

基于生命周期评估的高烈度区高层剪力墙隔震结构碳排放计算分析



白玉钢^{1,*}, 张延芹¹, 于文学¹, 左兴华¹, 刘国栋¹, 木其尔¹, 杨永强², 许德峰³

¹ 赤峰市防灾救灾中心, 内蒙古赤峰 024005

² 中国地震局工程力学研究所工程抗震研究中心, 黑龙江哈尔滨 150010

³ 同济大学土木工程学院, 上海 200092

摘要: 建筑业碳排放高, 为实现中国碳减排目标, 需加强碳减排措施。隔震技术是降低碳排放的利器, 在建筑设计中应加入碳排放分析。中国隔震建筑设计注重安全和经济因素, 然而, 隔震建筑往往忽略碳排放量计算。本文选择中国烈度区(9 度 0.4g)高层剪力墙结构作为研究对象并对其进行隔震设计。同时基于生命周期评估(LCA)理论计算了隔震结构和非隔震结构的碳排放量。结果表明: 采用隔震方案后结构的自振周期延长了 1.52 倍, 隔震结构的减震系数为 0.44, 在罕遇地震作用下隔震支座的位移、压应力和拉应力均满足《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016)要求。基于 LCA 理论, 采用隔震方案后中国 9 度区高层剪力墙结构在全生命周期阶段总碳排放量可减少约 2.8%; 建材生产及运输阶段碳排放量减少 10.19%; 施工建造和拆除处理碳排放量分别减少 51.76% 和 40.72%。该研究为中国隔震建筑设计的碳排放量计算提供了有价值的参考。

关键词: 高烈度区; 高层剪力墙结构; 隔震设计; 生命周期评估 (LCA); 碳排放量

DOI: [10.57237/j.cear.2024.02.003](https://doi.org/10.57237/j.cear.2024.02.003)

Carbon Emission Calculation and Analysis of High-Rise Shear Wall Isolation Structure in High Seismic Region Based on Life Cycle Assessment

Bai Yugang^{1,*}, Zhang Yanqin¹, Yu Wenxue¹, Zuo Xinghua¹, Liu Guodong¹, Muqier¹, Yang Yongqiang², Xu Defeng³

¹ Chifeng Disaster Prevention and Relief Center, Chifeng 024005, China

² Engineering Seismic Research Center, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150010, China

³ College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The carbon emissions of the construction industry are high. In order to achieve China's carbon emission reduction goals, it is necessary to strengthen carbon emission reduction measures. Seismic isolation technology is a powerful tool to reduce carbon emissions, and carbon emission analysis should be added to the architectural design.

基金项目: 内蒙古自治区地震局局长基金 (项目编号: 2023M S10).

*通信作者: 白玉钢, 307447924@qq.com

收稿日期: 2024-05-13; 接受日期: 2024-06-19; 在线出版日期: 2024-06-24

<http://www.cearesearch.org>

Chinese seismic isolation building designs focus on safety and economic factors; however, carbon emissions calculations are often overlooked in seismic isolation buildings. This article selects the high-rise shear wall structure in China's intensity zone (9 degrees 0.4g) as the research object and conducts seismic isolation design on it. At the same time, based on the Life Cycle Assessment (LCA) theory, the carbon emissions of seismic isolation structures and non-seismic isolation structures are calculated. The results show that after adopting the seismic isolation scheme, the natural vibration period of the structure is extended by 1.52 times, and the damping coefficient of the seismic isolation structure is 0.44. Under the rare earthquake action, the displacement, compressive stress and tensile stress of the seismic isolation bearing all meet the requirements of the "Code for Seismic Design of Buildings" (GB50011-2016). Based on the LCA theory, the total carbon emissions of the high-rise shear wall structure in the 9-degree area of China can be reduced by about 2.8% in the whole life cycle stage after adopting the seismic isolation scheme; the carbon emissions in the construction materials production and transportation stages are reduced by 10.19%; the carbon emissions of construction and demolition treatment are reduced by 51.76% and 40.72%, respectively. This study provides a valuable reference for calculating the carbon emissions of seismic isolation building designs in China.

Keywords: High Seismic Region; High-rise Shear Wall; Isolation Seismic Design; Life Cycle Assessment; Carbon Emissions

1 概述

2020年9月22日，中国在第75届联合国大会上向全球宣布了减排目标：“力争在2030年前达到碳排放峰值，并于2060年前实现碳中和”。作为全球最大的温室气体排放国家，中国加速推进碳减排目标势不可挡[1]。根据2020年中国建筑能耗研究报告，2018年中国建筑全过程碳排放总量达到49.3亿吨，占所有行业碳排放的比重为51.3%。这一数据表明建筑行业在中国温室气体排放中发挥着重要作用。建筑行业应该加强节能减排措施，推动绿色建筑和可持续发展[2]。目前，隔震建筑、建筑光伏一体化和新材料结构等已成为绿色建筑的重要选择。在这些选择中，隔震建筑不仅有助于实现中国防灾减灾和打造韧性城乡的目标，同时还可以发挥绿色降碳的作用[3, 4]。随着2021年《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408-2021)的颁布[5]，同时，研究表明隔震建筑相比非隔震建筑能够减少碳排放量，如若隔震建筑设计增加碳排量计算，预计隔震建筑将迎来新的增长趋势[6]。为了更准确、高效地计算隔震结构碳排放量，本文基于生命周期评估(LCA)原理框架，以中国9度设防区(0.4g)某高层剪力墙结构为研究对象。首先，按照《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408-2021)[5]和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016)[7]进行隔震设计。然后，对隔震结构方案和非隔震结构方案按照全周期碳排放进行研究，详细阐述从建材生产及运输阶段到拆除处理阶段碳排放量的计算与分析。

2 隔震结构设计

2.1 工程概况

本工程设计使用年限为50年，抗震设防烈度为9度(0.4g)，设计地震分组为第一组，特征周期为0.45s，场地类别为III类，基本风压为0.5kN/m²。根据《建筑工程抗震设防分类标准》(GB50233-2008)[8]要求，属于标准设防类。本工程上部为剪力墙结构体系。地上为19层，地下1层，建筑高度为55.1米，建筑平面宽度为15.8米，高宽比为3.49米。高层剪力墙PKPM三维结构模型如下图1所示。

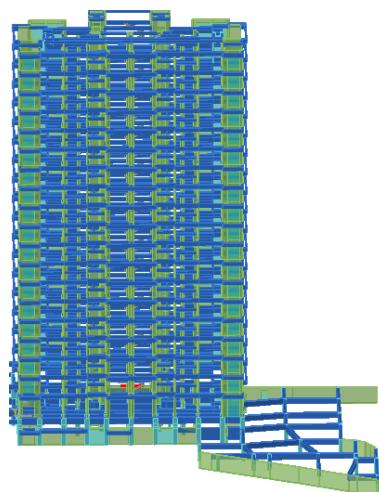


图1 PKPM 三维结构模型

2.2 隔震层布置

隔震层布置采用天然橡胶隔震支座（LRB）、铅锌橡胶隔震支座（LNR）以及滑板隔震支座（EBS）。使用 ETABS 有限元软件建立结构模型，其隔震支座立面布置图如图 2 所示。通过隔震设计与分析，整体结构共使用 81 个支座。其中天然橡胶隔震支座（LRB）为 42 个、铅锌橡胶隔震支座（LNR）为 35 个、滑板隔震支座（EBS）为 4 个，各隔震支座参数详见表 1~3 所示。

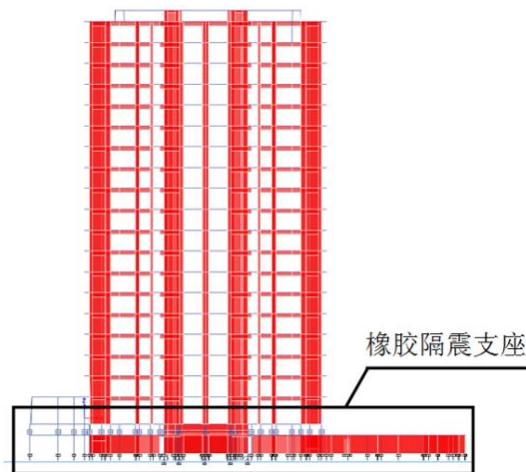


图 2 剪力墙结构隔震层立面布置图

表 1 铅芯橡胶隔震支座力学性能参数

类别		LRB900	LRB1000	LRB1100
使用数量	套	16	24	2
第一形状系数	S1	≥25	≥25	≥25
第二形状系数	S2	≥5	≥5	≥5
橡胶层总厚度	mm	≥175	≥188	≥212
竖向刚度	kN/mm	4050	4400	4800
设计压应力	N/mm ²	15	15	15
等效水平刚度 (100%)	kN/mm	2.7	2.87	3.08
等效水平阻尼比	%	26.7	22	21.4
屈服前刚度	kN/mm	25	26	28
屈服力	kN	133	163	196
支座总高度	mm	344	417	449

表 2 天然橡胶隔震支座力学性能参数

类别		LNR900	LNR1000
使用数量	套	15	20
第一形状系数	S1	≥25	≥25
第二形状系数	S2	≥5	≥5
橡胶层总厚度	mm	148	162
竖向刚度	kN/mm	4050	4400
等效水平刚度 (100%)	kN/mm	2.33	2.48
设计压应力	N/mm ²	15	15
支座总高度	mm	348	421

表 3 滑板隔震支座力学性能参数

EBS 参数	取值
竖向刚度 (kN/mm)	5600
一次刚度 (kN/mm)	8.8
静摩擦系数	0.055
动摩擦系数	0.04
位移量 (mm)	±350

2.3 隔震与非隔震结构自振周期对比

高层剪力墙结构隔震结构与非隔震结构的前三阶自振周期如表 4 所示。隔震结构自振周期根据隔震橡胶支座（100% 剪应变）对应的等效刚度计算得到。隔震结构最大周期延长至 3.506s，隔震与非隔震对应的主要周期比在 1.520~1.645 之间。采用该隔震方案大大延长了结构自振周期。

表 4 隔震与非隔震结构模型前三阶周期对比

振型	非隔震 (s)	隔震 (s)	隔震/非隔震
1	2.306	3.506	1.520
2	1.986	3.053	1.537
3	1.757	2.899	1.645

2.4 重力荷载下隔震支座应力验算

根据《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2016）[7] 要求标准设防类建筑隔震支座压应力≤15Mpa。在 1D+0.5L 组合作用下，高层剪力墙隔震结构支座压应力为 5.2Mpa~12.5Mpa，满足规范要求。

2.5 抗风验算

根据《抗规》12.1.3 条，采用隔震措施的结构风荷载产生的总水平力不宜超过结构总重力的 10%，本结构风荷载的产生的总水平力 X 方向为 1635.48kN，Y 向为 1991.54kN，总重力为 304206.4kN，取最不利风荷载产生的总水平力为 1991.54kN 进行抗风验算。隔震层总的屈服力为 4128kN>2788.156kN，满足规范抗风要求。

2.6 偏心率验算

表 5 整体隔震结构的偏心率

参数	X 向	Y 向
重心 (m)	46.16	10.64
刚心 (m)	45.74	12.25
偏心距 (m)	0.42	1.61
扭转刚度 (kN/m)	78088701	78088701
层刚度 (kN/m)	56899411	56899411
扭转半径 (m)	29.15	29.15

参数	X 向	Y 向
偏心率 (%)	0.45	0.45

隔震层偏心率是隔震结构计算的重要指标, 日本和台湾规范明确规定隔震层偏心率不应大于 3%。通过对高层剪力墙整体结构为研究对象, 计算了隔震层的偏心率如表 5 所示。计算结果 X 方向为 0.45%, Y 方向为 1.47%, 满足规范要求。

3 隔震分析

3.1 地震动选取

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016) 5.1.2 条, 采用时程分析法时, 应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程, 其中

实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3, 多组时程的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符。弹性时程分析时, 每条时程计算的结构底部剪力不应小于振型分解反应谱计算结果的 65%, 多条时程计算的结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%。

本文依据高层剪力墙结构的主要周期点, 共同选取了实际 5 条强震记录和 2 条人工模拟加速度时程如下图 3 所示。《抗规》规定: 输入的地震加速度时程曲线的有效持续时间, 一般从首次达到该时程曲线最大峰值的 10% 那一刻算起, 到最后一点达到最大峰值的 10% 为止; 无论是实际的强震记录还是人工模拟波形, 有效持续时间一般为结构基本周期的(5~10)倍, 详细情况如表 6 所示。

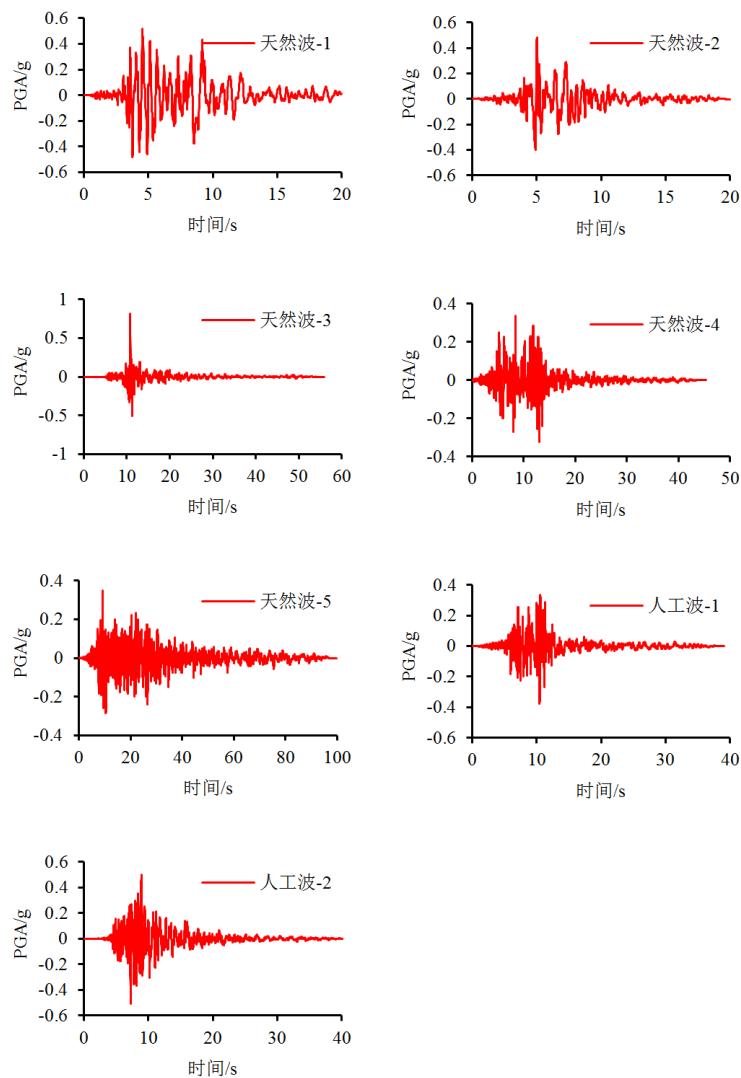


图 3 地震波加速度时程线

表 6 设防地震 7 条时程反应谱持续时间表

时程名称	方向	T1	T2	Ts=T1-T2	Tn	Ts/Tn
R-1	X	31.71	1.55	30.16	3.506	8.602
	Y	33.78	1.76	32.02	3.506	9.133
	Z	29.61	0.97	28.64	3.506	8.169
R-2	X	25.64	0.24	25.40	3.506	7.245
	Y	24.11	0.01	24.11	3.506	6.877
	Z	24.89	0.01	24.88	3.506	7.096
T-1	X	25.27	0.09	25.19	3.506	7.185
	Y	25.92	0.01	25.92	3.506	7.393
	Z	26.65	0.01	26.65	3.506	7.601
T-2	X	31.56	0.84	30.72	3.506	8.762
	Y	30.03	0.73	29.31	3.506	8.360
	Z	30.75	0.01	30.74	3.506	8.768
T-3	X	30.76	1.50	29.26	3.506	8.346
	Y	25.46	2.74	22.72	3.506	6.480
	Z	27.50	0.92	26.58	3.506	7.581
T-4	X	31.98	3.00	28.98	3.506	8.266
	Y	27.12	1.84	25.28	3.506	7.210
	Z	27.20	0.26	26.94	3.506	7.684
T-5	X	36.74	7.04	29.70	3.506	8.471
	Y	37.78	4.22	33.56	3.506	9.572
	Z	31.12	1.72	29.40	3.506	8.386

T1: 第一次达到该时程曲线最大峰值 10% 对应的时刻; T2: 最后一次达到该时程曲线最大峰值 10% 对应的时刻; Ts: 有效持续时间, $Ts=T1-T2$; Tn: 结构第一自振周期。由上表 6 可知, 有效持续时间满足要求。

3.2 层间剪力和倾覆力矩比计算

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016) 5.1.2 条, 在 7 条地震波作用下, 隔震结构和非隔震结构的剪力比和倾覆力矩比如下图 4~5 所示。得到隔震层上部剪力墙结构剪力比和倾覆力矩比对平均值的最大值为 0.44。

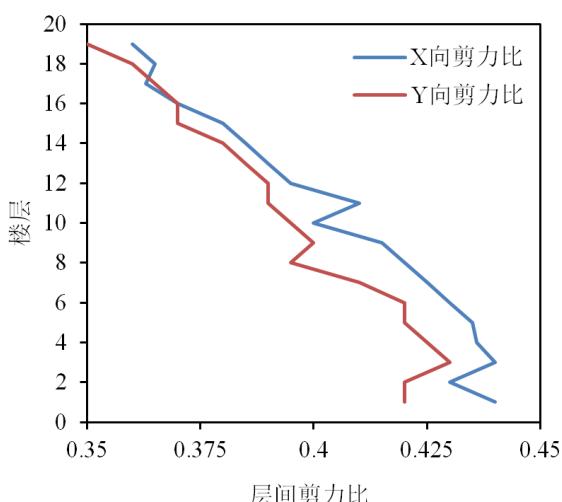


图 4 X 向和 Y 向层间剪力比

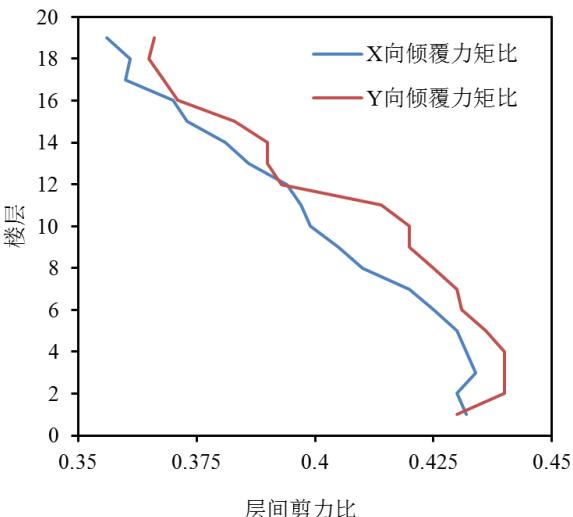


图 5 X 向和 Y 向层间倾覆力矩比

3.3 罕遇地震位移、压应力和拉应力验算

- (1) 罕遇地震作用下隔震层水平位移计算采用荷载组合为 $1.0D+0.5L+1.0E$, 得到罕遇地震下七条地震动下隔震支座最大平均水平位移为 458mm, 满足隔震支座的水平变位应小于其有效直径的 0.55 倍 ($0.55D=495\text{mm}$, 最小支座直径为 900mm), 同时小于橡胶层总厚度 3 倍 ($3Tr=525\text{mm}$, 最小隔震支座橡胶层厚度为 175mm), 满足规范要求。
- (2) 罕遇地震作用下隔震支座面压计算采用组合为 $1.0(1.0D+0.5L)+1.0E$, 得到隔震支座最大压应力 26.1MPa , 小于限值 30MPa , 满足规范要求。罕遇地震下支座面压验算采用组合为 $1.0(1.0D)+1.0E$, 计算隔震支座最大拉应力为 0.31MPa , 小于限值 1MPa , 满足规范要求。

4 建筑全生命周期碳排放量计算

4.1 建筑全生命周期碳排放来源分析

建筑物生命周期每个阶段的特定碳源分析包括建筑材料生产和运输, 建筑阶段, 建筑物运营阶段和拆除阶段的阶段[9]。

建筑材料生产和运输阶段: 在此阶段, 重要理论包括生命周期评估 (LCA) 方法, 该方法评估了建筑材料的整个生命周期, 包括原材料开发, 加工, 运输和其他链接, 以全面评估碳排放。此外, 可以引入碳

足迹的概念, 以测量建筑材料生产和运输过程中的温室气体排放, 以及碳排放交易等政策的影响。

施工阶段: 在施工阶段, 可以采用碳排放会计方法, 包括现场排放会计, 能源消耗会计等, 以评估建筑活动对碳排放的贡献。此外, 与碳中立性理论相结合, 可以提出减少建筑活动中碳排放的措施, 例如使用低碳建设技术, 优化建筑过程等。

建筑物运营阶段: 在运营阶段, 可以利用建筑能源管理理论来减少通过诸如能源消耗监控, 节能技术的应用等方法通过构建设备操作产生的碳排放。可以考虑, 包括使用可再生能源, 实施碳捕获和存储技术等, 以在建筑物运营阶段实现碳中立目标。

拆除阶段: 在拆除阶段, 可以应用循环经济原则来促进废物资源的利用, 减少废物对环境的影响。同时, 可以鼓励低碳拆除技术与碳排放交易机制相结合, 以减少拆除活动对碳排放的影响。

本文根据计算建筑碳排放量计算软件的特点[10], 选取 PKPM-CES 建筑碳排放软件 (V3 版本) 计算隔震建筑全生命周期的碳排放量。为节省篇幅, 在 4.2 和 4.3 节中仅给出建筑结构全生命周期 4 个阶段的碳排放量汇总。

4.2 非隔震结构全生命周期碳排放量计算

根据全生命周期 4 个阶段计算非隔震结构碳排放量及各阶段占比, 如下表 7 所示。碳排放总量为 3273.75tCO₂e。其中建筑运行阶段的碳排量最高为 2381.75tCO₂e; 其次是建材生产及运输阶段为 847.3tCO₂e; 施工建造与拆除处理分别为 28.4 和 44.7tCO₂e。

表 7 非隔震结构全生命周期碳排放量汇总表

活动阶段	碳排放阶段来源	总碳排放量/tCO ₂ e	碳排量占比/%
建材生产及运输	阶段合计	847.3	25.88
	建材生产	743.5	22.71
	建材运输	103.8	3.17
施工建造	建造	28.4	0.87
建筑运行	阶段合计	2381.75	72.75
	照明	1.1	0.03
	热水	-453.4	-13.85
	电梯	98.8	3.02
	采暖空调	2130.3	65.07
	通风	4.45	0.14
	碳汇	-199.5	-6.09
拆除处理	拆除	44.7	1.37

活动阶段	碳排放阶段来源	总碳排放量/tCO ₂ e	碳排量占比/%
合计		3273.75	100

4.3 隔震结构全生命周期碳排放量计算

根据生命周期 4 个阶段计算隔震结构碳排放量及各阶段占比, 如下表 8 所示。碳排放总量为 3182.05tCO₂e。其中建筑运行阶段的碳排量最高为 2381.75tCO₂e; 其次是建材生产及运输阶段为 760.1tCO₂e; 施工建造与拆除处理分别为 13.7tCO₂e 和 26.5tCO₂e。

表 8 隔震结构全生命周期碳排放量汇总表

活动阶段	碳排放阶段来源	总碳排放量/tCO ₂ e	碳排量占比/%
建材生产及运输	阶段合计	760.1	23.89
	建材生产	603.2	18.96
	建材运输	156.9	4.93
施工建造	建造	13.7	0.43
建筑运行	阶段合计	2381.75	74.85
	照明	1.1	0.03
	热水	-453.4	-14.25
	电梯	98.8	3.10
	采暖空调	2130.3	66.95
	通风	4.45	0.14
	碳汇	-199.5	-6.27
拆除处理	拆除	26.5	0.83
合计		3182.05	100

4.4 非隔震与隔震结构全生命周期碳排放量对比分析

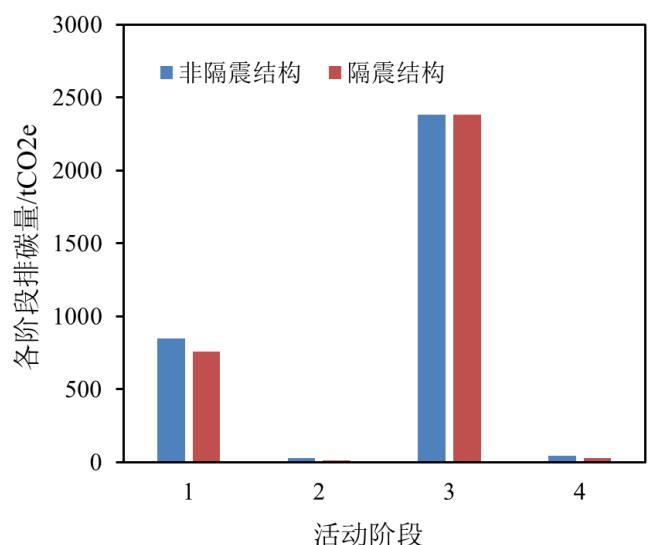


图 6 高层剪力墙结构非震和隔震方案全生命周期碳排放量对比

根据高层剪力墙结构非震和隔震方案全生命周期碳排放量，分别得到隔震结构和非隔震结构各活动阶段与单位面积碳排放强度关系柱状图，如图 6 所示。在全生命周期碳排放量高层剪力墙结构采用隔震方案相对于非隔震方案碳排放量减少 2.8%；在建材生产及运输阶段采用隔震方案碳排放量减少 10.19%；在施工建造和拆除处理阶段采用隔震方案碳排放量分别减少 51.76% 和 40.72%。

5 结论

通过对某高烈度区高层剪力墙结构进行隔震设计以及基于全生命周期评估（LCA）计算隔震结构和非隔震结构的碳排放量对比分析，得到如下结论：

- (1) 采用隔震方案后结构的自振周期延长了 1.52 倍，隔震结构减震系数为 0.44，隔震层上部结构抗震设防按照降 1 度设计。在罕遇地震作用下隔震支座的位移、压应力和拉应力均满足《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016)要求。
- (2) 隔震结构碳排放总量为 3182.05tCO₂e。其中建筑运行阶段的碳排量最高为 2381.75tCO₂e；其次是建材生产及运输阶段为 760.1tCO₂e；施工建造与拆除处理分别为 13.726.5tCO₂e 和 26.5tCO₂e。
- (3) 在全生命周期碳排放量高层剪力墙结构采用隔震方案相对于非隔震方案碳排放量减少 2.8%；在建材生产及运输阶段采用隔震方案碳排放量减少 10.19%；在施工建造和拆除处理阶段采用隔震方案碳排放量分别减少 51.76% 和 40.72%。可见，高烈区高层剪力墙结构采用隔震结构设计能够有效降低碳排放量。该研究能为中国隔震建筑设计的碳排放量计算提供了有价值的参考。

参考文献

- [1] 周天军, 陈晓龙, 张文霞等. 气候变化与碳中和 [J]. 自然杂志, 2024, 46(01): 1-11.
- [2] 程凯. 装配率对建筑碳排放的影响分析研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [3] 梁嘉琳. 基于“双碳”目标的城市滨河景观优化设计研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [4] 许德峰, 孙飞飞, 戴君武等. 高层剪力墙隔震结构设计与分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 947-953.
- [5] 建筑隔震设计标准: GB/T 51408-2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [6] 许德峰, 孙飞飞, 姚秋雨等. 高烈度区高层剪力墙结构隔震设计及碳排放分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 936-940.
- [7] 建筑抗震设计规范: GB50011-2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [8] 建筑工程抗震设防分类标准: GB50233-2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [9] 孙杰威, 严晓东. 热冬冷地区绿色建筑碳排放计算及碳减排潜力研究——以宁波大学科技服务大楼为例 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2024, 37(02): 57-64.
- [10] 孙建伟, 蒋世龙, 马义奎等. 建筑碳排放软件对比分析及计算研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(01): 48-51.

作者简介

白玉钢

1972 年生, 男, 高级工程师, 主要从事建筑材料安全性工作.

E-mail: 307447924@qq.com