

不同连接装配式剪力墙抗震性能及碳排放 综合效益分析

张博华

(中铁四局设计研究院, 合肥 230023)

摘要:在我国加快建筑产业转型和“碳中和”的背景下,面对我国多高层装配建筑产业现代化发展的需求,量化研究不同形式装配式剪力墙之间碳排放量及性能的关系规律,建立物化阶段构件的碳排放计算模型,比较不同连接形式装配式剪力墙的碳排放计算差异。结果表明:碳排放计算差异主要体现在不同形式装配式剪力墙的工艺流程方面,单位体积不同连接方式装配剪力墙的碳排放量差距较小;装配式剪力墙连接方式较大程度影响其碳排放量和性能提升。

关键词:装配式建筑;装配式剪力墙;物化阶段;碳排放量;抗震性能

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)17-0212-09

受到我国人口和环境问题影响,建筑行业人力成本快速上升、现浇施工污染浪费严重、现浇质量通病较多等问题制约了建筑业的可持续发展。国家相继出台了《建筑业发展“十三五”规划》和《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》,推动建筑产业结构调整升级。装配式建筑利用构件工厂生产、现场装配的特点,不仅减少建筑材料浪费、降低劳动强度、削减能耗,还可以提高构件尺寸精度及工程质量,满足建筑工业化需求^[1]。

2020 年 9 月我国提出“碳达峰、碳中和”战略,在此大背景下,推动建筑行业的技术创新与行业变革,也不能只依据传统的性能和经济指标,还应包含人力、材料、机械的碳排放量。《中国建筑能耗研究报告 2020》^[2]中的数据显示,全国建筑过程碳排放总量为 49.3 亿 t CO₂,占全国碳排放比重的 51.3%,建筑业碳排放量巨大,计算评估并降低建筑行业的碳排放已经刻不容缓。但目前对于装配式结构碳排放的研究还不够充分,多数研究仅从全局化、整体化角度出发进行计算^[3-4],未能精细化、量化到连接方式的层次评估碳排放量。

装配式混凝土剪力墙结构具有良好的抗侧能力和室内空间的规整性,是目前中高层装配式建筑中最普遍的结构形式^[5-7]。现阶段装配式混凝土剪力墙结构体系繁多,较为普遍的有灌浆套筒

连接剪力墙^[8]、浆锚装配式剪力墙结构^[9-10]、竖向分布筋不连续剪力墙结构^[11-13]、叠合剪力墙结构^[14,15]、螺栓连接剪力墙结构^[16-17],无黏结后张拉装配式预应力混凝土剪力墙^[18-20]等不同连接方法的预制剪力墙。但众多研究仅从性能角度验证不同连接下装配式剪力墙的适用性^[21-38],未深入分析不同形式装配式剪力墙结构之间的碳排放量与性能,不利于装配式剪力墙结构设计时的方案比选及推广应用。

基于此,创新性地从装配式剪力墙性能与碳排放两个方面探究装配式剪力墙构件的综合效益评价,收集整理了竖向分布筋不连续、灌浆套筒连接、干法螺栓连接、约束浆锚连接、双面叠合、后张预应力预制共 6 种形式的装配式剪力墙相关研究数据,以剪力墙构件物化阶段碳排放计算模型为基础,计算对比了不同装配式剪力墙之间的碳排放与性能,对装配式剪力墙的应用推广提供了理论支持和工程价值。

1 研究边界与量化方法

1.1 界定研究范围

界定研究范围是装配式结构碳排放计算的首要问题。目前较为统一的观点^[3]是从建筑生命周期的角度将建筑物生产分为建筑物化阶段、建筑运行维护阶段和建筑拆除处置阶段,如图 1 所示。装配

收稿日期:2023-04-25

作者简介:张博华(1993—),男,江西于都人,中铁四局设计研究院,工程师,研究方向为装配式结构。

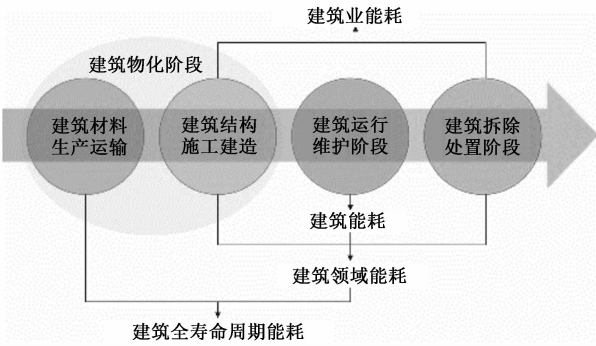


图1 建筑全寿命周期能耗相关概念范围界定

与现浇结构建造方式具有较大差异,其碳排放量区别主要存在于物化阶段,该阶段占据了建筑全寿命周期内 50% 以上碳排放量^[2]。为研究不同连接形式对剪力墙碳排放量与性能的关系规律,重点计算了剪力墙构件物化阶段碳排放。

1.2 碳排放量计算方法

目前建筑碳排放的测算方法有 3 种:实测法、质量平衡法和排放因子法。其中排放因子法以物化阶段的活动数据和不同能源的排放因子为基础,计算时主要考虑活动数据的搜集和排放因子的使用,通过现场调查监测人、材、机的使用情况,获得排放源所消耗的能源和资源数据,查阅相关资料和文献以及地方各级单位的统计报告来获取材料和能源的排放因子。排放因子法相较于其他两种方法适用性更强,因此采用该方法进行碳排放测算。在已有研究的基础上,运用碳排放系数法计算不同连接式的预制剪力墙构件生产阶段碳排放量,依据调查结果估算预制剪力墙运输过程的碳排放量,针对不同形式剪力墙的施工难易程度,实地考察施工消耗的材料、人工工时和机械台班数,计算出不同形式剪力墙施工阶段碳排放量。相关碳排放因子通过国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)、《建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究》《建材产品碳足迹-产品种类规则》以及其他国内成熟的数据库或文献中的相关研究获取,具体见表 1。

表 1 常用建筑材料及能源碳排放因子

类别	材料及能源	单位	碳排放因子
材料碳排放因子	混凝土 C20~C50	kgCO ₂ /m ³	264.7~464.3
	钢筋		2 340
	钢模板		2 400
	木模板		146.3
能源碳排放因子	电力	kgCO ₂ /(kW·h)	0.792
	柴油	kgCO ₂ /kg	2.730
	汽油		2.260

2 装配式剪力墙物化阶段碳排放模型

2.1 生产阶段的碳排放计算

装配式建筑在生产阶段需要消耗原材料,加工时需要耗费能源,将生产阶段碳排放分为两部分:材料消耗所产生的碳排放和制造过程的碳排放。计算公式为

$$C_{m1} = \sum_{i=1}^n M_i F_i \tag{1}$$

$$C_{m2} = \sum_{i=1}^n W_i E_d \tag{2}$$

式中: C_{m1} 为原材料消耗的碳排放总量; $i=1,2,\cdots,n$ 分别代表不同种类的原材料; M_i 为第 i 种原材料的使用量; F_i 为第 i 种原材料的碳排放因子; C_{m2} 为预制构件生产过程中的碳排放总量; W_i 为生产第 i 种预制构件所消耗的用电量; E_d 为电力碳排放因子。

2.2 运输阶段的碳排放计算

装配式建筑运输阶段的碳排放是指使用运输工具将预制构件从预制工厂运输到建筑场地过程中,车辆所产生的碳排放。在计算运输阶段的碳排放时,需要统计预制工厂到建筑现场的距离。由于运输工具返程阶段会造成空载现象,考虑其返程空载系数,具体的碳排放计算公式为

$$C_t = \sum_{i=1}^n E_{ti} W_{ti} D_{ti} K_y \tag{3}$$

式中: C_t 为运输过程中总的碳排放; E_{ti} 为运输车辆运输构件 i 的碳排放因子; W_{ti} 为构件 i 的运输质量; D_{ti} 为构件 i 的运输距离; K_y 为空载系数,假定运输车辆满载运输,空载返回,根据文献[4],空载返回时的环境负荷是满载时的 0.67 倍,空车返回系数 K_y 取 1.67。为统一计算,参考相关研究,采用 30 t 重型牵引柴油车,并考虑施工场地和预制厂房的推荐距离 30 km 作为运输距离,取单位体积单位运距碳排放因子为 0.098 1 kg/(m³·km)。

2.3 施工阶段的碳排放计算

装配式建筑施工阶段的碳排放主要是指预制构件现场安装时施工机械耗能所排放的碳排放,计算公式为

$$C_c = T_i R E_d \tag{4}$$

式中: C_c 为施工阶段的单位体积预制构件碳排放量; T_i 为施工阶段吊装单位体积第 i 种预制构件所耗费的机械台班数; R 为单位机械台班能源消耗量; E_d 为电力碳排放因子。通过相关调研,常用吊装机械为塔式起重机,单位台班能源消耗量为 266.04 kW/h。经过实际考察,不同剪力墙节点连接

形式的不同会导致施工工艺的差异,在一定程度上影响了安装操作难度和现场施工时间。通过考察不同形式装配式剪力墙的安装施工流程,得到不同形式装配式剪力墙的人工和机械工程量,从而计算施工阶段的碳排放。

3 装配式剪力墙连接形式分类

在目前的研究中,装配式剪力墙存在许多不同的连接方式,连接形式的差异在一定程度上影响其物化阶段的碳排放,同时不同的连接形式会影响装配式剪力墙的抗震性能。考虑不同连接形式的构造差异,对装配式剪力墙进行划分,并且考虑在不同连接形式下,材料消耗和施工过程差异对装配式剪力墙物化阶段的碳排放影响。

3.1 连接方式差异性

装配式剪力墙结构是我国高层住宅常用的结构形式之一,其可靠的竖向连接是保证结构安全的关键,按照竖向分布钢筋在楼层处连接数量(连接程度)不同,装配式剪力墙竖向连接可分为不连接、部分连接和全部连接 3 类。基于大量的研究成果,系统总结了 6 种装配式剪力墙的竖向分布钢筋连接形式、构造特点与受力性能,将装配式剪力墙结构分为图 2 所示的几种类型。竖向分布筋不连续装配式剪力墙的水平接缝不设置竖向灌浆

套筒、浆锚措施,采用水平缝坐浆连接,结构投入成本降低,施工效率提升,综合经济效应更优,连接形式如图 2(a)所示;灌浆套筒连接是通过套筒连接竖向分布筋,套筒内灌注有高强度、微膨胀的灌浆材料,利用硬化后灌浆料的黏结力和约束效应使竖向分布钢筋紧密连接,连接形式如图 2(b)所示;干法螺栓连接是采用高强度螺栓与预埋钢板焊接相结合,形成栓焊混合连接作为剪力墙竖向应力传递部件,该种连接方式完全摆脱湿作业,连接部位受力机理明确,充分发挥装配式的优势,连接形式如图 2(c)所示;约束浆锚连接是在预制混凝土构件预埋钢筋底端预留竖向孔,吊装安装时将被连接钢筋插入预留的孔洞内并留有一定的搭接长度,再将灌浆料灌入预留孔洞内,凝结硬化后预埋钢筋与被连接钢筋形成稳固连接^[8],连接形式如图 2(d)所示;预制双面叠合剪力墙的 2 片预制墙板在工厂预制,在现场施工过程中充当现场现浇混凝土的模板,可以减少支设模板、拆除模板等工序。该类剪力墙体^[14-15,31]是通过钢筋桁架将两侧钢筋混凝土板联系在一起,水平连接处设置搭接钢筋,最后在板件空腔内浇筑混凝土形成组合剪力墙,连接形式如图 2(e)所示;后张预应力预制墙板在墙体内使用连续的混凝土无黏结的后

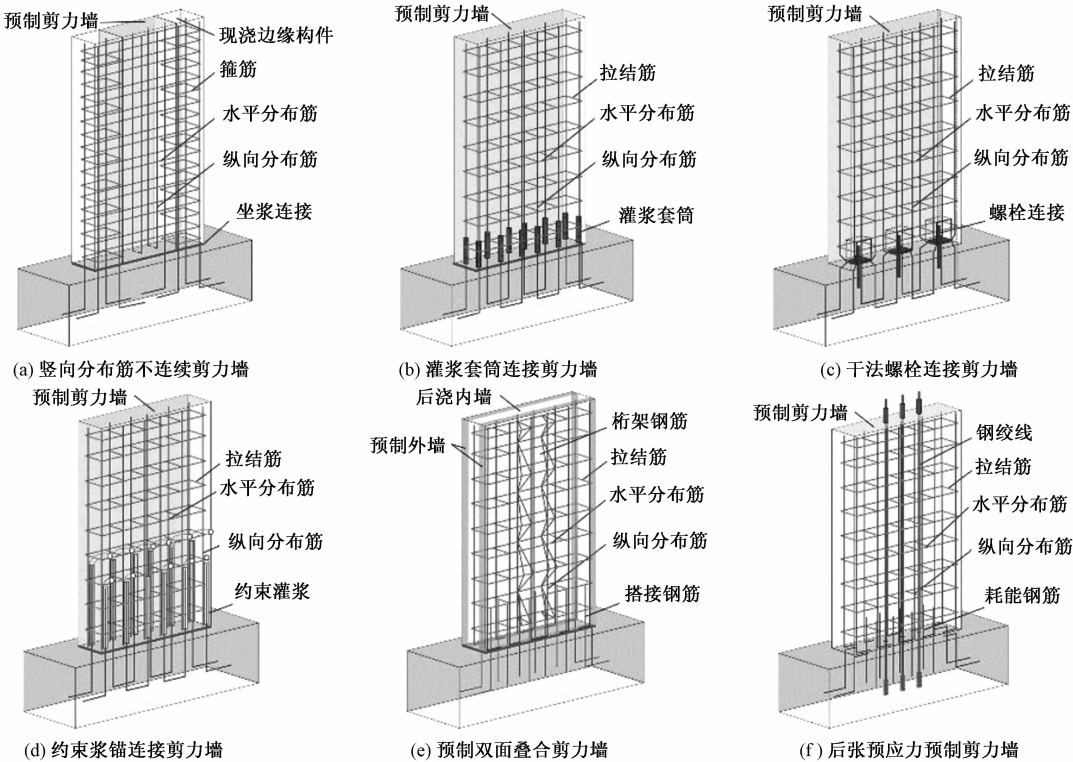


图 2 装配式剪力墙连接方式分类

张拉钢绞线、不连续的耗能钢筋完成竖向荷载的传递以及地震能量的消耗,其连接形式如图 2(f) 所示。

3.2 连接方式对碳排放计算的影响

在计算装配式剪力墙物化阶段碳排放时,需要对装配式剪力墙的生产阶段、运输阶段和安装阶段进行划分,不同的连接形式在一定程度上影响材料的使用,并且考虑施工工艺的差异会影响安装阶段碳排放量。因此对不同连接形式的施工工艺进行讨论如下:

竖向分布筋不连续剪力墙混凝土与钢筋用量将包含预制剪力墙体的边缘构件,并且按照施工流程的要求,其边缘构件是现场支模后浇筑。对国内装配式混凝土剪力墙灌浆套筒连接现场施工的调查发现,该类套筒造价较高,施工连接对孔慢,灌浆质量难以保障,从而使得加工的材料损耗和施工的工程量增大。因此,在计算此类装配式剪力墙的物化阶段碳排放量时,相比较其他形式装配式剪力墙,需要考虑生产套筒和灌浆材料的碳排放。螺栓连接对构件的精度要求更高,空洞位置的微小误差累积,可能导致整个剪力墙安装初始就处于不利应力状态,误差更大时将无法完成安装。因此,在螺栓连接预制剪力墙成型阶段需要投入更多的物力和人力保障其精度。约束浆锚连接剪力墙多筋多孔的特点,导致其预制精度要求较高,施工吊装难度也较大,因此在计算此类装配式剪力墙的物化阶段碳排放量时,需要额外考虑约束灌浆内使用的搭接钢筋长度,同时由于较大的施工难度,在实际工程中会导致人员的工时和机械使用时间增大,需要考虑约束浆锚在施工过程中增加的工程量。双面叠合剪力墙可缩短安装时间,减轻预制墙体体积和运输质量,但实际应用中暴露出一些缺点,预制墙板间需布设桁架筋,这不仅导致该墙体用钢量增大,还影响混凝土的浇筑振捣,需要额外考虑运输过程和现场施工在其预制和后浇部分中的权重影响,对预制部分和后浇部分分开计算。无黏结后张预应力剪力墙相比较其他形式装配式剪力墙,由于使用预应力技术需要额外采用张拉设备,需要对实际工程中的预张拉设备进行考察,在计算中增大机械使用的耗能量和人工量。此外,耗能钢筋也要计算在剪力墙施工安装阶段的材料用量中。

因此在进行不同连接形式剪力墙的碳排放计

算时,主要考虑不同形式剪力墙使用的材料差异,如附加套筒、螺栓、灌浆料、后浇段浆料等材料。其次考虑实际工程中不同连接形式对工程量的影响,考虑施工阶段人、材、机用量的增加。

4 不同装配式剪力墙的碳排放与性能

4.1 建立数据库

已有研究中装配式剪力墙的试验设计参数及低周反复试验下剪力墙的破坏荷载、破坏位移,每篇文献选取的试验组为轴压比相同、高宽比相同的单层单片装配式剪力墙,且必须具有现浇对照组。

采用排放因子法计算装配式剪力墙物化阶段的碳排放量。由于在物化阶段涉及多种建材,一些重量和成本较低的材料,碳排放因子较难获得,对整体碳排放影响不大,因此本研究仅将累计重量、成本和能源消耗占总量 80% 以上的材料和机器设备纳入碳排放计算。其次,对于单独构件的运输阶段和装配阶段,没有详细的运输距离和装配消耗能源量,因此,对运输和施工过程的碳排放进行相关调查,搜集相关工程项目,假定运输距离为 30 km,利用调研区分 6 种形式的装配式剪力墙的施工难度和机械使用情况。

4.2 碳排放及性能归一化系数

由于收集的相关数据剪力墙的设计参数差异较大,不同文献数据难以比较,因此,以现浇式剪力墙的碳排放量为基准,将不同形式装配式剪力墙和其对照组现浇式剪力墙进行归一化处理,提出单位体积装配式剪力墙碳排放系数 NC_i 、破坏承载力提升系数 NF_i 以及破坏位移提升系数 ND_i ,各系数定义如式(5)~式(7)所示。基于此对比分析不同连接方式装配式剪力墙的碳排放量和性能提升量。

$$NC_i = \frac{C_{\text{预制剪力墙}i}}{C_{\text{现浇剪力墙}i}} \tag{5}$$

$$NF_i = \frac{F_{\text{预制剪力墙}i}}{F_{\text{现浇剪力墙}i}} \tag{6}$$

$$ND_i = \frac{D_{\text{预制剪力墙}i}}{D_{\text{现浇剪力墙}i}} \tag{7}$$

式中: $C_{\text{预制剪力墙}i}$ 为单位体积预制剪力墙 i 的碳排放量; $C_{\text{现浇剪力墙}i}$ 为单位体积现浇剪力墙 i 的碳排放量; $F_{\text{预制剪力墙}i}$ 为预制剪力墙 i 的破坏荷载; $F_{\text{现浇剪力墙}i}$ 为现浇剪力墙 i 的破坏荷载; $D_{\text{预制剪力墙}i}$ 为预制剪力墙 i 的破坏位移; $D_{\text{现浇剪力墙}i}$ 为现浇剪力墙 i 的破坏位移。计算结果如表 2^[12,14,39-60] 和图 3 所示。

表 2 剪力墙收集数据及计算结果										
文献	试件类型	试件编号	钢筋用量/t	混凝土用量 (型号)/m³	C/(kg·m ⁻³)	F/kN	D/mm	NC	NF	ND
[12]	0	SW1	0.125 80	0.647 62(C40)	915.5	319.1	81.0			
	1	SW2	0.125 80	0.647 62(C40)	891.3	300.1	50.7	0.961	0.940	0.626
[39]	0	SW1	0.061 00	0.519 87(C35)	675.4	389.2	28.0			
	1	SW-2	0.061 00	0.519 87(C35)	675.0	290.7	31.8	0.982	0.747	1.138
	1	SW-3	0.063 86	0.539 71(C35)	677.2	330.0	31.5	0.986	0.848	1.127
	1	SW-4	0.063 51	0.519 55(C35)	686.0	307.5	31.4	0.999	0.79	1.123
[40]	0	RC1	0.080 07	0.653 45(C35)	721.9	329.8	35.9			
	1	PC1	0.080 07	0.653 45(C35)	686.6	246.8	63.0	0.935	0.748	1.755
	1	PC3	0.089 49	0.652 25(C35)	719.1	287.2	47.2	0.980	0.871	1.319
	1	PC6	0.097 34	0.663 75(C35)	740.1	338.4	50.3	1.009	1.026	1.401
[41]	0	XD-1	0.167 32	2.804 69(C40)	606.9	903.0	51.6			
	1	PD-1	0.167 32	2.804 69(C40)	593.1	938.5	53.5	0.958	1.039	1.034
	0	XF-1	0.143 42	2.435 73(C40)	619.1	2 846.5	27.9			
	1	PF-1	0.143 42	2.435 73(C40)	591.1	2 938.5	36.5	0.937	1.032	1.308
[42]	0	OSW	0.059 66	0.686 95(C30)	603.9	300.6	59.2			
	2	PW1	0.057 31	0.687 05(C30)	588.5	288.9	49.7	0.955	0.961	0.839
	2	PW2	0.057 31	0.687 05(C30)	588.5	299.2	68.0	0.955	0.995	1.148
[43]	0	SJ-1	0.029 35	0.544 01(C30)	522.8	312.2	27.6			
	2	SJ-2	0.029 35	0.543 51(C30)	521.9	276.1	19.7	0.976	0.884	0.714
[44]	0	RCW2	0.016 35	1.579 05(C40)	677.2	1 233.4	32.0			
	2	PCW1-2	0.018 35	1.577 05(C40)	690.2	982.0	33.0	1.002	0.796	1.031
	2	PCW2-2	0.018 35	1.577 05(C40)	692.7	1 185.0	32.0	1.006	0.961	1.001
	2	PCW3-2	0.018 35	1.577 05(C40)	695.0	1 091.0	27.0	1.009	0.885	0.844
[45]	0	XW1	0.056 97	0.961 08(C30)	532.2	382.4	59.0			
	2	YW1	0.056 97	0.961 08(C30)	529.3	376.1	70.4	0.973	0.984	1.193
	2	YW2	0.056 97	0.961 08(C30)	522.3	378.9	70.2	0.960	0.991	1.190
[12]	0	SW1	0.003 78	0.655 11(C40)	601.8	319.1	81.0			
	2	SW4	0.003 78	0.655 11(C40)	572.1	330.5	55.5	0.932	1.036	0.685
[46]	0	SW0-1.4-0.26	0.005 13	0.233 12(C45)	940.8	435.0	17.1			
	2	SW2-1.4-0.26	0.005 89	0.289 72(C45)	919.9	411.0	43.0	0.966	0.945	2.524
[47]	0	RCW-0	0.009 28	1.987 70(C35)	524.9	1 634.0	40.0			
	2	PCW-1	0.011 28	1.985 70(C35)	527.2	1 104.0	49.6	0.983	0.676	1.24
	2	PCW-2	0.011 37	1.985 61(C35)	527.1	1 352.0	38.6	0.982	0.827	0.965
	2	PCW-3	0.011 81	1.983 48(C35)	530.4	1 693.0	40.1	0.989	1.036	1.003
[48]	0	XJQ	0.018 35	1.078 67(C30)	667.8	321.6	50.5			
	2	PZQ-TT	0.018 35	1.077 75(C30)	703.8	229.4	14.5	1.037	0.713	0.287
[49]	0	W1	0.075 36	0.930 00(C30)	680.5	342.0	23.2			
	3	W2	0.075 36	0.930 00(C30)	709.6	323.9	27.8	1.026	0.947	1.198
[50]	0	SCW	0.084 78	0.900 00(C30)	617.3		19.2			
	3	PCW-1	0.084 78	0.900 00(C30)	627.6		28.8	0.998	—	1.502
	3	PCW-2	0.084 78	0.900 00(C30)	627.6		21.5	0.998	—	1.122
[51]	0	SW1	0.117 20	0.784 00(C30)	749.2	330.4	69.8			
	4	PW1	0.120 42	0.784 00(C30)	740.0	260.0	63.5	0.972	0.787	0.91
	4	PW2	0.120 42	0.784 00(C30)	740.0	396.4	77.3	0.972	1.12	1.217
	4	PW3	0.120 42	0.784 00(C30)	740.0	313.1	55.8	0.972	0.948	0.799
[52]	0	XJ	0.132 74	1.008 00(C30)	703.8	601.0	60.0			
	4	JW	0.152 29	1.008 00(C30)	734.1	613.0	52.0	1.027	1.02	0.867
	4	JN	0.152 29	1.008 00(C30)	734.1	581.0	56.0	1.027	0.967	0.933
[53]	0	SW1	0.135 81	1.024 00(C35)	753.4	481.0	74.0			
	4	SW2	0.153 08	1.024 00(C35)	776.6	448.0	68.0	1.016	0.931	0.919
	4	SW3	0.153 08	1.024 00(C35)	776.6	462.0	68.0	1.016	0.96	0.919
[54]	0	SW1	0.079 29	0.896 00(C30)	599.8	350.9	70.4			
	4	DW1	0.079 29	0.896 00(C30)	587.7	308.0	70.0	0.961	0.878	0.994
[55]	0	RCW	0.094 75	0.972 00(C50)	772.9	25.7	52.5			
	5	DPCW	0.102 60	0.972 00(C50)	741.7	26.0	21.8	0.952	1.012	0.415

续表

文献	试件类型	试件编号	钢筋用量/t	混凝土用量 (型号)/m³	C/(kg·m ⁻³)	F/kN	D/mm	NC	NF	ND
[56]	0	XQB-1	0.094 75	0.972 00(C50)	772.9	624.0	12.3			
	5	YQB-1	0.102 60	0.972 00(C50)	741.7	476.9	5.7	0.952	0.764	0.466
[14]	0	RCW1	0.127 09	1.080 00(C30)	672.2	1 156.9	10.9			
	5	PCW1	0.127 09	1.080 00(C30)	622.2	1 219.8	16.2	0.917	1.054	1.492
[57]	0	TRC-0.2	0.103 54	1.755 00(C35)	579.8	917.4	11.8			
	5	TPC-0.2	0.116 89	1.755 00(C35)	552.3	821.5	10.6	0.943	0.896	0.905
[58]	0	SW1	0.070 82	1.024 00(C50)	683.5	919.0	21.0			
	5	SW2	0.078 67	1.024 00(C50)	685.5	608.0	22.0	0.995	0.662	1.048
	5	SW3	0.078 67	1.024 00(C50)	685.5	915.0	20.5	0.995	0.996	0.976
	5	SW4	0.078 67	1.024 00(C50)	685.5	1 035.0	19.5	0.995	1.126	0.929
	5	SW5	0.098 30	1.024 00(C50)	713.6	976.5	19.5	1.044	1.063	0.929
[59]	0	SW1	0.073 40	1.024 00(C35)	610.8	369.7	105.0			
	5	SW2	0.097 42	1.024 00(C35)	615.6	451.4	75.0	0.999	1.221	0.714
	5	SW3	0.097 42	1.024 00(C35)	615.6	456.0	75.0	0.999	1.233	0.714
[60]	0	XJ1	0.162 50	1.122 00(C35)	768.7	582.3	80.0			
	6	NHPW1	0.171 92	1.122 00(C35)	797.3	673.2	86.0	1.016	1.156	1.075
	6	NHPW2	0.176 63	1.122 00(C35)	807.1	693.6	90.0	1.029	1.191	1.125
	6	NHPW3	0.181 34	1.122 00(C35)	816.9	723.4	94.0	1.041	1.242	1.175
[55]	0	CW0	0.094 99	1.024 00(C40)	696.7	452.5	96.0			
	6	HW1	0.124 03	1.024 00(C40)	770.0	466.6	120.0	1.082	1.155	1.250
	6	HW2	0.123 25	1.024 00(C40)	768.2	425.4	108.0	1.079	1.111	1.125
	6	HW2	0.124 03	1.024 00(C40)	770.0	360.9	120.0	1.082	1.201	1.250

注:试件类型 0、1、2、3、4、5、6 分别为现浇式剪力墙、竖向分布筋不连续剪力墙、灌浆套筒连接剪力墙、干法螺栓连接剪力墙、约束浆锚连接剪力墙、双面叠合剪力墙、无黏结后张预应力剪力墙;NC、NF、ND 为空白的是由于那一行为现浇构件,用来作为计算的基数,因此 NC、NF、ND 无分析与计算意义,后续分析和计算中并不需要考虑;标注一字线的是由于引用的该篇论文中无相关数据,导致无法计算该项,对后续分析和结果无影响。

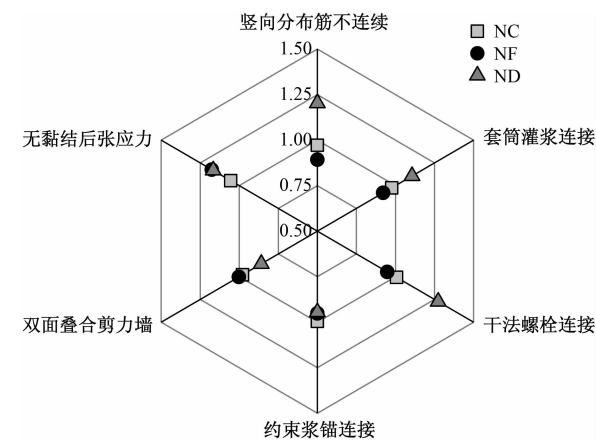


图3 碳排放及性能归一化系数

4.3 不同连接方式间的对比分析

4.3.1 单位体积装配式剪力墙碳排放

在本文调研的运输、安装条件下,通过计算得到的物化阶段下建造单位体积预制剪力墙碳的排放量大小排序为:无黏结后张预应力剪力墙>干法螺栓连接剪力墙>现浇剪力墙>约束浆锚连接剪力墙>双面叠合剪力墙>灌浆套筒连接剪力墙>竖向分布筋不连续剪力墙。

在物化阶段,部分装配式剪力墙比现浇剪力墙

碳排放量高,主要原因分为 3 个方面:①在建筑材料方面,干法螺栓连接剪力墙,约束浆锚连接剪力墙和灌浆套筒连接剪力墙由于使用额外的连接材料,导致材料碳排放量增加;②在装配式构件运输方面,考虑预制构件需整体运输,因此其单位体积运输效率小于现浇材料,运输距离的增加会增加碳排放,如图 4 所示,且根据调查统计,目前预制厂数量不足,分布不够广泛,导致预制构件的运输距离较长;③不同连接施工过程方面,无黏接后张预应力剪力墙、干法螺栓连接剪力墙、约束浆锚连接剪力墙和灌浆套筒连接剪力墙安装过程中施工难度较大,需要消耗更多的人工和机械,从而导致碳排放的增加,不同连接形式导致其各阶段碳排放比例也不尽相同,如图 5 所示,在材料用量一定的情况下,提升安装效率减少安装过程人力、材料、机械的消耗,可以减少碳排放量。

不同连接形式下装配式剪力墙碳排放量系数差异不大,其中无黏接后张预应力剪力墙体积碳排放量最高,平均高于现浇式 5.5%左右;竖向分布筋不连续剪力墙体积碳排放量最低,平均低于现浇式剪力墙 2.8%左右。但考虑到装配式结构减少了人

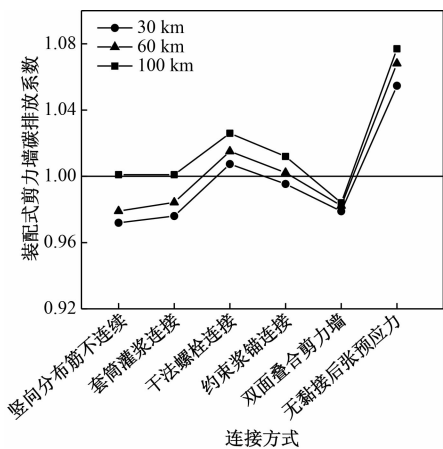


图 4 运输距离对预制剪力墙碳排放量的影响

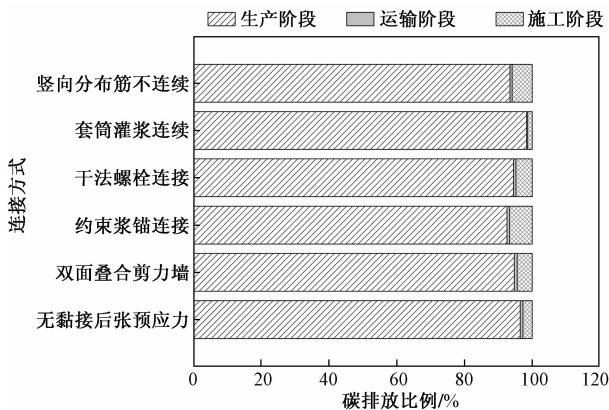


图 5 物化三阶段碳排放量比例

工数量,施工成本,提升了构件产品的质量。在目前人口及环境压力下,随着装配技术的提高,可以有效提升装配结构的性价比,这将使装配式剪力墙体系在建筑领域上将更具优势。

4.3.2 不同连接装配式剪力墙的碳排放与性能

对比分析不同类型装配式剪力墙的破坏承载力提升量系数 NF_i 、破坏时位移量提升系数 ND_i 与碳排放量之间的关系。总体而言,碳排放量与剪力墙性能并不是正比关系,而与采用的连接形式相关。装配式剪力墙结构在破坏位移、耗能性能方面的提升量较为明显,不同连接方式所带来的性能提升方向不相同,应根据碳经济效应、工程需求和抗震设防条件妥善选取适用的装配式剪力墙。

由图 6 可以发现:以现浇式剪力墙为基准,竖向分布筋不连续剪力墙和套筒灌浆剪力墙排放更少的 CO_2 ,得到较优异的破坏位移,但竖向分布筋不连续剪力墙承载力降低过大,应格外注意抗震设计要求;无黏结后张预应力剪力墙破坏承载力和破坏位移均得到明显提升,但其碳排放量系数最大;约束

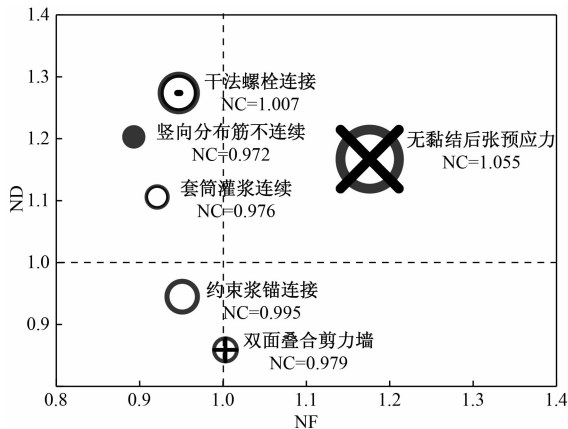


图 6 碳排放系数与性能系数对比

浆锚连接和双面叠合剪力墙承载力和位移没有明显的提升,但碳排放量系数相较现浇剪力墙有所下降;干法螺栓连接剪力墙具有最好的破坏位移,即耗能性能优越,但碳排放和破坏承载力不够让人满意,建议使用于高烈度区中低层建筑中。

同时,碳排放量基本一致的竖向分布筋不连续、套筒灌浆连接和双面叠合剪力墙,将其 NF 和 ND 简单加和用以考虑综合性能提升,3 类剪力墙总和系数分别为 2.096、2.027、1.862,其性能差异仍然较大,且与碳排放量系数 NC 呈负相关,说明碳排放一定的情况下,连接方式很大程度影响了其性能表现形式。

5 结论

选取不同形式装配式剪力墙为研究对象,通过收集不同连接形式装配式剪力墙相关研究,计算了单片单层剪力墙构件物化阶段的碳排放量,同时基于现浇剪力墙比较不同装配式剪力墙之间的碳排放及性能。主要结论可归纳如下:

1)不同连接形式的装配式剪力墙抗震性能均能满足要求,其碳排放计算差异主要体现在工艺流程方面,需要考察装配的材料消耗和安装流程,得到该类墙体的人工量、材料量和机械工程量,从而计算碳排放量。

2)利用收集的数据和调研的运输、安装条件,得到物化阶段建造单位体积装配剪力墙的碳排放量顺序为:无黏结后张预应力剪力墙>干法螺栓连接剪力墙>现浇式剪力墙>约束浆锚连接剪力墙>双面叠合剪力墙>灌浆套筒连接剪力墙>竖向分布筋不连续剪力墙。

3)装配式剪力墙连接方式较大程度决定了其碳排放量和性能提升方向。大部分装配式剪力墙在破坏位移、耗能性能方面的提升量较为明显,应根据实际需求妥善选取适用的装配式剪力墙。

参考文献

- [1] 孙国帅,刘占坤,冯娇,等. 中国装配式混凝土结构研究态势的知识图谱分析:基于 1992—2019 年文献计量数据[J]. 科学技术与工程,2021,21(16):6807-6814.
- [2] 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能,2021(2):1-6.
- [3] 李萌萌,陈为公,李龙. 装配式建筑物化阶段碳排放计算及影响因素研究[J/OL]. 安全与环境学报:1-10[2023-07-24]. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1045.
- [4] 曹西,缪昌铅,潘海涛. 基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究[J]. 建筑结构,2021,51(S2):1233-1237.
- [5] 申彦利,石佩云. 低层装配式竖缝中空剪力墙抗震性能[J]. 科学技术与工程,2021,21(7):2810-2815.
- [6] 杨宝坤,王二成,刘凯,等. 低层装配式混凝土墙板结构开洞墙体抗震性能试验研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(34):14213-14222.
- [7] 张淑云,韩凌禹. 边缘纵筋对暗柱型钢焊接装配式剪力墙抗震性能影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(5):1980-1987.
- [8] 余琼,孙佳秋,许雪静,等. 钢筋套筒灌浆搭接连接的预制剪力墙抗震试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,46(10):1348-1359.
- [9] 姜洪斌,陈再现,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):34-40.
- [10] 姜洪斌,张海顺,刘文清,等. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):28-31.
- [11] 张锡治,韩鹏,李义龙,等. 带现浇暗柱齿槽式预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报,2014,35(8):88-94.
- [12] 钱稼茹,杨新科,秦珩,等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):51-59.
- [13] 黄灿灿. 竖向分布钢筋部分连接的混合装配式剪力墙抗震性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019:38-76.
- [14] 薛伟辰,李亚,蔡磊,等. 双面叠合混凝土剪力墙平面内和平面外抗震性能研究[J]. 工程力学,2018,35(5):47-53,142.
- [15] 张文莹,杨联萍,余少乐,等. 双面叠合剪力墙水平连接节点承载力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(1):7-15.
- [16] 孙建,邱洪兴,谭志成,等. 螺栓连接全装配式一字形 RC 剪力墙受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(3):67-75.
- [17] GUO W, ZHAI Z P, CUI Y, et al. Seismic performance assessment of low-rise precast wall panel structure with bolt connections[J]. Engineering Structures, 2019, 181: 562-578.
- [18] PEREZ F J, SAUSE R, PESSIKI S. Analytical and experimental lateral load behavior of unbonded posttensioned precast concrete walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11):1531-1540.
- [19] PEREZ F J, PESSIKI S, SAUSE R. Seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joint connectors[J]. PCI Journal, 2004, 49(1):58-79.
- [20] KURAMA Y, PESSIKI S, SAUSE R, et al. Seismic behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls[J]. PCI Journal, 1999, 44(3):72-89.
- [21] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, LEBLANC B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations; part 1: mild steel connection[J]. Precast/Prestressed Concrete Institute Journal, 1995, 40(4):78-96.
- [22] SOUDKI K A, WEST J S, RIZKALLA S H, et al. Horizontal connections for precast concrete shear wall panels under cyclic shear loading[J]. Precast/Prestressed Concrete Institute Journal, 1996, 41(3):64-80.
- [23] DALLAGO B, MUHAXHERI M, FERRARA L. Numerical and experimental analysis of an innovative lightweight precast concrete wall[J]. Engineering Structures, 2017, 137:204-222.
- [24] 王向阳,王二成,李冲,等. 小剪跨比低层装配式墙体暗柱砂浆连接水平缝抗震性能试验研究[J]. 混凝土,2021(2):120-126.
- [25] 邵旭东,刘也萍,邱明红,等. 采用 UHPC 灌浆材料大口径全灌浆连接套筒接头的性能研究[J]. 土木工程学报,2020,53(2):81-91.
- [26] XU G, WANG Z, WU B, et al. Seismic performance of precast shear wall with sleeves connection based on experimental and numerical studies[J]. Engineering Structures, 2017, 150:346-358.
- [27] 张微敬,钱稼茹,陈康,等. 竖向分布钢筋单排连接的装配式剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):12-16.
- [28] 方强,邱洪兴,孙建,等. 有限滑动螺栓连接装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):559-565.
- [29] 陈再现,姜洪斌,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟动力子结构试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):41-50.
- [30] 朱张峰,郭正兴. 装配式短肢剪力墙低周反复荷载试验[J]. 工程力学,2013,30(5):125-130.
- [31] 赵作周,王晶秋,郁银泉,等. 低轴压比下预制边缘构件双面叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(3):63-71.
- [32] 薛伟辰,俞鹏程,刘硕,等. 双面叠合剪力墙竖向钢筋连接构造优化研究[J]. 施工技术,2018,47(12):25-29.
- [33] 崔瑶,王晶秋,郁银泉,等. 双面叠合剪力墙压弯性能的数值模拟分析[J]. 北京工业大学学报,2020,46(8):851-860.
- [34] 孙巍巍,孟少平,蔡小宁. 后张无粘结预应力装配式短肢剪力墙拟静力试验研究[J]. 南京理工大学学报,2011,35(3):422-426.
- [35] 党俊梁,吕西林,周颖. 底部开水平缝摇摆剪力墙抗震性

- 能分析[J].地震工程与工程振动,2013,33(5):182-189.
- [36] HOLDEN T,RESTREPO J,MANDER J B. Seismic performance of precast reinforced and prestressed concrete walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(3):286-296.
- [37] SMITH B J. Design analysis and experimental evaluation of hybrid precast concrete shear walls for seismic regions [D]. Indiana:University of Notre Dame,2012:30-62.
- [38] 吴浩,吕西林,蒋欢军,等. 预应力预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(5):208-217.
- [39] 袁泉,朱洪磊,李慧慧,等. 新型装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2020,40(3):85-96.
- [40] 蒋平安. 预制混凝土开缝剪力墙抗震性能试验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2020.
- [41] 肖绪文,曹志伟,刘星,等. 竖向分布筋不连接装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(17):5-9,24.
- [42] 刘香,崔涛,伍敏,等. 直螺纹灌浆套筒连接预制剪力墙抗震性能试验[J]. 沈阳工业大学学报,2017,39(2):205-212.
- [43] 严涛. 不同连接方式对装配式剪力墙抗震性能的影响[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [44] 李蕊. 采用套筒连接方式的预制装配式剪力墙抗震性能研究[D]. 广州:广州大学,2019.
- [45] 余琼,孙佳秋,许雪静,等. 钢筋套筒灌浆搭接连接的预制剪力墙抗震试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(10):1348-1359,1373.
- [46] 王远哲. 灌浆套筒连接装配式钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [47] 余周. 套筒续接预制装配混凝土剪力墙的拟静力试验研究[D]. 广州:广州大学,2021.
- [48] 刘及进. 不同竖向钢筋连接的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [49] 龚永智,柯福隆,谭涛,等. 全干法连接装配式夹芯剪力墙结构抗震性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(5):451-461.
- [50] 薛伟辰,古徐莉,胡翔,等. 螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙低周反复试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(S2):221-226.
- [51] 张壮南,王春刚,李珊珊,等. 接缝形式对凹槽浆锚连接装配式混凝土剪力墙抗震性能影响研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(S1):276-285.
- [52] 陈云钢,刘家彬,郭正兴,等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):83-89.
- [53] 刘家彬,陈云钢,郭正兴,等. 螺旋箍筋约束波纹管浆锚装配式剪力墙的抗震性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(11):92-98.
- [54] 钱稼茹,彭媛媛,秦珩,等. 竖向钢筋留洞浆锚间接搭接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):7-11.
- [55] 谷倩,任靖,张延宾,等. 双面叠合剪力墙平面外受力性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):32-41.
- [56] 方宇轩. 带水平拼缝的装配整体式双面叠合剪力墙抗震性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
- [57] 骆玉琦,谷倩,赵端锋,等. 带构造边缘构件的 T 形双面叠合剪力墙抗震性能研究[J]. 工业建筑,2021,51(9):90-97.
- [58] 李杨奕. 新型预制混凝土双板剪力墙抗震性能研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [59] 肖全东,郭正兴. 预制混凝土双板剪力墙抗震性能试验[J]. 土木工程学报,2014,47(S2):151-157.
- [60] 朱张峰,郭正兴,汤磊. 新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报,2018,51(3):36-43.

Seismic Performance and Carbon Emission Comprehensive Benefit Analysis of Prefabricated Shear Walls with Different Connections

ZHANG Bohua

(China Railway Fourth Bureau Design and Research Institute,Hefei 230023,China)

Abstract: Under the background of accelerating industrial transformation and “carbon neutrality” in my country, facing the need for modernization development of my country's multi-high-rise prefabricated building industry, the relationship between carbon emissions and performance between different types of prefabricated shear walls is quantified to promote the development of prefabricated building structures. In this research, the carbon emission calculation model of components in the physical and chemical stage is established, and the data of prefabricated shear walls with different connection types are sorted and analyzed. The results show that the difference in carbon emission calculation is mainly reflected in the technological process of different types of prefabricated shear walls. Based on data collection and field investigation, it is calculated that the carbon emission gap of shear wall assembly with different connection modes per unit volume is small. The connection mode of fabricated shear walls greatly affects its carbon emission and performance improvement.

Keywords: prefabricated buildings; prefabricated shear wall; materialization phase; carbon emissions; seismic performance