

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201910022



施工现场台风风险系统动力学的 预测管控体系

邹丰秋, 王晨

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了有效降低台风环境下施工现场的风险, 基于系统动力学模型构建施工现场台风风险预测管控体系. 通过选取台风环境下影响施工现场安全的主要风险因素, 利用层次分析法(AHP)-熵权求组合权重分析风险体系中各个风险因素的权重, 确定关键风险. 采用系统动力学模型动态仿真施工现场台风风险值随时间的变化, 并模拟确定风险控制的最佳时间, 以及对比分析不同控制措施对降低风险值的效果. 结果表明: 管理风险是影响台风环境下施工现场的关键因素, 台风前进行风险管控应重点关注管理风险; 采取对应的控制措施可以有效降低施工现场风险值, 并且在发布台风预警信号后, 及时采取风险控制可达到较好的控制效果.

关键词: 施工现场; 台风风险; 层次分析法-熵权组合权重; 系统动力学模型; 风险控制

中图分类号: X 947 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)03-0331-09

Construction Site Typhoon Risk System Dynamics Prediction Control System

ZOU Fengqiu, WANG Chen

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to effectively reduce the risk of construction site under typhoon environment, the construction site typhoon risk prediction control system is constructed based on system dynamics (SD) model. By selection of the main risk factors affecting the safety of the construction site under typhoon environment, the combined weights are obtained by the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weights, which analyzes the weights of each risk factor in the risk system and determines the key risks. The system dynamics model dynamically simulates the change in typhoon risk values over time at the construction site, and simulates the optimal time for risk control and compares the effects of different control measures on risk reduction. The results show that management risk is the key factor affecting the construction site under typhoon environment. The management risk control measures before typhoon can effectively reduce the risk value, and after the typhoon warning signal is issued, timely risk control can achieve better control effects.

Keywords: construction site; typhoon risk; analytic hierarchy process-entropy weight combination weight; system dynamics model; risk control

近年来,在以全球变暖为主要特征的气候变化背景下,极端气象灾害的发生频次和破坏程度明显上

收稿日期: 2019-10-22

通信作者: 王晨(1978-),教授,博士,博士生导师,主要从事工程管理、智能建造、市政工程管理、绿色建筑与节能和人工智能相结合方面的研究. E-mail:wch@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878303);福建省泉州市科技计划项目(2018Z010);华侨大学高层次人才科研基金资助项目(17BS201);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(18013086043)

升. 台风是影响沿海地区最严重的一种灾害性天气系统,它的主要危害是风力极大、影响范围广、持续时间长,并常伴有暴雨和特大暴雨. 建筑工程由于投资规模、建设规模庞大,社会效益和经济效益显著,对台风等灾害性天气的影响亦更加敏感^[1],导致建筑工程在施工阶段面临风险更为复杂. 因此,构建施工现场台风风险预测管控体系,以提升施工现场的防范台风风险水平,保证建筑工程的安全具有重要的意义. 目前,关于台风对建筑工程的安全影响的研究主要集中在建筑物的灾后评估. 如 Zhou 等^[2]对多级飓风后破坏后的住宅建筑进行损伤评估;Arroyo 等^[3]重点研究了台风对建筑物的造成的损失及如何进行建筑物损伤恢复;林江豪等^[4]建立了台风灾害经济损失评估模型;何原荣等^[5]以“莫兰蒂”台风为例,基于激光点云获取与分析建筑灾损的三维信息以定量量测台风造成的损失. 综上所述,当前学者们主要关注台风后建筑工程的损失,而对台风前的风险预测及实施灾前风险控制的研究较为鲜见.

本文选取台风环境下影响施工现场安全的因素,建立风险评价指标体系,确定台风环境下影响施工现场安全的关键因素,提出在台风前采取有针对性的风险控制措施.

1 施工现场台风风险体系

由于施工现场人员多、物料杂,在台风环境下施工现场情况复杂且危险性极高,风险因素多种多样. 通过研究大量建设项目的防范台风专项方案并结合行业标准 JGJ/T429—2018《建筑施工易发事故防治安全标准》,以及参考《厦门市加强建筑工地重大风险管控遏制重特大生产安全事故整体方案》等相关建筑安全条例法规,将台风环境下施工现场风险因素分为 5 类.

- 1) 人员风险. 人员因素是指由于人主观能动性所引起的风险,包括建设项目中高层领导、施工现场管理人员的管理能力,以及一线施工人员的台风应急能力与意识.
- 2) 管理风险. 管理因素指建设项目的管理水平对施工现场的影响,如台风应急知识是否普及管理措施是否到位,施工现场是否有防台风专项方案.
- 3) 施工工艺风险. 施工工艺风险因素重点关注了脚手架工程、边坡基坑支护等在台风环境下易发生安全事故的部位,以及其对施工现场安全的影响.
- 4) 材料设备风险. 材料设备风险主要指施工现场的材料、大型机械在台风环境下发生的不安全事故造成施工现场的风险.
- 5) 环境风险. 环境风险因素则是关注台风本身,如台风的等级,台风的登陆地是否与施工现场在同一地点、带来的降雨量等不可抗力风险因素对施工现场安全的影响.

基于上述分析,建立了由 5 个一级风险因素,20 个二级风险指标构成的台风环境下施工现场风险体系,如图 1 所示.

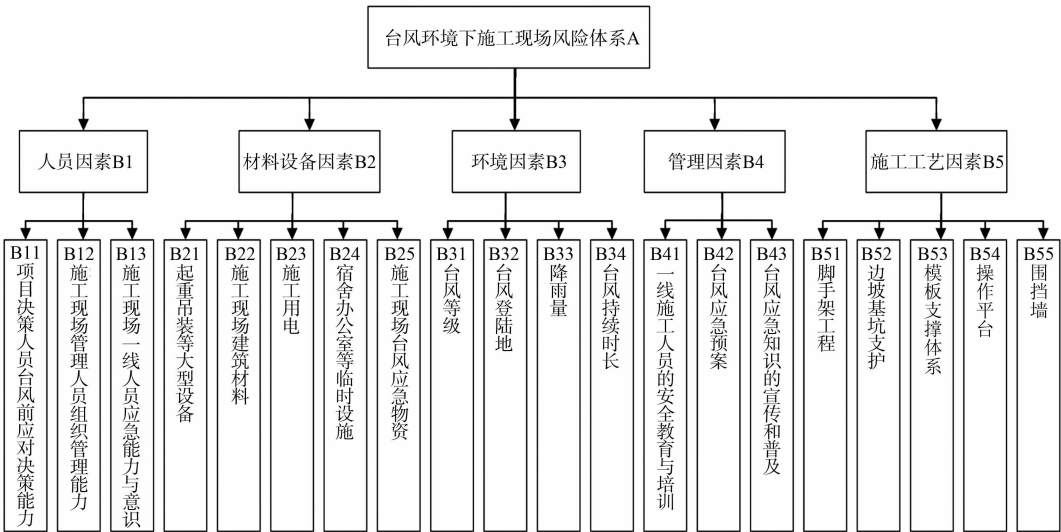


图 1 台风环境下施工现场风险体系

Fig. 1 Construction site risk system under typhoon environment

2 AHP-熵权法计算组合权重

2.1 数据来源及分析

根据构建的施工现场台风风险体系,采用专家打分法及问卷调查法收集数据. 专家打分法选取的 10 位专家均具有 5 a 以上建筑工程从业经验,且指导过或参与过施工现场台风防范工作;专家对象涵盖了建设单位、施工单位、高等院校等科研单位、监理单位.

问卷调查是研究台风环境下各风险因素对施工现场安全的影响程度. 为保证数据的有效性,问卷发放区域选择在沿海台风易发地区,结合线上和线下对建筑从业人员进行问卷发放. 线下发放地区为福建省厦门市,线上问卷发放地区涵盖福建省福州市、泉州市、厦门市和广东省湛江市,共发放问卷 156 份,筛除对台风环境下施工现场风险完全不了解的选项,得到 121 份有效问卷,有效问卷回收率为 77.6%. 数据来源及对象分布情况,如表 1 所示. 表 1 中:设计单位中的专家来自科研单位.

表 1 数据来源及对象分布情况
Tab. 1 Data source and object distribution %

工作单位	问卷 的分布	专家打 分的分布	学历 水平	问卷 的分布	专家打 分的分布	工作 年限	问卷 的分布	专家打 分的分布	对台风环境下 施工现场风险 了解情况	问卷 的分布	专家打 分的分布
施工单位	16.5	50.0	硕士及以上	9.1	70.0	8 a 以上	11.6	30.0	非常了解	12.4	100.0
建设单位	9.1	10.0	本科	67.8	30.0	5~8 a	21.5	70.0	比较了解	55.4	—
监理单位	1.7	20.0	大专	21.5	—	3~5 a	36.4	—	一点了解	32.2	—
设计单位	72.7	20.0	高中及以下	1.6	—	3 a 以下	30.5	—	完全没有	—	—

问卷设计包括两个部分:1) 调查填表人基本信息,如从事专业领域、年龄、职称,以及从事本专业年限;2) 在施工现场台风风险体系的基础上,对 5 个一级因素和 20 个二级因素的风险程度采用李克特 7 级量表进行打分,分值从 1~7 分别代表台风环境下该因素从小到大的风险程度.

2.2 AHP 确定的风险指标权重

层次分析法(AHP)是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化,定性与定量相结合的决策分析方法^[6]. 该方法是先建立层级结构的评价体系,通过 Santy 1-9 标度法,构造指标层两两比较判断矩阵,并保证判断矩阵通过一致性检验,最后得到指标主观权重^[7].

根据已建立的层级评价体系(图 1),对各个风险因素进行成对比较. 通过 10 个专家打分比较的算术平均数构造 1 个一级风险因素判断矩阵,5 个二级风险因素判断矩阵,然后进行一致性检验. 求得各个风险因素的权重,如表 2 所示.

表 2 AHP 风险因素权重计算结果
Tab. 2 Calculation result of AHP risk factor weight

一级风险指标	一级权重	二级风险指标	二级权重	AHP 权重
人员风险因素 B1	0.156 1	项目决策人员台风前应对决策能力 B11	0.259 9	0.040 6
		施工现场管理人员应对台风的组织管理能力 B12	0.412 6	0.064 4
		施工现场一线人员台风应急能力与意识 B13	0.327 5	0.511 0
材料设备风险因素 B2	0.154 4	起重吊装等大型设备风险 B21	0.441 9	0.068 2
		施工现场建筑材料风险 B22	0.116 2	0.017 9
		施工用电的风险 B23	0.162 6	0.025 1
		宿舍办公室等临时设施的风险 B24	0.139 6	0.021 6
		施工现场台风应急物资投入不足 B25	0.139 6	0.021 6
		台风等级的影响程度 B31	0.566 7	0.068 9
环境风险因素 B3	0.121 5	台风登陆地对安全的影响程度 B32	0.142 9	0.017 4
		降雨量对安全的影响程度 B33	0.135 8	0.016 5
		台风持续时长的影响程度 B34	0.154 6	0.018 8

续表

Continue table

一级风险指标	一级权重	二级风险指标	二级权重	AHP 权重
管理风险因素 B4	0.411 9	一线施工人员的安全教育与培训 B41	0.443 4	0.182 6
		台风应急预案 B42	0.387 4	0.159 6
		台风应急知识的宣传和普及 B43	0.169 2	0.069 7
施工工艺风险因素 B5	0.156 1	脚手架工程 B51	0.319 6	0.49 9
		边坡基坑支护 B52	0.337 5	0.052 7
		模板支撑体系 B53	0.168 8	0.026 3
		操作平台 B54	0.089 7	0.014 0
		围挡墙 B55	0.084 4	0.013 2

2.3 熵权法计算权重

熵是系统无序程度的一个度量,熵权反映各指标对决策评价提供有用信息量的大小.如果一个指标的信息熵小、熵权大,该指标提供信息量越大,在综合评价中所起的作用越大,权重就越高^[8].根据问卷调查所得数据构造判断矩阵,由 121 份有效问卷和 20 个风险指标标形成原始矩阵 $R_{m,n}$.即

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m,1} & r_{m,2} & \cdots & r_{m,n} \end{bmatrix}.$$

上式中: $r_{m,n}$ 为第 n 个指标下第 m 份问卷的评价值.

对评价值进行标准化处理,计算第 j 项指标下第 i 个样本值占该指标的比重, $p_{i,j} = r / \sum_{i=1}^n r_{i,j}$;然后,根据比重计算第 j 项指标的熵值 $e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{i,j} \ln(p_{i,j})$,以及信息熵冗余度 $d_j = 1 - e_j$.最后,求得各项指标的熵权 $w_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j$,如表 3 所示.

表 3 AHP-熵权法组合权重计算结果

Tab.3 Calculation result of AHP-entropy weight method combined weight

风险指标	熵权	AHP 权重	组合权重
项目决策人员台风前应对决策能力 B11	0.046 0	0.040 6	0.040 6
施工现场管理人员应对台风的组织管理能力 B12	0.057 1	0.064 4	0.080 0
施工现场一线人员台风应急能力与意识 B13	0.088 7	0.051 1	0.098 7
起重吊装等大型设备风险 B21	0.042 4	0.068 2	0.063 0
施工现场建筑材料风险 B22	0.043 3	0.017 9	0.016 9
施工用电的风险 B23	0.035 7	0.025 1	0.019 5
宿舍办公室等临时设施的风险 B24	0.054 1	0.021 6	0.025 4
施工现场台风应急物资投入不足 B25	0.066 3	0.021 6	0.031 1
台风等级的影响程度 B31	0.037 7	0.068 9	0.056 4
台风登陆地对安全的影响程度 B32	0.035 9	0.017 4	0.013 6
降雨量对安全的影响程度 B33	0.048 4	0.016 5	0.017 4
台风持续时长的影响程度 B34	0.032 4	0.018 8	0.013 3
一线施工人员的安全教育与培训 B41	0.028 2	0.182 6	0.112 1
台风应急预案 B42	0.029 9	0.159 6	0.103 8
台风应急知识的宣传和普及 B43	0.044 7	0.069 7	0.067 8
脚手架工程 B51	0.088 7	0.049 9	0.096 3
边坡基坑支护 B52	0.077 1	0.052 7	0.088 3
模板支撑体系 B53	0.048 2	0.026 3	0.027 6
操作平台 B54	0.055 7	0.014 0	0.017 0
围挡墙 B55	0.039 2	0.013 2	0.011 2

2.4 组合权重的计算

为避免单一的赋权方法受自身局限性影响,使得结果产生偏倚,在权重的确定过程中采用组合赋权法^[9].即将 AHP 与熵权法进行组合,主客观评价互相修正权重,使得各个风险指标的权重更为可靠^[10].加法合成法、乘法合成法、级差最大化组合赋权法和基于客观修正主观的组合赋权方法是典型的主客观组合赋权方法^[11].文中采用乘法合成法进行组合权重赋值,通过将层次分析法和熵权法线性加权来确定组合权重,不仅注重基于评审专家经验估计的主观权重,而且还重视反映评标指标信息量大小的客观权重,增加了评标的客观性与科学性^[12].

利用乘法合成法确定第 j 项风险指标的组合权重,是将熵权法权重 ω_j 与 AHP 所得权重 γ_j 相乘,然后除以两种方法所得权重的乘积的和,即

$$\varphi_j = \omega_j \gamma_j / \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma_j.$$

根据上式所得风险指标的组合权重,如表 3 所示.

AHP-熵权法组合权重的计算结果显示:人员因素、材料设备因素、环境因素、管理因素、施工工艺因素的对施工现场风险影响的组合权重依次为 0.22,0.16,0.10,0.28,0.24.其中,管理因素对台风环境下施工现场的风险影响最大,其次是人员因素.在二级风险因素中,施工现场一线人员台风应急能力与意识 B13 的风险权重为 0.098 7,脚手架工程 B51 的风险权重为 0.096 3,对施工现场风险影响较大.根据权重分析得出管理因素是台风环境下影响施工现场安全的关键因素.

3 施工现场台风风险 SD 模型

台风环境下,施工现场的风险不是单个风险因素作用形成的,而是各个风险因素相互作用的结果.在研施工现场的风险时,用系统动力学(SD)模型确定各个风险因素边界,研究各个风险因素之间的联系,揭示风险之间的关联性及其互相影响机制,探究其共同作用对施工现场风险水平的影响.

3.1 因果回路分析

因果回路图是表示系统反馈的重要工具,可以迅速表达关于系统动态形成原因的假说.一张因果回路图包含多个变量,变量之间由标出因果关系的箭头所连接,每条因果链都具有极性.当因果链为正(+)时,意味着如果原因增加,结果要高于它原来所能达到的程度;而当因果链为负(-)时,意味着如果原因增加,结果要低于它原来所能达到的程度^[13].针对台风环境下施工现场风险因素之间相互作用的关系,建立施工现场风险因素因果回路图,如图 2 所示.

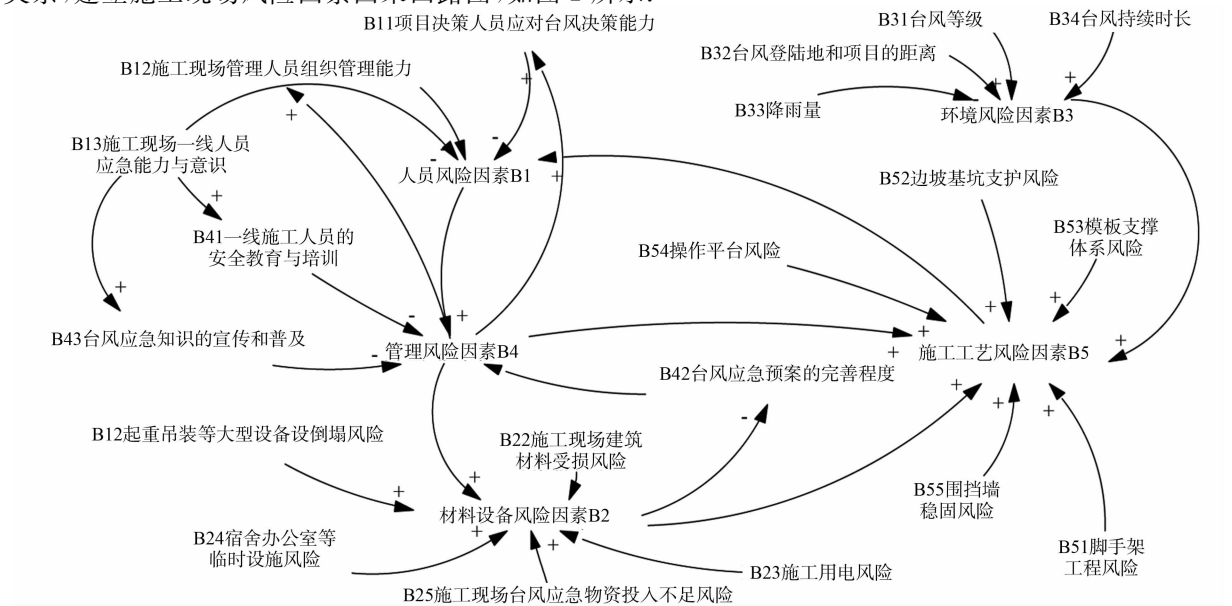


图 2 施工现场风险因素的因果回路图

Fig. 2 Causal circuit diagram of risk factors at construction site

研究风险因素之间相互影响的机制,对人员、环境、材料设备、管理、施工工艺风险因素进行反馈回路分析,共得到 13 条反馈回路.其中,人员风险、材料设备风险、管理风险、施工工艺风险分别形成 4,2,5,2 条反馈回路,而环境风险只对其他风险有影响,不在反馈回路中.

3.2 存量流量图仿真分析

因果关系图是对系统反馈结构的描述,不能反映不同性质变量间的区别^[14].因此,为了进一步分析各个风险因素之间的关系,需要在此基础上构建存量流量图模型,建立变量之间的数学关系.为了区别不同类型的变量,引入常量、辅助变量、速率变量和水平变量,并建立变量之间的方程,画出存量流量图,如图 3 所示.图 3 可以进行台风环境下施工现场的风险水平分析,清楚地刻画在台风环境下施工现场各个风险要素之间的反馈过程.

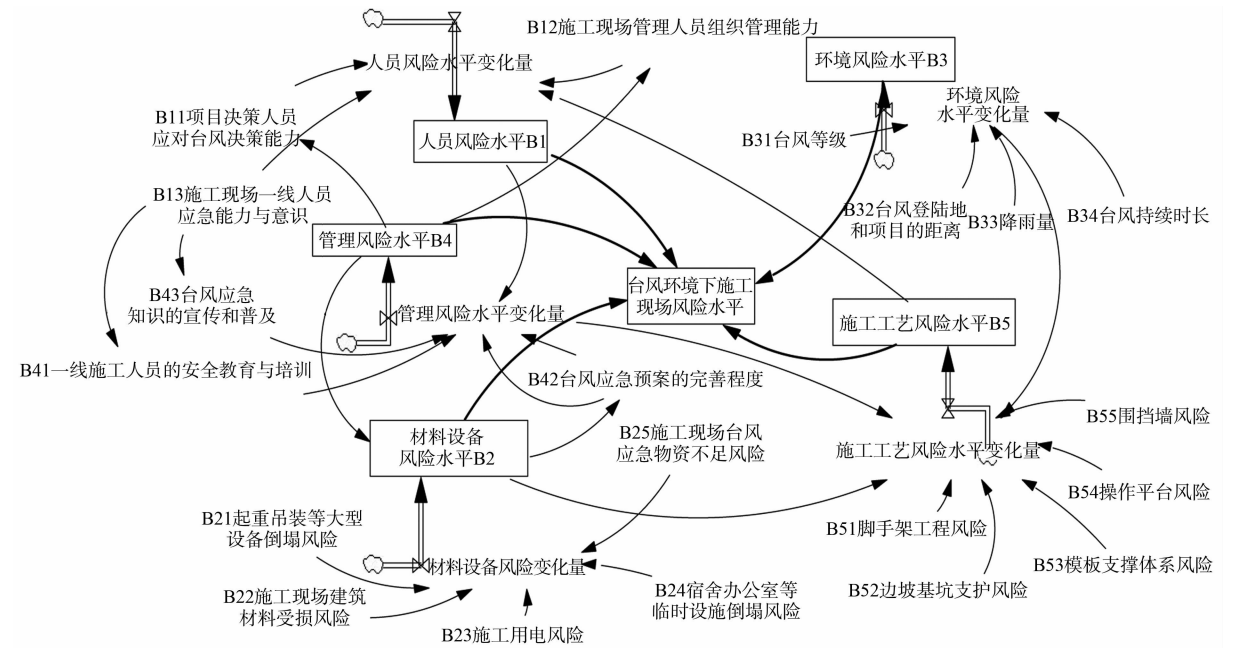


图 3 施工现场风险因素的存量流量图

Fig. 3 Stock flow diagram of risk factors at construction site

在存量流量图中,有些变量的值是可以通过历史资料查阅到的而有些是无法确定的.为了使结果具有可比性和保持结果的一致性,对常量的初始值进行统一赋值,赋值时所有的值均在一范围内,表示此因素发生的概率^[15].文中对各个变量的研究统一采取无量纲的形式,对收回的问卷数据进行合理的估计得到相应数量级的初始风险值,确定各个变量取值的方式,如表 4 所示.

表 4 变量取值及其表达式

Tab. 4 Variable value and its expression

变量类型	序号	名称	取值及方程
常量	B13	施工现场一线人员台风应急能力与意识	0.098 7
	B21	起重吊装等大型设备风险	0.063 0
	B22	施工现场建筑材料风险	0.016 9
	B23	施工用电的风险	0.019 5
	B24	宿舍办公室等临时设施的风险	0.025 4
	B25	施工现场台风应急物资投入不足	0.031 1
	B31	台风等级的影响程度	0.056 4
	B32	台风登陆地对安全的影响程度	0.013 6
	B33	降雨量对安全的影响程度	0.017 4
	B34	台风持续时长的影响程度	0.013 3
	B51	脚手架工程	0.098 7
	B52	边坡基坑支护	0.088 3
	B53	模板支撑体系	0.027 6
	B54	操作平台风险	
	B55	围挡墙风险	

续表

Continue table

变量类型	序号	名称	取值及方程
常量	B54	操作平台	0.017 0
	B55	围挡墙	0.011 2
辅助变量	B11	项目决策人员台风前应对决策能力	$0.283\ 7\times B4$
	B12	施工现场管理人员应对台风的组织管理能力	$0.283\ 7\times B4$
	B41	一线施工人员的安全教育与培训	$0.098\ 7\times B13$
	B42	台风应急预案	$0.155\ 8\times B2$
	B43	台风应急知识的宣传和普及	$0.098\ 7\times B13$
水平变量	B1	人员风险水平	INTEG(人为风险变化量,0.219 3)
	B2	材料设备风险水平	INTEG(材料设备风险变化+ $0.283\ 7\times$ 管理风险水平 B4,0.155 8)
	B3	环境风险水平	INTEG(环境风险水平变化量,0.100 7)
	B4	管理风险水平	INTEG(管理风险水平变化量,0.283 7)
	B5	施工工艺风险水平	INTEG(施工工艺风险水平变化量,0.240 5)
速率变量	—	人员风险水平变化量	$0.040\ 6\times B11+0.080\ 0\times B12+0.098\ 7\times B13$
	—	材料设备风险水平变化量	$0.011\ 1\times B5$
	—	环境风险水平变化量	$0.056\ 4\times B31+0.013\ 6\times B32+$ $0.017\ 4\times B33+0.013\ 2\times B34$
	—	管理风险水平变化量	$0.112\ 1\times B41+0.103\ 8\times B42+$ $0.067\ 8\times B43+0.219\ 3\times B1$
	—	施工工艺风险水平变化量	$0.096\ 3\times B51+0.088\ 3\times B52+$ $0.027\ 6\times B53+0.017\ 0\times B54+$ $0.011\ 2\times B55+0.155\ 8\times B2+$ 环境风险水平变化量+管理风险水平变化量

台风登陆一般在 24 h 内发布预警信号,并对登陆地及其周围地区产生对影响^[16]. 因此,存量流量模型中研究 24 h 内施工现场风险的变化,仿真分析得出在多种因素共同作用下台风环境中施工现场综合风险水平,如图 4 所示. 图 4 中: D 为风险值.

由分析可得,环境风险没有进入风险回路,故只研究其他 4 种风险因素的风险变化,如图 5 所示. 图 5 中: D 为风险值. 由图 5 可知:各个因素的风险值在 24 h 内变化从大到小,依次为管理因素、施工工艺因素、人员因素、材料设备风险.

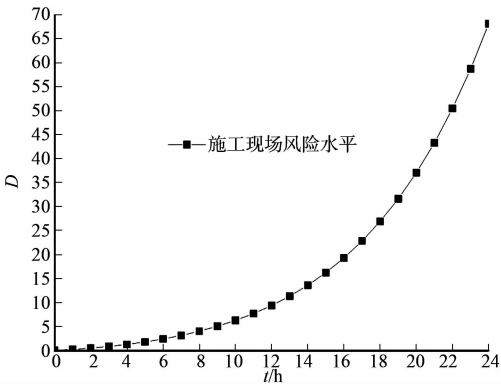


图 4 台风环境下施工现场综合风险水平

Fig. 4 Comprehensive risk level of construction site under typhoon environment

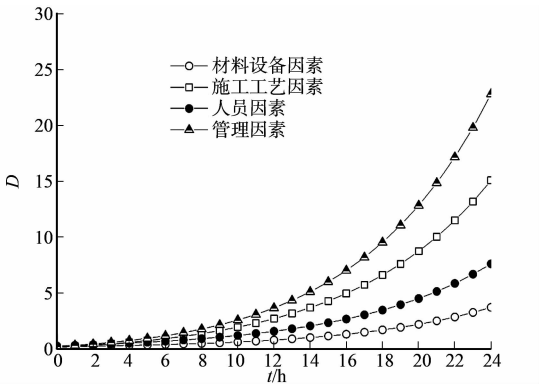


图 5 施工现场单因素风险值变化分析

Fig. 5 Analysis of single factor risk value change in construction site

4 风险控制策略

4.1 风险控制的时间

台风预警信号划分为 4 级,以蓝色、黄色、橙色和红色表示,时间上分别代表 24 h 内、24 h 内、12 h

内和 6 h 内台风周围地区可能或者已经受台风影响. 根据台风预警的时间节点, 划分施工现场采取风险控制的时间, 比较在受台风影响前 24 h 内、12 h 内、6 h 内开始采取风险控制措施施工现场风险值的变化; 控制措施采用单脉冲函数量化, 如 24 h 内采取风险控制措施为 $PULSE(0, 1)$, 其中“0”表示在一开始就进行风险控制, “1”表示采取风险控制措施的时间为 1 h. 由此可以得出不同时间节点开始采取风险控制的效果, 如图 6 所示. 图 6 中: D 为风险值.

从图 6 可知: 在发布台风预警一开始就采取风险控制, 可以有效降低施工现场台风风险值. 即在第 8 个小时的时候, 施工现场风险值为 0, 达到理想水平; 在 12 h 内采取风险控制措施比在 6 h 内采取控制措施的效果更好.

4.2 风险控制的措施

从存量流量模型仿真分析及表 3 组合权重分析可得: 风险值变化从大到小为管理因素、施工工艺因素、人员因素、材料设备因素、环境因素, 组合权重依次为 0.283 7, 0.240 5, 0.219 3, 0.155 8, 0.100 7, 其中, 管理因素的权重最大, 在台风环境下对施工现场的风险影响最大.

在台风前有效地控制管理因素风险, 有如下 3 个需要注意的方面. 1) 要加强一线施工人员的安全教育与培训, 普及防台风的安全知识, 加强一线施工人员对台风风险的重视, 保障自身的安全. 2) 在施工现场要提前做好台风应急预案, 落实台风应急预案, 做好应急准备. 3) 沿海台风频发地区在台风前应进行台风应急知识的宣传和普及, 有助于施工现场人员在发布台风预警信号时快速科学的做好应急措施.

风险控制措施采用单脉冲函数, 其风险控制措施效果对比, 如图 7 所示. 图 7 中: D 为风险值. 从图 7 可知: 在台风前进行风险管控时, 重点关注管理风险的控制可以有效降低施工现场台风风险水平.

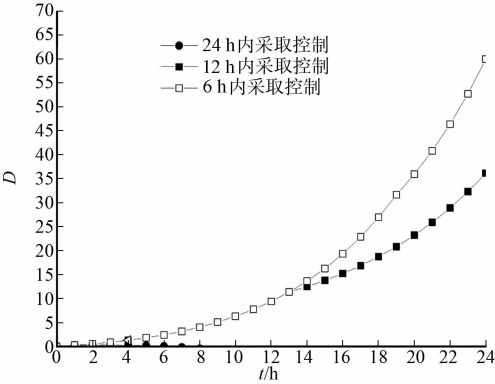


图 6 不同时间采取风险控制措施效果对比
Fig. 6 Comparison of risk control measures taken at different times

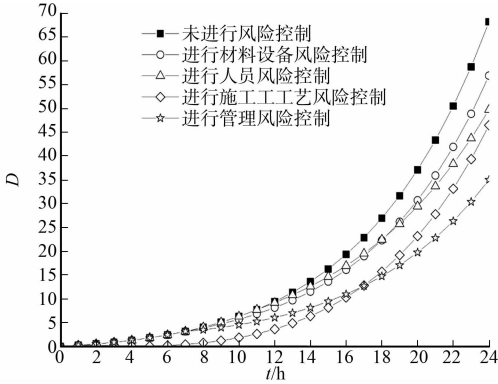


图 7 单因素风险控制措施效果对比
Fig. 7 Comparison of the effects of single factor risk control measures

5 结论

1) 建立了施工现场台风风险预测管控体系, 分析风险因素的权重得出关键风险, 验证了台风前对关键风险进行控制可以明显降低施工现场风险水平. 该方案有助于沿海地区在台风前施工现场做好台风防范工作, 也为其他类型风险进行预测管控提供参考.

2) 文中建立了由 5 个一级指标、20 个二级指标构成的风险评价体系. AHP-熵两种主客观方法相结合求权重, 得出管理因素对施工现场台风险影响最大: 一线施工人员的安全教育与培训、台风应急预案、台风应急知识的宣传和普及是在台风前施工现场风险管控的重点.

3) 建立 SD 模型可以预测风险值的变化规律, 可知施工现场风险值在 24 h 内随着时间变化呈指数型增长. 这可为施工现场管理人员了解台风风险变化规律, 开展台风防范措施提供参考.

4) 通过 SD 仿真模拟施工现场开始采取台风风险控制措施的时间, 以及采取的措施对风险值的影响, 证明了在 24 h 内实施控制措施的时间越早, 风险值越低; 在台风前进行风险管控重点关注管理风险, 可以有效降低施工现场风险水平. 这有助于施工现场管理人员关注台风预警信号, 及时采取更具针对性的风险防范措施.

参考文献:

- [1] LI Mengxia,PING Fan,TANG Xiba,*et al.* Effects of microphysical processes on the rapid intensification of super-typhoon Meranti[J]. Atmospheric Research,2019,219:77-94. DOI:10.1016/j.atmosres.2018.12.031.
- [2] ZHOU Zixiang,GONG Jie,HU Xuan. Community-scale multi-level post-hurricane damage assessment of residential buildings using multi-temporal airborne LiDAR data[J]. Automation in Construction,2019,98:30-45. DOI:10.1016/j.autcon.2018.10.018.
- [3] IVETTE A,JOHNNY Å. User involvement in housing recovery after typhoon Haiyan from a capability perspective [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2019,38:101158. DOI:10.1016/j.ijdrr.2019.101158.
- [4] 林江豪,阳爱民. 基于 BP 神经网络和 VSM 的台风灾害经济损失评估[J]. 灾害学,2019,34(1):22-26. DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.005
- [5] 何原荣,郑渊茂,崔胜辉,等. 基于激光点云的建筑灾损三维信息获取与分析:以“莫兰蒂”超强台风为例[J]. 防灾减灾工程学报,2017,37(2):327-334. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2017.02.022.
- [6] 朱峰,张宏伟. 基于“AHP+熵权法”的 CW-TOPSIS 冲击地压评判模型[J]. 中国安全科学学报,2017,27(1):128-133. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.01.023.
- [7] 陈兴博,靳文舟,胡坤鹏. 基于 AHP-熵权模糊物元的城乡公交一体化评价[J]. 交通科学与工程,2018,34(1):74-79. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.01.013.
- [8] 王新民,柯愈贤,鄢德波,等. 基于熵权法和物元分析的采空区危险性评价研究[J]. 中国安全科学学报,2012,22(6):71-78. DOI:10.3969/j.issn.1003-3033.2012.06.012.
- [9] 姜安民,董彦辰,吴洋,等. 三标度 AHP-熵优化组合赋权法在 PPP 项目风险评价中的应用[J]. 工程管理学报,2017,31(5):62-67. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2017.05.012.
- [10] 赵新好,姚安林,郭磊,等. 基于 AHP-熵权法的输气站场区块风险因素权重确定方法研究[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(10):91-96.
- [11] 李刚,李建平,孙晓蕾,等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论,2017(12):17-26. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2017.12.002.
- [12] 吴夏萍,张建坤. 基于灰色关联-组合赋权的建筑工程项目评标模型研究[J]. 项目管理技术,2018,16(2):49-55. DOI:10.3969/j.issn.1672-4313.2018.02.007.
- [13] 王其藩,系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:272.
- [14] 潘丹,罗帆. 基于 SD 模型的不停航施工情景下机场安全风险作用机理研究[J]. 安全与环境工程,2016,23(5):163-169. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.05.028.
- [15] 贺德强,胡颖,路向阳. 基于系统动力学的地铁火灾调度安全模型研究[J]. 安全与环境学报,2019,19(1):35-43. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2019.01.006.
- [16] 杨琼琼,吴立广. 中国 24 h 台风路径预报难点及其大尺度环流分析[J]. 气象科学,2015,35(4):389-397. DOI:10.3969/2014jms.0029.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)