

文章编号:1673-2049(2018)05-0101-08

BIM 技术在桥梁承载力评定中的应用

陈志为^{1,2}, 陈宇¹, 吴焜¹, 黄颖³

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 厦门市交通基础设施智能管养工程技术研究中心, 福建 厦门 361005; 3. 福建船政交通职业学院, 福建 福州 350000)

摘要:针对桥梁荷载试验及承载力评定中的信息管理问题,通过在建筑信息模型建模软件 Revit 和 SQL Server 数据库上进行二次开发,设计系统框架并搭建应用模块,形成一套新的桥梁承载力评定系统。在实桥案例中该系统被应用到一座预应力混凝土 T 形刚构桥,在某种程度上证明了其应用于实桥的可行性与有效性。结果表明:三维可视化模拟荷载试验相关的所有空间信息与数据信息均通过 BIM 模型集成管理;通过管理信息数据库,使数据录入、存储、查询和修改,更加方便高效;BIM 模型可直接转换成有限元模型,扩展了结构分析功能,使桥梁承载力评定更趋于自动化;可方便比较桥梁试验的历史数据,纵观不同检测时点的指标改变,掌握桥梁现状和变化趋势。

关键词:BIM 技术;桥梁;荷载试验;承载力评定

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Application of BIM Technology in Bridge Bearing Capacity Evaluation

CHEN Zhi-wei^{1,2}, CHEN Yu¹, WU Kun¹, HUANG Ying³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;
2. Xiamen Engineering Technology Center for Intelligent Maintenance of Infrastructures, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: In view of the problem of information management in bridge loading test and bearing capacity evaluation, a bridge carrying capacity evaluation system was developed through designing the system framework and establishing the application modules based on BIM modeling software Revit and SQL Server database. Finally, the system was applied to a prestressed concrete T-type rigid frame bridge in the case study of real bridge, and to some extent its feasibility and effectiveness of the practical application was proved. The results show that loading tests simulated by three-dimensional visualization technology, and all of testing-related spatial information and data information are integrated and managed by BIM model. The management of information database makes data input, storage, query and modify more convenient and efficient. BIM model can be directly converted into finite element model, and the structure analysis function is extended to make the bridge carrying capacity evaluation more automatic. It can be convenient to compare the historical data of the bridge testing, take a look at the change of the index of different detection time, master the current situation and the trend of the bridge.

Key words: BIM technology; bridge; loading test; bearing capacity evaluation

收稿日期:2018-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(NSFC-51778550);福建省自然科学基金项目(2017J01101);厦门大学校长基金项目(20720180060)

作者简介:陈志为(1980-),男,福建漳州人,厦门大学副教授,工学博士,E-mail:cezhiwei@xmu.edu.cn。

0 引言

在环境腐蚀、材料老化、疲劳效应以及突变效应等不利因素的耦合作用下,桥梁将不可避免地发生结构损伤累积和抗力衰减,甚至有可能引发重大事故。中国现有 83.25 万座公路桥,大规模的桥梁建设之后,随之而来的是桥梁运营管理,如何保障服役期内桥梁的安全性是关键问题。面对遍布于公路交通网的众多既有桥梁,准确评定桥梁的服役性能具有重要的社会意义和经济价值。

经过多年探索,国内外已提出多种桥梁状态评定方法^[1-5]。在工程实践中,桥梁承载力是评定桥梁安全性的重要指标,荷载试验是相对可靠的桥梁承载力评定方法^[6]。基于荷载试验的桥梁承载力评定尤其是在试验信息管理方面仍然存在着明显的不足,例如:①通常采用图纸或文字形式描述试验工况,难以准确且形象地显示测点分布及重车布载位置;②试验信息录入与存档不同步,在信息迁移过程中易出现差错;③试验报告涉及的信息冗杂且分散,读报告获取关键信息的效率低;④不同时间节点的试验信息未做集成,难以依据检测历史记录对桥梁承载力的变化趋势做出准确分析与预测。

BIM 技术兴起于建筑工程行业,旨在通过对信息的更有效管理,改变行业内各生产环节配合不利、效率低下的局面。BIM 技术可贯穿于工程项目全生命周期,是一种可将生产、交流、分析流程信息模型化的技术^[7-8]。通过 BIM 技术,可构建整个工程项目生命周期的数据信息库,实现不同阶段不同专业间的信息集成和共享^[9-10]。近年来,美国和新加坡已颁布了 BIM 国家标准^[11];英国在 2017 年也实现了政府工程皆采用合作式 3D BIM,以利于政府资产维护管理;中国在 2017 年也颁布了《建筑信息模型应用统一标准》。在不久的将来,更智能化的 BIM 模型可能会替代图纸文件,工程建设行业将朝着无纸化方向发展^[12]。桥梁作为交通基础设施的重要部分,在设计、施工、运营维护阶段都面临大量的数据管理和分析工作,BIM 技术可为其提供高效的信息管理解决方案。近年来,BIM 技术发展迅速,已被成功地应用到工程设计^[13-15]、施工管理^[16-19]、模拟分析^[20-23]等领域,但是尚未有研究将 BIM 技术与桥梁承载力评定相结合,以解决桥梁静载试验信息管理中存在的问题。

本文将 BIM 技术应用于桥梁承载力评定,建立了一套包含模型信息管理、试验信息管理和桥梁承

载力评定模块的桥梁安全评定系统。模型信息管理模块可实现 BIM 模型创建和有限元模型转换功能;试验信息管理模块可实现静载试验工况模拟和试验实测信息管理功能;桥梁承载力评定模块可实现桥梁承载力评定和历史记录对比分析功能。通过实桥案例验证,将该系统应用到一座预应力混凝土 T 形刚构桥。

1 系统框架

《公路桥梁承载能力检测评定规程》(简称《规程》)说明实施荷载试验的目的为:通过对桥梁施加静力荷载作用,测定桥梁结构在试验荷载下的结构响应,并据此确定验算系数重新进行承载能力验算或直接判定桥梁承载能力是否满足要求^[19]。静力荷载试验结构校验系数是该方法最主要的评价指标,可直观反映桥梁实际状态与理论状态的关系。试验荷载作用下主要测点的结构校验系数 ξ 可按如下公式计算

$$\xi = \frac{S_e}{S_s} \quad (1)$$

式中: S_e 为实测弹性变位或应变值; S_s 为理论计算变位或应变值。

根据《规程》,结构校验系数介于 0.8~1.0 代表实测结果已接近于理论计算结果;若校验系数大于 1.0,应判定桥梁承载能力不满足要求。

通过桥梁静载试验确定结构校验系数,通常有以下步骤:①现场试验前,建立桥梁受力分析模型,确定静力试验荷载和重车布载工况;②确定桥梁加载的控制截面(如跨中、支座等)和测点位置,现场布置应变和挠度传感器;③在不同车辆布载工况下,采集测点的应变和挠度实测值;④通过桥梁受力分析模型,计算测点位置的应变和挠度理论值;⑤确定静载试验的结构校验系数,得到承载力评定的部分结论。因此,基于静载试验的桥梁安全评定通常需要以下信息:①桥梁有限元分析模型及其在静载作用下的应变、挠度理论值;②传感器测点和检测车布载的空间位置信息;③不同工况下的桥梁测点应变、挠度实测值。

鉴于此,基于 BIM 技术建立一套桥梁承载力评定系统,系统框架如图 1 所示,该系统框架包括 4 个层级:数据层、模型层、技术层和应用层。

数据层:通过 SQL Server 数据库管理系统建立底层数据库,上传数据包括桥梁技术信息和静载试验信息,其中试验信息含有传感器信息以及加载工

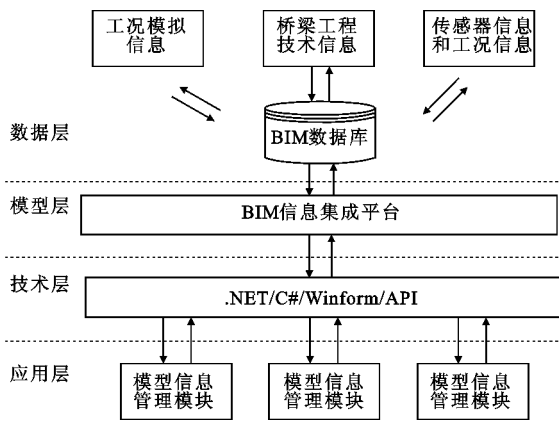


图 1 系统框架

Fig. 1 System Framework

况信息。

模型层: BIM 模型是工况模拟、试验信息管理、评定结果呈现的重要载体与平台。采用 AutoDesk Revit 创建 BIM 模型, 将静载试验相关信息集成在模型中, 并与数据库相关联。

技术层: 通过 Revit 提供的应用程序编程接口 API, 使用 .NET 兼容的语言(如 C# 语言)可做后续开发^[20]。SQL Server 数据库和 Revit 均支持 C# 语言, 通过 Winform 开发人机交互界面, 可较好地实现信息交互和功能协调。

应用层: 系统的应用层包括模型信息管理、试验信息管理和桥梁承载力评定 3 个模块。模型信息管理模块包括 BIM 模型的创建和有限元模型的转换。创建桥梁与车辆模型是静载试验信息管理的基础。基于 BIM 模型快速转换生成的有限元模型, 可提供各工况在不同测点的理论计算值。试验信息管理模块包含试验工况模拟和试验实测信息管理。试验工况模拟可重现静载试验各工况的车辆、传感器布置方案。试验实测信息管理对各工况和测点信息进行管理, 是桥梁承载力评定的数据基础。桥梁承载力评定模块是根据试验实测和模型计算信息评定桥梁承载力, 并对历史试验数据进行对比分析。

2 模型信息管理

模型信息管理包括 BIM 模型和有限元分析模型管理。现阶段, 由 BIM 软件建立的模型普遍还不具备结构受力分析功能。为了拓展该项功能, 本文以 BIM 建模软件 Revit 和有限元分析软件 ANSYS 为研究对象, 通过编写相应的接口程序, 实现由 BIM 模型向有限元模型的自动转换。

2.1 BIM 模型的创建

2.1.1 待检桥梁模型

桥梁 BIM 模型通过参数化构件建模完成, 构件是族的具体实例, 族的设计是桥梁 BIM 模型的关键。族的创建步骤大致包括: 建立参照平面, 绘制构件轮廓线, 通过拉伸、放样、融合等命令生成三维实体模型, 对关键尺寸进行注释, 添加桥梁结构的技术参数。通过输入具体参数生成各构件, 组合各构件, 完成桥梁 BIM 模型创建。

2.1.2 检测车辆模型

为实现加载车辆信息的三维可视化, 需要创建加载车辆族。车辆模型需要添加的参数有车牌号、车辆载重以及车辆轴距。车牌号用以区分不同车辆, 车辆载重反映荷载值, 车辆轴距用于反映荷载分布位置。

2.2 BIM 模型向有限元模型的转换

2.2.1 几何信息提取

提取 Revit 模型的几何信息后, 通过构件关键点在 ANSYS 软件自动生成几何实体。该方式对于转换形状规则的构件模型有较高的工作效率, 但若构件模型形状复杂(如变截面异形构件)则不再适用。本研究采用另一种方法: 首先获取 Revit 构件模型, 从中提取几何信息并转换成 SAT 数据格式; 再通过边界表达 BREP 描述 ANSYS 几何实体模型; 最后将获取到的几何实体模型编译成 APDL 命令流。

2.2.2 物理信息的提取

除了含有大量的几何信息, BIM 模型还在对象属性中存储了有限元建模所需的非几何信息。桥梁有限元分析, 需要从存储的非几何信息中提取可用于结构分析的相关物理信息, 包括密度、泊松比、弹性模量、剪切模量等。

2.2.3 几何与物理信息匹配

通过上述方法, 可实现 Revit 模型的几何信息与物理信息的提取与转换。除此以外, 建立结构有限元模型之前, 需要完成以上 2 类信息的匹配。实现信息自动匹配的步骤有: ①赋予每个生成的 ANSYS 几何实体模型编号, 以此关联 Revit 构件模型; ②根据 Revit 构件模型的物理参数, 赋予相关联的 ANSYS 几何实体模型对应的材质编号; ③找出 ANSYS 中具有相同材质属性(同一材质编号)的构件, 赋予其材质编号对应的物理信息。

3 试验信息管理

静载试验过程需记录在各工况的检测车空间分

布、轴距和轴重信息、传感器布置在桥梁结构的空
间信息,实测不同工况下的挠度和应力信息。

3.1 静载试验工况模拟

基于 BIM 模型模拟静载试验工况,主要工作包
括在桥梁 BIM 模型上布置静载试验所涉及的应变
和挠度传感器,以及不同工况的检测车布置。

为了便于查看和编辑,静载试验中各类工况的
检测车辆布置采用平面布置结合三维视图的方式。
首先在二维平面上完成车辆布置,然后同步更新三
维视图。车辆布置完成后,既可通过筛选器在三
维视图中确认总体布置情况,还可通过查询平面布
置图,获取车辆具体尺寸、位置信息。

在桥梁 BIM 模型布置传感器的具体步骤为:
①确定目标结构构件,选择传感器所在结构表面;
②划分网格,拾取传感器在桥梁结构中相应的节
点位置;③将传感器添加到桥梁结构,自动获取其 ID。

3.2 试验实测信息管理

基于静载试验评定桥梁承载力需要不同车辆布
载工况下传感器测点的应变和挠度实测值。因此,
针对布置在桥梁 BIM 模型上不同位置的传感器,还
需进一步录入静载试验各工况下的实测应变和挠
度结果。

通过表 1 所示的控件,完成静载试验实测信息
录入界面的设计:通过下拉选择框可选择不同工
况;采用文本框录入试验实测值;通过执行按钮触
发信息的上传、修改、删除等操作;通过标签添
加文本注释;用数据列表视图查看上传至数据库
的试验信息;通过分页控件选择传感器类型。

表 1 信息录入界面的控件

Tab. 1 Control of Information Entry Interface	
控件类型	功能
ComboBox	下拉选择框
Button	执行按钮
TextBox	文字输入框
OpenFileDialogue	文件对话框
Label	标签
DataGridView	数据列表视图
TabControl	分页控件

基于 SQL Server 数据库,进行试验实测信息
管理,具体功能包括信息添加、查询、修改和删
除。信息添加可将录入的信息上传数据库。信息
查询通过选择目标工况和传感器,在数据列表
视图中显示已录入的信息记录。信息修改以传
感器 ID 和工况为索引,修改后数据库中信息
同步更新,并在数据列表视图中显示。

4 桥梁承载力评定

结合 BIM 技术实现桥梁承载力评定的具体步
骤包括:①调用试验信息模块,获取检索测点传
感器信息以及不同工况的检测车位置和轴重信
息;②调用模型信息模块获取有限元模型,根据
测点和检测车信息设置不同工况下的荷载输入
与响应输出,模型分析得到各工况不同测点的
理论计算变位或应变值;③调用试验信息模块,
获取式(1)中各工况不同测点的实测弹性变位
或应变值;④通过各测点的理论值和实测值,
计算式(1)的结构校验系数,并根据《规程》相
关规定进行桥梁承载力评定。

根据各测点的结构校验系数,系统可自动筛
选系数超过所设阈值的测点,显示该测点的传
感器 ID,通过 BIM 模型可定位传感器及其依附
的结构构件,并将评定结果上传至信息数据库,
如表 2 所示,该数据库存储的信息包括传感器
ID、工况描述、测点理论值、测点实测值、结
构校验系数以及超限判断。添加传感器至结构
构件时,系统可自动识别并获取传感器 ID;结
构校验系数是测点实测值和理论值之比,需通
过计算确定;比较结构校验系数和预设的阈值,
可判断桥梁承载力是否满足要求。

表 2 评定信息数据库

Tab. 2 Evaluation Information Database			
序号	字段名称	字段说明	类型
1	SensorID	传感器 ID	Int
2	OptCondition	工况描述	Varchar(50)
3	TheoValue	测点理论值	Float
4	ActuValue	测点实测值	Float
5	CheckIndex	结构校验系数	Float
6	Diagnose	超限判断	Varchar(50)

桥梁使用周期内每次承载力评定的信息都存
储在数据库,每次评定均对应一张信息数据表。
通过选择桥梁评定时间与测点传感器 ID,可以
对比最近一次和历史的桥梁静载试验结果。若
发现数据发生异常变化的测点,可获取数据库
中该测点的试验历史记录,绘出数据变化趋势
图,可为维修与养护提供决策依据。

5 实例验证

前文基于 BIM 技术建立了桥梁承载能力评
定系统,可实现模型信息管理、试验信息管理和
桥梁承载力评定功能。为了检验该系统的实际
可行性,将其应用到一座 58 m+3×144 m+58 m
的预应力混

凝土 T 形刚构桥。

5.1 桥梁 BIM 模型与有限元模型

采用参数化设计方法创建桥梁 BIM 模型,该桥的上部结构采用箱梁截面,如图 2(a)所示,创建了箱梁族通过参数化设计定义构件的几何轮廓,然后根据箱梁实际准确模拟顶板、底板的弧度和棱角,箱梁截面沿桥梁纵向采用渐变截面。图 2(b)为生成的其中一段主跨箱梁模型。预应力混凝土 T 形刚构桥的 BIM 模型如图 3 所示。

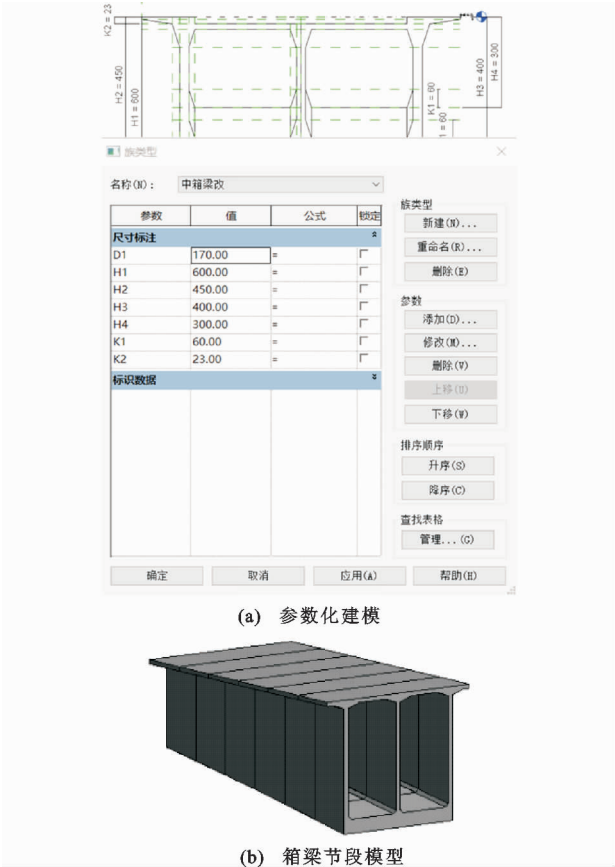


图 2 箱梁模型建模
Fig. 2 Modelling of Box Girder



图 3 桥梁 BIM 模型
Fig. 3 BIM Model of Bridge

运行 BIM 模型向有限元模型转换接口程序,可自动提取并匹配 BIM 模型的桥梁几何信息和物理信息,并生成有限元模型的 APDL 命令流文件。通过 ANSYS 软件调用命令流文件,可直接创建如图 4 所示的桥梁有限元模型。

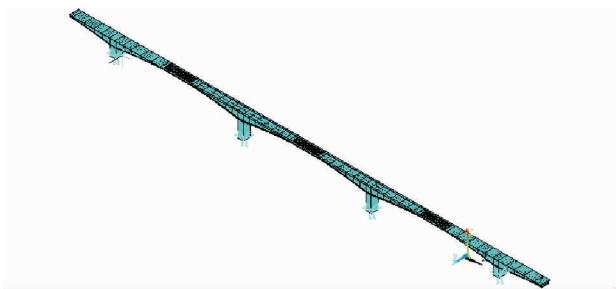


图 4 转换后的桥梁有限元模型
Fig. 4 Converted Finite Element Model of Bridge

5.2 静载试验工况模拟与信息管理

通过选择试验日期和指定工况,BIM 模型可显示该工况的检测车辆布置情况,如图 5(a)所示。通过桥梁 BIM 模型,可以准确定位静载试验涉及的所有传感器,如图 5(b)所示,并可通过 ID 查询传感器信息。通过 BIM 模型,还可查询检测车辆轴重、轴距、车牌号等信息,如图 5(c)所示。

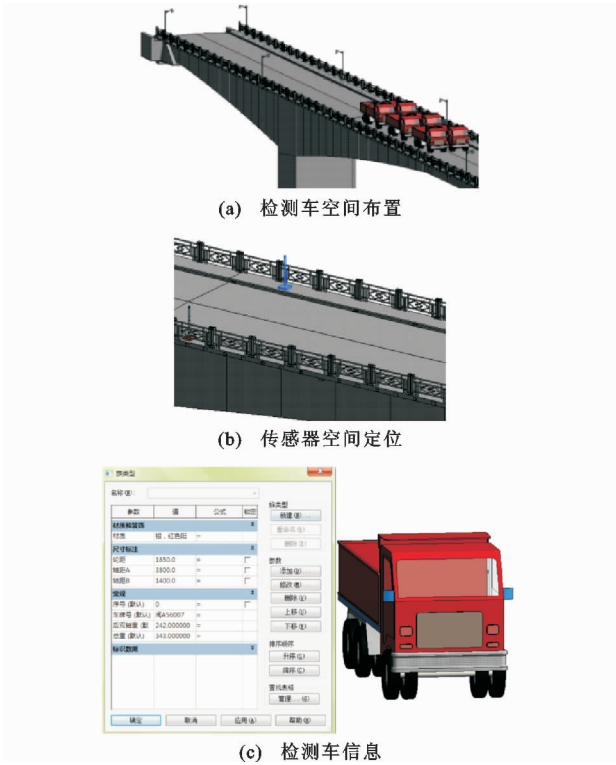


图 5 静载试验工况模拟
Fig. 5 Simulation of Static Load Testing Condition

实测信息管理包括各测点传感器信息的录入、上传、查询、更新和删除等,如以某工况应变传感器的实测信息管理为例,首先在 BIM 模型三维视图中选择需要管理的应变传感器,自动获取其 ID 并进入管理界面;其次,选择对应工况,录入测点的实测值,完毕后上传至数据库;此外,上传之后的信息记录可通过工况查询,错误的信息记录可以进行修改或删除。

除,如图 6 所示。



图 6 传感器信息管理界面

Fig. 6 Sensor Information Management Interface

5.3 桥梁承载力评定

根据静载试验记录的检测车位置、轴重和轴间距信息,模拟检测车队对桥梁的静力效应,简化桥梁在有限元模型相应位置施加竖向荷载,如图 7 所示。根据静载试验记录的传感器信息,输出有限元模型在对应传感器位置的挠度和应变。通过有限元模型分析,可得到各工况不同测点的理论计算变位或应变值。

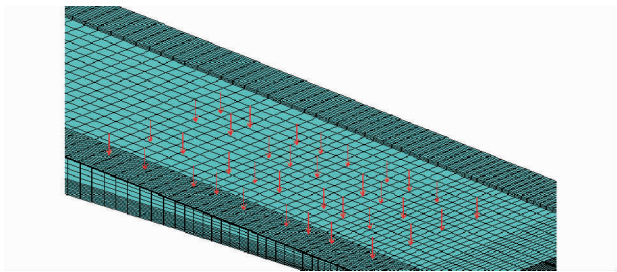


图 7 检测车静力效应模拟

Fig. 7 Simulation of Static Effect of Testing Vehicles

该系统仅需选择静载试验场次与加载工况以及待评定的传感器类型,便可实现桥梁承载力的自动评定,并以图表形式呈现评定结果。图 8 展示了某桥梁静载测试所有应变关键测点信息,包括传感器 ID、测点理论值、测点实测值、校验系数、超限判断等。图 8 中 2 幅折线图分别为拉、压应变测点的理论值与实测值,横轴表示测点传感器 ID,纵轴表示应变值。由于该工况所有关键测点实测值的绝对值均小于理论值,计算得到的结构校验系数均小于 1.0,故从该项指标判断桥梁承载力可满足要求。

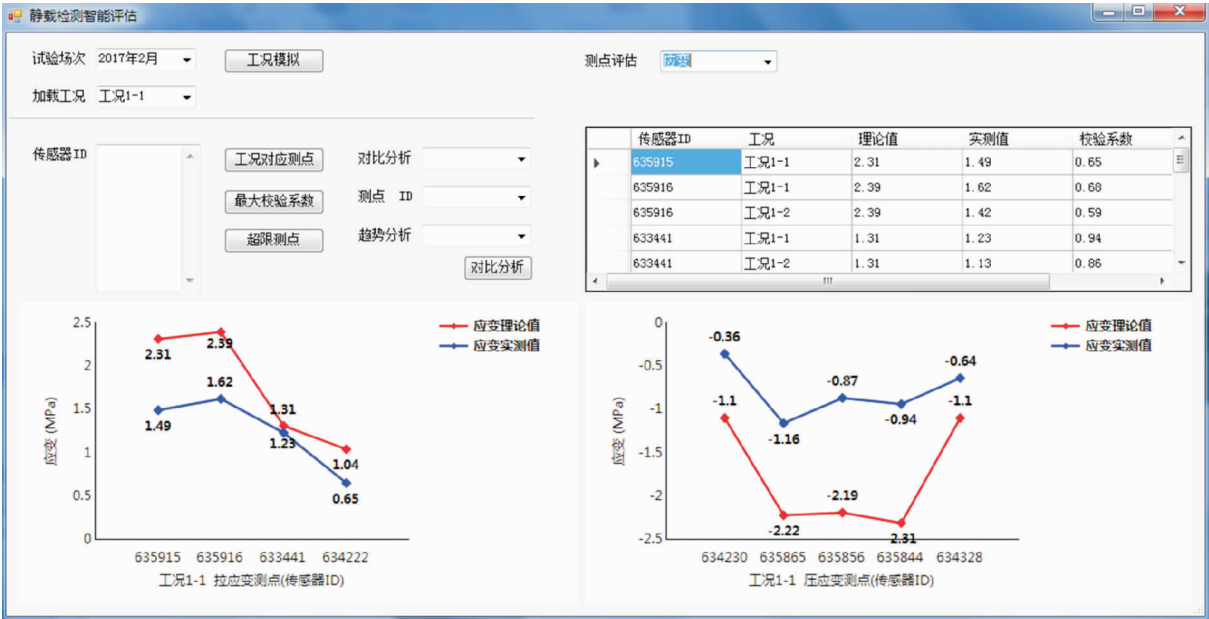


图 8 桥梁承载力评定

Fig. 8 Bearing Capacity Evaluation of Bridge

该系统可以方便地查询桥梁承载力评定的历史记录,并直观地比较任意 2 次评定结果。通过在分析界面上选择 2017 年与 2015 年的 2 次静载试验,并选择工况 1-1 中所有拉应变的测点,可得到不同测试时点的结构校验系数比较结果,如图 9 所示。由图 9 可知,2017 年的校验系数值相比 2015 年有增加趋势,并且某些传感器测点的校验系数已接近

于 1.0 的限值,应建议桥梁管养部门给予足够重视。

6 结 语

(1)荷载试验工况可三维可视化模拟,检测车与传感器的空间信息、试验实测信息均在桥梁 BIM 模型中集成,可直观掌握试验的全方面信息。

(2)通过信息数据库的管理,数据录入、存储、查

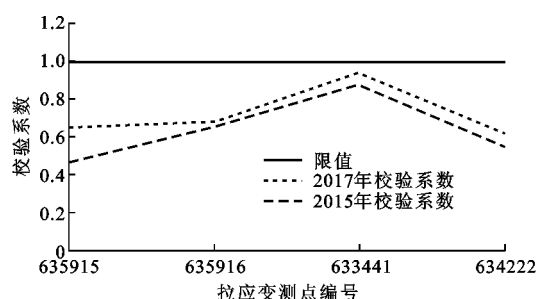


图9 不同检测时间的校验系数变化

Fig. 9 Check Coefficients Change of Different Detection Time

询和修改更方便高效,可同步完成信息录入与存档,有效避免信息迁移可能导致的信息失真。

(3) BIM模型可直接转换成有限元模型,扩展了结构分析功能,使桥梁承载力评定更趋于自动化。

(4) 可方便查询桥梁承载力评定的历史记录,直观比较桥梁试验的历史数据,纵观不同检测时点的指标改变,掌握桥梁现状和变化趋势。

参考文献:

References:

- [1] 李亚东. 既有桥梁评估方法研究[J]. 铁道学报, 1997, 19(3): 109-115.
LI Ya-dong. Research on Methods for Assessment of Existing Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 1997, 19(3): 109-115.
- [2] SARAF V, NOWAK A S. Proof Load Testing of Deteriorated Steel Girder Bridges[J]. Journal Bridge Engineering, 1998, 3(2): 82-89.
- [3] 宗周红, 任伟新, 郑振飞. 既有桥梁承载能力评估方法[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 147-152.
ZONG Zhou-hong, REN Wei-xin, ZHENG Zhen-fei. Load-carrying Capacity Assessment Methods of Existing Bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(5): 147-152.
- [4] 陈孝珍, 朱宏平, 陈传尧. 基于静载试验的桥梁安全性评价[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2005, 22(3): 37-39, 52.
CHEN Xiao-zhen, ZHU Hong-ping, CHEN Chuan-yao. Bridge Safety Assessment Based on Static Loading Test[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2005, 22(3): 37-39, 52.
- [5] 赵大亮, 李爱群, 缪长青, 等. 既有公路桥梁评估方法研究现状[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(1): 72-78, 60.
ZHAO Da-liang, LI Ai-qun, MIAO Chang-qing, et al. State of the Art on Assessment Methods of Existing Freeway Bridges[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(1): 72-78, 60.
- [6] 林贤坤, 张令弥, 郭勤涛, 等. 基于模态挠度法的预应力连续箱梁桥状态评估[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 83-90.
LIN Xian-kun, ZHANG Ling-mi, GUO Qin-tao, et al. Application of Modal Deflection Method for Condition Assessment of Prestressed Concrete Continuous Box-girder Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 83-90.
- [7] EASTMAN C, TEICHOLZ P, SACKS R, et al. BIM Handbook[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [8] SUCCAR B, SHER W, WILLIAMS A. Measuring BIM Performance: Five Metrics[J]. Architectural Engineering and Design Management, 2012, 8(2): 120-142.
- [9] 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.
- [10] LU W W, LI H. Building Information Modeling and Changing Construction Practices[J]. Automation in Construction, 2011, 20(2): 99-100.
- [11] EASTMAN C M, JEONG Y S, SACKS R, et al. Exchange Model and Exchange Object Concepts for Implementation of National BIM Standards[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(1): 25-34.
- [12] 胡振中, 陈祥祥, 王亮, 等. 基于BIM的管道预制构件设计技术与系统研发[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(12): 1269-1275.
HU Zhen-zhong, CHEN Xiang-xiang, WANG Liang, et al. BIM-based Design Method for Prefabricated Pipeline Components[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2015, 55(12): 1269-1275.
- [13] 王勇, 张建平. 基于建筑信息模型的建筑结构施工图设计[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 76-82.
WANG Yong, ZHANG Jian-ping. BIM-based Design of Structural Working Drawing[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(3): 76-82.
- [14] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 基于BIM建筑结构设计模型集成框架应用开发[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 948-953.

- LIU Zhao-qiu, LI Yun-gui, LU Xi-lin, et al. BIM-based Integrated Information Framework for Architectural and Structural Design Model[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(7): 948-953.
- [15] 宁新稳, 朱 庆, 任晓春, 等. 高速铁路施工进度数据图形化处理方法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 414-419.
- NING Xin-wen, ZHU Qing, REN Xiao-chun, et al. Graphical Processing Method of High-speed Railway Construction Progress Data[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 414-419.
- [16] 郭红领, 潘在怡. BIM 辅助施工管理的模式及流程[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2017, 57(10): 1076-1082.
- GUO Hong-ling, PAN Zai-yi. The Mode and Process of BIM-aided Construction Management[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2017, 57(10): 1076-1082.
- [17] 郑顺义, 魏海涛, 赵丽科, 等. 基于建筑信息模型的房建施工木模板计算及管理方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(1): 17-26.
- ZHENG Shun-yi, WEI Hai-tao, ZHAO Li-ke, et al. BIM-based Method for Calculating and Managing Wooden Template Required for Housing Construction[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(1): 17-26.
- [18] 满庆鹏, 李晓东. 基于普适计算和 BIM 的协同施工方法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增 2): 311-315.
- MAN Qing-peng, LI Xiao-dong. Collaborative Construction Based on Ubiquitous Computing and BIM[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S2): 311-315.
- [19] 施俊鹏, 龚景海, 李中立. 基于建筑信息模型的车辐式结构张拉仿真技术[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2018, 52(1): 89-96.
- SHI Jun-peng, GONG Jing-hai, LI Zhong-li. Simulation Technique for Tension Process in Spoke Structure Based on Building Information Modeling[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2018, 52(1): 89-96.
- [20] 谭献良, 管昌生, 卢艺伟, 等. 基于 BIM 模型的建筑风环境可靠性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(12): 4732-4737.
- TAN Xian-liang, GUAN Chang-sheng, LU Yi-wei, et al. Architecture Reliability Analysis in Wind Environment Based on BIM Model[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(12): 4732-4737.
- [21] 叶英华, 刘文鹏, 刁 波. 基于 BIM 技术的混凝土截面时效非线性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 106-112.
- YE Ying-hua, LIU Wen-peng, DIAO bo. BIM-based Time-dependent Non-linear Analysis of Concrete Section[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 106-112.
- [22] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- JTG/T J21—2011, Specification for Inspection and Evaluation of Load-bearing Capacity of Highway Bridges[S].
- [23] Autodesk Asia Pte Ltd. AUTODESK REVIT 二次开发基础教程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- Autodesk Asia Pte Ltd. AUTODESK REVIT API Tutorial Book [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.