

基于低碳指标的混凝土框架柱截面优化设计

张孝存¹, 王凤来²

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江宁波 315211; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:为研究钢筋混凝土结构构件的低碳设计方法与影响因素,以碳排放量和造价为指标,采用基于离散变量的双目标遗传算法实现了混凝土框架柱的截面优化设计,并通过参数分析,研究了材料强度、轴压比、偏心距以及抗震等级对框架柱碳排放水平的影响规律。结果表明:采用高强度纵筋具有较好的低碳与经济效益,而混凝土强度等级对框架柱最优碳排放量的影响较小,但可适当采用较高强度混凝土以节约经济成本;当轴压比一定时,碳排放及造价优化结果随轴向力偏心距增大而增大;当偏心距一定时,轴压比在 0.4~0.6 范围内的低碳与经济性较好。此外,随抗震等级提高,框架柱的优化碳排放量与造价显著增加。

关键词:钢筋混凝土框架柱; 低碳指标; 截面优化设计; 遗传算法

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A

Sectional optimization design of concrete frame column based on low-carbon indicator

ZHANG Xiaocun¹, WANG Fenglai²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To investigate the method and influencing factors for low-carbon design of reinforced concrete (RC) members, the carbon emission and cost were taken as indicators, and sectional optimization design of RC frame columns was realized by a double-objective genetic algorithm based on discrete variables. Moreover, a parametric analysis was employed to explore the influences of material strength, axial compression ratio, eccentricity, and seismic grade on the carbon emissions of frame columns. The results indicate that high-strength longitudinal reinforcements show considerable low-carbon and economic benefits, whereas the concrete strength has little impact on the optimized carbon emissions, and higher strength concrete can be appropriately used to save costs. If the axial compression ratio is constant, the optimal results of carbon emission and cost increase with the eccentricity of axial force. And if the eccentricity is constant, low-carbon and economical designs can be achieved when the axial compression ratio is within the range of 0.4 to 0.6. Besides, the optimized carbon emissions and costs of the frame columns increase significantly with the increase of seismic grade.

Keywords: RC frame column; low-carbon indicator; sectional optimization design; genetic algorithm

基金项目:国家自然科学基金项目(52108152),浙江省自然科学基金项目(LQ22E080001)。

作者简介:张孝存,出生于 1990 年,男,工学博士,副教授,主要从事低碳建筑结构与可持续性设计研究。email: hitzhangxc@hotmail.com

收稿日期:2022 年 3 月

0 引言

建筑业的低碳可持续发展对实现低碳经济、控制全球气候变化具有重要意义。从建筑全生命周期的角度,近年来建筑运维节能得到了广泛关注^[1]。随着清洁能源利用与建筑节能技术的发展,建筑运维能耗与碳排放不断降低,而鉴于我国现阶段的工程建设量仍持续处于较高水平,建筑物化阶段减排的重要性日益突出^[2]。建筑物化阶段包括建材与构部件生产、场外运输以及现场施工装配等环节^[3]。已有研究主要采用基于过程的方法、投入产出法和混合法计算碳排放^[4]。其中基于过程的方法可针对具体生产与建造环节的碳排放进行核算与分析,应用较为广泛,我国 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[5]即以该方法为理论框架。

作为建筑工业化发展的重要方向,混凝土结构应用广泛,消耗了大量的钢材与水泥等高能耗资源。目前,混凝土结构的受力性能与施工方法得到了大量研究,相关理论与技术已较为成熟。近年来,立足工程结构可持续发展^[6-7],国内外针对混凝土结构的低碳设计亦开展了一定的探索。在结构设计方面,早期研究以不同结构体系的碳排放量对比为主要目标^[8-9]。近年来,Yeo 等^[10]采用遗传算法 (genetic algorithm) 对某混凝土平面框架开展了低碳优化设计,结果表明,与传统的以造价为目标的优化设计相比,以碳排放为优化目标时,可进一步减排 5% ~ 10%。Nadoushani 等^[11]、Lotteau 等^[12]对比分析了不同结构平面布置方案和建筑体型特征对物化碳排放量的影响,结果表明,随着建筑高度、建筑表面积与楼面面积之比的增大,碳排放量呈上升趋势。李小冬等^[13]分析了预拌混凝土的生命周期环境影响,并提出采用 C50 ~ C60 混凝土时,框架结构的环保性与经济效益较好。构件设计方面,高宇等^[14]对常用混凝土预制构件的碳排放量进行了对比,为装配式结构的碳排放量计算提供了参考。Na 等^[15]对比分析了混凝土空心板与实心板的碳排放量与经济性,结果表明,空心板的碳排放量与造价均可降低约 12%。Yeo 等^[16]以材料隐含能为目标,依据 ACI 规范对某混凝土矩形梁进行了截面优化设计,分析表明,通过调整设计参数,材料固化能可降低 10%,但同时造价将增加约 5%。Mergos^[17]分别以碳排放量和造价为目标,采用穷举法对某 RC 柱进行了截面优化设计,结果表明,依据不同优化目标得出的构件截面尺寸及配筋率设计结果有明显差异。

综上,针对混凝土结构构件低碳优化设计仍存在以下不足: 1) 系统边界不完善,大多研究仅考虑

钢材与混凝土的生产环节,而忽略了其他辅材、材料运输及施工过程; 2) 在算法方面,多采用了单目标优化设计方法,未考虑碳排放与造价的相互影响; 3) 约束条件主要考虑了承载力与配筋率要求,鲜有涉及我国设计规范的详细构造规定; 4) 受力状态单一,未考虑实际结构中的荷载工况组合,框架柱的优化设计仅考虑了单向偏心受压等。为此,本文中以低碳与经济性为优化目标,综合考虑我国设计规范的计算与构造要求,采用双目标遗传算法实现混凝土框架柱双向偏心受压状态下的优化设计,并通过对抗震等级、材料强度、轴压比与偏心距的参数影响分析,为混凝土结构构件的低碳可持续性设计提供理论支持与指标参考。

1 优化设计模型

1.1 问题描述

基于物化碳排放量与造价指标的混凝土框架柱截面优化设计,可采用以下双目标优化模型描述:

$$\begin{cases} f_1 = \min [E_{\text{tot}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})] \\ f_2 = \min [C_{\text{tot}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})] \\ G_l = g_l(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: f_1 和 f_2 分别为碳排放及造价最小值目标函数; G_l 为第 l 个不等式约束条件, L 为约束条件总数量, $l = 1, 2, \dots, L$; E_{tot} 为框架柱在材料生产、运输及施工全过程的物化碳排放量; C_{tot} 为构件生产及施工造价; \mathbf{X} 为设计变量,即优化问题的一组解, $\mathbf{X} = \{x_i\}$, i 为 $1, 2, \dots, I$; \mathbf{Y} 为已知条件, $\mathbf{Y} = \{y_j\}$, j 为 $1, 2, \dots, J$ 。

对于框架柱的截面优化设计,已知量一般包括构件的计算内力、构件长度、抗震等级、环境类别等参数,以及材料碳排放因子、综合单价等数据;设计变量主要有截面尺寸、材料强度、纵筋直径与数量、箍筋直径、肢数与间距;而约束条件主要指构件承载力要求与构造规定。

1.2 功能函数

1.2.1 碳排放目标函数

以整个构件为功能单位 (functional unit), 并考虑材料生产、运输及施工全过程,采用“从摇篮到现场” (cradle to site)^[18]的系统边界计算碳排放量。结合混凝土构件的生产与建造特点,分析中主要考虑混凝土、钢筋及模板分项工程,相应的工程量可计算如下:

$$Q_c = (1 + \omega_c) b h l_c \quad (2)$$

$$Q_{sz} = (1 + \omega_s) \sum \rho_s n_s A_{s0} l_s \quad (3)$$

$$Q_{sv} = (1 + \omega_s) \sum \rho_s n_{sv} A_{sv0} l_{sv} \quad (4)$$

$$Q_f = (1 + \omega_f) \cdot 2(b + h) l_c \quad (5)$$

其中: Q_c 为混凝土体积; Q_{sz} 、 Q_{sv} 分别为纵筋和箍筋质量; Q_f 为模板面积; ω_c 、 ω_s 、 ω_f 分别为混凝土、钢筋及模板的材料损耗率; b 、 h 和 l_c 分别为框架柱的截面宽度、截面高度及纵向长度; ρ_s 为钢材的密度; n_s 为纵筋数量; A_{s0} 为单根纵筋的截面面积; l_s 为单根纵筋的下料长度; n_{sv} 为箍筋数量; A_{sv0} 为单肢箍筋的截面面积; l_{sv} 为同截面内箍筋的总长度。

在上述分项工程中,除钢筋、混凝土及模板等主材外,尚涉及铁丝、水等辅材及各类施工机械。因此,可依据工程消耗量定额、施工机械台班定额等确定单位分项工程的材料及能耗水平,并结合相应的碳排放因子确定各分项工程的综合碳排放系数^[8]。

按上述方法得到各分项工程碳排放系数的取值见表 1。由于不同强度、不同直径钢筋在加工时所需辅材及机械用量不同,碳排放系数亦略有差异。

表 1 单位分项工程的综合碳排放系数取值
Table 1 Comprehensive emission factors of unit subproject

分项工程	材料类型	单位	碳排放系数取值	工作内容
矩形柱 混凝土	C25	kgCO _{2e} /m ³	316	①混凝土生产 ②混凝土运输 ③浇筑、振捣及养护
	C30		339	
	C35		384	
	C40		431	
	C50		461	
直径 12~25 mm 纵筋	HRB335	kgCO _{2e} /kg	2.54~2.57	①钢筋生产 ②钢筋运输 ③钢筋加工与绑扎
	HRB400		2.54~2.57	
	HRB500		2.56~2.59	
直径 6~16 mm 箍筋	HPB300	kgCO _{2e} /kg	2.51~2.52	①钢筋生产 ②钢筋运输 ③钢筋加工与绑扎
	HRB335		2.51~2.52	
	HRB400		2.51~2.52	
	HRB500		2.51~2.52	
柱模板	组合钢模板	kgCO _{2e} /m ²	4.96	①模板生产(按周转频次与损耗率分摊) ②模板运输 ③模板加工及安装

在此基础上,物化碳排放量可按下式计算:

$$E_{\text{tot}} = Q_c e_c + Q_{sz} e_{sz} + Q_{sv} e_{sv} + Q_f e_f \quad (6)$$

其中: e_c 为混凝土分项工程的综合碳排放系数; e_{sz} 、 e_{sv} 分别为纵筋和箍筋分项工程的综合碳排放系数; e_f 为柱模板分项工程的综合碳排放系数。

1.2.2 造价目标函数

造价目标函数中需考虑材料费、人工费和机械费,即

$$C_{\text{tot}} = Q_c p_c + Q_{sz} p_{sz} + Q_{sv} p_{sv} + Q_f p_f \quad (7)$$

其中: p_c 为混凝土分项工程的综合单价; p_{sz} 、 p_{sv} 分别为纵筋和箍筋分项工程的综合单价; p_f 为模板分项工程的综合单价。各分项工程的综合单价可根据工程消耗量定额与各生产要素的单价确定。

1.3 约束条件及违反度

1.3.1 承载力要求

双向偏心受压混凝土框架柱,需同时满足偏心受压承载力和受剪承载力计算要求。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[19],结构的安全性约束条件可表示为:

$$G_{l,\mu} = 1 - N/(\mu_{\text{lim}} f_c b h) \geq 0 \quad (8)$$

$$G_{l,N} = N_u/\gamma_0 N - 1 \geq 0 \quad (9)$$

$$G_{l,M} = M_u/\gamma_0 M - 1 \geq 0 \quad (10)$$

$$G_{l,V} = V_u/\gamma_0 V - 1 \geq 0 \quad (11)$$

其中: $G_{l,\mu}$ 为最大轴压比约束; $G_{l,N}$ 为双向偏心受压承载力约束; $G_{l,M}$ 为 x 向或 y 向的受弯承载力约束; $G_{l,V}$ 为 x 向或 y 向的受剪承载力约束; γ_0 为结构重要性系数; N_u 为偏心受压承载力设计值; M_u 为受弯承载力设计值; V_u 为受剪承载力设计值; N 为轴压力设计值; M 为 x 向或 y 向的弯矩设计值; V 为 x 向或 y 向的剪力设计值; μ_{lim} 为轴压比限值; f_c 为混凝土抗压强度设计值;此外,有抗震设防要求时,需在结构构件承载力设计值计算中考虑承载力抗震调整系数。

1.3.2 构造要求

在 GB 50010—2010^[19] 中规定,混凝土框架柱设计时需满足截面尺寸、纵筋间距及配筋率、箍筋间距及配箍率等诸多构造要求。例如,抗震等级为三级的框架柱需满足:1) 截面尺寸不宜小于 400 mm × 400 mm;2) 纵筋间距不应小于 50 mm 且不应大于 200 mm;3) 全截面纵筋配筋率不应小于 0.5% ~ 0.6% 且不应大于 5%;4) 非加密区箍筋直径不应小于 $d/4$ (d 为纵筋直径) 及 6 mm,间距不应大于 $15d$ 及截面短边尺寸;5) 加密区箍筋直径 d_{sv} 不应小于 8 mm,间距不应大于 $8d$ 和 150 mm 的较小值,肢距不宜大于 250 mm 和 20 倍箍筋直径的较大值;6) 加密区箍筋体积配筋率不应小于 0.4%,非加密区不小于加密区的 50%。

上述构造约束条件可分为最大值及最小值约束两类,并可分别表示为:

$$G_{l,m} = 1 - D_m/D_{\text{max},m} \geq 0 \quad (12)$$

$$G_{l,n} = D_n/D_{\text{min},n} - 1 \geq 0 \quad (13)$$

其中: $G_{l,m}$ 和 $G_{l,n}$ 分别表示第 m 项最大值约束函数和第 n 项最小值约束函数; D_m 和 $D_{\text{max},m}$ 分别为第 m 项约束的计算值及最大值; D_n 和 $D_{\text{min},n}$ 分别为第 n 项约束的计算值及最小值。

1.3.3 约束违反度

对于一组解 X ,若可满足 1.3.1 节和 1.3.2 节所有约束条件,则 X 为可行解,否则 X 为非可行解。为描述任一组解违反约束条件的程度,便于在优化目标分析中获得可行解或较优非可行解,避免迭代过程收敛于非可行域,定义约束违反度 I_{cv} 为

$$I_{cv}(X, Y) = \sum_{l=1}^L \max(-G_l, 0) / L \quad (14)$$

易知,若 X 为可行解,则 $I_{cv} = 0$; 否则当 $I_{cv} > 0$ 时, I_{cv} 越大,违反约束条件的程度越高。

2 优化算法

2.1 最优解判定

对于双目标优化问题,通常不存在绝对最优解使所有目标函数均达到最小值,为此,引入 Pareto 最优解的概念。对于两组可行解 X_1 和 X_2 ,若满足:

$$\begin{cases} f_p(X_1) \geq f_p(X_2) & (\forall p \in \{1, 2\}) \\ f_q(X_1) < f_q(X_2) & (\exists q \in \{1, 2\}) \end{cases} \quad (15)$$

则解 X_1 支配解 X_2 ,若不存在任何解支配 X_1 ,则 X_1 为一组非支配解。由所有非支配解构成的集合,即为多目标优化问题的 Pareto 最优解集。

优化分析中,采用 NSGA-II 非支配性排序法^[20]确定解的优先级,即: 1) 为保证迭代收敛于可行域,优先选择 I_{cv} 较小的解。2) 确定现有解集中的非支配解,即为 Pareto 前沿,计 $R_f = 1$; 去除上述解后,在剩余解中确定非支配解,计 $R_f = 2$,并依此类推;迭代分析中优先选择 R_f 较小的解。3) 为保证解空间的多样性,采用拥挤距离指标 C_d ^[21]判断解的聚集程度,并优先选择 C_d 较大的解。

2.2 双目标遗传算法

在工程结构中,为便于设计与施工,设计参数通常为离散变量。例如,GB 50010—2010^[19]中混凝土强度等级以 5 MPa 递增,而普通钢筋屈服强度分为 300、335、400 MPa 和 500 MPa 四个等级,钢筋直径常取 6 ~ 25 mm,而构件截面尺寸通常以 50 mm 或 100 mm 为模数。因此,分析中采用适用于离散变量的双目标遗传算法,通过计算机编程实现优化模型的求解。遗传算法是借鉴生物进化规律提出的一种元启发式算法,该算法的基本原理为:根据设计参数范围,随机形成初始种群(即一簇初始解),通过遗传操作生产子代种群(即一簇新解),然后利用适应性条件(即非支配性排序原则)对上述种群中的个体进行选择,形成新的种群,最后重复遗传及选择操作直至达到终止条件,完成优化分析。综上,采用双目标遗传算法进行优化设计的流程见图 1,具体步骤说明如下:

1) 获取设计资料,确定设计条件与构造要求,由工程设计软件计算得到框架柱内力并进行荷载效应组合。

2) 建立优化模型,分别按 1.1 ~ 1.3 节方法确定输入变量及其取值范围、目标函数及约束函数。

3) 通过经验与试算,确定优化模型中主要算法参数的合理取值。

4) 当子代数 $k = 0$ 时,在输入变量的取值范围内,按种群容量随机生成初始种群 Q_0 。

5) 令 $k = k + 1$,采用遗传算法的交叉与变异操作,生成子代 P_k 。

6) 计算种群 Q_{k-1} 和 P_k 内个体的目标函数值 E_{tot} 和 C_{tot} 、约束违反度 I_{cv} 、解的 R_f 值及拥挤距离 C_d ,并按 2.1 节方法进行非支配性排序。

7) 根据种群容量,选择非支配性排序中的优势个体,作为下一代种群 Q_k 。

8) 重复步骤 5) ~ 7),直至达到终止条件(如子代数达到预设的最大值),最终种群中的非支配解即为所求的 Pareto 最优解。

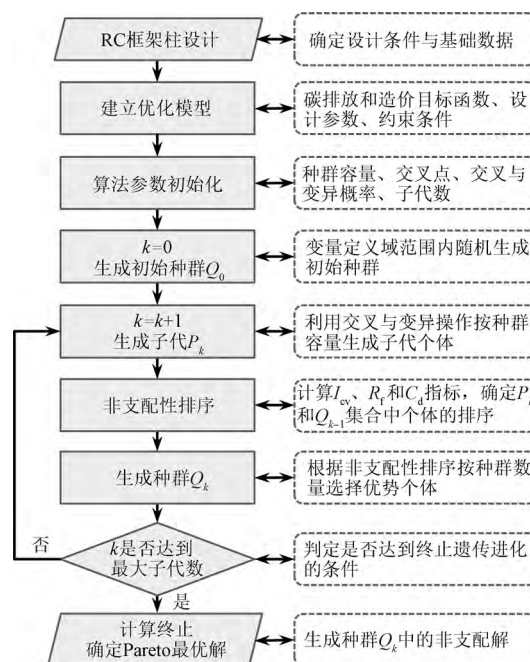


图 1 遗传算法优化分析流程

Fig. 1 Procedure for optimization analysis based on genetic algorithm

3 算例概况

3.1 框架柱设计

选取某框架结构中柱为算例,建筑抗震设防烈度为 7 度,抗震设防类别为丙类,实际抗震等级为三级,环境类别为一类。该框架柱的总高度为 3.3 m,净高度为 3.2 m,初始设计截面尺寸为 500 mm × 500 mm,混凝土强度等级为 C30,钢筋牌号为 HRB400。由软件 SATWE 分析得出的控制截面轴力及弯矩标准值,如表 2 所示,考虑以下荷载效应组合: 1) $1.3G_k + 1.5Q_k \pm 1.5 - 0.6W_k$; 2) $1.3G_k \pm 1.5W_k + 1.5 - 0.7Q_k$; 3) $1.3(G_k + 0.5Q_k) \pm 1.4E_k$,并根据抗震设计要求调整框架柱的弯矩及剪力设计值。

表2 框架柱的控制截面内力标准值
Table 2 Characteristic value of internal force
at control section of frame column

作用类型	轴力/ kN	柱顶弯矩/ (kN · m)		柱底弯矩/ (kN · m)	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向
恒荷载	1 310.4	10.1	2.0	32.0	1.1
活荷载	209.9	6.1	0.6	5.9	0.8
X 向风荷载	0.9	0.4	11.3	0.4	12.7
Y 向风荷载	17.5	43.7	0.1	46.9	0.1
X 向地震作用	10.6	5.6	86.6	6.0	94.1
Y 向地震作用	54.7	128.8	0.8	135.6	0.9

3.2 参数设定

结构设计参数方面,框架柱的优化设计参数及取值范围如表3所示。优化设计中,为减少变量数目、提高计算效率,纵筋根数和箍筋间距根据设计条件、构造规定以及承载力要求确定。

表3 设计参数的取值范围
Table 3 Range of design parameters

设计参数	取值范围
截面高度 h/mm	[300, 1 000]
截面宽度 b/mm	[300, 1 000]
混凝土抗压强度标准值 $f_{\text{cu},k}/\text{MPa}$	25, 30, 35, 40, 45, 50
角部纵筋直径 d_{sc}/mm	12, 14, 16, 18, 20, 22, 25
中部纵筋直径 d_{st}/mm	12, 14, 16, 18, 20, 22, 25
箍筋直径 d_{sv}/mm	6, 8, 10, 12, 14, 16
纵筋屈服强度标准值 f_{yk}/MPa	335, 400, 500
箍筋屈服强度标准值 f_{yk}/MPa	300, 335, 400, 500

注:当截面尺寸 h 、 b 小于 800 mm 时,以 50 mm 为模数;当 h 、 b 大于 800 mm 时,以 100 mm 为模数。

优化算法参数方面,变量数目为 8 个,种群容量取 50,基因交叉点个数取 2,交叉概率取 0.2,变异概率取 0.05。在上述条件下,子代数递增时,最优解的变化规律如图 2 所示。由图可见,优化初期的前 20 次迭代过程中,碳排放量和造价迅速向最优解收敛;随后的迭代过程中优化结果趋于平缓下降;至第 563 子代时,优化结果不再变化,判定为已获得了 Pareto 最优解。

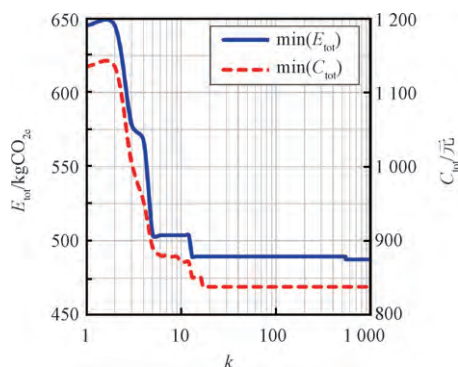


图2 最优解随算法子代数的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of optimal solutions with change in number of generations

为说明上述优化结果的稳定性,相同条件下进行了 5 次独立重复模拟,其中 4 次模拟结果可获得一致的最优解集,1 次模拟中碳排放量最优解有 0.4% 的误差,有效子代数在 94 ~ 619 之间。因此,后续分析中取最大子代数为 1 000,在满足算例分析精度要求的同时,减小时间成本。

4 算例结果分析

4.1 算例整体优化结果

根据第 3 节设计资料及参数设定,采用遗传算法可获得 3 组 Pareto 最优解 S1、S2、S3,优化结果如表 4 所示。

表4 算例最优解的分析结果

Table 4 Optimal solutions for numerical example

参数	分项工程	单位	Pareto 最优解		
			S1	S2	S3
工程量	纵筋	kg	52.8	50.9	50.9
	箍筋	kg	33.7	24.9	26.0
	混凝土	m ³	0.69	0.55	0.55
	模板	m ²	6.24	5.54	5.54
碳排放量	纵筋	kgCO _{2e}	136.8	131.0	131.0
	箍筋	kgCO _{2e}	85.0	62.8	65.6
	混凝土	kgCO _{2e}	235.0	268.3	268.3
	模板	kgCO _{2e}	30.9	27.5	27.5
	合计	kgCO _{2e}	487.7	489.7	492.5
造价	纵筋	元	253.0	238.1	238.1
	箍筋	元	156.6	122.7	120.9
	混凝土	元	307.4	316.8	316.8
	模板	元	182.8	162.5	162.5
	合计	元	899.7	840.1	838.3

由表 4 可见,框架柱算例的最优物化碳排放量为 487.7 kgCO_{2e},其中钢筋、混凝土及模板分项工程的贡献率分别为 45.5%、48.2% 和 6.3%;最优造价为 838.3 元,各分项工程的贡献率分别为 42.8%、38.8% 和 19.4%。与 Pareto 最优解 S3 相比,最优解 S1 的造价增加 61.4 元(7.3%),但碳排放量降低了 4.8 kgCO_{2e}(1.0%)。

在优化分析过程中,共获得可行解 12 287 组,相应的造价及碳排放量汇总于图 3。由图可见,可行域内混凝土框架柱的碳排放量与造价近似符合如下线性关系:

$$E_{\text{tot}} = 0.593C_{\text{tot}} \quad (16)$$

式(16)拟合方程的判定系数 $R^2 = 0.9981$,说明二者具有显著的线性相关性。

此外,对上述 12 287 组可行解的进一步分析发现,单位体积构件的碳排放量与构件配筋率之间满足如下回归方程:

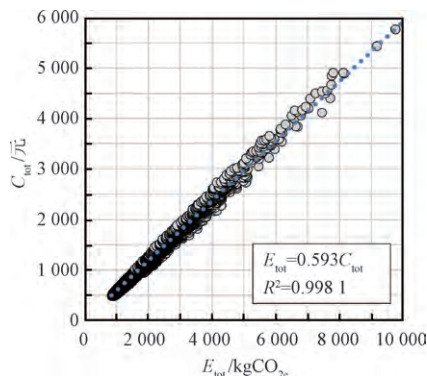


图3 可行域内碳排放量与造价相关性分析
Fig. 3 Correlation analysis between carbon emission and cost in feasible space

$$\rho_E = 2.586\rho_{\text{steel}} + 464.6 \quad (17)$$

其中: ρ_{steel} 为单位体积混凝土的配筋量, kg/m^3 ; ρ_E 为单位体积构件的碳排放量, $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$ 。

式(17)的判定系数 $R^2 = 0.898$,拟合效果亦较好。因此,工程实践中可根据构件的造价或配筋率,初步估算相应的碳排放水平。

4.2 材料强度的影响

4.2.1 混凝土强度

混凝土强度等级对框架柱优化设计结果的影响如图4所示。由图可见,随着混凝土强度等级提高,碳排放量呈折线形,而造价呈下降趋势。当混凝土强度等级较低时,受轴压比限值影响,构件截面尺寸的优化结果为 $(500 \sim 550) \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,相应的碳排放量及造价均较高。当混凝土强度等级为C40时,最优截面尺寸突变为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,导致构件用钢量明显提高,碳排放量出现局部峰值。而当混凝土强度等级继续提高至C50时,尽管混凝土的碳排放因子增大,但构件配筋降低使得钢筋分项工程的碳排放量随之下降,故总体碳排放量及造价均可获得较优结果。

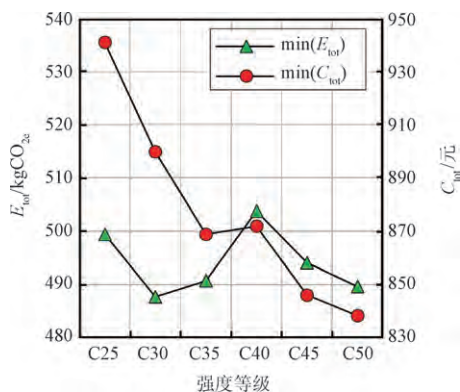


图4 混凝土强度对最优解的影响
Fig. 4 Influence of concrete strength on optimal solutions

进一步分析表明,混凝土强度等级在C25~C50范围内变化时,最优解的碳排放量最多仅相差3.3%,而造价最多相差11.2%。仅从低碳与经济的角度考虑,可适当采用较高强度的混凝土进行框架柱设计。

4.2.2 纵筋强度

纵筋强度对框架柱优化设计结果的影响如图5所示。与采用HRB335纵筋相比,当采用HRB400纵筋时,纵筋用量平均可降低9.9%,相应的最优碳排放量及造价可分别降低4.3%和1.9%;而当采用HRB500纵筋时,纵筋用量平均可降低26.5%,相应的最优碳排放量及造价可分别降低9.2%和5.8%。因此采用我国规范GB 50010—2010^[19]推荐的高强钢筋作为框架柱纵筋时,具有较好的低碳与经济效益。

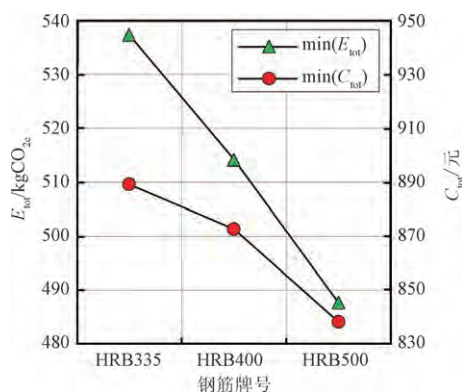


图5 纵筋强度对最优解影响
Fig. 5 Influence of longitudinal reinforcement strength on optimal solutions

4.2.3 箍筋强度

箍筋强度对框架柱优化设计结果的影响如图6所示。由图可见,当采用HPB300箍筋时,算例可获得最优的碳排放量及造价。箍筋强度提高时,碳排放量及造价反而出现一定的上升。产生这一现象的主要原因有以下两方面:1)该算例的箍筋间距由最大间距与体积配箍率等构造要求决定,箍筋强度提高对其间距影响不大,而综合碳排放系数及单价却略有上升。2)GB 50010—2010^[19]中规定箍筋受剪时,取其强度设计值不大于 $360 \text{ N}/\text{mm}^2$,因此采用HRB400和HRB500箍筋算例的设计承载力无差别,而后的单价更高。总体上,采用不同强度等级的箍筋时,最优碳排放量及造价的变化幅度不大于2.5%,可适当采用高强箍筋以提高对混凝土的约束作用,增加构件变形能力。

4.3 轴压比和偏心距的影响

实际结构中的框架柱可能处于轴心受压、大偏心受压及小偏心受压等不同状态。为研究受力状态的影响,以截面尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的框架柱为例,混凝土强度取C30,分析轴压比 μ 分别为0.05~

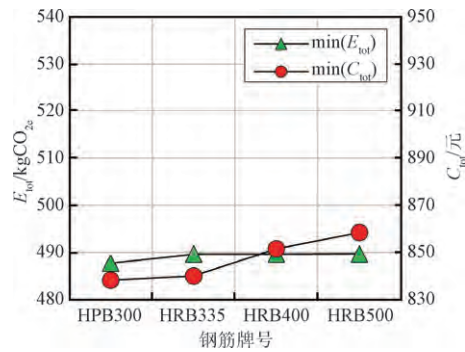


图6 箍筋强度对最优解影响

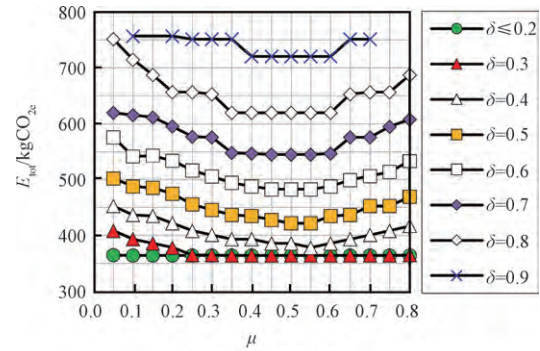
Fig. 6 Influence of stirrup strength on optimal solutions

0.80, 计算偏心弯矩分别为 δM_0 时的优化结果。其中, δ 为比例系数, 取值范围为 $0 \sim 0.9$; M_0 对应受压区高度 $x = 0.482h_0 \approx 173.5 \text{ mm}$ 、纵筋强度设计值 $f_y = 435 \text{ N/mm}^2$ 、配筋面积 $A_s = A'_s = 1964 \text{ mm}^2$ 情况下的偏心受压承载力, 计算得到 $M_0 \approx 540 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

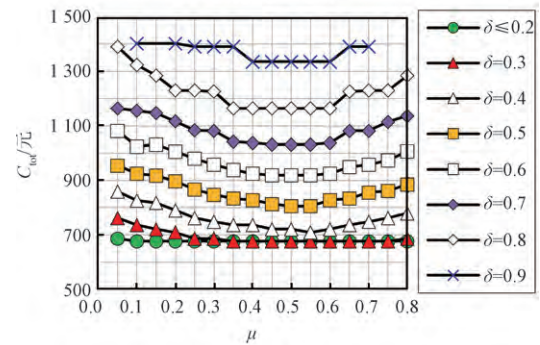
不同轴压比和偏心距下, 碳排放量及造价最优解如图7所示。由图可见, 轴压比一定时, 框架柱的最优碳排放量及造价与偏心弯矩呈正相关, 且偏心弯矩较大时, 碳排放量及造价增长更快。当偏心弯矩一定时, 若 $\delta \leq 0.2$, 框架柱的最优碳排放量及造价受轴压比的影响很小, 截面配筋主要由构造要求决定; 而若 $\delta \geq 0.3$, 随轴压比增大, 框架柱的最优碳排放量及造价先减小后增大。总体上, 当轴压比在 $0.4 \sim 0.6$ 之间时, 框架柱设计可获得较为低碳与经济的结果。

4.4 抗震等级的影响

根据 GB 50010—2010^[19] 要求, 提高抗震等级时, 框架柱的内力调整系数及配筋构造要求亦更为严



(a) 碳排放最优解



(b) 造价最优解

图7 轴压比和偏心距对最优解的影响

Fig. 7 Influence of axial compression ratio and eccentricity on optimal solutions

格。为此, 对一~四级抗震等级和非抗震设计五种情况进行对比, 相应的优化设计结果见表5。

由表5可见, 1) 抗震等级对框架柱的优化设计结果具有显著影响。相较于非抗震设计的情况, 抗震等级为三级时, 最优碳排放量和造价分别增加46.5%和48.5%; 而抗震等级为一级时, 最优碳排放

表5 不同抗震等级时的 Pareto 最优解集

Table 5 Pareto optimal sets under different seismic grades

抗震等级	编号	截面尺寸		混凝土强度	纵筋	箍筋	承载力富余度/%		$E_{\text{tot}}/\text{kgCO}_2\text{e}$	$C_{\text{tot}}/\text{元}$
		h/mm	b/mm				偏压	受剪		
一级	S1-1	550	400	C30	4 Φ 20 + 6 Φ 16	Φ 10@90/160(4 \times 3)	2.7	12.4	647.7	1 184.7
	S1-2	500	400	C35	10 Φ 18	Φ 10@100/180(4 \times 3)	0.2	3.8	649.4	1 169.6
	S1-3	500	400	C35	10 Φ 18	Φ 10@100/170(3 \times 4)	0.2	0.9	655.5	1 165.6
	S1-4	500	400	C40	10 Φ 18	Φ 10@100/180(4 \times 3)	0.6	2.7	665.8	1 136.0
二级	S2-1	550	400	C30	4 Φ 18 + 6 Φ 14	Φ 8@100/140(4 \times 3)	5.1	23.5	541.5	993.2
	S2-2	500	400	C35	4 Φ 18 + 6 Φ 14	Φ 8@100/140(4 \times 3)	0.8	15.6	542.3	961.7
	S2-3	500	400	C40	4 Φ 16 + 6 Φ 14	Φ 8@100/140(4 \times 3)	2.0	22.2	559.7	941.8
三级	S3-1	500	400	C30	4 Φ 18 + 6 Φ 14	Φ 8@110/210(4 \times 3)	0.2	11.6	487.7	899.7
	S3-2	400	400	C50	4 Φ 20 + 4 Φ 14	Φ 8@110/210(3 \times 3)	0.9	7.7	489.7	840.1
	S3-3	400	400	C50	4 Φ 20 + 4 Φ 14	Φ 8@100/210(3 \times 3)	0.9	3.3	492.5	838.3
四级	S4-1	450	400	C35	4 Φ 18 + 4 Φ 14	Φ 6@80/210(3 \times 3)	0.6	10.2	425.9	768.4
	S4-2	450	400	C40	4 Φ 16 + 4 Φ 12	Φ 6@80/180(3 \times 3)	3.4	25.2	431.8	733.2
非抗震	S0-1	450	300	C50	4 Φ 14 + 2 Φ 12	Φ 6@180/180(3 \times 2)	6.5	118.6	332.2	568.7
	S0-2	500	300	C40	4 Φ 14 + 2 Φ 12	Φ 6@180/180(3 \times 2)	3.1	127.2	332.8	564.4

注: 偏压承载力富余度(承载力/荷载效应-1)为式(8)~(10)计算结果的最小值; 受剪承载力富余度为式(11)计算结果。

量和造价分别增加 95.0% 和 101.3%。2) 抗震等级相同时,相较于造价最优解,碳排放最优解的框架柱截面尺寸及配筋量通常更高,但混凝土的强度等级则相对较低。而随着抗震等级提高,构件的含钢率逐渐增加,从而导致钢筋工程对物化碳排放量及造价的贡献显著提高,而混凝土及模板工程的贡献则逐渐降低。此外,由于框架柱内力调整满足“强剪弱弯”的要求,箍筋贡献的变化幅度高于纵筋。

5 结论

1) 尽管算例中碳排放最优解与造价最优解的设计参数不同,但可行解的回归分析表明,构件的碳排放量与造价、配筋率等指标具有良好的线性相关性,工程实践中可作为碳排放量初步估算的依据。

2) 混凝土强度对框架柱最优碳排放量影响不大,但与造价呈负相关,设计中可适当采用较高强度的混凝土;箍筋强度对碳排放量及造价的影响较小,当采用 HRB500 钢筋时,其强度不能充分利用且单价较高,实践中采用 HPB300 ~ HRB400 箍筋较为合理;而采用高强钢筋作为纵筋时,低碳与经济效益均较好。

3) 轴压比一定时,最优碳排放量与造价随偏心弯矩增大而增大;偏心弯矩一定时,最优碳排放量与造价随轴压比增大先减小后增大,轴压比在 0.4 ~ 0.6 范围内时,低碳与经济性较好。

4) 抗震等级对混凝土框架柱的优化结果具有显著影响,抗震等级提高时,钢筋对碳排放量及造价的贡献增大,且箍筋贡献的变化幅度高于纵筋。

参 考 文 献

- [1] NWODO M N, ANUMBA C J. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach [J]. Building and Environment, 2019, 162:106290.
- [2] RESCH E, LAUSSELET C, BRATTEBØ H, et al. An analytical method for evaluating and visualizing embodied carbon emissions of buildings[J]. Building and Environment, 2020, 168:106476.
- [3] 高鑫, 朱建君, 陈敏, 等. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹测算模型研究[J]. 建筑节能, 2019, 47(2):97-101. (GAO Xin, ZHU Jianjun, CHEN Min, et al. Carbon footprint model of prefabricated concrete construction in materialization stage [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2019, 47(2):97-101. (in Chinese))
- [4] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 20-28. (ZHANG Xiaocun. Research on the quantitative analysis of building carbon emissions and assessment methods for low-carbon buildings and structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 20-28. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文. 工程结构可持续性设计理论架构[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 1-12. (XIAO Jianzhuang, XIA Bing, XIAO Xuwen. Theoretical framework for sustainability design of engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6):1-12. (in Chinese))
- [7] 王竹君, 夏晋, 金伟良. 一种改进的工程结构全寿命设计理论指标体系[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1):40-48. (WANG Zhujun, XIA Jin, JIN Weiliang. Modified life-cycle design index system of engineering structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1):40-48. (in Chinese))
- [8] 张孝存, 郑荣跃, 王凤来. 清单选择对乡村建筑物化碳排放的影响分析[J]. 工程管理学报, 2020, 34(3): 51-55. (ZHANG Xiaocun, ZHENG Rongyue, WANG Fenglai. Influence analysis of inventory selection on the embodied carbon emissions of rural buildings [J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(3):51-55. (in Chinese))
- [9] 曹静, 沈志明, 王晓玉, 等. 混凝土装配式与现浇住宅建筑碳排放分析与研究[J]. 建设科技, 2020(合刊1):69-73. (CAO Jing, SHEN Zhiming, WANG Xiaoyu, et al. Research on carbon emission of concrete prefabricated and cast-in-place residential buildings [J]. Construction Science and Technology, 2020 (Z1):69-73. (in Chinese))
- [10] YEO D H, POTRA F A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO₂ emission optimization[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 43(3):2028-2033.
- [11] NADOUSHANI Z S M, AKBARNEZHAD A. Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings[J]. Energy and Buildings, 2015, 102: 337-346.
- [12] LOTTEAU M, LOUBET P, SONNEMANN G. An analysis to understand how the shape of a concrete residential building influences its embodied energy and embodied carbon[J]. Energy and Buildings, 2017, 154:1-11.
- [13] 李小冬, 王帅, 孔祥勤, 等. 预拌混凝土生命周期环境影响评价[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1):132-138. (LI Xiaodong, WANG Shuai, KONG Xiangqin, et al. Life cycle assessment of environmental impacts of

- ready-mixed concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1):132-138. (in Chinese))
- [14] 高宇, 李政道, 张慧, 等. 基于 LCA 的装配式建筑建造全过程的碳排放分析[J]. 工程管理学报, 2018, 32(2): 30-34. (GAO Yu, LI Zhengdao, ZHANG Hui, et al. A carbon emission analysis model for prefabricated construction based on LCA[J]. Journal of Engineering Management, 2018, 32(2): 30-34. (in Chinese))
- [15] NA S, PAIK I. Reducing greenhouse gas emissions and costs with the alternative structural system for slab; a comparative analysis of South Korea cases [J]. Sustainability, 2019, 11(19):5238.
- [16] YEO D, GABBAI R D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization[J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 2028-2033.
- [17] MERGOS P E. Contribution to sustainable seismic design of reinforced concrete members through embodied CO₂ emissions optimization[J]. International Federation for Structural Concrete, 2018, 19:454-462.
- [18] DIXIT M K, CULP C H, FERNÁNDEZ-SOLÍS J L. System boundary for embodied energy in buildings: a conceptual model for definition [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21:153-164.
- [19] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 2015 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. 2015 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [21] LEI X, ZHANG J, WANG H, et al. Deriving mixed reservoir operating rules for flood control based on weighted non-dominated sorting genetic algorithm II [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564:967-983.