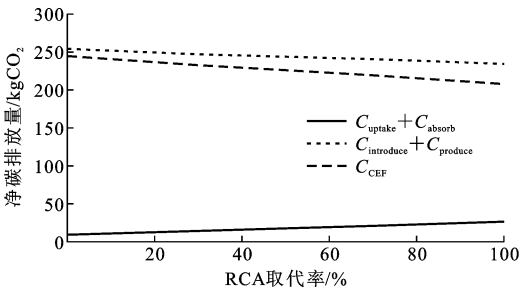


图 4 不同 RCA 取代率的 RAC 碳排放因子

Fig. 4 RAC carbon emission factors with different RCA replacement percentages

高,再生混凝土的碳排放因子越低。当 RCA 取代率分别为 30%、50%、70%、100%时,RAC 的碳排放因子分别降低了 5.1%、7.7%、10.4%、15%。

#### 2.1.2 混凝土强度等级的影响

在保证单位用水量不变(维持工作性一致)情况下,通过调整水灰比设计出强度一致的不同 RCA 取代率下 C30 与 C45 RAC 的配合比(表 2),使 RCA 达到饱和的用水量根据骨料吸水率计算,以附加水的形式体现。其余数据与条件均与第 2.1.1 节相同。计算得到 1 m<sup>3</sup>C30 和 C45 RAC 的碳排放因子如图 5~7 所示。

在 50 年的生命周期内,C30 与 C45 RAC 的 CO<sub>2</sub> 吸收量均随着 RCA 取代率的增加而增加,CO<sub>2</sub>

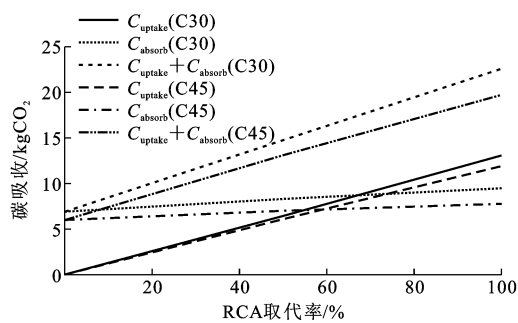


图 5 不同 RAC 强度等级的碳吸收

Fig. 5 RAC carbon uptake with different concrete strength grades

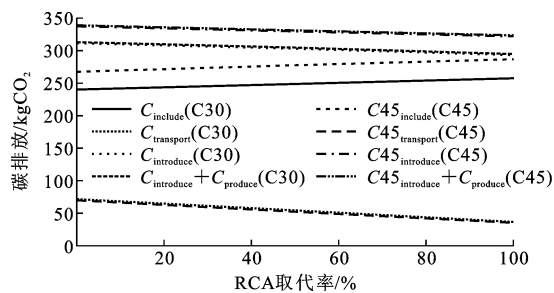


图 6 不同 RAC 强度等级的碳排放

Fig. 6 RAC carbon emission with different concrete strength grades

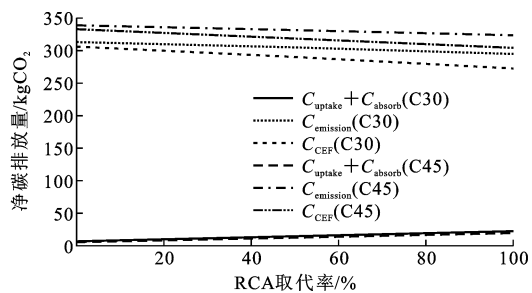


图 7 不同 RAC 强度等级的碳排放因子

Fig. 7 RAC carbon emission factors with different concrete strength grades

排放量均随着 RCA 取代率的增加而减少。无论是 RCA 碳吸收,还是再生混凝土结构服役阶段的碳吸收,C30 RAC 均高于 C45 RAC。随 RCA 取代率的升高,C30 RAC 总的碳吸收高出 C45 RAC14%~15%。C45 RAC 的碳排放高于 C30 RAC8%~9%,说明 RAC 强度等级越高,碳排放量越大。C30 RAC 相较于 C45 RAC 的碳排放更少、碳吸收更多。当 RCA 取代率分别为 0、50%、100%时,C45 RAC 的碳排放因子分别高于 C30 RAC 约 8.7%、9.7%、11.7%。

#### 2.2 再生细骨料混凝土

以上海地区 C40 与 C45 RFC 为例,C40 RFC

表 2 不同 RCA 取代率下 C30 与 C45 RAC 配合比

Table 2 C30 and C45 RAC mixture proportion with different RCA replacement percentages

RCA 取代率/%	各材料用量/kg						
	水	附加水	水泥	砂	NCA	RCA	减水剂
0	160/160	0/0	320/357	793/683	1 030/1 080	0/0	1.06/1.89
50	160/160	27/21.2	332/372	768/678	540/530	540/530	1.10/1.97
100	160/160	54/41.2	345/386	734/679	0/0	1 080/1 030	1.14/2.05

注：“/”左方为 C30 RAC 配合比数据，“/”右方为 C45 RAC 配合比数据。

配合比数据参考文献[22],C45 配合比数据参考文献[23]。RFC 中各种原材料碳排放因子同表 1, RFA 碳排放因子采用  $12\text{ kg CO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$  [24]。RFA 级配曲线参考文献[23],由此可算出 RFA 平均粒径  $\bar{d}=1.33\text{ mm}$ 。其余条件同第 2.1.1 节。

计算得到 RFC 的原材料引入碳排放  $C_{\text{introduce}}$ 、RFA 储存阶段碳吸收  $C_{\text{uptake}}$ 、产品生产碳排放  $C_{\text{produce}}$ 、RFC 结构服役阶段的碳吸收  $C_{\text{absorb}}$ ,从而得到 RFC 的碳排放因子,如图 8~13 所示。

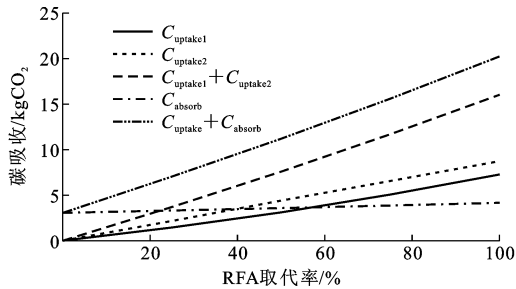


图 8 不同 RFA 取代率的 RFC 碳吸收  
Fig. 8 RFC carbon uptake with different RFA replacement percentages

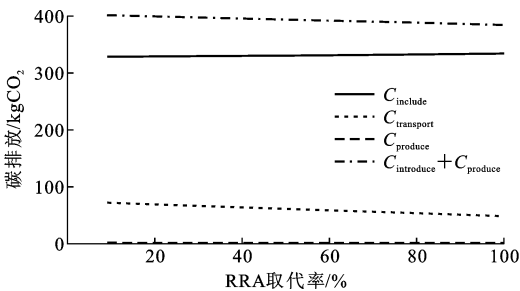


图 9 不同 RFA 取代率的 RFC 碳排放  
Fig. 9 RFC carbon emission with different RFA replacement percentages

2.2.1 RFA 取代率的影响

在 50 年的生命周期内,C45 RFC 的  $\text{CO}_2$  吸收量随着 RFA 取代率的增加而增加, $\text{CO}_2$  排放量随着 RFA 取代率的增加而减少。当 RFA 取代率为 25%、50%、75%、100%时,RFC 的  $\text{CO}_2$  吸收量分别是 NFC 的 2.27 倍、3.60 倍、5.01 倍和 6.49 倍。RFC 相较于 NFC 的碳排放更少、碳吸收更多,当

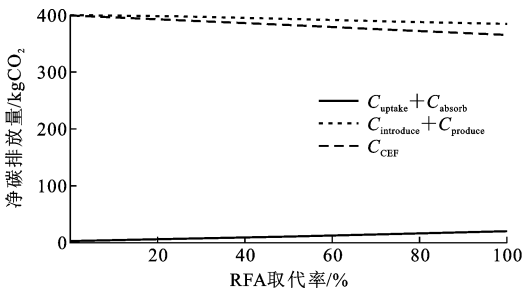


图 10 不同 RFA 取代率的 RFC 碳排放因子  
Fig. 10 RFC carbon emission factors with different RFA replacement percentages

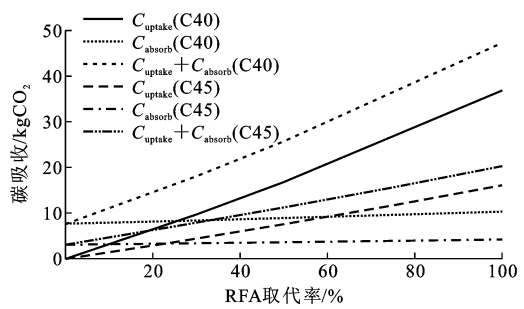


图 11 不同 RFC 强度等级的碳吸收  
Fig. 11 Carbon uptake with different RFC strength grades

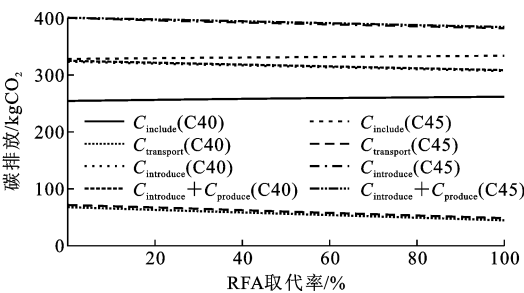


图 12 不同 RFC 强度等级的碳排放  
Fig. 12 Carbon emission with different RFC strength grades

RFA 取代率分别为 25%、50%、75%、100% 时,RFC 的碳排放因子分别降低了 2.1%、4.2%、6.4%、8.6%。

2.2.2 混凝土强度等级的影响

在 50 年的生命周期内,C40 与 C45 RFC 的

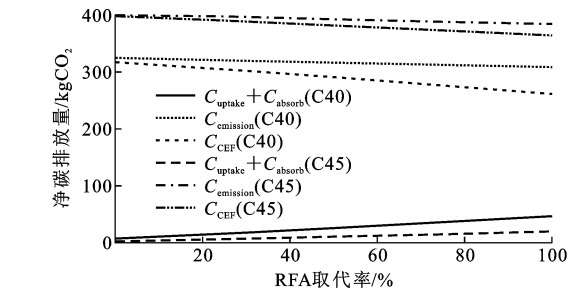


图 13 不同 RFC 强度等级的碳排放因子

Fig. 13 Carbon emission factors with different RFC strength grades

CO<sub>2</sub> 吸收量均随着 RFA 取代率的增加而增加,CO<sub>2</sub> 排放量均随着 RFA 取代率的增加而减少。无论是 RFA 碳吸收,还是再生混凝土结构服役阶段的碳吸收,C40 RFC 均高于 C45 RFC。随 RFA 取代率的升高,C40 RFC 总的碳吸收是 C45 RFC 总碳吸收的 2.29 倍~2.44 倍。强度等级越高,有效水灰比越小,水泥用量越大,因此 C45 RFC 的碳化深度均比

同 RFA 取代率下的 C40 RFC 碳化深度小,C45 RFC 的  $C_{\text{absorb}}$  和  $C_{\text{uptake}}$  均要小于 C40 RFC。C45 RFC 的碳排放比 C40 RFC 高 24%~25%,说明 RFC 强度等级越高,碳排放越大。C40 RFC 相较于 C45 RFC 的碳排放更少、碳吸收更多,总体上看,C40 RFC 碳排放因子更低。当 RFA 取代率分别为 0%、50%、100% 时,C45 RFC 的碳排放因子分别比 C40 RFC 高 26%、31%、39%。

### 2.3 再生粉混凝土

以上海地区 C30 与 C45 RPC 为例,各种材料运输数据与 C30 RPC 配合比数据参考文献[17],根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)[25],将 C30 水灰比 0.5 调整为 0.447,C45 RPC 的配合比数据如表 3 所示。RPC 中各种原材料的碳排放因子同表 1,RP 碳排放因子数据采用 32.775 kg CO<sub>2</sub> · t<sup>-1</sup>[17]。关于 RP 对水泥水化的影响系数,该案例中采用 0.3。计算得到 C30 和 C45 RPC 的

表 3 C45 RPC 配合比

Table 3 Concrete mixture proportion of C45 RPC

RP 取代率/%	各材料用量/kg						
	水泥	RP	自由水	附加水	砂	NCA	减水剂
0	357.94	0.00	160	0	683	1 080	1.43
15	304.25	53.69	160	0	683	1 080	2.15
30	250.56	107.38	160	0	683	1 080	2.63

碳排放因子如图 14~17 所示。

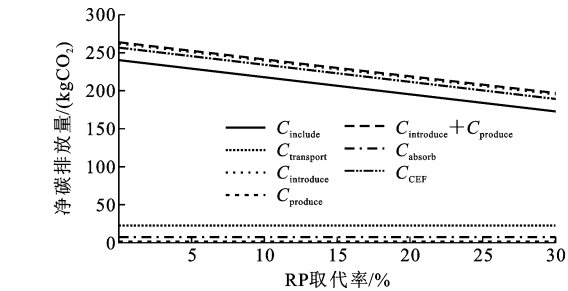


图 14 不同 RP 取代率的 C30 RPC 碳排放因子

Fig. 14 C30 RPC carbon emission factors with different RP replacement percentages

#### 2.3.1 RP 取代率的影响

原材料内含碳排放量  $C_{\text{include}}$  随 RP 取代率的增大而减小,因为水泥是碳排放量大户,而再生粉替代了部分水泥。RP 是一种低污染材料,其生产是一个研磨和筛分的物理过程,不会产生二氧化碳排放;而水泥生产是一个化学过程,在这个过程中,原材料碳酸钙被煅烧和分解,直接产生二氧化碳排放。RP 取代率分别为 15% 和 30% 时,RPC 的碳吸收补偿效益分别高出普通混凝土 6.2% 和 10.5%,证明了

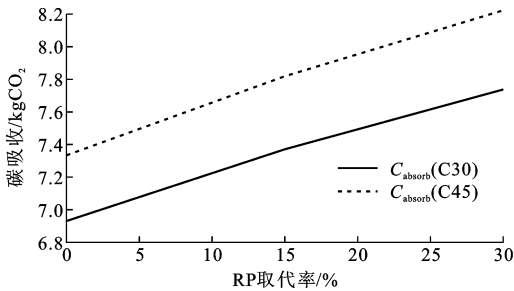


图 15 不同 RPC 强度等级的碳吸收

Fig. 15 Carbon uptake with different RPC strength grades

再生粉混凝土具有良好的碳吸收能力。RPC 的碳排放更少,碳吸收更多,这一优势随着 RP 取代率的增加而变得更加明显。与普通混凝土相比,RPC 的碳排放量降低了 12.7%~25.3%,考虑碳吸收过后的净排放量(碳排放因子)则降低了 13.2%~26.3%。

#### 2.3.2 混凝土强度等级的影响

随着 RP 取代率的提高,RPC 碳吸收逐步增大,对于 C30 RPC 来说,碳吸收可增大至普通混凝土的 6.3%~11.5%;对于 C45 RPC 来说,碳吸收可增大至普通混凝土的 6.7%~12.1%。相同 RP 取代率



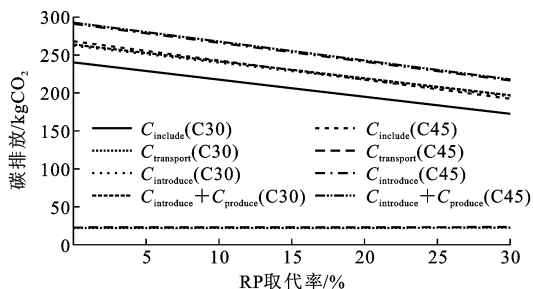


图 16 不同 RPC 强度等级的碳排放

Fig. 16 Carbon emission with different RPC strength grades

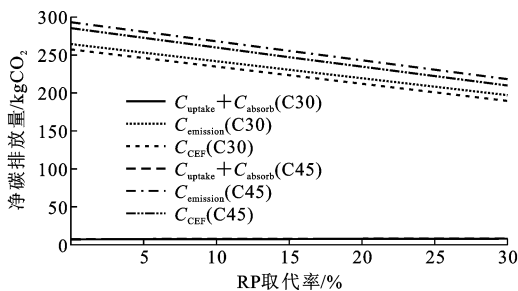


图 17 不同 RPC 强度等级的碳排放因子

Fig. 17 Carbon emission factors with different RPC strength grades

时进行横向对比,发现 C45 RPC 的碳吸收要比 C30 RPC 高 5.8%~6.1%。由于更高强度的混凝土等级会导致更低的水灰比,由此导致混凝土结构碳化深度减少;但由于更高强度混凝土的水泥用量更大,所以  $m_0$  会相应增大;最后导致混凝土结构服役阶段的碳排放更大。对于 C45 RPC,随 RP 取代率的提高,碳排放因子可降低 13.3%~26.7%。相同 RP 取代率 C30 RPC 和 C45 RPC 做横向对比可以发现,后者碳排放因子要高于前者 10.6%~10.9%。

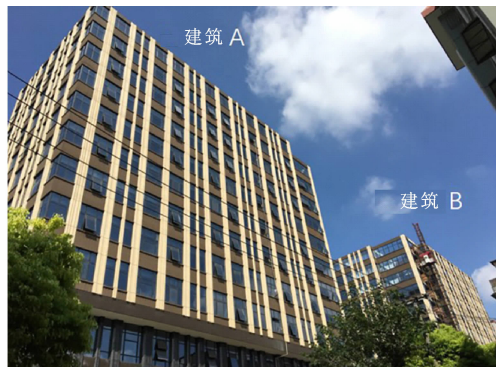
### 3 案例分析

选择 1 栋再生粗骨料混凝土高层建筑与 1 栋普通混凝土高层建筑,依据前文各项碳排放因子计算方法、计算结果、该项目实际运行的数据,计算 RAC 高层建筑全生命周期相较于 NAC 高层建筑减少的碳排放量。

#### 3.1 基本情况

本研究采用文献[26]中的 2 栋商业建筑,位于上海市五角场镇 340 街坊,均为 12 层钢筋混凝土框架-剪力墙结构,地上 12 层,高度 49.2 m,建筑面积 15 000 m<sup>2</sup>。建筑 A 采用 RAC,为提高地震变形性能,在地下室和一、二层垂直构件中未使用 RCA,同时考虑到 RAC 在高层建筑中应用经验不足,RCA

取代率仅限于 30%。建筑 B 采用普通混凝土,其他均与建筑 A 相似。2 栋建筑如图 18 所示。



(a) 建筑A(RAC)



(b) 建筑B(NAC)

图 18 RAC 与 NAC 高层建筑

Fig. 18 RAC and NAC high-rise buildings

#### 3.2 计算结果及分析

各强度等级 NAC、RAC 的配合比、原材料输送至混凝土搅拌站的运输距离以及由此计算得到的各类混凝土碳排放因子如表 4 所示[26]。

##### (1) 建材生产与结构运营阶段减少的碳排放

建筑 A 与建筑 B 所需建材除混凝土不同,其余均相似,因此为了计算再生混凝土建筑建材生产与结构运营阶段相对减少的碳排放量,只需计算混凝土部分。建筑 A 与建筑 B 使用的混凝土体积参考文献[26],利用碳排放因子可算出二者的碳排放差值(表 5)。

##### (2) 建材运输阶段、建造阶段、运行阶段、拆除阶段减少的碳排放

RAC 和 NAC 均由距离建筑工地 3.2 km 的混凝土搅拌站准备和供应,且建筑 A 与建筑 B 总的混凝土体积相同,因此建材运输阶段无减少的碳排放。

根据文献[27],当在非侵蚀性环境条件下以相同的强度和可加工性设计时,RAC 和 NAC 结构的施工、服务和拆除阶段所涉及的操作预计大致相同。因此,建筑 A 与建筑 B 建造阶段、运行阶段、拆除阶



表 4 混凝土配合比、原材料运距及碳排放因子

Table 4 Mix proportion of concrete, raw material transportation distances and carbon emission factors

混凝土强度	各材料用量/kg								碳排放因子/ (kgCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )
	水	水泥	砂	NCA	RCA	粉煤灰	矿渣	减水剂	
C30	178	231	793	1 030	0	53	71	3.55	241.37
RAC30-30	178	235	793	721	309	53	71	3.59	231.44
C35	189	244	790	1 018	0	66	77	3.87	254.53
C40	168	257	789	1 024	0	59	79	3.75	271.41
RAC40-30	168	270	789	717	307	59	79	3.88	273.68
C50	161	254	771	1 022	0	72	97	4.23	276.45
RAC50-10	161	273	771	920	102	72	97	4.42	294.17
运距/km	0	4.5 <sup>a</sup>	2.8 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup> +212 <sup>b</sup>	11 <sup>a</sup>	27 <sup>a</sup>	4.5 <sup>a</sup>	0	

注:RACX-Y 格式表示 RAC 强度等级为 X,RCA 取代率为 Y%;强度等级低于 C50 的混凝土选用等级为 42.5 的水泥,C50 的混凝土选用等级为 52.5 的水泥;a 表示城市运输;b 表示水路运输。

表 5 建筑 A、B 建材生产阶段碳排放差值

Table 5 Carbon emission difference in building materials production phase of buildings A and B

建筑类别	建筑 A(RAC)	建筑 B(NAC)
混凝土生产阶段的碳排放/kgCO <sub>2</sub>	1 455 782.055	1 481 767.5
碳排放差值/kgCO <sub>2</sub>	25 985.423 54	

段减少的碳排放在本文中可忽略不计。

(3)拆除项目寿命终止阶段减少的碳排放

为了精确比较 RAC 和 NAC 建筑的碳排放差异,不仅要考虑建筑自身生命周期减少的碳排放,还应将拆除项目寿命终止阶段减少的环境影响考虑在内。RCA 的来源为上海一集装箱码头混混凝土地面拆除项目,应考虑废混凝土加工造成的能源消耗和碳排放。假设废混凝土及 RCA 生产过程中产生的废物(本应回收以生产粗 RCA)在上海老港市垃圾填埋场处置,该垃圾填埋场距离拆除现场 71.7 km。

当采用两级破碎回收策略时,RCA 的产量为相对于废混凝土输入的 54%<sup>[26]</sup>。建筑 A 中 RCA 的用量共为 1 336 220 kg,填埋单位建筑废物所产生的 CO<sub>2</sub> 当量为 6.063 gCO<sub>2</sub>e·kg<sup>-1</sup>。因此建筑 A 由于利用 RCA 而避免填埋所产生的影响为

$$\frac{1\,336\,220}{54\%}\times\frac{6.063}{1\,000}=15\,002.78\text{ kgCO}_2$$

RCA 由拆除现场的回收厂生产,拆除现场距离填埋场地 71.7 km,运输采用重型卡车,运输碳排放因子为 402.158 gCO<sub>2</sub>·(t·km)<sup>-1</sup><sup>[26]</sup>。建筑 A 相较于建筑 B 还减少了废混凝土运输至填埋场地的碳排放,减少量为

$$\frac{1\,336\,220}{54\%\times1\,000}\times71.7\times\frac{402.158}{1\,000}=71\,351\text{ kgCO}_2$$

因此拆除项目寿命终止阶段减少的碳排放共为 86 353.78 kgCO<sub>2</sub>。

在本例中,再生混凝土建筑 A 的混凝土“建材

生产+结构运营”碳排放为 1 455 782 kgCO<sub>2</sub>e,普通混凝土建筑 B 的混凝土“建材生产+结构运营”碳排放为 1 481 767.5 kgCO<sub>2</sub>e,在混凝土“建材生产+结构运营”边界内,建筑 A 减少的碳排放为 25 985 kgCO<sub>2</sub>e,建筑 A 相较于建筑 B 减少了 1.75%的碳排放。拆除项目寿命终止阶段减少的碳排放更加显著,高达 86 353 kgCO<sub>2</sub>e,是混凝土“建材生产+结构运营”碳排放减少量的 3.32 倍,而其中避免废混凝土运输至填埋场地的影响占其中的 82.6%。因此可以得出结论,再生混凝土建筑的减碳效果主要在于避免了拆除项目废混凝土的运输与填埋,而避免建筑固废运输为环境带来的有利影响成为减碳的主要贡献者。

4 结 语

(1)随着再生材料取代率的升高,再生混凝土的碳排放因子下降。随 RCA 取代率升高,RAC 碳排放因子最多可降低 15%;随 RFA 取代率升高,RFC 碳排放因子最多可降低 8.6%;随 RP 取代率升高,RPC 碳排放因子最多可降低 26.3%。

(2)随混凝土强度等级的升高,再生混凝土碳排放因子上升。通过案例分析发现,C45 RAC 的碳排放因子高于 C30 RAC 可达 11.7%;C45 RFC 的碳排放因子高于 C40 RFC 可达 39%;C45 RPC 的碳排放因子高于 C30 RPC 可达 10.9%。

(3)在“建材生产+结构运营”边界内,RAC 建

筑相较于 NAC 建筑减少了 1.75% 的碳排放。再生混凝土建筑的减碳效果主要在于避免了拆除项目废混凝土的运输与填埋,是“建材生产+结构运营”减碳量的 3.32 倍,而避免建筑固废运输为环境带来的有利影响成为减碳的主要贡献者,占比高达 82.6%。

## 参考文献:

## References:

- [1] LIU Z, DENG Z, HE G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 3(2): 141-155.
- [2] XU X Y, WANG Y, RUAN Y J, et al. Integrated energy planning for near-zero carbon emission demonstration district in urban areas; a case study of Meishan district in Ningbo, China [J]. *Energies*, 2022, 15(3): 874.
- [3] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨[J]. *暖通空调*, 2021, 51(4): 1-17.  
LONG Weiding, LIANG Hao. Discussion on paths of carbon peak and carbon neutrality of urban buildings in China[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2021, 51(4): 1-17.
- [4] 吴文伶, 刘星, 冯建华, 等. 建筑工程施工机械碳排放研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2021, 50(13): 118-122.  
WU Wenling, LIU Xing, FENG Jianhua, et al. Research on carbon emission of construction machinery in construction engineering[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(13): 118-122.
- [5] 张涛, 姜裕华, 黄有亮, 等. 建筑中常用的能源与材料的碳排放因子[J]. *中国建设信息*, 2010(23): 58-59.  
ZHANG Tao, JIANG Yuhua, HUANG Youliang, et al. Carbon emission factors of commonly used energy and materials in buildings[J]. *Informatization of China Construction*, 2010(23): 58-59.
- [6] 刘立涛, 张艳, 沈镭, 等. 水泥生产的碳排放因子研究进展[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 110-119.  
LIU Litao, ZHANG Yan, SHEN Lei, et al. A review of cement production carbon emission factors: progress and prospects [J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 110-119.
- [7] DIXIT M K, CULP C H, FERNANDEZ-SOLIS J L. Calculating primary energy and carbon emission factors for the United States' energy sectors[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(97): 54200-54216.
- [8] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. London: IPCC, 2006.
- [9] SONG R P, YANG S, SUN M. GHG protocol tool for energy consumption in China (Version 1.0) [R]. Beijing: World Resources Institute, 2011.
- [10] SONG R P, YANG S, SUN M. GHG protocol tool for energy consumption in China (Version 2.0) [R]. Beijing: World Resources Institute, 2012.
- [11] SONG R P, YANG S, SUN M. GHG protocol tool for energy consumption in China (Version 2.1) [R]. Beijing: World Resources Institute, 2013.
- [12] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [13] HUANG K W, LI A, XIA B, et al. Prediction on CO<sub>2</sub> uptake of recycled aggregate concrete[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2020, 14(3): 746-759.
- [14] LIU Q, XIAO J Z, SUN Z H. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(10): 1050-1057.
- [15] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2010, 32(1): 9-14.
- [16] 肖建庄, 雷斌. 再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计[J]. *建筑科学与工程学报*, 2008, 25(3): 66-72.  
XIAO Jianzhuang, LEI Bin. Carbonation model and structural durability design for recycled concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2008, 25(3): 66-72.
- [17] XIAO J Z, XIAO Y, LIU Y, et al. Carbon emission analyses of concretes made with recycled materials considering CO<sub>2</sub> uptake through carbonation absorption [J]. *Structural Concrete*, 2021, 22(S1): E58-E73.
- [18] 李春晖. 复掺矿物掺合料混凝土碳化性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
LI Chunhui. Researches on carbonation of concrete with multi-mineral admixtures[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [19] 肖建庄, 黎骛, 丁陶. 再生混凝土生命周期 CO<sub>2</sub> 排放评价[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(5): 1088-1092.  
XIAO Jianzhuang, LI Ao, DING Tao. Life cycle assessment on CO<sub>2</sub> emission for recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(5): 1088-1092.
- [20] 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019 [S]. Beijing: China Architecture

- &. Building Press,2019.
- [21] 综合能耗计算通则:GB/T 2589—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- General rules for calculation of the comprehensive energy consumption: GB/T 2589—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China,2020.
- [22] 谭艺帅,彭有开,吴 徽. 不同再生细骨料取代率下的再生混凝土单轴受压本构关系[J]. 混凝土,2019(3): 65-70.
- TAN Yishuai, PENG Youkai, WU Hui. Constitutive relationship of recycled concrete with different recycled fine aggregate replacement rates under uniaxial compression[J]. Concrete,2019(3):65-70.
- [23] 段珍华,侯少丹,潘智生,等. 再生细骨料混凝土流变性及其对强度和耐久性的影响[J]. 建筑结构学报, 2020,41(增 2):420-426.
- DUAN Zhenhua, HOU Shaodan, PAN Zhisheng, et al. Rheology of recycled fine aggregate concrete and its effect on strength and durability[J]. Journal of Building Structures,2020,41(S2):420-426.
- [24] HOSSAIN M U, POON C S, LO I M C, et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA[J]. Resources, Conservation and Recycling,2016,109:67-77.
- [25] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architecture &. Building Press,2011.
- [26] XIAO J Z, WANG C H, DING T, et al. A recycled aggregate concrete high-rise building: structural performance and embodied carbon footprint[J]. Journal of Cleaner Production,2018,199:868-881.
- [27] DING T, XIAO J Z, TAM V W Y. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China[J]. Waste Management,2016,56:367-375.