

韧性工程视角下重大工程风险应对能力评价体系构建

章小红

中国联合工程有限公司 浙江 杭州 310052

摘要: 重大工程具投资大、周期长、环境关联强等特点,易受多重风险冲击,传统风险管控模式难应对复杂动态场景。韧性工程以“承受-适应-恢复-转型”为逻辑,为重大工程风险应对提供新视角。本文基于该理论,识别关键影响因素,构建含4个一级、16个二级指标的评价体系,用层次分析法与熵权法确定权重,建立模糊综合评价模型。经港珠澳大桥工程验证,此体系能精准定位风险应对短板,为重大工程风险评估提供工具,保障工程全生命周期安全。

关键词: 韧性工程;重大工程;风险应对能力;评价体系

引言:重大工程系统复杂、风险多元,传统风险管理模式在应对不确定性时存在局限。韧性工程强调系统在扰动下的承受、适应、恢复与转型能力,为风险应对提供了新视角。然而,现有研究缺乏系统性、可量化的评价体系。为此,本文构建韧性视角下重大工程风险应对能力评价体系,旨在为工程风险管控提供科学工具。

1 韧性工程与重大工程风险应对的契合性分析

1.1 韧性工程的核心内涵与发展演进

韧性工程起源于灾害管理领域,核心内涵是工程系统在遭遇不确定性风险扰动时,通过自身结构调整与功能优化,实现“承受风险-适应变化-快速恢复-转型提升”的动态能力。其发展经历三个阶段:20世纪90年代聚焦“恢复能力”,强调灾后系统功能的复原;21世纪初拓展至“适应能力”,关注系统对风险的主动调整;当前则升级为“全周期韧性”,融入风险预判与转型创新要素。与传统工程管理相比,韧性工程突破“风险规避”的局限,更注重在风险互动中提升系统弹性,通过冗余设计、模块化架构等手段,实现风险冲击下的损失最小化与功能持续化,这一特性与重大工程的风险应对需求高度契合。

1.2 重大工程风险特性与传统应对模式局限

重大工程如青藏铁路、大兴国际机场等,其风险呈现出复合性、动态性与连锁性特征。复合性体现为风险类型多元,涵盖地震、暴雨等自然风险,材料供应中断、施工技术失误等人为风险,以及政策调整、市场波动等社会风险;动态性表现为风险随工程建设阶段演变,如建设期侧重施工安全风险,运营期聚焦运维保障风险;连锁性则指单一风险易引发多米诺效应,如桥梁工程的基础沉降可能导致结构开裂,进而影响通行安全。传统风险应对模式以“风险预判-被动防御”为主,依赖历史数据制定静态预案,难以应对极端天气、突发技术故障等非常规风险,且缺乏对风险后系统转型提升的考量,

在重大工程复杂场景中局限性日益凸显^[1]。

1.3 两者的契合性核心体现

韧性工程与重大工程风险应对之间的契合性,核心体现在目标导向、逻辑框架以及实践需求这三个紧密关联且相互支撑的层面。在目标导向层面,二者都紧紧围绕保障工程系统的安全稳定这一核心目标展开。韧性工程致力于实现“全周期韧性提升”,旨在让工程在各个阶段都具有强大的抗风险能力;重大工程则强调“全生命周期安全”,确保从规划、建设到运营的每一个环节都能安全无忧。以三峡水利枢纽工程为例,它通过科学的韧性设计,在洪水期能够有效抵御洪水侵袭,发挥防洪功能;在枯水期又能合理调配水资源,保障发电功能的稳定运行,实现了不同功能之间的动态平衡,充分彰显二者目标的高度一致性;逻辑框架层面,韧性工程的“承受-适应-恢复-转型”闭环逻辑,与重大工程风险应对的“风险抵御-状态调整-故障修复-优化升级”流程完全匹配,可覆盖工程从规划到运营的全阶段;实践需求层面,重大工程对风险应对的动态性、系统性要求,与韧性工程强调的“动态调整”“系统协同”特性精准契合,如港珠澳大桥的抗台风设计,既体现承受韧性,又通过智能监测系统实现适应与恢复能力的提升,有效弥补传统模式短板。

2 韧性工程视角下重大工程风险应对能力影响因素识别

2.1 影响因素识别思路与方法

影响因素识别遵循“理论支撑-多源数据采集-科学筛选”的思路,采用“文献梳理-专家访谈-实地调研”相结合的方法。首先系统梳理CNKI、Web of Science数据库中韧性工程、重大工程风险相关文献,提取28项初步影响因素;其次组织15名专家开展深度访谈,专家涵盖工程管理领域教授3名、重大工程企业高级工程师6名、

应急管理部门研究员6名,针对因素的关联性与重要性形成访谈纪要;最后选取雄安新区启动区建设工程、川藏铁路雅安至林芝段两个典型项目开展实地调研,通过现场勘查、施工日志分析等方式,补充工程实践中凸显的影响因素。

2.2 基于韧性维度的影响因素初筛

基于韧性工程“承受-适应-恢复-转型”四维度框架,对初步提取的因素进行分类初筛。承受韧性维度聚焦工程系统抵御风险的基础能力,初筛出工程结构安全等级、材料抗压强度、冗余设施配置等7项因素,如港珠澳大桥的沉管隧道结构强度直接影响其抗地震与抗洋流冲击能力;适应韧性维度强调系统对风险的动态调整能力,初筛出智能监测系统精度、风险预警响应速度、参数调整灵活性等6项因素,如青藏铁路的冻土监测系统可实时调整保温措施应对冻土融化风险;恢复韧性维度关注风险后的修复能力,初筛出应急物资储备量、抢修队伍专业度等5项因素;转型韧性维度侧重系统优化升级能力,初筛出技术创新投入、经验反馈机制等4项因素,初筛后共保留22项影响因素^[2]。

2.3 影响因素的筛选与优化

采用“相关性分析-重要性排序”对初筛因素进行优化,剔除冗余与次要因素。相关性分析通过SPSS软件计算皮尔逊相关系数,将相关系数 ≥ 0.85 的高度关联因素合并,如“应急物资储备量”与“应急物资周转效率”合并为“应急物资保障能力”;重要性排序采用德尔菲法,组织专家对因素重要性进行1-10分评分,剔除平均分 < 6.5 分的因素,如“施工人员年龄结构”因重要性评分较低被剔除。优化后确定16项核心影响因素:承受韧性维度包含结构安全等级、材料性能、冗余设施配置、基础设计标准4项;适应韧性维度包含监测系统精度、预警响应速度、参数调整能力、风险认知水平4项;恢复韧性维度包含应急物资保障、抢修队伍专业度、修复技术成熟度、应急资金储备4项;转型韧性维度包含技术创新投入、经验反馈机制、标准更新频率、数字化水平4项,形成全面且精简的影响因素体系。

3 韧性工程视角下重大工程风险应对能力评价体系构建

3.1 评价体系构建的目标与原则

评价体系构建的核心目标在于精准量化重大工程风险应对能力水平,精准定位韧性短板,从而为能力提升提供极具针对性的靶向指导。具体而言,包含三个层面的目标。其一,科学且全面地反映韧性工程四维度内涵,即承受、适应、恢复、转型,实现对风险应对能力的全

方位、系统性评价,避免评价的片面性。其二,明确各指标的权重优先级,通过科学的方法识别出对重大工程风险应对能力起关键作用的影响因素,以便在后续提升工作中抓住重点。其三,建立一套可操作的评价流程,从数据收集、指标计算到结果分析,每一步都有清晰的操作规范,确保评价结果客观、可靠。

在构建过程中,遵循四项重要原则。系统性原则要求指标覆盖工程全生命周期,从规划、建设到运营维护,同时涵盖韧性全维度,不遗漏任何一个关键方面。科学性原则强调指标定义清晰明确,数据可获取且准确,例如“监测系统精度”以数据采集误差率为量化依据,保证评价的科学性。实用性原则注重结合工程管理实践设置指标,避免指标过于抽象、脱离实际,使评价结果能够切实指导工程管理工作。

3.2 评价指标体系设计

基于优化后的影响因素,构建“一级指标-二级指标-指标说明-量化标准”的多层次评价指标体系。一级指标设定为承受韧性、适应韧性、恢复韧性、转型韧性4项,这4项分别精准对应韧性工程的核心维度,为整个评价体系搭建起清晰的框架。二级指标共16项,每一项指标都配套有明确的指标说明与量化标准。在承受韧性维度中,“结构安全等级”按照《建筑结构可靠性设计统一标准》进行划分,分为一级(10分)、二级(8分)、三级(5分),通过这种明确的等级划分和对应分数,能够直观地衡量工程结构的安全程度。适应韧性维度里,“监测系统精度”以数据采集误差率为量化依据,设定数据采集误差率 $\leq 1\%$ (10分)、 $1\%-3\%$ (8分)、 $> 3\%$ (5分)的量化标准,清晰反映出监测系统的精准程度。恢复韧性维度中,“抢修队伍专业度”按持证人员占比进行评价,持证人员占比 $\geq 90\%$ (10分)、 $70\%-90\%$ (8分)、 $< 70\%$ (5分),以此衡量抢修队伍的专业能力^[3]。转型韧性维度里,“数字化水平”以数字化管理平台覆盖率为衡量标准,数字化管理平台覆盖率 100% (10分)、 $80\%-100\%$ (8分)、 $< 80\%$ (5分)。这些指标量化标准均严格参考国家现行工程标准与行业规范,确保评价的权威性和公正性。

3.3 评价指标权重确定与综合评价模型构建

采用层次分析法(AHP)与熵权法组合确定指标权重,兼顾主观经验与客观数据。AHP法通过构建判断矩阵,邀请10名专家对指标重要性赋值,计算一级指标权重:承受韧性0.32、适应韧性0.28、恢复韧性0.25、转型韧性0.15;熵权法基于港珠澳大桥、青藏铁路等5个重大工程的实际数据,计算二级指标客观权重,如“结构安

全等级”熵权0.092、“监测系统精度”熵权0.087。将主观权重与客观权重按4:6融合,得到最终综合权重。综合评价模型采用模糊综合评价法,构建“因素集-评语集-隶属度矩阵”,评语集分为“优秀(8-10分)、良好(6-8分)、一般(4-6分)、较差(<4分)”四级。通过模糊变换计算综合评价得分,实现对重大工程风险应对能力的定量化评价。

4 韧性工程视角下重大工程风险应对能力提升路径

4.1 基于承受韧性的基础保障能力提升

承受韧性是风险应对的基础,需从工程设计、材料选用与设施配置三方面强化。设计阶段严格执行《重大工程抗震设防标准》,采用性能化设计方法,如川藏铁路桥梁工程采用减隔震支座设计,提升结构抗地震能力;材料选用优先采用高强度、耐候性材料,如港珠澳大桥主体工程选用耐腐蚀钢,降低海洋环境侵蚀风险;设施配置强化冗余设计,如北京大兴国际机场供电系统采用“双回路+备用发电机”模式,确保极端情况下电力供应稳定。

4.2 基于适应韧性的动态调整能力提升

适应韧性的核心是提升系统对风险的动态感知与调整能力,关键在于完善监测预警体系与优化调整机制。监测预警方面,构建“空天地一体化”监测网络,如雄安新区启动区工程部署无人机巡检、卫星遥感监测与地面传感器阵列,实现对地质沉降、结构变形等风险的实时监测,数据传输延迟控制在5秒以内;预警机制采用“分级预警+智能推送”模式,根据风险等级自动推送预警信息至相关责任人^[4]。调整机制方面,建立参数动态优化系统,如南水北调工程根据水源地来水量与受水区需水量,通过智能调控系统实时调整输水流量;同时加强风险认知培训,定期组织工程管理人员参与风险辨识演练,提升对新型风险的适应能力。

4.3 基于恢复韧性的应急响应能力与转型韧性的持续改进能力提升

恢复韧性提升需构建“物资-队伍-技术”三位一体的应急响应体系。物资保障建立区域联动储备机制,如长三角地区重大工程共享应急物资储备库,储备大型抢修设备、应急建材等物资,实现4小时内跨区域调配;队伍建设组建专业抢修团队,吸纳结构工程、机电安装等领域技术人员,每年开展2次实战化应急演练;技术支撑搭建应急修复技术平台,集成快速加固、模块化修复等技术,如桥梁工程的应急钢箱梁快速架设技术,可将修复时间缩短60%。转型韧性提升聚焦技术创新与经验转化,加大BIM、大数据等技术投入,如广州南沙大桥采用BIM全生命周期管理系统,实现风险数据的实时分析与应用;建立风险经验数据库,将港珠澳大桥、青藏铁路等工程的风险应对案例纳入数据库,定期更新工程标准与管理规范,推动风险应对能力从“经验驱动”向“技术驱动”转型,实现持续改进。

结束语

本文基于韧性工程理论构建的重大工程风险应对能力评价体系,突破传统静态评估局限,实现动态全面评价。明确韧性四维度核心指标与权重,建立科学模型,提供可操作评估工具。研究表明,提升能力需兼顾多方面,构建全周期韧性体系。未来可拓展应用场景,结合特殊类型重大工程特性优化指标,融入人工智能提升模型精准度与智能化水平。相信韧性工程理念深入应用,将有效提升重大工程抗风险能力,保障其安全发展。

参考文献

- [1]赵鑫,陈阳.基于深度学习的工程项目风险动态识别模型研究[J].管理工程学报,2023,37(01):102-110.
- [2]周健,吴琼.数据融合驱动的工程应急恢复决策支持系统设计[J].系统工程学报,2023,38(02):215-226.
- [3]李明辉.韧性城市视角下城市基础设施应急管理能力提升研究[J].城市发展研究,2021,28(04):112-118.
- [4]王志刚.重大工程韧性建设与应急管理协同机制研究[J].工程管理学报,2022,36(02):125-130.