

数字化转型下装配式建筑供应链韧性提升机理分析

盛超^{1,*}, 盛晗²

¹毅康科技有限公司, 山东烟台, 中国

²山东海成石化工程设计有限公司, 山东烟台, 中国

*通讯作者

【摘要】双碳战略与智能建造发展背景下, 装配式建筑供应链易受原材料、物流等外部冲击, 脆弱性问题突出。数字化转型是提升装配式建筑供应链韧性的重要方式, 现有研究未理清动态能力在二者间的内在传导逻辑。研究划分感知、学习、重构三类动态能力, 构建数字化转型、动态能力与装配式建筑供应链韧性理论模型并设定假设, 基于352份有效问卷, 采用结构方程模型与Bootstrap法实证检验。数字化转型可直接正向提升装配式建筑供应链韧性, 且培育三类动态能力; 动态能力均存在部分中介效应, 重构能力中介作用最强。数字化转型通过双重路径增强供应链抗扰动能力, 结合多地产业实践提出优化对策, 丰富相关定量研究, 为企业数字化升级与装配式建筑供应链韧性治理提供理论及实践参考。

【关键词】数字化转型; 装配式建筑; 供应链韧性; 动态能力; 结构方程模型 (SEM)

1. 引言

在“双碳”战略目标以及建筑业绿色转型的大背景之下, 我国相继出台了多项产业扶持政策。按照住房城乡建设部下发的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展指导意见》, 装配式建筑被列为优先推广领域, 发展要依靠BIM技术、大数据分析来实现全生命周期数字化管理。相关政策措施中重点提出要推进建筑产业互联网平台建设, 创建起一体化协作体系来提高产业链韧性以及供应链稳定水平。在这样的大环境下, 我国装配式建筑行业的规模也迅速扩大。因为该领域供应链包含材料采购、预制构件制作、跨区域运送以及现场装配等诸多方面, 牵涉到众多的利益攸关方, 在面对原材料价格变动, 交通阻塞或者市场需求不平衡这些外部状况的时候, 常常会遭遇构件短缺和工期延误等状况, 这就表现出了整个供应链存在的脆弱性属性[1]。

数字经济同建筑业深度融合发展的时候, 数字化转型成了提高装配式建筑产业链韧性的重要方法[2]。从已有的研究文献可以知道, 在数字技术应用和供应链韧性评价方面已经做过一些研究, 但是对于二者之间的互动机理还没有深入的研究。大部分研究只停留在表面相关性分析上, 没有对数字技术如何作用于供应链韧性的内在机理进行系统的解析。特别是动态能力理论下对于感知、认知和变革这三个主要方面的具体影响机理

探究还比较欠缺, 在装配式建筑领域中该模型的实施价值也未得到足够的论述。目前还没有足够的实证依据来支持, 企业不同的数字化投入水平所对应的绩效差异以及背后的原因很难被准确地解释。

本研究从动态能力理论角度出发, 丰富了有关数字化转型下装配式建筑供应链韧性问题的已有成果, 在已有的文献中找出缺少的地方并加以补充。采用实证研究法、案例分析法等研究方法, 得出的研究成果对装配式企业进行数字化工厂建设以及提升供应链韧性有实践上的借鉴意义, 同时也丰富了建筑领域供应链数字化转型、韧性管理的理论研究。

2. 文献综述

2.1 数字化转型赋能装配式建筑供应链韧性

目前学术界对于装配式建筑领域数字化转型以及供应链韧性研究还处在初步阶段, 并没有形成一套完整的、成熟的理论支持体系。目前缺少有关该行业的实证研究, 对技术验证和应用效果的深入分析还处在发展中。目前的研究成果大多集中在传统产业或者宏观经济层面的产业链协同效应研究上, 几乎没有对装配式建筑领域进行专门研究的。李梓元等[3]学者认为数字经济与实体经济融合是提高产业链竞争力的主要途径, 用数字化技术可以改善供应链各个环节。王薇[4]在实地调研了大型企业的案例之后得出结论, 数字化转型不但是提高企业运营效率的

重要方式, 而且是企业实现可持续发展战略的保证。乔智等[5]人的研究认为, 制造业经过深度数字化改造后, 其内部管理效率、供应链稳定性以及风险防控能力都会得到改善, 并且该种模式也可以给企业提供新的市场开拓方式和融资渠道。上述研究清楚地表明, 装配式建筑行业数字化的发展有着十分重要的实践意义和发展前途。

目前学界对于数字化转型与供应链韧性已经达成共识, 两者一起成为研究领域的主要问题。在装配式建筑行业, 学者们开始对数字化转型怎样改善产业链运作效率、提升其稳定性进行探究, 把它当作促使产业持续发展的关键力量之一。尽管已有文献已经揭示出数字化转型对装配式建筑供应链韧性产生潜在作用的机理, 但是大多数研究还处在宏观概念化的解释或者理论假设的阶段。现有的研究虽然试图建立起二者之间的逻辑联系, 但是对于具体的指标的建立、量化分析以及中介变量的作用机理等研究还比较浅显。因此本研究对有关概念做了系统的梳理和明确的界定, 即将数字化转型定义为依托 BIM 技术和物联网以及大数据分析这些前沿的信息化手段来完成从规划、设计到施工全生命周期的优化改造过程, 并且着重提出智能化协同平台的创建实践; 同时将装配式建筑供应链韧性定义为面对原材料短缺、运输受阻等外界冲击的时候, 组织能够感受到风险, 迅速做出响应并实现恢复的能力。在此基础上创建一个动态能力视角的多层次理论架构, 并且开发出相应的调查问卷来保证数据收集质量及可靠性。另外, 多渠道调节效应机制也被引入进来, 从而充实和加深了研究假设内容。由于模型中包含大量的交互项, 并且多方面影响路径比较隐蔽, 使用结构方程模型 (SEM) 做为主要的分析方法是必要的——既可以很好地检验量表是否一致、是否区分度好, 也可以准确求出各个路径系数值, 从而更好地反映模型整体的适配程度。根据实证结果提出改进建议既可以给企业战略规划提供参照, 也可以使政府部门制定更具有前瞻性政策, 从而推进装配式建筑整体水平的提高和发展。

2.2 动态能力

动态能力理论是由 Teece 和 Pisano 于 1994 年首次提出的, 它突破了传统资源基础论只重视静态存量资源的局限, 把企业长期竞争优势的形成机制、内外部资源整合效率

以及对外部环境变化的适应能力结合在一起[6]。相比而言, 资源基础论更注重对企业的内部静态资源配置状况的剖析, 不能很好地解释一些行业的普遍衰退现象等在市场变化时所表现出来的特点, 动态能力理论则从一个更加有力的视角去解释这一问题。装配式建筑产业属于高技术性、长链条的建筑行业, 在装配式建筑产业中, 其产业链的各环节、各主体的协同配合、对 BIM 技术的应用、市场需求变化趋势等都会对装配式建筑产业产生较大影响。

根据实际情况和已有的研究成果, 本研究对装配式建筑领域的企业动态能力的概念进行了重新建构。研究表明, 在装配式建筑产业环境下, 企业可以利用 BIM 技术或者数字化工具来获取行业实时数据, 依靠先进的科技和管理理念应对市场波动; 供应链中断等情况出现的时候, 企业要迅速调动起内部的各种资源, 改变自己的经营方针以符合市场变化, 进而保证运营体系的稳定[7]。按照经典理论框架以及装配式建筑行业的特征, 动态能力被界定成具备感知、学习和重构这三个主要方面的一个综合名词。感知能力指的是企业对于政策导向、市场情况、技术革新这些方面的信息预测和解读水准, 而学习能力是企业依靠将 BIM 应用经验进行整合、实行模块化施工方式、改善供应链管理体系等手段来提升自身绩效水平的能力, 重构能力就是应对由于原材料供应紧张或者工程出现变更这样的突发状况时, 利用数字化平台完成生产布局、物流调配、合作网络的快速协调并重新构建的功能[8-10]。三个能力之间互相影响, 互相促进, 共同构成了装配式建筑企业面对复杂的外部环境挑战时, 保证供应链正常运转的基础。

3. 研究概念模型与假设建立

3.1 研究概念模型

已经取得的有关建筑学和工业制造方面研究结果指出, 数字化转型给装配式建筑供应链韧性所带来的影响已经被学术界所普遍接受。因此本研究选择数字化转型、动态能力、供应链韧性这三个主要的研究变量, 并结合装配式建筑行业的特点来构建理论模型 (见图 1)。

3.2 研究假设

3.2.1 数字化转型对装配式供应链韧性的影响

本研究采用 BIM 技术、大数据分析、产

业链协同平台这些先进的信息化手段改进装配式建筑行业上下游之间信息交流的状态,推进各个部门之间的深度融合并开展数据的价值挖掘工作。该技术体系涵盖预制构件的设计、工厂加工生产、物料配送、现场组装等关键业务领域,并利用数字化技术实现对市场供求关系的变化作出快速反应,创建起多种供应商组合的形式来增强供应链的弹性。根据改进过的风险评价模型以及完备的应急预案体系,外部环境的不确定给外部运营带来的影响得到很大减轻,企业抗压能力慢慢提高。据此提出如下研究假设:

H1 认为,数字化转型会提高装配式建筑供应链韧性。

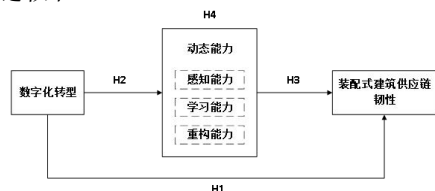


图 1.理论模型

3.2.2 数字化转型对动态能力的影响

动态能力的主要组成要素有感知、学习、重构三个部分。企业创建全链条数据生态系统之后,大幅度地拓宽了对市场动态、政策走向和技术革新等外部环境要素的捕捉范围,因而明显加强了感知水平;依靠平台化的运作机制,创建起诸多 BIM 技术应用实例和装配式管理操作经验的仓库,给知识库的不断充实给予坚实根基,而且明显改进了学习速率。这些重要的要素彼此相互影响,从而促使动态能力系统全面地形成起来。本研究采用上述的分析框架,给出以下研究假设:

H2a: 数字化转型对感知能力有正向影响。

H2b: 数字化转型对学习能力的正向影响。

H2c: 数字化转型对重构能力有正向影响。

3.2.3 动态能力对装配式供应链韧性的影响

根据感知能力的应用,企业可以提早发现原材料价格的变动、物流网络出现的异常状况等危险情况,并依照这些危险状况制订相应的风险控制手段。建立起完善的组织学习体系之后,企业就能迅速地把装配式建筑施工的新技术、新的经验以及数字化供应链的新模式等吸纳进来,并加以应用到实际的

操作当中去,进而促使企业运营管理模式得到不断的改善和升级。重组能力主要是对供应链的突发状况做出反应,使企业在资源整合、生产计划上得到及时调整,从而实现供应链的快速恢复。这三种主要能力分别从预测预警、系统优化和应急处理这三个方面提升装配式建筑供应链的总体韧性,有着明显实际运用的价值。结合前述研究结论,本研究进一步提出以下假设:

H3a: 感知能力对装配式建筑供应链韧性有正向影响。

H3b: 学习能力对装配式建筑供应链韧性有正向影响。

H3c: 重构能力对装配式建筑供应链韧性有正向影响。

3.2.4 动态能力的中介作用

数字化转型创造的信息、技术与资源优势无法直接作用于供应链韧性,需要依托企业动态能力完成转化:数字化资源先赋能感知、学习、重构能力,再由三类能力分别发挥风险预警、模式优化、资源重组作用,最终改善供应链韧性。由此可见,感知、学习、重构能力分别在数字化转型与装配式供应链韧性之间承担传导桥梁。基于此,提出以下假设:

H4a: 感知能力在数字化转型与装配式建筑供应链韧性间有中介作用。

H4b: 学习能力在数字化转型与装配式建筑供应链韧性间有中介作用。

H4c: 重构能力在数字化转型与装配式建筑供应链韧性间有中介作用。

结合前文划分的变量维度框架与全部研究假设内容,本研究绘制了数字化转型作用于装配式建筑供应链韧性的路径作用模型(见图 2),该模型清晰地呈现了数字化转型、动态能力三大维度划分(感知能力、学习能力、重构能力)以及装配式建筑供应链韧性三者之间的内在作用逻辑、层级关联与传导路径。

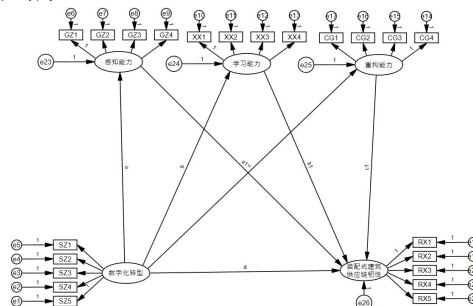


图 2.模型构建

4.研究方法

4.1 问卷调研设计与结果

本研究采取多层次、多维度的方式分发调查问卷，把精准定向邀约、跨领域社群传播、实地走访调研等手段综合起来使用。共发出问卷 380 份。在回收过程中按照预先确定的标准对问卷数据加以规范化整理，剔除非逻辑矛盾或者信息空白的无效样本之后得到有效的问卷 352 份，有效回收率达到 92.63%保证了数据质量和统计分析的科学性。

本研究以装配式建筑产业集群为调查对象，主要研究推进程度较高的企业数字化转型的状况。研究对象包括预制构件生产、供应链管理、BIM 技术的应用及开发、现场安装等各个相关岗位的人员。从人口学数据统计分析可知，男性占全部受访者的 67.61%，女性占全部受访者 32.39%，存在较大性别比例差距；年龄段以 31 到 40 岁为主，共 89.1%的受访者属于该年龄段，有很强的实践经验优势。在教育背景上，研究者本科及以上学历者占全部被调查对象的 67.61%。根据

职务分类和职业类型来划分的话，管理层和技术研发人员所占比例达到 78.05%，样本企业大部分是国有或者中型企业，同时包含着材料供应、构件生产、物流配送以及施工建设等各个方面的业务范围，分布较广且有较强的代表性，可以较为接近实际状况的装配式建筑行业开展研究。

本问卷有三个大的模块，第一部分用调研导语介绍研究背景、目的和意义，第二部分主要调查受访者职业特点，包括职位种类和从业时间等基本情况，第三部分从数字化转型实践、技能认识程度、培训效果、供应链协同运营等各个方面设计具体的问题，并用五级李克特量表做量化分析。在收集数据之后，用探索性因子分析和信效度检验的方法对问卷质量进行评价，结果表明该工具有较好的理论依据和技术规范性，可以用于后面的验证性因子分析和其他统计模型的研究。

4.2 测量题项设计

本文围绕四大核心变量设计对应观测题项，具体测量题项整理如下（见表 1）。

表 1.测量题项设计

变量	编号	题项具体内容
数字化转型	SZ1	搭建数字平台，打通装配式建筑供应链全流程协同，提升整体运营效率。
	SZ2	政府出台税收、奖励政策，激励企业在供应链管理应用数字化技术。
	SZ3	数字化深度融合供应链组织与业务流程，拥有清晰数字化转型目标。
	SZ4	员工熟练运用物联网、云计算，全流程实时采集、处理、分析构件数据。
	SZ5	企业投入资金、人才、平台，开展装配式供应链数字化技术研发。
感知能力	GN1	企业能及时捕捉装配式建筑供应链环境变化，预判机会与风险。
	GN2	企业能够主动追踪并预判装配式建筑行业政策的调整趋势。
	GN3	企业对装配式建筑供应链的运行逻辑与发展脉络具备系统性认知。
	GN4	企业能准确把握装配式建筑供应链上竞争对手与合作伙伴的发展动态。
学习能力	XN1	企业对标行业标杆，学习装配式建筑供应链先进经验与技术方法。
	XN2	搭建全员知识管理体系，持续沉淀、复用装配式供应链信息资源
	XN3	建立系统化人才培养机制，培训考核提升员工供应链专业能力。
	XN4	开展供应链管理、技术、信息化创新，并落地到运营与项目建设。
重构能力	CN1	企业统筹优化装配式供应链人力、资金、技术各类资源配置。
	CN2	企业低成本高效率获取外部互补资源、先进技术与行业经验。
	CN3	结合市场与项目需求，动态管控、调配供应链存量及增量资源。
	CN4	根据装配式项目实际需求，灵活调整供应链流程与组织架构
装配式建筑供应链韧性	ZG1	企业多源采购规避原料单一依赖，有效抵御上游断供、价格波动风险。
	ZG2	有柔性生产、设备冗余与质量追溯体系，稳定构件交付、应对生产波动。
	ZG3	拥有多路线运输、应急调配及全程监控能力，规避构件运输延误风险。
	ZG4	和施工端实时协同，快速适配进度调整需求，维持现场施工连续推进。
	ZG5	供应链遭遇中断后，企业可快速修复业务流程，恢复常态化运营。

4.3 假设验证与分析

4.3.1 模型拟合分析

将 352 份有效问卷数据导入 AMOS26，对整体模型做适配度检验。检验采用 χ^2/df 、

GFI、RMSEA、NFI、TLI、IFI、CFI、PGFI、PNFI 九项指标,涵盖绝对拟合、增值拟合与简约拟合三类。运算结果显示: X^2/df 为 1.563, 低于 3; GFI 为 0.925, 高于 0.8; RMSEA 为 0.040, 低于 0.08; NFI、TLI、IFI、CFI 均超过 0.9; PGFI 与 PNFI 分别为 0.738 和 0.810, 均高于 0.5。各项指标均达到适配标准。

经过对以上检验结果的深入分析可以发现,建立起来的数字化转型、动态能力、装配式建筑供应链韧性三者之间的理论模型与现场调查的数据基本吻合。问卷题目设计严密、规范,样本数据质量较好,该理论体系有很强的解释力和预测性,具体的拟合度检验结果如下(见表 2)。

表 2.模型拟合度检验结果

指标	绝对拟合指标			增值拟合指标				简约拟合指标	
具体分类	X^2/df	GFI	RMSEA	NFI	TLI	IFI	CFI	PGFI	PNFI
判断标准	<3	>0.8	<0.08	>0.9	>0.9	>0.9	>0.9	>0.5	>0.5
实际值	1.563	0.925	0.040	0.926	0.968	0.972	0.972	0.738	0.810
拟合情况	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好

4.3.2 验证路径假设

本研究利用 AMOS 28 软件对数字化转型、感知能力、学习能力、重构能力和装配

式建筑供应链韧性这五个潜在变量之间的路径关系进行系统的探究,并且用实证分析来证明和解释(见图 3)。

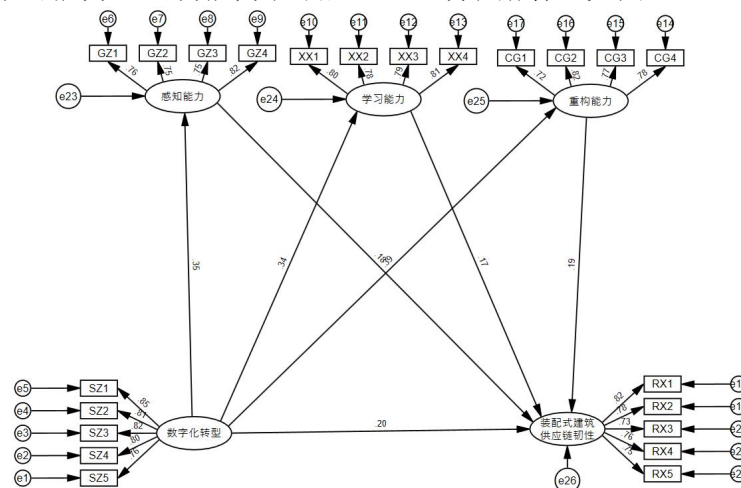


图 3.研究假设路径系数

用路径系数进行统计分析得出本研究中所提出来的直接效应假设 H1、H2a-H2c 和 H3a-H3c 全部路径都具有显著性,即 $P < 0.05$ 。由此可以看出初始理论模型中基础路径关系的信效度较好,有较好的科学依据。上述初步路径有效性给认识感知能力、学习能力、重构能力怎样在数字化转型大背景之下推动装配式建筑供应链韧性产生提供关键的实证基础,而且给进一步探寻动态能力的嵌入机制赋予了必需的前期条件。

4.3.3 中介效应检验

本研究使用 Bootstrap 中介效应检验方法,样本数量为 5000 个,置信水平设为 95% 进行感知能力、学习能力、重构能力对数字化转型和供应链韧性的影响的中介效应分析,具体的分析数据结果如下(见表 3)。

根据实证研究结果可以得出,数字化转型对于装配式建筑供应链韧性的影响,用数学符号表示就是整体效应路径中数字转型的综合影响系数为 0.435。其直接作用很大,效应值为 0.223;动态能力的传导机制产生的间接影响也很重要,效应值为 0.212。统计检验结果表明,两条路径的置信区间都不包含零点,说明数字化转型可以独立提高供应链韧性水平,也能通过动态能力使供应链韧性得到间接提高。

研究数据显示数字化转型对于装配式建筑供应链韧性的作用机制,是由感知能力、学习能力和重构能力这三个主要变量所构成的。回归分析得出这三种能力有明显正向的影响(系数分别为 0.068、0.063、0.082),其 95% 置信区间都不包含零点,说明这三种

能力在一定程度上参与了这个过程，从而支持了假设 H4a、H4b、H4c。在三种能力当

中，重构能力解释力度最大，感知能力次之，而学习能力的作用比较小。

表 3.中介效应检验结果

路径关系	效应类型	效应值	Bias-corrected 95%CI		Percentile 95%CI	
			下限	上限	下限	上限
数字化转型→装配式建筑 供应链韧性	总效应	0.435	0.299	0.585	0.295	0.580
	直接效应	0.223	0.059	0.400	0.055	0.396
	中介效应	0.212	0.126	0.344	0.121	0.331
数字化转型→感知能力→ 装配式建筑供应链韧性	总效应	0.290	0.139	0.459	0.137	0.456
	直接效应	0.223	0.059	0.400	0.055	0.396
	中介效应	0.068	0.016	0.139	0.013	0.137
数字化转型→学习能力→ 装配式建筑供应链韧性	总效应	0.286	0.123	0.457	0.119	0.451
	直接效应	0.223	0.059	0.400	0.055	0.396
	中介效应	0.063	0.014	0.135	0.008	0.127
数字化转型→重构能力→ 装配式建筑供应链韧性	总效应	0.305	0.146	0.474	0.143	0.470
	直接效应	0.223	0.059	0.400	0.055	0.396
	中介效应	0.082	0.022	0.164	0.018	0.157

4.3.4 路径结果分析与讨论

(1) 假设 H1：数字化转型对装配式建筑供应链韧性具有正向积极影响。从实证研究结果中可以得知 H1 假设成立。装配式建筑企业开展全产业链的数字化转型之后，供应链韧性的改善十分突出。从研究结果来看，BIM 技术和物联网等新兴信息技术相融合之后，可以有效地提高设计、生产、仓储、施工等主要环节数据互通的情况，从而大大降低供需两方面信息不一致的状况。通过对企业内部库存变化、工序进行实时监控，及时发现并处理由于供应商断供、生产计划调整造成的供应链断裂或者工期延误问题。尤其是原材料价格起伏、运输受阻等外界环境影响的时候，依靠数字化预警系统，企业可以迅速改善自身的资源配置策略，从而减小负面效果的影响。从数据上可以发现，在整个风险管理过程中，数字化投入越高，对于提高供应链整体韧性就越有积极的作用。

(2) H2a、H2b、H2c 提出数字化转型可以促进感知能力、学习能力以及重构能力的发展。本研究通过研究认为，所提出的三个研究假设都被证明是正确的。从数字化转型的标准化途径来讲，它对感知能力的影响程度是 0.349，P 值小于 0.001。依靠数字化平台整合起来的信息资源——行业政策变动，原材料的价格变动以及市场的需求变动等等要素，企业既拓展了信息的获取途径，又创建起了一个供全供应链去预警的体系，进而改善了全部的风控效果。就学习能力来

说，相关性系数也是 0.345 ($p<0.001$)，说明借助 BIM 辅助设计、智能预制加工和全生命周期协同管理的方式产生了基于在线知识库的知识管理体系。员工可以在使用的过程中去了解新的技术、新观念，促使装配式建筑项目方案不断发展和创新。对于重构能力而言，其回归系数最高，为 0.395 ($p<0.001$)。因为数字化管理系统已经对供应商的生产能力、物流网络布局、库存储备等各方面信息进行详细的记载，在面对供应链中断事件的时候，企业可以立即作出调整方案，修改生产计划，改善配送路线或者重新选择合作单位等方式来提高内部和外部资源调配的效率以及应急反应速度。

(3) H3a、H3b 和 H3c 分别提出感知能力、学习能力和重构能力可以给装配式建筑供应链韧性提高起到正向作用。感知能力、学习能力、重构能力都会抑制供应链断裂的风险。感知能力路径系数为 0.176，P 值小于 0.01，说明较强的感知力有助于企业提早察觉资源匮乏或者物流停摆这类潜在危险，并且依靠搭建多元化的供应商网络去应对不稳定的状况带来的危机，学习能力路径系数是 0.163，P 值小于 0.01，表明创建系统的组织学习机制具备重要的意义，它推进了预制构件领域的技术创新和工艺革新，也促使供应链内部多余的环节渐渐优化，进而提升企业可持续发展水平和市场竞争能力，重构能力路径系数为 0.190，再次显示高重构能力对企业遭受外界冲击时实行迅速调整的能力有着

显著的作用,即马上对供应商结构作出改变,重组生产安排,减小运营支出,加快供应链重回正常运转的步伐。

(4) H4a、H4b、H4c 假设有感知能力和供应链韧性之间有中介关系。本研究使用实证方法检验出三条潜在的中介机制,也对数字化转型给供应链韧性带来具体影响的路径做了详细的剖析。研究表明数字化转型不但直接提高了企业的动态能力,而且它又通过感知能力、学习能力、重构能力三个关键中介变量来起间接作用。从感知的角度来说,数字化的工具大大扩充了信息的获取途径,加强了风险的预测与应对能力,促使企业先于外界形成抵抗外部影响的缓冲体系,缩减不确定因素造成的影响,进而促使供应链的韧性得到提升。对学习能力来说,数字平台汇集了各种各样的 BIM 技术和智能化施工的案例资料,有助于促进最好的实践在行业内广泛流传,改善企业的运作速度,并为企业应付可能出现的供应链中断等情况提供支持。数字化技术带来的全链条可视化管理使得企业陷入危机的时候可以迅速调动起各种资源,并且及时对资源调配方案作出调整,从而加快产业链恢复正常运转的速度,进而提升整个供应链抗压能力。根据上面的分析可知,重构能力作用最明显(系数为 0.082),感知能力次之(系数为 0.068),学习能力作用较小(系数为 0.063)。

本章实证研究结果很好地证明了研究假设,详细探究了数字化转型对于装配式建筑供应链韧性的作用机制。研究显示,其影响主要是通过感知能力、学习能力和重构能力这三个动态能力来体现的,并且表现出明显的中介效应特点。研究成果为装配式建筑企业创建数字化转型战略并改进供应链风险管理给予强有力的理论支撑与实际参照,对于有关政策的制订者改善产业韧性提升策略也具备十分重要的意义。

5. 讨论与启示

根据实证研究和装配式建筑产业发展的现状,本研究根据国内先进装配式建筑企业的实际经验,结合区域差异化的政策环境,从数字化转型路径、动态能力构建、产业链协同机制改进、政策支持体系的完善等四个方面给出相应的对策建议。研究主要探究数字技术怎样在装配式建筑行业全生命周期管理里起到作用,试图提高企业供应链的韧性以及整体的竞争优势,并且给行业的可持续

发展给予实践参照和理论支撑。

5.1 分层推进数字化转型,搭建 BIM 全链条协同体系

实证研究结果表明,数字化工厂的建立是提高装配式建筑供应链韧性的一个重要方法,也是提高企业快速适应市场的关键要素。目前行业在数字化的过程中存在着明显的阶段性特点和系统性的欠缺,虽然有部分企业在设计阶段开始使用 BIM 技术,但是制造、物流以及施工等重要环节还大量地采用传统的线下协同手段,造成整个流程的数据交互整合体系还没有形成起来,从而引发严重的信息隔断状况。不仅使整个供应链的弹性降低,当原材料的价格波动或者交通受阻等外部冲击出现的时候,就会造成构件供应不足、工期被延误等不良后果,从而给供应链稳定带来不良影响。

国内标杆企业数字化转型的实践给相关产业效率改善给予重要的参照。以天津丙辉数字科技为例,该企业用 BIM 技术和数字孪生平台搭建起预制构件设计、生产、物流、现场施工全链条智能集成系统,而且在中国建筑、龙湖集团等大型装配式建筑项目上取得了很好的应用效果。采用基于数字化管理系统的资源优化配置策略之后,不但可以大大缩短工程周期,而且可以使企业在市场环境变化的时候有较强的应变能力。中建六局依托宝坻国家级装配式产业园区,实行轨道交通预制构件全生命周期信息化管理方案,保证京津冀区域重点基础设施建设项目所需要供应链安全稳定的运行。

按照装配式建筑产业的发展特点,企业应按照企业规模属性来制订不同的数字化转型方案。对大型总承包商和国家级产业园区来说应该自主创建 BIM 协同平台,健全数据标准化体系并整合设计、生产、运维等主要业务环节从而达成全流程信息化管控,对于小型企业以及中小企业可借助进入行业标杆企业云服务平台达成经济高效的改造技术提升效率。从全产业链角度出发,要用 BIM 技术打通供需双方的数据交流链路,冲破信息壁垒,最大限度地发挥数字化变革给加强产业链韧性带来的战略好处。

5.2 三维度系统培育动态能力,筑牢供应链韧性内生动力

实证结果表明,在数字化转型对于装配式建筑供应链韧性影响机制当中,感知能力、学习能力和重构能力起到重要的中介变

量作用,而且它们的中介效应经由数据予以证实。重构能力的作用最好,感知、学习能力较弱。目前行业普遍存在着动态能力培育欠缺的问题,大多数企业采取被动应对的方式处理风险,缺少建立起系统的、持续的危险预知和技术积累的机制。当危机来临的时候,依靠临时性的资源调配来解决遇到的问题,这样就会使供应链整体抗压能力和稳定运行水平难以提高。

中建科技(济南)、国舜绿建科技两家单位依靠自身丰富的资源,为动态能力的全面发展起了带头作用。前者以BIM技术为基础,开发出具有云端风险管理功能的系统,可以对主要原材料价格变动、政策动向以及项目建设情况展开全方位的监控,并且能够很好地提高了预警准确性,并且通过校企合作的方式创建了线上培训平台,不断地加强员工的数字素养,补齐了组织学习系统的不足,后者更加重视供应链弹性,建立了供应商资源、物流网络的储备体系,并且定期进行应急演练,努力提高危急情形下资源调配效率和应对能力。协同发展战略指引之下,企业两支队伍一起推进技术创新能力、市场开拓能力以及内部治理效能这三个主要方面的改善,从而有效提升面对市场竞争和技术变革所具备的应对能力与韧性。

因此企业在建设的过程中应该建立起系统的、可随时调整的创新能力,以此推进技术创新、组织变革和资源协同这三个关键能力的相互配合。采用数字化技术创建出多层次的风险预估体系,把风险监测节点前置到经营前端;搭建起行业标杆案例同实践经验交融起来的开放式知识平台,依靠周期性的专业培训来提高员工的学习速度,储备起各类供应商备选方案并制定完善的应急预案流程,定时开展实战演练来加强应对危机的能力。经由前瞻性规划、实时跟踪监测以及事后的修复这三级风险控制体系的设计之后,使企业的应变能力和抗压韧性得以得到明显的加强,并且给装配式建筑产业安全稳定的持续发展赋予了可靠的支撑力量。

5.3 深化产业链数字化协同,打造区域韧性共同体

目前装配式建筑行业发展到现阶段的时候,在推进其数字化转型的时候遇到了诸多的难题,其中最为严重的就是由于各企业的数字化程度参差不齐,导致各个企业内部的数据存在壁垒,无法互通有无的情况也时常

出现,且在资源配置方面也存在不平衡现象,造成整个产业链条之间的协同效应不足。仅靠某一个企业推动数字化改革很难形成完整的产业韧性体系,要依靠全产业链生态系统深层次的数字化整合来克服目前所遇到的问题并达成可持续发展。

浙江省装配式建筑产业形成起来的数字化协同运作机制具有明显的示范作用。依靠“浙里建”工程管理一体化平台和杭萧钢构创建的省级绿色建筑协同制造工业互联网体系,对建筑设计、构件生产、现场施工等各个方面的关键环节实行全覆盖,创建起一个完整的信息互联互通网络。制定出统一的BIM模型数据接口标准,把产业链上下游所有相关企业纳入进来(原材料供应方、预制构件生产方、物流运输服务商以及施工方),从而达成供需双方之间关键要素信息的公开透明并可以实时互动的效果。极端气候造成产能急剧下降或者跨区域运输受阻的时候,该平台可以立刻调动起区域内的闲置资源,改善调配方案,进而减小供应链受到的干扰,大幅度加强产业抵抗外界冲击的能力。

根据浙江省装配式建筑领域相关实践,在创建区域供应链韧性合作网的过程中可以参照。以产业中占较大比重的数字协同管理服务平台为核心企业,建立数字协同管理模式、制定统一的数据标准与技术标准,并且以公开的数据接口的形式推动各个主体的信息化升级工作。配套供应商要主动加入区域共享信息系统或者龙头企业数字化网络,达成供需双方关键数据实时互通和联合调配。行业协会要集聚区域内产能、设备以及人力资源等战略性资源,创建包含原材料储备、生产加工能力、人力资源状况等内容的综合性数据库,冲破行业内部信息壁垒,推进跨环节资源共建共享,实现风险共担机制的形成,进而改善区域装配式建筑产业的整体抗压水平和可持续发展能力。

5.4 完善政策与标准体系,优化数字化转型外部环境

在装配式建筑企业进行数字化转型时,前期巨大的资金投入和技术人才缺乏的问题比较明显,不能通过市场机制很好地调动企业开展转型的动力。因此急需依靠政府出台扶持政策、建立行业标准体系,给产业的可持续发展筑牢制度根基、搭建支撑平台。

山东对于新型建筑工业化的政策有明显的导向性作用, 依靠顶层设计推进全产业链协同发展。省政府发布了诸多战略性规划文件, 同时还出台了智能建造的实施方案, 为产业各个环节创建起了支持网络。依靠财政补贴、税收减免等诸多激励措施来降低企业对 BIM 技术融合以及智能化预制构件生产线创建所造成的费用压力。依靠省级智慧工地信息化平台的建设, 逐渐创建起统一的数据标准体系, 促使产业链上下游资源协同运转。为了缓解由于人才不足而造成的建筑行业装配式建筑项目风险控制能力及质量之间的矛盾, 通过校企联合方式创建专项实训基地, 增加装配式建筑项目的相关课程, 从而提高该地区的装配式建筑产业链的建设水平和质量, 推动区域装配式建筑行业的高质量发展。

根据山东省实践经验进行总结和借鉴, 各级住房城乡建设部门同财政主管部门一起不断改善产业生态系统的支撑架构。对中小企业给予专项数字化转型补助和税收优惠等扶持, 创建起区域性的开放型数字化服务平台, 从而有效缩减企业展开数字化改造的成本开支。急需加快创建全流程、标准化数据管理机制, 整合跨行业数据资源, 消除信息壁垒, 加强校企协同育人, 定向培养既有数字施工技能又有供应链管理能力的复合型人才。依靠信息化基础设施来探寻并推行区域供应链应急响应模式, 在突发事件之时改善资源调配效能, 保证产业链条的安全稳定运转。

本研究经过实证分析得出结论, 数字化技术是改善装配式建筑供应链韧性的重要支持性手段, 它的使用深度左右着供应链对于外界环境变动的适应速度和重新安排的速度, 而且动态能力就是供应链体系遇到冲击之后达成自我调节并重构的关键推动力量。产业链协同机制对企业抗风险能力提升起着积极作用, 完善的政策法规以及标准建设属于行业的可持续发展制度性保证。根据天津、浙江、山东等地的典型案例的研究结果可知, 目前行业还存在着很多亟待解决的问题。本研究从技术创新途径、资源配置改善以及风险防控等几个方面给出了相应的意见。研究成果可以给企业经营决策给予科学的支撑, 也能为政府部门制订产业扶持政策赋予实践参照, 助力行业朝着智能化方向前进并打造更高的韧性体系。

6. 结语

本研究从数字化转型入手, 分析它的影响因素及其对装配式建筑供应链韧性产生的作用机理。就该主题而言, 创建出一个涵盖数字化转型、动态能力和供应链韧性的理论分析架构, 进而产生一些研究假说。使用结构方程模型做实证研究来检验上面提出的假设是否有效、科学。

研究结果表明, 数字化转型可以提高供应链的韧性, 还可以促进企业动态能力在感知、认知和适应这三个方面共同发展。三个能力一起加强了企业的供应链韧性, 并且彼此之间存在着一定的交互影响。实证分析可以证明各个变量之间的因果联系, 也可以清楚地看出其内在逻辑链条。

就行业现状而言, 装配式建筑领域数字化的发展是不均衡的, 有明显的区域差异。中小企业在数字转型的时候多使用分散探索方式, 产业内各环节数据不能互相打通共享, 资源协调效率低。目前行业内主体还没有形成系统化的、常态化的风险识别和战略规划体系, 这就从某种程度上影响着供应链韧性建设。本研究所使用的截面数据只能对变量间的发展趋向有所显示, 并不能很好地体现其内部的影响因素。由于数字技术不断革新发展, 目前的评价体系还较为粗糙, 急需加以完善。建议以后的研究可以加入纵向面板数据或者典型案例的分析方法, 从企业规模等级、供应链层次等方面做多层次比较研究, 采用更加精确量化的方法工具, 探究装配式建筑行业供应链韧性成长的过程以及发展策略。

参考文献

- [1] 李福坤. 装配式建筑高质量发展的研究[J]. 工程与建设, 2024, 38 (2): 270-273.
- [2] 李倩, 张嫚, 李梅. 信息技术对供应链管理的影响探究[J]. 现代营销 (信息版), 2019, (09): 56-56.
- [3] 李梓元, 高拴平, 郭丹丹, 等. 数字经济、新质生产力与产业链供应链韧性[J]. 技术经济与管理研究, 2024, (12): 65-70.
- [4] 王薇. 采购与供应链平台的智慧化转型与实践[J]. 能源科技, 2025, 23 (06): 74-77.
- [5] 乔智, 谭淳丰, 王思雨, 等. 电子商务发展与审计师风险感知——基于国家电子商

- 务示范城市的准自然实验[J].中国注册会计师, 2025, (12): 47-55.
- [6] Teece D, Pisano G. The Dynamic Capabilities of Firms: an Introduction[J]. Industrial and Corporate Change, 1994, 3(3):537-556.
- [7] 高喜珍, 郑健彤.建筑企业转型升级动态能力的识别研究——基于验证性因子分析[J].价值工程, 2020, 39 (30): 21-23.
- [8] 邢雪娇, 张永成, 方鑫, 等.建筑工人心理负荷智能诊断与精准干预研究[J].中国安全生产科学技术, 2025, 21 (5): 124-131.
- [9] 宋健.装配式建筑产业链技术创新网络演化模型构建及仿真研究[J].科技与创新, 2022, (21): 115-118.
- [10] 章蓓蓓, 尹财鹏, 邵成, 等.装配式建筑供应链数字化转型对供应链韧性的影响机制和实证检验[J].安徽建筑大学学报, 2025, 33 (6): 75-86.