

中文引用格式:张思远,喻博,李睿璞,等. 基于 GRA-SD 桥梁工程参建主体组织安全行为脆弱性及韧性分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 41-49.

英文引用格式:ZHANG Siyuan, YU Bo, LI RuiPu, et al. Vulnerability and resilience analysis of safety behavior of organizations participating in bridge engineering based on GRA-SD [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 41-49.

基于 GRA-SD 桥梁工程参建主体组织安全行为 脆弱性及韧性分析*

张思远¹讲师, 喻博^{**2}讲师, 李睿璞²副教授, 王群²教授

(1 广州科技职业技术大学 建筑工程学院, 广东 广州 510550;

2 深圳职业技术大学 建筑工程学院, 广东 深圳 518055)

中图分类号: X922; U447

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.0079

基金项目: 国家自然科学基金资助(52078305); 教育部人文社科青年基金资助(20YJCZH074); 广东省哲学社会科学规划项目(GD24YGL26); 广东省教育厅科研项目(2023WCXTD037)。

【摘要】 为确保桥梁工程施工安全生产投入有效落实, 首先利用灰色关联法(GRA)分析项目监理机构和施工单位施工安全行为影响因素的关联度, 并确定核心致因要素; 然后, 构建系统动力学(SD)模型分析各核心致因要素之间的相互作用机制; 最后, 分析影响施工安全行为的核心致因要素的脆弱性和韧性。结果表明: 施工单位两极化罚款、项目监理机构高额监管成本、双方较低的初始比例是桥梁工程施工安全行为的脆弱点; 适度的经济罚款和监管成本以及加大培训提高一线人员的安全意识, 对提升施工安全行为韧性具有明显效果。

【关键词】 灰色关联法(GRA); 系统动力学(SD); 桥梁工程; 参建主体; 安全行为; 脆弱性; 韧性; 施工单位; 项目监理机构

Vulnerability and resilience analysis of safety behavior of organizations participating in bridge engineering based on GRA-SD

ZHANG Siyuan¹, YU Bo², LI RuiPu², WANG Qun²

(1 School of Construction Engineering, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong 510550, China; 2 School of Construction Engineering, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen Guangdong 518055, China)

Abstract: To effectively implement safety production investment in bridge construction projects, GRA was used to analyze the correlation between the influencing factors of construction safety behavior from both the project supervision organization and construction units, and then the core causal factors were determined. Subsequently, a SD model was proposed to investigate the interaction mechanisms among the core causal factors. Finally, the vulnerability and resilience of the core causal factors affecting construction safety behavior were analyzed. The results indicated that extreme fines imposed by construction units, high supervision costs for project monitoring organizations, and low initial proportions between parties were the

* 文章编号: 1003-3033(2024)09-0041-09; 收稿日期: 2024-03-14; 修稿日期: 2024-06-18

** 通信作者: 喻博(1994—), 男, 湖南长沙人, 博士, 讲师, 主要从事可持续工程建设与管理方面的研究。E-mail: yubo0011@szpu.edu.cn。

key vulnerability factors of the safety behavior in bridge construction. Reasonable economic fines, appropriate supervision costs, and enhanced training to improve frontline personnel's safety awareness significantly improved the construction safety behavior resilience.

Keywords: grey relational analysis (GRA); system dynamics (SD); bridge engineering; main participants; safety behavior; vulnerability; resilience; construction unit; project supervision organization

0 引言

桥梁工程服役地域通常环境复杂,参建主体多,管理难度大、效力低,使得桥梁工程施工过程面临诸多安全技术和风险,且安全事故频发^[1-2]。从近年来的桥梁工程施工安全事故调查分析结果来看,施工安全管理风险是导致事故发生的主要原因^[3]。根据安全系统论的“四因素”观点^[4],参建主体管理的欠缺是导致事故发生的重要因素甚至是直接因素,对人、物和环境都会产生重要影响^[5]。由于桥梁工程施工复杂的作业环境和众多利益联动的参建主体,使得各参建主体的安全行为被认为是施工现场开展安全管理的重要途径,对预防安全事故的发生至关重要^[6]。项目施工阶段各参建主体的决策行为受到决策环境的不确定性影响,同时,决策因素之间存在的规则制约和利益联动也会影响参建主体的决策判断,进而影响其决策行为^[7]。因此,部分学者开展了相关研究,如张跃斌等^[8]研究了政府部门强弱监管与施工单位的应对策略;GU Shengyu 等^[9]研究了业主、监理单位和承包商的相互影响机制;张仕廉等^[10]分析影响施工安全管理行为的关键因素;申玲等^[11]探索了影响承包商安全生产投入的关键因素。综上,现有研究推动了施工阶段安全管理体系的逐步完善,但是,其主要关注建筑工程施工阶段各参建主体的施工安全管理,而鲜有聚焦桥梁工程的,同时,对安全生产投入费用的界定不够清晰,甚至忽视了安全生产投入费用对施工阶段各参建主体施工安全管理的影响。

鉴于此,笔者拟基于灰色关联法(Grey Relation Analysis, GRA),识别影响桥梁工程施工阶段参建主体安全行为的核心致因要素;再从安全生产投入监管的视角,以监理单位和施工单位的利益诉求为核心,建立系统动力学(System Dynamics, SD)仿真模型,分析监理单位和施工单位的施工安全行为的脆弱性和韧性,并基于分析结果进行单要素和策略组合分析,以期为我国桥梁工程施工阶段的安全管理提供理论参考。

1 安全行为致因要素识别与参数确定

1.1 主体关系和安全行为

工程参建主体是指参与工程项目建设并对参建项目承担特定法律责任的单位。各参建主体在工程施工中担任不同角色,并承担相应责任。工程施工阶段通常涉及多个参建主体,主要的参建主体有业主方、施工单位和监理单位^[12],三者之间的关系如图1所示。

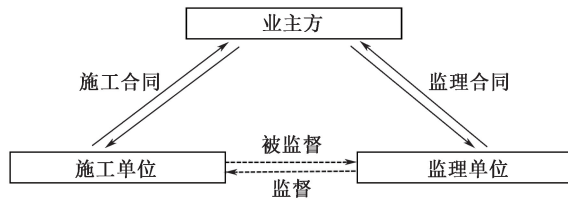


图1 工程项目施工阶段的主要参建主体

Fig. 1 Main participants during engineering project construction phases

施工现场常驻方主要为施工单位和监理单位指派的项目监理机构,二者均为有限理性人。施工单位从自身利益出发,对于安全生产通常会选择“少投入多报账”的策略,以获取更多的收益,达到降低施工成本的目的。对于项目监理机构而言,也会在合适的时机为施工单位提供“方便”,以谋取更多的利益。因此,双方行为对工程项目施工阶段的安全管理实施效果至关重要^[13]。

施工安全行为是指为确保工程施工过程中的安全,参建主体在施工过程中面对外界刺激做出理性的、不对自己和其他参建主体产生损害,遵守施工合同、行业规范、国家规范、法规的行为反应。研究对象是工程项目施工阶段的参建主体组织,因此,施工安全行为更倾向于组织安全行为(简称安全行为)。

1.2 要素识别与参数确定

GRA能够量化各要素之间的关联度,从而识别出影响安全科学系统发展态势的核心致因要素,因此,采用GRA分析和处理样本数据。首先,基于文献综述和专家访谈识别出影响参建主体施工安全行

为的致因要素,见表 1。然后,邀请来自桥梁工程项目 10 位施工单位的项目总工程师和工程部长以及 10 位项目监理机构的总监和专监,针对所识别出来的致因要素进行两两重要性比较打分,结果见表 2。最后,对专家打分数据作无量纲化处理,并根据下式计算灰色关联系数 σ_{ij} 和各要素之间的灰色关联度 r_j 。

$$\sigma_{ij} = \frac{i_{\min} |u_{ij} - u_{i1}| + \rho i_{\max} |u_{ij} - u_{i1}|}{|u_{ij} - u_{i1}| + \rho i_{\max} |u_{ij} - u_{i1}|} \quad (1)$$

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_{ij}}{m}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: i 为第 i 位评分专家; j 为第 j 个影响施工安全行为的致因要素; i_{\min} 为同一致因要素评价指标下对应专家评分值的最小值; i_{\max} 为同一致因要素评价指标下对应专家评分值的最大值; μ_{ij} 为评价专家 i 对致因要素 j 的评分值; ρ 为削弱最大最小化极差导致关联系数失真而引入的分辨系数,取 $\rho = 0.5$; m 为评分专家的总数; n 为影响施工安全行为致因要素的总数。

表 1 致因要素及文献来源

Table 1 Causal factors in literature

序号	致因要素	文献来源
1	监管成本 J_b 、安全生产投入成本 S_b	张跃斌 ^[8] 、申玲 ^[11] 等
2	奖励 J_j 、罚款 S_f	王志强 ^[5] 、陈述 ^[6] 等
3	安全人员初始比例 Y (施工单位)、 X (项目监理机构)	CHEN Fangyu ^[4] 、GU Shengyu ^[9] 等
4	事故发生率 P	王志强 ^[12] 、MJAKUSKINA S ^[14] 等
5	事故发生后对本单位的损失 S_s (施工单位)、 J_s (项目监理机构)	陈雍君 ^[13] 、PENG Wang ^[15] 等

表 2 专家评分

Table 2 Expert rating

样本量	S_b/J_b	S_f/J_j	S_s/J_s	Y/X	P
专家 1	8/9	7/9	9/8	9/9	6/6
专家 2	8/9	8/8	8/9	9/8	7/7
专家 3	8/8	7/8	9/7	8/8	5/6
专家 4	7/9	8/8	8/9	9/9	8/8
专家 5	7/8	8/7	8/9	8/8	6/6
专家 6	9/8	8/8	9/8	9/9	7/7
专家 7	8/9	7/8	9/9	9/8	6/7
专家 8	8/8	8/9	8/8	8/8	5/6
专家 9	8/7	7/9	7/9	9/9	7/7
专家 10	9/9	9/8	8/8	9/8	9/9

基于式(1)和式(2),计算得到桥梁工程施工安全行为致因要素的灰色关联度,如图 2 所示。关联度越大,比较序列和参考序列的变化趋势越相同,与桥梁工程施工现场安全生产的关系越密切。研究结果显示:项目监理机构与施工安全行为相关的 5 个核心要素的 $r_j = (0.83, 0.77, 0.8, 0.82, 0.72)$,按照关联度大小排序依次为:监管成本>安全人员初始比例>事故发生后对本单位的损失>奖励>事故发生率;施工单位与施工安全行为相关的 5 个核心要素的 $r_j = (0.87, 0.76, 0.8, 0.91, 0.68)$,按照关联度大小排序依次为:安全人员初始比例>安全投入成本>事故发生后对本单位的损失>罚款>事故发生率。

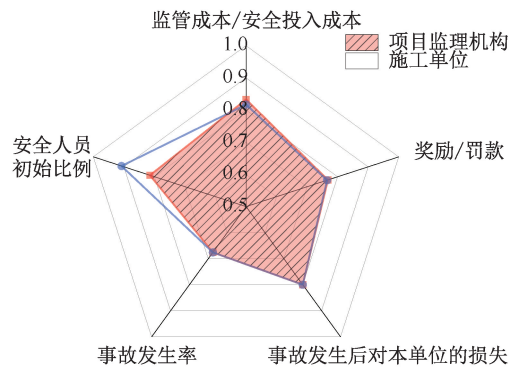


图 2 致因要素灰色关联度

Fig. 2 Grey correlation degree of causal factors

2 SD 模型构建及流程图

根据致因要素灰色关联度分析结果,将施工单位真实安全投入成本、罚款、安全人员初始比例以及项目监理机构监管成本、安全人员初始比例分别确定为影响施工单位和项目监理机构施工安全行为的核心致因要素。同时,根据各核心致因要素之间的灰色关联度大小,构建演化博弈 SD 仿真模型。模型包括水平变量、速率变量、辅助变量和常量,见表 3。

2.1 基本假设

1) 博弈主体。施工单位 S 和项目监理机构 J , 双方多次反复博弈,不断寻找最优行为策略。

2) 项目监理机构的行为策略。严格监管和形式监管,对应的概率分别为 $x(0 \leq x \leq 1)$ 和 $1-x$,其中,严格监管是指项目监理机构严格按照合同要求对施工单位的施工过程进行符合国家规范与标准的监督管理,而形式监管则刚好相反。

3) 施工单位的行为策略。规范安全投入和不规范安全投入,对应的概率分别为 $y(0 \leq y \leq 1)$ 和

表3 施工安全行为演化博弈SD仿真模型的变量

Table 3 SD simulation model variables for construction safety behavior evolutionary game

变量类型	变量名称
水平变量 (4个)	项目监理机构—严格监管;项目监理机构—形式监管; 施工单位—规范安全投入;施工单位—不规范安全投入
速率变量 (2个)	项目监理机构严格监管变化率 $F(x)$; 施工单位规范施工变化率 $F(y)$
辅助变量 (8个)	项目监理机构对施工单位采取严格监管策略的期望收益 U_{11} 、采取形式监督的期望收益 U_{12} 、期望收益差 U_1 ; 施工单位规范安全投入的期望收益 U_{21} 、不规范安全投入的期望收益 U_{22} 、期望收益差 U_2 ; 影子变量 (x, y)
外部变量 (17个)	施工单位按规范标准及合同要求完成施工任务的正常收益 S_z ; 项目监理机构按规范标准及合同要求完成监管任务的正常收益 J_z ; 项目监理机构对施工单位进行安全施工监管的成本 J_b ; 施工单位根据施工合同规定应对项目投入的安全生产费用 S_b ; 施工单位对项目实际投入的安全生产费用 S_c ; 施工单位未规范安全投入,被项目监理机构查处后受到的经济惩罚 S_f ; 项目监理机构严格监管得到的奖励 J_j ; 施工单位未规范安全投入,被项目监理机构发现的概率 P_1 ; 项目监理机构严格监管,施工单位未规范安全投入且未被发现发生的安全事故概率 P_2 ; 项目监理机构在 P_2 情况下产生的损失 J_{s2} ; 施工单位在 P_2 情况下产生的损失 S_{s2} ; 项目监理机构未严格监管,施工单位规范安全投入发生的安全事故概率 P_3 ; 项目监理机构在 P_3 情况下产生的损失 J_{s3} ; 施工单位在 P_3 情况下产生的损失 S_{s3} ; 项目监理机构未严格监管,施工单位未规范施工发生的安全事故的概率 P_4 ; 项目监理机构在 P_4 情况下产生的损失 J_{s4} ; 施工单位在 P_4 情况下产生的损失 S_{s4}

$1-y$,其中,规范安全投入是指施工单位严格按照施工合同要求对施工现场进行全额专款专项的安全生产投入,而不规范安全投入则刚好相反。

4) S_b 由业主方单独提供,为不可竞争性费用,采取实报实销的方式,剩余部分归业主所有,令 $\Delta S = S_b - S_c$ 。

2.2 模型及流图构建

基于文献[16],结合灰色关联度分析结果以及《企业安全生产费用提取和使用管理办法》(财资[2022]136号),构建桥梁工程施工阶段项目监理机构和施工单位的博弈收益矩阵,见表4。

项目监理机构严格监管水平由严格监管变化率决定, U_{11} 、 U_{12} 、 U_1 为严格监管变化率的辅助变量,其通过改变项目监理机构严格监管变化率来发挥作用。其中, U_{11} 由 y (影子变量)、收益、监管成本、绩效奖金、事故损失 (P_2 对应的损失)、事故发生概率 (P_1 、 P_2) 决定; U_{12} 由 y 、收益、事故损失 (P_3 、 P_4 对应的损失)、事故发生概率 (P_3 、 P_4) 决定; U_1 由 U_{11} 和 U_{12} 决定。

施工单位规范安全投入水平由施工单位的规范

表4 项目监理机构和施工单位的博弈收益矩阵

Table 4 Game benefit matrix between project supervision organization and construction unit

名称		S		
		y	1-y	
			被发现 P_1	未被发现 ($1-P_1$)
项目 监理 机构 (J)	x	$J_z - J_b$, $S_z - S_b$	$J_z - J_b + J_j$, $S_z - S_c - S_f$	$J_z - J_b - P_2 \times J_{s2}$, $S_z - S_c - P_2 \times S_{s2}$
	1-x	$J_z - P_3 \times J_{s3}$, $S_z - S_b -$ $P_3 \times S_{s3}$	$J_z - P_4 \times J_{s4}$, $S_z - S_c - P_4 \times S_{s4}$	

施工变化率决定, U_{21} 、 U_{22} 、 U_2 为规范施工变化率的辅助变量。其中, U_{21} 由 x (影子变量)、收益、安全成本、事故损失 (P_3 对应的损失)、事故发生概率 (P_3) 决定; U_{22} 由 x 、收益、实际安全投入成本、罚款、事故损失 (P_2 、 P_4 对应的损失)、发事故生概率 (P_2 、 P_4) 决定。 U_2 由 U_{21} 和 U_{22} 决定。

根据项目监理机构和施工单位施工安全行为变化的相互作用关系,构建桥梁工程施工阶段参建主体施工安全行为演化博弈SD仿真模型,如图3所示。

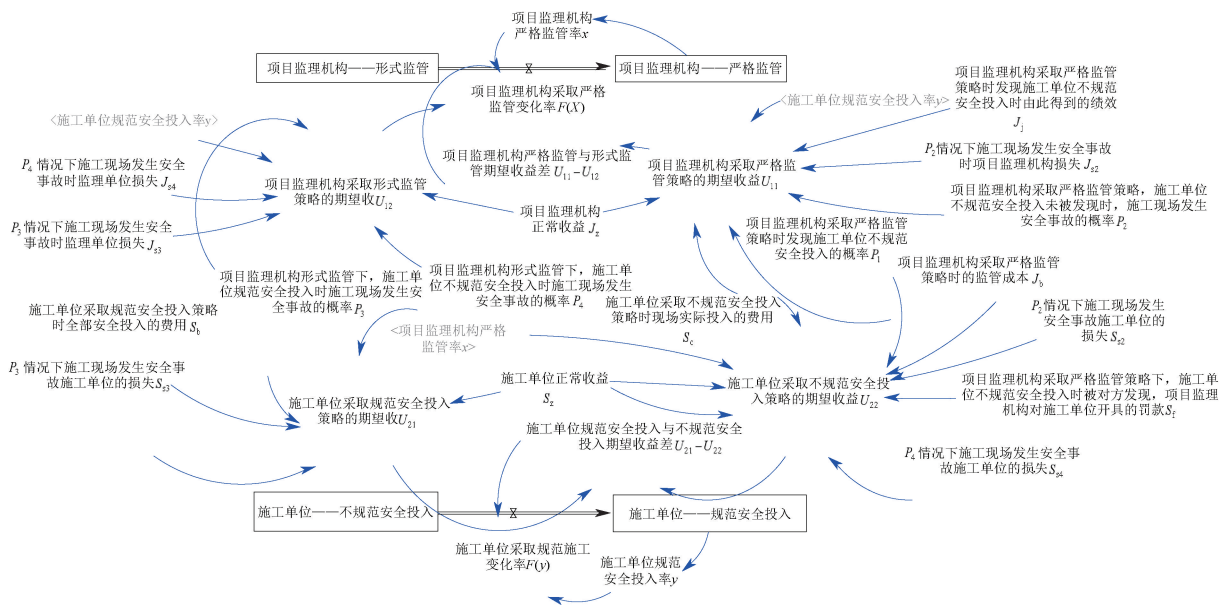


图 3 施工安全行为演化博弈 SD 仿真模型

Fig. 3 SD simulation model of construction safety behavior evolutionary game

3 施工安全行为脆弱性分析

基于上述所构建的桥梁工程施工安全行为演化博弈 SD 仿真模型,分析项目监理机构和施工单位的施工安全行为的脆弱性。施工安全行为脆弱性是指项目监理机构和施工单位在受到桥梁工程施工安全行为核心致因要素影响时发生安全生产事故的可能性。

3.1 模型仿真条件

根据事故发生可能性等级标准中的相关规定, P_2 、 P_3 为项目监理机构和施工单位两者中的一方在尽职情况下,事故发生的概率等级为偶然,取其中间值 0.01, P_4 属于可能发生的范畴,取其中间值 0.1。其他变量则根据实际工程中各参与方的费用形成和相应关系,同时参考《中国建筑业统计年鉴》《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》和部分学者的研究成果^[14-16],将项目施工阶段作为仿真时长,并将仿真时长设置为 60 个月。

为表达清晰,从数据分析图中取前 20 个月进行分析,项目监理机构和施工单位的初始概率分别取 $x=0.61$, $y=0.29$,仿真结果如图 4 所示。结果显示:项目监理机构的主导策略是形式监管,而施工单位的策略则趋向于规范安全投入,双方策略可达到各自稳定均衡,这表明该模型无演化稳定均衡点。为引导施工单位在趋向于规范安全投入的同时,项目监理机构趋向于严格监管,以此模型为基础分别

灰色关联度较高的 3 个核心致因要素(经济奖惩、行为成本和初始比例)分析施工单位和项目监理机构的施工安全行为的脆弱性。

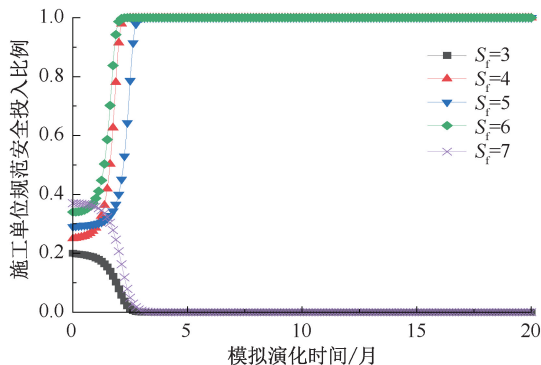


图 4 S_f 对演化博弈结果的影响

Fig. 4 Effects of S_f on evolutionary game results

3.2 施工安全行为脆弱性分析

3.2.1 经济罚款要素脆弱性分析

在其他要素保持不变的前提下,随着 S_f 的初始值由 5 变化为 7,博弈鞍点由 (0.61, 0.29) 变化为 (0.69, 0.37),演化博弈结果如图 4 所示。研究结果显示,随着经济处罚力度的增强,对于施工单位而言,处罚所带来的经济损失会提升其安全生产投入的积极性,重视安全生产投入的比例会逐渐收敛于 1。此外,当 S_f 增至 7 时,尽管加快了达到演化均衡的速率,但策略选择趋于反方向并收敛于 0,表明惩罚力度过大会使施工单位质疑处罚实施的真实性而

增加施工单位对不规范安全投入行为的试探,不利于施工单位自身安全体系的建立和项目监理机构的监管。

在其他要素保持不变的前提下,随着施工单位 S_c 的初始值由 5 变化为 3,博弈鞍点由 (0.61, 0.29) 变化为 (0.56, 0.20), 演化博弈结果如图 4 所示。研究结果显示:随着处罚力度减弱,施工单位规范施工重视安全生产投入的比例有所下降并逐渐趋于 0,高额诱人的利益和“罚款才有几个钱”的心理反差,使得施工单位会出现对安全生产投入费用过度追求利益的现象,导致通常会忽视由此带来的罚款和未知风险。

3.2.2 行为成本要素脆弱性分析

在其他要素保持不变的前提下,随着项目监

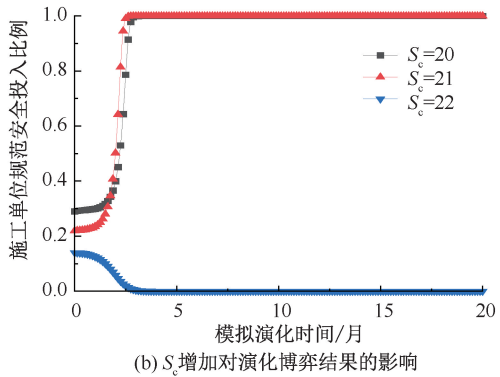
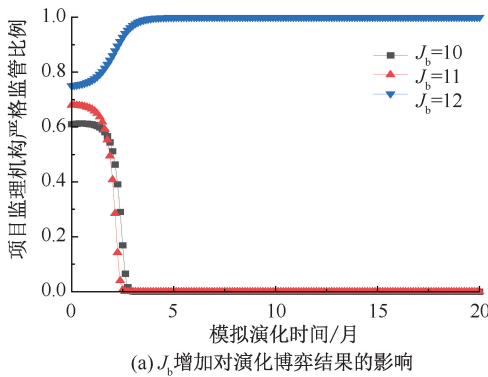


图 5 行为成本增加对演化博弈结果的影响

Fig. 5 Effects of behavioral cost increase on evolutionary game results

在其他要素保持不变的前提下,随着项目监 理机构 J_b 的初始值由 10 变化为 8,施工单位 S_c 的初始值由 20 变化为 18,博弈鞍点由 (0.61, 0.29) 变化为 (0.48, 0.44), 演化博弈结果如图 6 所示。由图 6a 可知:随着监管成本的降低,项目监理机构由惰性及利益至上心态逐渐转变为严格监管,

付出更少成本就能达到合同约定效果,因此,严格 监管的比例明显提高并收敛于 1。由图 6b 可知: 施工单位重视安全行为策略是典型的付出型决 策,随着 S_c 减弱, ΔS 增加,利益至上心态使得施 工单位“照章办事”积极性减弱,重视安全的比例降 低并趋向于 0。

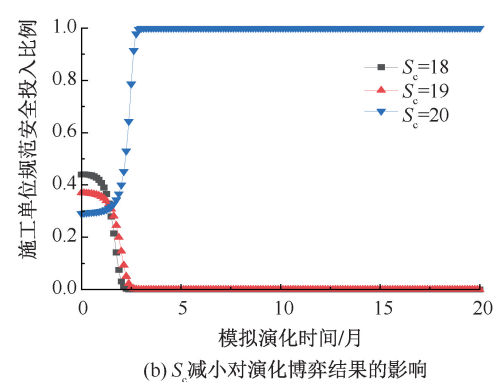
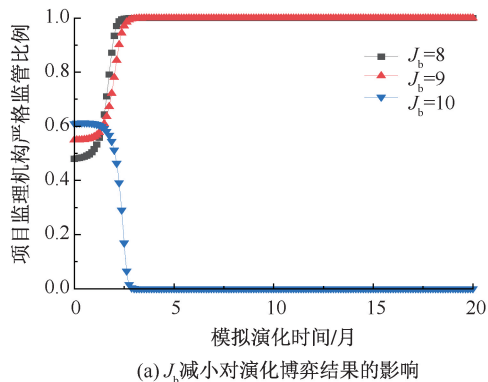
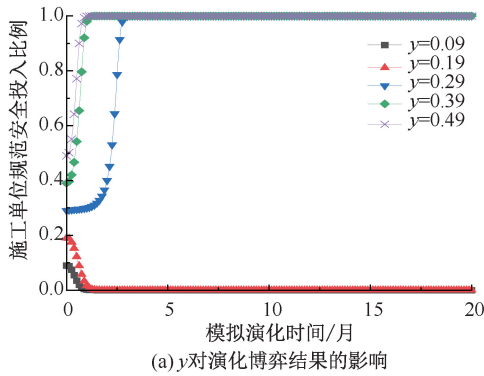


图 6 行为成本减小对演化博弈结果的影响

Fig. 6 Effects of behavioral cost reduction on evolutionary game results

3.2.3 初始比例要素脆弱性分析

初始比例对演化博弈结果的影响如图7所示。图7a中,施工单位策略选择在鞍点 $y = 0.29$ 附近取值,从 $0.09 \sim 0.49$ 取值范围内观察施工单位重视安全生产投入的初始比例对施工安全行为选择的影响。



研究结果显示,在 0.2 附近存在趋向于对立行为的阈值,当初始比例小于该阈值时,施工单位的策略选择倾向于 0 ;相反,当初始比例大于该阈值时,策略选择倾向于 1 。由此可知,提高施工单位重视安全生产投入的初始比例能有效确保施工现场安全。

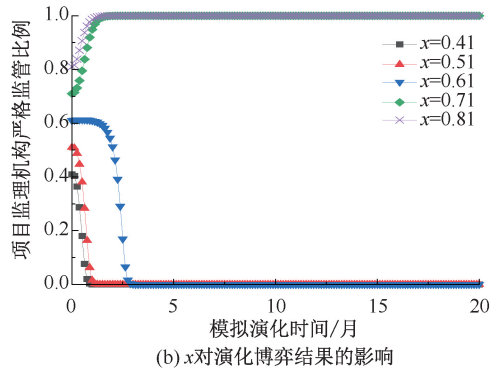


图7 初始比例对演化博弈结果的影响

Fig. 7 Effects of initial proportions on evolutionary game results

图7b中,项目监理机构策略选择在鞍点 $x = 0.61$ 附近取值,从 $0.41 \sim 0.81$ 取值范围内观察项目监理机构严格监管的初始比例对施工安全行为选择的影响。研究结果显示,在 0.6 附近存在趋向于对立行为的阈值,当项目监理机构严格监管的比例小于 0.6 时,选择曲线初期有明显的保持原状现象,最终仍会收敛于 0 ,即最终的策略选择是形式监管;当严格监管的初始比例大于 0.6 时,项目监理机构选择曲线最终会收敛于 1 ,即策略选择是严格监管。

始比例可有效降低稳定均衡所需的时间,对组合策略中的其他应对策略能起到正向作用。基于研究结果可知:对项目监管人员定期开展安全培训能够有效促使项目监理机构的风险水平趋于稳定,并具有韧性。

4 施工安全行为韧性分析

根据核心致因要素对施工安全行为的脆弱性分析结果,分别分析项目监理机构和施工单位采取对应策略后的施工安全行为的韧性。施工安全行为韧性是指项目监理机构和施工单位在受到桥梁工程施工安全行为核心致因要素影响时,采取相应策略有效降低安全生产事故发生的程度。

4.1 项目监理机构

根据脆弱性分析结果,针对项目监理机构选取的应对策略分别为增加绩效奖励、降低监管成本和提高初始比例。在上述应对策略下,项目监理机构采取严格监管行为的韧性分析结果如图8所示。研究结果显示,增加绩效奖励、降低监管成本和提高初始比例3个应对策略的叠加效果明显,但应对策略的叠加顺序对结果影响不大。此外,2个应对策略的叠加效果介于3个应对策略的叠加效果和单一应对策略的实施效果之间。研究结果还表明:提高初

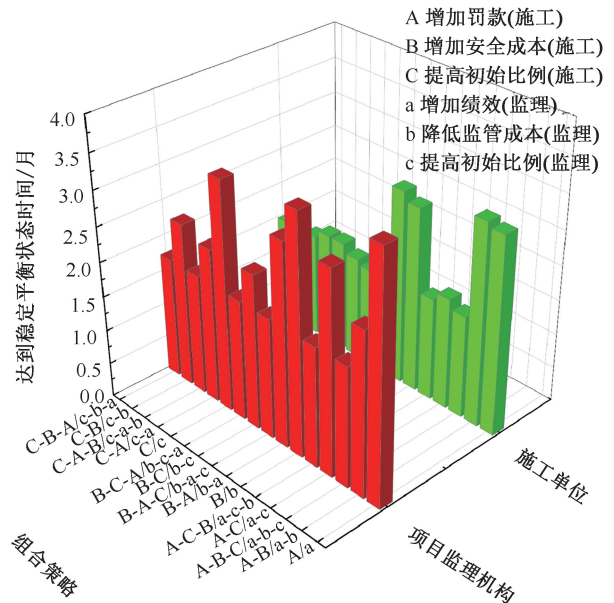


图8 韧性分析结果

Fig. 8 Resilience analysis results

4.2 施工单位

根据脆弱性分析结果,针对施工单位选取的应对策略分别为适度增加罚款、增加实际安全生产投入和提高初始比例。在上述应对策略下,施工单位规范安全生产投入的韧性分析结果(图8)显示,部

分组合策略具有一致性且达到稳定均衡的时间较长,同时,采取适度加强罚款、增加实际安全生产投入的用对策略没有产生叠加效果且效应不明显。相反,初始比例对应策略的组合效果影响较大,可快速达到稳定均衡状态。基于研究结果可知:通过定期开展安全培训、实操考核增加施工人员的初始比例可以提升施工单位的整体素质和安全意识,同时提升其他应对策略的实施效果,以提升施工单位施工安全行为的韧性。

5 结 论

1) 所研究的参建主体双方在自身利益与安全风险之间进行全过程动态博弈,安全行为曲线走势取决于核心致因要素的大小。因此,制定有效的安全监管方案应充分考虑不同核心致因要素的影响,保证双方在博弈中长期稳定做出公众所期待的选择。

2) 经济奖惩、行为成本和初始比例是影响项目监理机构和施工单位施工安全行为的核心致因要素,其中,初始比例的影响最大。

3) 施工单位未规范安全投入受到的经济惩罚并非越高越好,重罚和轻罚均会造成监管失效,同时,适罚代管可以起到监管和服务的作用,经济惩罚应遵循适度原则;安全成本投入是付出型决策,当监管成本发生波动,双方会在一定范围内追求更高获利;初始比例不仅能有效提升人员的安全意识,而且还能提升其他应对策略的实施效果,最终达到严格监督和规范安全投入的“双赢”局面。

4) 文中存在的局限性主要为缺少对实际桥梁工程项目开展实证研究,因此,在后续的研究中应收集相关典型案例数据,进一步探索施工单位和项目监理机构在桥梁工程施工过程中采取不同的安全行为应对策略的演化路径,使研究结果更能有效指导实践。

参 考 文 献

- [1] 周海怡, 鲍全贵, 叶茂, 等. 基于组合赋权法的城市桥梁可靠性模糊综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增1): 156-161.
ZHOU Haiyi, BAO Quanguai, YE Mao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of urban bridge reliability based on combination weighting method[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 156-161.
- [2] 李海文, 鲍学英. 基于动态权重-二维云模型的川藏铁路桥梁施工风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1 650-1 660.
LI Haiwen, BAO Xueying. Risk assessment of Sichuan-Tibet railway bridge construction based on dynamic weight and 2-D cloud model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1 650-1 660.
- [3] 王飞球, 黄健陵, 符竞, 等. 基于BP神经网络的跨既有高速铁路桥梁施工安全风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(5): 1 129-1 136.
WANG Feiqiu, HUANG Jianling, FU Jing, et al. Risk assessment of construction safety of high-speed railway bridge across existing lines based on BP neural network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(5): 1 129-1 136.
- [4] CHEN Fangyu, WEI Yongchang, JI Hongchang, et al. A multiplex network based analytical framework for safety management standardization in construction engineering [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 59: DOI: 10.1016/j.aei.2023.102278.
- [5] 王志强, 刘硕, 马婷婷, 等. 风险偏好视角下地铁施工安全群体行为博弈研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 138-144.
WANG Zhiqiang, LIU Shuo, MA Tingting, et al. Study on behavioral game of metro construction safety groups under perspective of risk preference[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 138-144.
- [6] 陈述, 任亚萍, 席炎, 等. 动态惩罚机制下企业安全生产行为演化分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 51-57.
CHEN Shu, REN Yaping, XI Yan, et al. Evolutionary analysis on work safety behavior in firms under dynamic punishment Mechanism[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 51-57.
- [7] LI Xinhong, MA Jie, HAN Ziyue, et al. Application of game theory in risk management of urban natural gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: DOI:10.1016/j.jlp.2023.105037.

- [8] 张跃斌, 易欣, 宋璋玉, 等. 基于 SD 的装配式建筑施工安全监管演化博弈研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 149-155.
ZHANG Yuebin, YI Xin, SONG Zhangyu, et al. Research on evolutionary game of safety supervision for prefabricated building construction based on SD[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3): 149-155.
- [9] GU Shengyu, ZHANG Pan, YANG Jianying. System dynamics model based on evolutionary game theory for quality supervision among construction stakeholders [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 24(4): 318-330.
- [10] 张仕廉, 聂李琴. 基于 DEMATEL 方法的建筑施工安全管理行为影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 121-125.
ZHANG Shilian, NIE Liqin. Influence factors of safety management behaviors of building construction by using DEMATEL method[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(1): 121-125.
- [11] 申玲, 孙其珩, 吴立石. 基于博弈关系的建筑安全投入监管对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(7): 110-115.
SHEN Ling, SUN Qiheng, WU Lishi. Study on supervision strategies for construction safety investment based on game theory[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(7): 110-115.
- [12] 王志强, 张樵民, 有维宝. 装配式建筑政府激励策略的演化博弈与仿真研究: 基于政府补贴视角下[J]. 系统工程, 2019, 37(3): 151-158.
WANG Zhiqiang, ZHANG Qiaomin, YOU Weibao. Evolutionary game and simulation of government incentive strategies for prefabricated buildings: from the perspective of government subsidies[J]. Systems Engineering, 2019, 37(3): 151-158.
- [13] 陈雍君, 王璐琳, 王卫东, 等. 高铁四电建设工程信息共享演化博弈分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 44-52.
CHEN Yongjun, WANG Lulin, WANG Weidong, et al. Analysis and research on evolutionary game of information sharing in railroad electrification construction engineering[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 44-52.
- [14] MJAKUSKINA S, KAVOSA M, LAPINA I. Achieving sustainability in the construction supervision process[J]. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2019, 5(3): DOI:10.3390/joitmc5030047.
- [15] PENG Wang, YANG Weijun. Research on safety accidents in bridge construction based on safety rheology and mutation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204/205/206/207/208: 2 162-2 166.
- [16] 龙彦江, 彭鹏, 马羚, 等. 安全管理行为对安全管理绩效影响分析方法[J]. 工程管理学报, 2020, 34(3): 103-108.
LONG Yanjiang, PENG Peng, MA Ling, et al. Analysis for impact of safety management behaviors on safety management performance[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(3): 103-108.

作者简介: 张思远 (1992—), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 讲师, 主要从事可持续工程建设与管理、桥梁结构设计理论与工程应用方面的研究。E-mail: zhangsiyuan@gkd.edu.cn。

