

# 基于 BIM 的跨海大桥施工动态风险评估 与可视化平台

范冰辉, 王素裹, 刘益宝

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘 要:** 为提高跨海大桥工程的施工期风险管理水平,结合风险评估的模糊层次分析法(FAHP),基于 BIM 平台研发了跨海大桥施工 BIM 动态风险评估系统;该系统应用过程包括桥梁 3D 模型创建、风险水平 FAHP 计算、风险评估结果与 BIM 模型的链接、风险动态模拟等步骤,包含悬臂浇筑预应力混凝土梁、主墩承台施工等 5 个施工模拟模块,实现了施工过程风险水平的 5D 动态可视化;该系统的工程实践表明,通过专家意见与 3D 模型的交互,直观呈现不同施工形象进度时风险水平的变化,可提供给工程管理者在各施工阶段的风险警示,从而及时采取相应风险控制对策,改善风险管理效率。

**关键词:** BIM; 3D 模型; 跨海大桥; 风险控制; FAHP

**中图分类号:** U445.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0073-06

## BIM-based Dynamic Risk Assessment of Cross-sea Bridge Construction and Visualization Platform

FAN Bing-hui, WANG Su-guo, LIU Yi-bao

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to improve the level of risk management in the construction period of cross-sea bridge project, a dynamic risk assessment system of cross-sea bridge construction BIM is developed based on the BIM platform, combined with the risk assessment method of the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). The application process of the system includes the steps of 3D model creation of bridge, FAHP calculation of risk level, link of risk assessment results and BIM model, dynamic risk simulation, etc. It includes five construction simulation modules, including cantilever casting of prestressed concrete beam, construction of main pier cap, etc., which realizes the 5D dynamic visualization of risk level of construction process. The engineering practice of the system shows that through the interaction of expert opinion and 3D model, the change of risk level in different construction image progress can be visualized, which can provide risk warning for project managers in each construction stage, so as to take corresponding risk control measures in time and improve risk management efficiency.

**Key words:** BIM; 3D model; cross-sea bridge; risk control; FAHP

近年来,随着桥梁结构的创新与施工技术的突破,越来越多的跨海大桥工程得以建设实施。由于工程规模巨大,施工期桥址水文地质环境的多样化,施工过程中结构的不完整而存在的时变性,所受荷载的复杂性,桥梁施工方法的创新,及施工管理的不完善等多种因素,使得跨海大桥施

工的风险明显高于普通桥梁<sup>[1]</sup>;其施工管理面临着越来越大的挑战。传统的风险管理方法,大多取决于工程管理人员的经验和技术水平,受主观因素影响很大,已经跟不上桥梁工程发展的需要。因此,研究基于客观施工风险因素,采用数学模型对其进行量化评价,并用直观的方式进行呈现

收稿日期: 2019-09-04 修回日期: 2019-12-05

作者简介: 范冰辉(1982-),男,福建永泰人,博士,讲师,研究方向为桥梁评定与维护,BIM (Email: fanbinghui@fzu.edu.cn)

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(JAT170063);福州大学高校人才科研启动基金(GXRC-19049)

与沟通的风险管理方法,对于跨海大桥工程有重要的现实意义<sup>[2]</sup>。

BIM (Building Information modeling) 技术是以协同和交互的方式对建筑信息进行建模、存储、管理、交换和共享,衔接建筑全生命周期不同阶段的数据和资源,为工程参与人员提供一个在数字化三维环境中检索、分析和处理建筑信息的平台<sup>[3]</sup>,致力于改变传统 2D 条件下建筑设计、施工、管理等各阶段与各参与方各自为战形成的“信息孤岛”带来的沟通不畅、返工率高、效率低下等问题,正成为当下建设行业应用和研究的热点。基于 BIM 技术实现数据的集成和复用,进而带来生产组织模式和管理方式的变革,使 BIM 从技术手段上升为一种管理行为<sup>[4]</sup>;根据工程中质量、安全或环境管理等需求,在 BIM 的 3D 模型基础上还可进一步扩展其功能应用,集成为 BIM-nD 模型,实现所有工程参与者信息交互与决策的需求,可显著改善沟通与管理效率<sup>[5]</sup>。

为此,本文根据跨海大桥工程施工风险控制的需要,引入模糊层次分析法 (Fuzzy-Analytic Hierarchy Process, FAHP) 进行各施工阶段的风险评价,在此基础上基于 BIM 平台进行桥梁工程动态风险评估系统开发,以可视化方法实现施工过程风险水平的动态呈现与控制,从而为桥梁工程管理者提供一种直观、有效的风险管理手段。

## 1 基于 BIM 技术的桥梁工程动态风险评估方法

### 1.1 BIM 技术在桥梁工程中的研究和应用现状

桥梁工程的 BIM 模型包含桥梁生命周期的各种信息要素,桥梁工程的设计优化,施工中的安全、进度和质量控制,以及运维管理方面的研究都在逐步深入<sup>[6]</sup>。Lin 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于多源数据集成的结构安全的闭环管理方案,其框架包括桥梁安全信息模型 (BrSIM) 数据集成算法、半自动时变结构模型的生成方法、结构安全警告和评估的方法,提出了 BrSIM 和 3D 产品、进度、结构模拟和各种工程监控相关的数据系统的整合算法。覃亚伟等<sup>[8]</sup>将三维激光扫描技术与 BIM 技术相结合,提出了构件加工质量检测、施工现场虚拟拼装以及施工过程中实时监测一体化的工程质量管控方法。张贵忠<sup>[9]</sup>基于互联网搭建桥梁建设现场感知体系,采用“极简化平台+基础模块+专项应用 APP”架构,解决了桥梁 BIM 模型的轻量化应用,开发了沪通长江大桥 BIM 建设管理平

台。Wan 等<sup>[10]</sup>研究并扩展了工业基础类 (Industry Foundation Classes, IFC) 和国际字典框架 (International Framework for Dictionaries, IFD) 标准,提出了桥梁工程的编码规则,提出了一种快速建立桥梁 BIM 模型的标准结构建模方法,并将 BIM 与地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 集成提出了面向 Web 的 BIM 桥梁维护管理系统。Sacks 等<sup>[11]</sup>提出了下一代综合桥梁检测系统“SeeBridge”,编制了桥梁结构的信息传递手册 (Information Delivery Manual, IDM),规定了技术组成部分、活动和信息在系统进程中传递方式,并提供了模型视图定义 (Model View Definition, MVD) 来指定为 IDM 服务的数据交换模式。Zou 等<sup>[12]</sup>以基于知识的风险数据库,将桥梁管理知识和经验集成到 BIM 模型中,以通过开发定制的风险分解结构 (Risk Breakdown Structure, RBS) 来管理桥梁项目的风险,建立了 RBS 和 BIM 之间有效链接的概念模型。

可见,近年来桥梁工程信息化研究逐渐增加,且多聚焦于桥梁工程生命周期静态数据与动态数据的集成与分析。现有研究已开始关注桥梁工程的可视化风险管理,但对于桥梁施工过程,其风险因素较多且随着项目进展而动态变化;这还有待于结合 BIM 技术研究桥梁施工动态风险管理的解决方案。

### 1.2 基于 FAHP 的风险分析方法

将风险理论与 FAHP<sup>[13]</sup>进行结合,可以将风险因素逐对进行比较来决定各自的重要程度来考虑评估因素的权重;并采用模糊隶属度函数解决模糊的主观评价语言集的量化问题<sup>[14]</sup>。其分析过程如下:

(1) 将风险因素变量的语言描述用模糊理论定义,分为 5 个等级:很低 (VL), 低 (L), 中等 (M), 高 (H), 很高 (VH); 把风险概率等级值,以及相应的影响程度 (分为 4 个等级) 输入式 (1) 得到风险水平:

$$R_{ijn} = \frac{1}{\sum_n P_{ijn}} \otimes \left| (+) \bigoplus_{n=L}^{VH} P_{ijn} \right| \quad (1)$$

式中:  $i$  为风险因素;  $j$  为风险评估因子,包括风险概率  $P$ , 严重程度  $I$ ,  $P$  与  $I$  的隶属度函数如表 1 所示;  $n$  为风险语言描述变量值,  $n \in RV = \{VL, V, M, H, VH\}$ ;  $R_{ijn}$  为风险因素  $i$  在评估因子  $j$  语言描述下的风险三角模糊数;  $P_{ijn}$  为风险因素  $i$  在评估因子  $j$  语言描述下变量值  $n$  的模糊隶属度函数值。

表 1 风险等级与风险概率的隶属度关系

风险等级		I	II	III	IV	V
风险 概率 $P$	很可能	0	0	0	0.5	1
	较可能	0	0	0.5	1	0.5
	可能	0	0.3	0.7	0.5	0
	不太可能	0.5	0.5	0	0	0
严重 程度 $I$	特大	0	0	0	0	1
	重大	0	0	0	1	0.5
	较大	0	0.5	1	0.5	0
	一般	1	0.5	0.5	0	0

(2)将每个风险标准以风险概率和相应影响作为评价因素来考虑风险水平后,将其代入三角模糊数近似值公式,来计算不同重要性程度下的风险估计值:

$$\begin{cases} A_i = \sum_{j=P}^I o_{ij} a_j / \sum_{j=P}^I a_j \\ B_i = \sum_{j=P}^I p_{ij} b_j / \sum_{j=P}^I b_j \\ C_i = \sum_{j=P}^I q_{ij} c_j / \sum_{j=P}^I c_j \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $(a_j, b_j, c_j)$  为风险因素对应三角模糊数的隶属度;  $(o_{ij}, p_{ij}, q_{ij})$  为单项风险因素的风险评价价值。

(3)加权计算部件风险评价价值

将单项风险因素综合评价价值乘以相应的 AHP 权重值,计算桥梁分部工程在多因素下的综合风险评价价值:

$$\begin{cases} RA_w = \sum_{i=1}^3 \omega_i A_i \\ RB_w = \sum_{i=1}^3 \omega_i B_i \\ RC_w = \sum_{i=1}^3 \omega_i C_i \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w$  为桥梁分部工程;  $\omega_i$  为各风险因素的权重。

(4)计算广义平均值 GMV:

$$GMV = (RA_w + 4RB_w + RC_w) / 6 \quad (4)$$

(5)计算欧几里得距离

$$d(F_i; X) = \left[ \sum_{k=1}^3 (F_i(k) - X(k))^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中:  $d$  为两个模糊集之间的欧几里得距离;  $F_i$  为某桥梁分部工程的风险模糊集  $(RA_w, RB_w, RC_w)$ ;  $k$  为三个模糊数位置编号;  $X$  为 5 个风险等级的隶属函数值。

得到的所有欧几里得距离中,距离最小值对应的评价价值即是该桥梁分部工程施工风险等级的最终评价价值。

(6)把风险因素的数学分析结果连接到 BIM 仿真模型中,用不同颜色:蓝(I等)、绿(II等)、黄(III等)、橙(IV等)、红(V等)来表示不同等级风险程度以有效传递信息<sup>[15]</sup>。

1.3 基于 BIM 技术的桥梁工程动态风险评估系统开发

在 BIM 模型基础上整合 FAHP 风险分析方法,把空间信息、时间信息及风险信息集合在一个可视的 5D(3D Model+Time+Risk)模型中,在 BIM 平台上进行二次开发,可以动态展示风险因素随着施工进度而发生的变化,从而给予工程人员科学、直观的使用方式和决策依据。

(1)系统框架设计与平台概述

为实现设计平台的多功能、多平台交互的集成,将不同的模块功能封装成动态链接库(Dynamic Link Library,DLB),以供主程序体调用;各个动态链接库内通过命名空间将不同的方法和类组织在一起。系统按功能可以分为评价和交互两个部分,其封装的类和方法如图 1 所示。

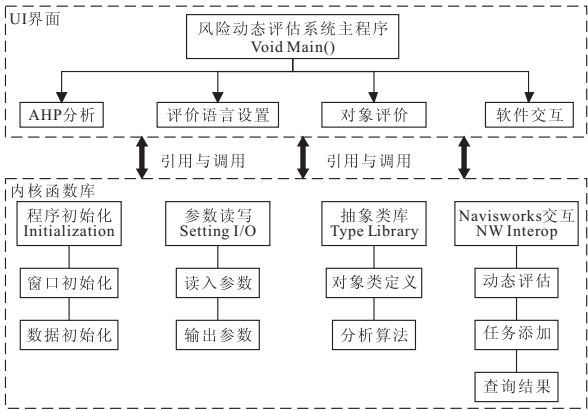


图 1 系统功能函数库架构

Navisworks 是 Autodesk 公司的 BIM 平台发布的针对工程项目管理的专业解决方案,它将 Revit 等软件创建的 BIM 模型,与来自其它软件创建的几何图形和信息相结合,基于强大的可视化和仿真能力,分析多种格式的三维模型以进行实时审阅;Navisworks 提供的 Timeliner 工具,可与三维模型进行链接,实现工程的形象进度模拟。同时,Navisworks 平台提供了 .Net API 用户接口文件来调用 Navisworks 的功能拓展。图 1 的架构即基于 Navisworks 平台实现。

(2)抽象类定义

本系统定义了三角模糊数类作为实现算法的基类,在进行 Fuzzy 评价时,可以调取已定义的三角模糊数基类简化算法。其实现函数为:Public TriNumber FuzzyAnalysis (int ChoiceP, int ChoiceI),其返回值则是一个三角模糊数,图 2 为本应用的核心算法的类库架构。1.2 小节介绍了 FAHP 风险评估的工作流程,本系统采用 C#语言将 FAHP 法编译成计算机语言,包括 AHP 算法编译、Fuzzy 评价类库编译和 Fuzzy 评价算法编译。



受篇幅所限,在此不一一赘述。

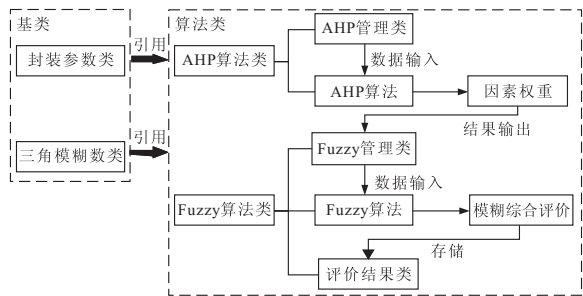


图2 核心算法的类库架构

(3) 软件界面设计

系统界面也分设评价和交互两个部分,评价部分包含“AHP 设置”“Fuzzy 设置”“风险评估”三个操作应用集,其功能是计算风险因素权重,设置模糊评价语言的三角模糊数,计算风险三角模糊数的特征值,输出桥梁分部工程施工风险等级。交互部分包含添加任务的名称、开始时间、结束时间、链接对象等操作,其功能是将风险评估、桥梁 BIM 模型和施工进度计划相关联,实现桥梁施工工期风险动态可视化管理。

(4) 动态风险评估系统的调用

打开 Navisworks 软件,软件将自动加载动态风险评估系统。导入桥梁 BIM 模型,使用动态风险评估系统计算模糊层次分析法专家评定意见,得到桥梁施工风险等级大小,使用 Timeliner 工具将风险评估结果、桥梁 BIM 模型和施工进度计划相关联,实现桥梁工程施工期风险动态可视化管理的目标,其流程如图 3 所示。

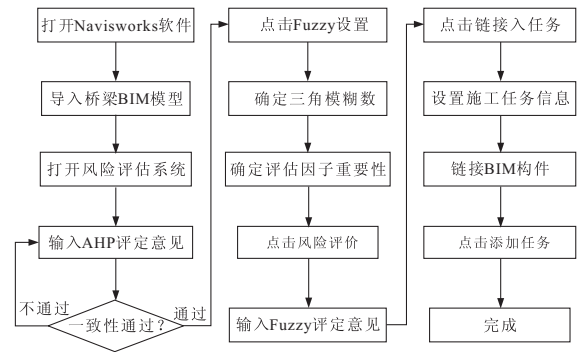


图3 桥梁工程施工期风险动态可视化管理流程

2 案例研究

2.1 背景工程

漳江湾特大桥是《福建省普通国省干线公路网布局规划》“八纵十一横十五联”的重要组成部分,路线全长 6308.89 m,投资估算总金额 130985 万元。其主桥上部结构为预应力混凝土变截面连

续箱梁,主墩墩身采用等截面矩形实体墩,基础为分离式承台基础,配 6 根直径 2.2 m 的钻孔灌注桩。漳江湾特大桥工程投资规模大,牵涉到水文地质、施工技术、环境保护、通航等多个复杂问题,项目面临较大的施工风险。经专家问卷与实地调研,本文选取漳江湾特大桥五个主要分部工程作为风险评估对象,相应开发的风险动态评估系统模块分别是:主墩承台模块、墩身盖梁模块、悬臂浇筑预应力混凝土梁模块、灌注桩模块、预制梁板架设模块。后文主要以悬臂浇筑预应力混凝土梁模块为例来说明。

2.2 BIM 动态风险评估系统构建

(1) BIM 的桥梁 3D 模型建立

BIM 软件中大都未预先集成桥梁构件的参数化图元问题,本文基于概念体量( Concept Mass )方法,采用自适应.rfa,创建桥塔、拉索、变截面箱梁、桥墩、基础等构件族,建立大桥的 BIM 模型,如图 4 所示。

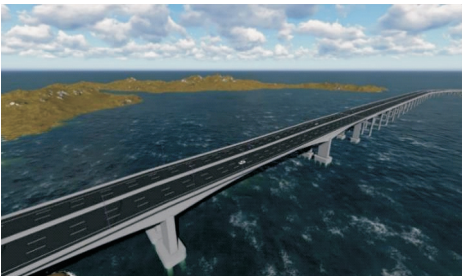


图4 漳江湾特大桥 BIM 模型

(2) 风险评估系统 FAHP 的计算

运用动态风险评估系统分析计算收集到的模糊层次分析法专家问卷,判定构件施工风险等级。以专家的风险评定意见进行计算,系统操作过程如下:

1) AHP 参数填写

点击下拉列表选取风险因素的两两比较相对重要性值,点击“计算权重”,若一致性检验通过,则计算结果显示在“权重”一栏中,如图 5 所示。

悬臂浇筑预应力混凝土梁模块				
AHP 设置 Fuzzy 设置 风险评价				
	挂篮行走	挂篮拆除	高空作业	权重
挂篮行走	1	2	7	0.591
挂篮拆除	1/2	1	5	0.334
高空作业	1/7	1/5	1	0.075
操作				
计算权重				

图5 AHP 计算界面

2) Fuzzy 计算

点击“Fuzzy 设置”即可设置模糊评价语言的

三角模糊数及隶属度函数,如图 6 所示。



图 6 Fuzzy 计算界面

3) 风险评价

点击“风险评价”,对悬臂浇筑预应力混凝土梁工程 3 个重大风险因素的概率和严重程度做出评定,自动计算出“三角模糊数”“广义平均值”,并确定风险的等级,评估结果如图 7 所示,悬臂浇筑预应力混凝土梁工程施工风险等级为 IV 级。



图 7 风险评价界面

(3) 风险评估结果与 BIM 模型的链接

要实现基于 Navisworks 的风险动态评估,需编写一个 Navisworks 插件,以在软件启动时自动调用 Plugins 文档内存储的插件程序集,并在应用面板界面上创建一个激发窗口。其实现方法是,在工程资源中添加窗体,比如定义该窗体类为“Form1”,在插件的“Excute”函数中使用“New”方法实现对“Form1”的实例化,并将其显示,即可达到在 Navisworks 平台上运行自定义的应用程序的要求。故此,在 Navisworks 软件安装目录下的 Plugins 文件夹里分别放入相应风险评估模块;打开 Navisworks 软件,软件会自动加载 Plugins 文件

夹内包含的插件,并显示在软件操作栏的“附加模块”内。

单击“链接入任务”启动软件交互部分,在 BIM 模型中选择某个悬臂浇筑预应力混凝土梁构件,设置“任务名称”“开始时间”“结束时间”,再单击“链接选择集”,弹出窗口提示链接 BIM 模型成功;单击“添加任务”,弹出窗口提示添加任务成功。而后根据模糊层次分析法专家评定意见,对大桥各个分项工程的施工风险大小进行计算;接着,结合大桥总体施工进度计划设置施工模拟计划时间,将整个施工期的风险水平与 BIM 模型关联。风险评估结束后,点击风险评估软件上的“显示任务集”查看评估的结果,如图 8 所示。使用相同的方法可以得到其他分项工程的广义平均值,确定多专家综合评定的风险等级,可以得出漳江湾特大桥各个分项工程风险从大到小的排序是:悬臂浇筑预应力混凝土梁>预制梁板架设>主墩承台>灌注桩>桥墩盖梁。

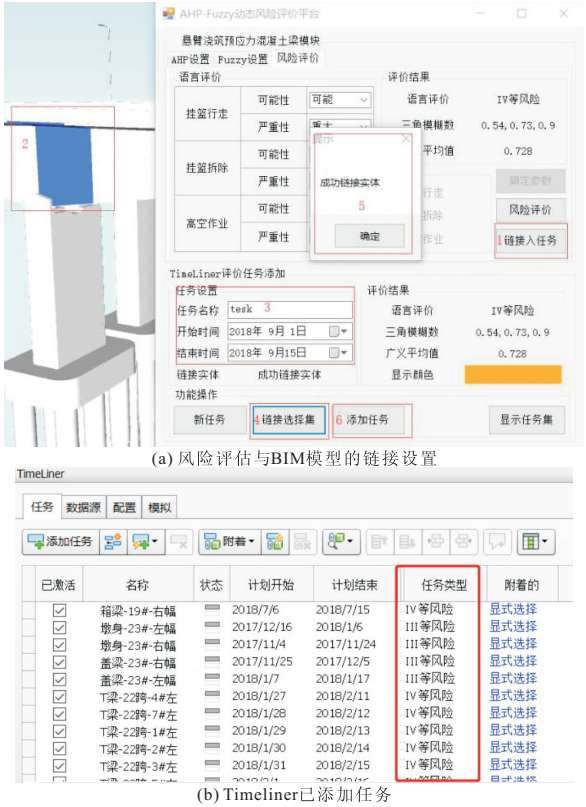
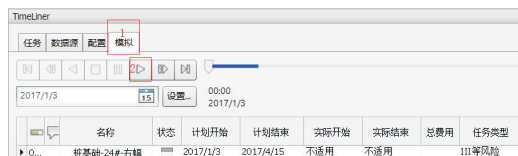


图 8 风险评估与 BIM 模型的链接设置界面

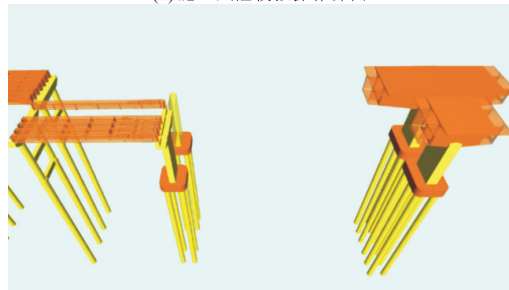
(4) 施工期风险动态模拟

对“Timeliner”窗口已添加施工任务的任务类型进行修正之后,点击“模拟”面板下的“开始”按钮即可动态演示风险水平;在模拟过程中,半透明状态表示该部件正处于施工状态,施工完毕后部件将显示对应风险大小的颜色。由于悬臂浇筑预应力混凝土梁工程为高空作业、施工工艺较为复

杂,施工过程安全隐患较大,评估结果为Ⅳ级风险,呈现为橙色,参见图9。



(a) 施工风险模拟操作界面



(b) 悬臂浇筑预应力混凝土梁风险动态模拟

图9 施工风险模拟

### (5) 风险控制措施

结合本系统自动化风险评估的结论,在施工过程提出相应风险防范控制对策及建议。以悬臂浇筑预应力混凝土梁工程为例,风险评估结论为Ⅳ级风险,其重大风险因素为挂篮行走、挂篮拆除、高空作业;高空作业中人员坠落事故及物体打击事故发生可能较大,事故严重程度相对较小;挂篮倾覆事故发生的可能性较低,一旦发生却会造成重大人员伤亡及经济损失。因此,经论证,主要风险控制措施为:1) 高处作业人员必须戴安全帽,系好安全带,穿专用劳保鞋,杜绝恶劣天气高空作业;2) 挂篮行走滑道应平顺、无偏移,行走应缓慢,速度控制在 0.1 m/min 以内,并由专人指挥;挂篮应整体后退至可正常下放的位置再拆除。

基于 BIM 的跨海大桥施工风险控制系统在本项目的应用表明,在综合风险因素作用下,可以便捷地计算各分部工程的风险评价价值,工程实体的风险值分别用不同颜色显示,动态地呈现不同施工形象进度时风险值的变化,提供给工程管理者在各施工阶段的不同等级的风险警示,从而相应地采取风险控制对策。

## 3 结 语

将 BIM 技术引入跨海大桥工程施工期信息化风险管理,通过可视的 5D 风险控制模型,直观、精确地反映桥梁的施工过程和虚拟形象进度,还能通过构件施工过程中不同的外观颜色反映施工风险的大小。基于 BIM 平台开发的风险评估系统实现了 FAHP 计算过程的自动化,评估人员无需掌握复杂的数学模型,只需要在风险评估系

统中按照模糊评定规则输入评定意见即可得到风险水平;管理人员以信息自动化辅助风险决策,根据评估结果动态监控施工风险,并采取相应的控制措施,从而提升了桥梁施工风险评估工作的效率和实用性。基于 BIM 的跨海大桥施工动态风险控制系统将风险评估、BIM 模型及施工进度计划相关联,实现了风险动态可视化管理,也为今后的桥梁风险管理系统提供了一种新的思路。

## 参 考 文 献

- [1] 朱治宝,马长飞,王波,等. 平潭海峡公铁两用大桥施工安全风险评估[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 12-16.
- [2] Zou Y, Kiviniemi A, Jones S W. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies[J]. Safety Science, 2017, 97: 88-98.
- [3] Gao X, Pishdad-Bozorgi P. BIM-enabled facilities operation and maintenance: a review[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 39: 227-247.
- [4] Lai H, Deng X, Chang T P. BIM-based platform for collaborative building design and project management[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019, 33(3): 5019001-1-15.
- [5] Ding L, Zhou Y, Akinci B. Building Information Modeling (BIM) application framework: the process of expanding from 3D to computable nD[J]. Automation in Construction, 2014, 46: 82-93.
- [6] Costin A, Adibfar A, Hu H, et al. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure-Literature review, applications, challenges, and recommendations[J]. Automation in Construction, 2018, 94: 257-281.
- [7] Lin J, Zhang J, Zhang X, et al. Automating closed-loop structural safety management for bridge construction through multisource data integration[J]. Advances in Engineering Software, 2019, 128: 152-168.
- [8] 覃亚伟,石文洁,肖明钊. 基于 BIM+三维激光扫描技术的桥梁钢构件工程质量管控[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(4): 119-125.
- [9] 张贵忠. 沪通长江大桥 BIM 建设管理平台研发及应用[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 6-10.
- [10] Wan C, Zhou Z, Li S, et al. Development of a bridge management system based on the Building Information Modeling technology[J]. Sustainability, 2019, 11: 4583-1-17.
- [11] Sacks R, Kedar A, Borrmann A, et al. SeeBridge as next generation bridge inspection: overview, information delivery manual and model view definition[J]. Automation in Construction, 2018, 90: 134-145.

(下转第 84 页)



[11] 薛彦瑾,王起才,马丽娜,等. 原状泥岩膨胀变形试验及计算模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1041-1047.

[12] 刘祖强,罗红明,郑敏,等. 南水北调渠坡膨胀土胀缩特性及变形模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(s1): 409-414.

[13] 张锐,张博亚,郑健龙,等. 改进的膨胀土侧限膨胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2223-2230.

[14] 王炳忠,王起才,张戎令,等. 无砟轨道地基泥岩膨胀变形及水分迁移速率衰减规律[J]. 水利水电工程学报, 2019, (2): 41-47.

[15] 何彬,肖宏彬,尹铎霖,等. 基于 Sigmoid 函数的膨胀土膨胀时程试验研究[J]. 人民长江, 2017, 48(21): 108-114.

[16] 范臻辉. 膨胀土地基胀缩特性及桩—土相互作用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

[17] Sridharan A, Gurtug Y. Swelling behaviour of compacted fine-grained soils[J]. Engineering Geology, 2004, 72: 9-18.

[18] Schanz T, Al-Badran Y. Swelling pressure characteristics of compacted Chinese Gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. Soils and Foundations, 2014, 54(4): 748-759.

[19] Wang Q, Tang A M, Cui Y J, et al. A comparative study on the hydro-mechanical behavior of compacted bentonite/sand plug based on laboratory and field infiltration tests[J]. Engineering Geology, 2013, 162: 79-87.

[20] 钟志彬,李安洪,邓荣贵,等. 川中红层泥岩时效膨胀变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 76-86.

[21] 鞠英博,李伟,姚磊. 基于总体最小二乘的直线拟合方法探究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(6): 166-168.

(上接第 72 页)

[8] 唐欣. 基于 BIM 的建设工程质量控制体系研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

[9] 赵继伟,魏群,张国新. 水利水电工程的图形信息模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(2): 155-159.

[10] 孙伟超. 基于 Revit Architecture 的古建筑信息模型系统设计初探[D]. 天津: 天津大学, 2001.

[11] 吴亮. 基于 BIM 技术的工程管理应用的施工计划构成方案研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.

(上接第 78 页)

[12] Zou Y, Kiviniemi A, Jones S. Developing a tailored RBS linking to BIM for risk management of bridge projects[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2016, 23(6): 727-750.

[13] Saaty T L. Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process[M]. Pittsburgh: WS Publication, 1990.

[14] 高会生,冉静学,孙逸群. 基于改进的 FAHP 电力通信网风险评估[J]. 系统工程理论与实践, 2008, (3): 133-138.

[15] Zeng J, An M, Smith N J. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment[J]. International Journal of Project Management, 2007, 25: 589-600.