

基于BIM-FEM的桥梁健康状态评估研究

张培旭¹ 李跃穗² 郑宝锦³ 应旭永⁴

1. 福州市公路事业发展中心 福建福州 350001
2. 福州市公路事业发展桥隧中心 福建福州 350001
3. 福州市公路事业发展桥隧中心 福建福州 350001
4. 苏交科集团股份有限公司 江苏南京 211112

摘要: 本文利用功能完善的有限元分析软件ANSYS和高性能的计算机软硬件对带裂缝的桥梁结构进行详细地安全评定。以烈士河大桥为例进行BIM模型的建立,通过对实际裂缝的采集和分析生成了带裂缝的桥梁BIM模型。其次利用模型转换接口将带裂缝桥梁BIM模型转换为相应有限元模型,并设定相应条件完成结构模态分析和静力分析,之后对比了桥梁损伤前后结构动力特性变化以及同等荷载下结构响应的变化,实现了桥梁健康状态评估。研究结果表明:基于BIM-FEM方法符合桥梁健康状态评估流程,提高结构计算精度,增强模型健康状态可视化效果,促进项目运维能力的提升。

关键词: 建筑信息模型;有限元模型;静力分析;状态评估

BIM (Building Information Modeling) 全称建筑信息模型^[1],该技术以计算机技术为基础,能够依据整个建筑工程项目的各种信息,构建三维可视化的建筑信息模型,在工程项目的全寿命周期中发挥其运维管理作用。与规划设计施工相比,桥梁运维在整个桥梁寿命周期中时间占比最高。因此运维阶段中使用BIM技术更能充分利用其价值。基于BIM的桥梁管理系统可以有效地管理运维阶段的检查和评定信息,使养护管理工作更加的科学化、

规范化,尽可能减少重复工作,降低养护管理成本。使用BIM技术已成为目前桥梁管养的发展趋势^[2]。

裂缝是混凝土桥梁结构中最常见的病害,裂缝的出现涉及结构外观的破损,受力钢筋的锈蚀及结构功能的丧失。裂缝对桥梁性能的影响主要有两方面的影响。一方面是桥梁的使用性能会下降,开裂会使桥梁刚度降低,从而影响桥梁的正常使用,严重的开裂问题还会导致桥梁承载力明显下降,影响桥梁的安全性能;二是会直接降低桥梁的耐久性及使用寿命^[3]。

传统的桥梁裂缝检测方法基本依赖人工巡检、人为判断病害,并且借助传统检测仪器,如利用裂缝测宽仪、超声波检测仪、骨架式桥检车等来测量裂缝等病害的几何特征。该方法易受到测试专业人员自身的技术和经验等人为主观因素的影响,且检测效率低下,难以适应现代桥梁结构健康状态评估监测数据多且杂的情况^[4]。

本文利用高性能的计算机以及功能完善的有限元分析软件ANSYS,对带病害桥梁结构进行精细的有限元模拟分析,之后依据分析结果在桥梁管养阶段评估其健康状况,对潜在的安全问题进行评估,避免造成重大安全事故。

1 技术路线及实例

1.1 病害模拟流程

一般来说,桥梁病害可分为结构性病害和非结构性病害两种。对于结构性病害则需要通过有限元模拟的方式进行桥梁安全性的数值分析,如图1所示,从位移与变形、材质老化、几何缺损等方面分别进行结构性病害

作者简介:

张培旭,1976年8月16日,男,汉,福建罗源,福州市公路事业发展中心,副科长,高级工程师,本科,毕业院校:重庆交通学院,研究方向:桥梁养护管理,邮箱:673834406@qq.com;

李跃穗1978年6月20日,男,汉,福建南安,福州市公路事业发展桥隧中心,副主任,高级工程师,硕士,毕业院校:福建农林大学,研究方向:桥梁养护管理,邮箱:896094283@qq.com;

郑宝锦1973年10月19日,男,汉,福建闽侯,福州市公路事业发展桥隧中心,科员,高级工程师,本科,毕业院校:福州大学,研究方向:桥梁养护管理,邮箱:476670188@qq.com;

应旭永,1987年6月,男,汉,浙江台州,苏交科集团股份有限公司,副主任,高级工程师,博士,毕业院校:大连理工大学,研究方向:桥梁检测,邮箱:yxy612@jsti.com。

的有限元模拟：位移与变形可在有限元建模分析时设置强制位移来模拟；材质老化可通过单元弹模修正实现；而几何缺损一般通过刚度折减的方法简化处理，采用参数化建模方法建立桥梁初始状态模型作为基准模型，然后根据桥梁检查的病害信息更新有限元模型，以实现病害的实时映射，关联实际结构与有限元模型从而实现病害的数值模拟。对于不影响桥梁实际承载力的非结构性病害仅在BIM模型中标记出它们的位置，用于指导养护即可。

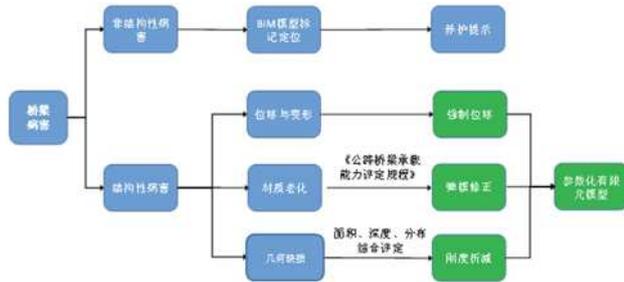


图1 病害的有限元模拟

1.2 健康状态初步评估

我国《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99-2003)、《公路养护技术规范》(JTG H10-2009)以及《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)分别对桥梁裂缝进行了分级，具体标准见表1至表3所示。其中《城市桥梁养护技术规范》和《公路养护技术规范》针对不同结构类型的桥梁，不同的裂缝类型给出了裂缝宽度的限值，实际操作性强，便于现场检测并及时对裂缝危害进行评价，而《公路桥梁技术状况评定标准》更是从定性和定量两方面同时对混凝土梁裂缝的评价进行了规定。

表1 混凝土构件裂缝宽度限值规定

结构类别	裂缝部位	允许最大裂缝宽度/mm
使用钢筋混凝土构件以及精轧螺纹钢的预应力混凝土构件	A类(一般环境)	0.20
	B类(严寒、海滨环境)	0.20
	C类(海水环境)	0.15
	D类(侵蚀环境)	0.15
使用钢丝和钢绞线的预应力混凝土构件	A类和B类环境	0.10
	C类和D类环境	不允许

表2 混凝土梁裂缝宽度限值规定

结构类型	裂缝种类	允许最大裂缝宽度/mm	其他要求
钢筋混凝土梁	主筋附近竖向裂缝	0.25	不允许贯通组合面
	腹板斜向裂缝	0.30	
	组合梁结合面	0.50	
	横隔板与梁体端部	0.30	
	支座垫石	0.50	
预应力混凝土梁	梁体竖向裂缝	不允许	
	梁体纵向裂缝	0.20	

表3 混凝土梁裂缝评定标准

结构等级	定性描述	定量描述
1	完好	—
2	局部位置出现网状裂缝，或主梁出现少量轻微裂缝，缝宽未超限值	网状裂缝累计面积小于等于构件面积的20%，单处面积小于1.0m ² ，或主梁裂缝缝长小于等于截面尺寸的1/3
3	出现大面积网状裂缝，或主梁出现较多横向裂缝，或顺主筋方向出现纵向裂缝，或出现斜裂缝、水平裂缝、竖向裂缝等，缝宽未超限值	网状裂缝累计面积大于等于构件面积的20%，单处面积大于1.0m ² ，或主梁裂缝缝长大于截面尺寸的1/3且小于等于截面尺寸的2/3
4	主梁控制截面出现较多横向裂缝，或顺主筋方向出现较多纵向裂缝并伴有钢筋锈蚀等现象，或出现斜裂缝、水平裂缝、竖向裂缝等，缝宽超限值	主梁裂缝缝长大于截面尺寸的2/3，间距小于20cm
5	主梁控制截面出现大量结构性裂缝，且多数裂缝已经贯通，缝宽超限，主梁出现变形	主梁裂缝缝宽大于1.0mm，间距不超过10cm

实际工程为烈士河大桥。从每根箱梁上选取10条典型裂缝进行分析，采用综合判定法对裂缝进行判定分级^[3]，以初步评判桥梁健康状态，裂缝的详细信息见表4，带裂缝箱梁健康状态初步评定见表5。

表4 10条典型裂缝特征

裂缝编号	裂缝类型	裂缝长度/m	裂缝宽度/mm
C3	腹板竖向裂缝	0.91	0.20
C17	底板横向裂缝	0.45	0.11
C64	腹板纵向裂缝	1.12	0.14
C75	腹板纵向裂缝	4.31	0.21
C96	底板纵向裂缝	3.98	0.37
C112	腹板斜裂缝	1.24	0.18
C154	横隔板竖向裂缝	0.71	0.25
C177	底板纵向裂缝	7.82	0.21
C189	腹板纵向裂缝	2.65	0.19
C201	横隔板竖向裂缝	0.54	0.44

综合评定法可以初步判定带裂缝箱梁的安全状态，由表5可知该带裂缝箱梁的结构等级为4，因此有必要对其进行有限元模拟分析，计算桥梁损伤前后结构响应的变化。

表5 带裂缝箱梁健康状态初步评估

裂缝编号	缝宽是否超限	结构等级
C3	是	4
C17	否	
C64	否	
C75	是	
C96	是	
C112	否	
C154	否	
C177	是	
C189	否	
C201	是	

1.3 BIM模型到有限元模型的转换

利用Inventor2020和Ansys15.0这两个软件实现BIM模型到相应有限元模型的转换。

1.3.1 配置接口

首先配置接口要检查Ansys的必装组件是否安装完全，在Ansys的安装文件夹里有一个installPreReqs.exe文件，打开后程序会自动检测是否安装完全，若未安装完全，将自动安装未装组件。然后便可开始配置接口，配置成功后就完成了模型转换接口的配置，如图2所示，此时再打开Inventor可见模型转换按键ANSYS 15.0。

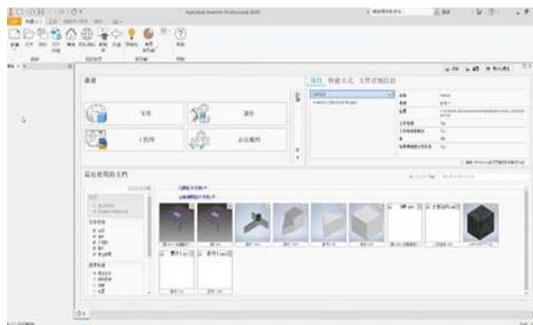


图2 配置接口

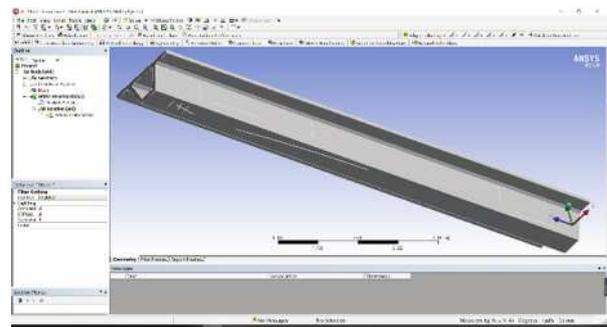
1.3.2 模型无损转换

有了模型转换按键就可以实现BIM模型到相应有限元模型的转换。

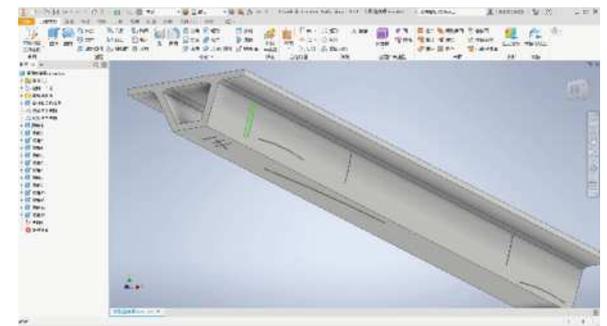
由于之前是对每一条裂缝根据其形状、长度、宽度和深度等信息直接在BIM模型中“挖出裂缝”，实际上修改了几何实体，所以转换到有限元模型中同样是带有裂缝的几何实体，裂缝信息随着几何实体的转换实现了无损传递。带裂缝箱梁BIM模型及其转换得到的有限元模型见图3所示。

1.4 桥梁健康状态评估

前文以得到基于基准有限元模型和实时映射的损伤有限元模型，根据烈士河大桥相关数据资料，依次完成



(a) 带裂缝箱梁BIM模型



(b) 带裂缝箱梁有限元模型

图3 裂缝无损传递

定义单元类型和材料属性、选择单元类型、划分网格、施加边界约束条件等建模工作。加载时考虑自重+车道荷载，进行静力分析和模态分析，计算结果见表6至表7。

表6 损伤前后频率对比

	阶次	1	5
损伤前	频率/Hz	4.0481	15.553
损伤后		3.3784	12.848
差值/Hz		-0.6697	-2.705

表7 损伤前后挠度对比

	最大挠度/mm
损伤前	20.179
损伤后	28.827
增量	8.648

根据有限元建模分析结果可以进行桥梁健康状态评估，对比损伤模型与基准模型的分析结果，参考《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)中校验系数的思路，计算结构损伤后的基频校验系数 ξ_f 和挠度校验系数 ξ_γ ，并对两者进行加权线性组合得到整体刚度校验系数 ξ_w ，然后结合《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)中的评级方法对桥梁健康状态进行分级评定，根据整体刚度校验系数 ξ_w 与临界整体刚度校验系数 ξ_{w0} 的大小关系计算桥梁健康状态评定分数，桥梁健康状态评估流程图见图4所示。

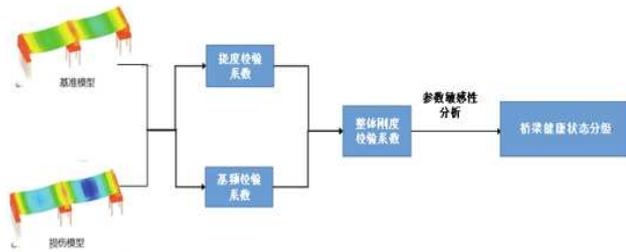


图4 桥梁健康状态评估流程图

1.4.1 校验系数

校验系数包含了四个部分，分别是基频校验系数、整体刚度校验系数、挠度校验系数和临界校验系数。式1.1到1.3给出基频校验系数、挠度校验系数和整体刚度校验系数这三者的定义。

①基频校验系数 ξ_f ，应按下式计算：

$$\xi_f = \frac{f_a}{f_p} \quad (1.1)$$

式中： f_a ——损伤模型基频， f_p ——基准模型基频。

②挠度校验系数 ξ_γ ，应按下式计算：

$$\xi_\gamma = \frac{\gamma_p}{\gamma_a} \quad (1.2)$$

式中： γ_a ——同等荷载下，损伤模型最大挠度， γ_p ——同等荷载下，基准模型最大挠度。

基频校验系数和挠度校验系数均小于1且大于0，校验系数越接近1则表示桥梁健康状态越好，校验系数越接近0则表示桥梁健康状态越差。基频校验系数反应的是结构动力特性的变化情况，而挠度校验系数则反应结构静力特性的变化。

对基频校验系数和挠度校验系数进行加权线性组合，并视动力特性和静力特性同等重要，得到

③整体刚度校验系数 ξ_w ，应按下式计算：

$$\xi_w = 0.5 \xi_f + 0.5 \xi_\gamma \quad (1.3)$$

式中： ξ_f ——基频校验系数， ξ_γ ——挠度校验系数。

通过引入整体刚度校验系数，很好地将基频校验系数和挠度校验系数结合起来，充分反应结构动力和静力特性，以最简单的方式量化结构整体特性的变化。

由式1.1计算可得带裂缝烈士河大桥的基频校验系数

$$\xi_f' = \frac{3.3784}{4.0481} = 0.835;$$

由式1.2计算可得带裂缝烈士河大桥的挠度校验系数

$$\xi_\gamma' = \frac{20.179}{28.827} = 0.700;$$

由式1.3计算可得带裂缝烈士河大桥的整体刚度校验系数 $\xi_w' = 0.77$ 。

④临界校验系数

烈士河大桥的跨径为 $L=25m$ ，由于桥梁允许的最大挠度 γ_{max} 为跨径 L 的 $1/600$ ，即

$$\gamma_{max} = \frac{L}{600} = \frac{25000}{600} = 41.67mm;$$

所以带裂缝烈士河大桥的挠度校验系数 ξ_γ 必须满足

$$\xi_\gamma \geq \frac{\gamma_p}{\gamma_{max}} = \frac{20.179}{41.67} = 0.484 = \xi_{\gamma 0};$$

将这里的0.484定义为临界挠度校验系数 $\xi_{\gamma 0}$ 。

$$\xi_{\gamma 0} = \frac{\gamma_p}{\gamma_{max}} \quad (1.4)$$

式中： γ_p ——同等荷载条件下，基准模型最大挠度； γ_{max} ——损伤模型允许的最大挠度。

临界挠度校验系数 $\xi_{\gamma 0}$ 是挠度校验系数可以达到的最小值，若挠度校验系数小于其临界值，则表示桥梁处于危险状态。注意不存在统一的临界挠度校验系数值，对不同的桥梁，需分别计算得到其各自的临界挠度校验系数。

临界挠度校验系数实现了桥梁健康状态的量化评估，但是对于基频校验系数，我们很难对其定义一个临界最小值。另外已有大量研究表明，基频对结构损伤不敏感，且容易被温度变化干扰，本文将临界挠度校验系数除以基频校验系数的值作为临界整体刚度校验系数，以偏安全的方式对桥梁结构整体进行安全校验，即

$$\xi_{w0} = \xi_{\gamma 0} / \xi_f \quad (1.5)$$

对于烈士河大桥而言，由式1.5得其临界整体刚度校验系数 $\xi_{w0}=0.580$ ，同样它是整体刚度校验系数可以达到的最小值，若整体刚度校验系数小于其对应的临界值，则表示桥梁处于危险状态。

1.4.2 健康状态分级

本文将桥梁健康状态分为五级，每一级都有其对应的健康状态评定分数范围，这将有利于桥梁运维阶段各参与方对桥梁健康状态的理解，另外每一级也有对应的颜色，从而实现桥梁健康状态的可视化展示，具体如表8所示。

表8 桥梁健康状态分级

健康状态评定等级	健康状态描述	健康状态评定分数 s	健康状态对应颜色
1级	全新状态，功能完好	95-100	鲜红色
2级	有轻微缺陷，对桥梁使用功能无明显影响	80-95	暗红色
3级	有中等缺陷，尚且能维持桥梁正常使用功能	60-80	褐色

健康状态评定等级	健康状态描述	健康状态评定分数s	健康状态对应颜色
4级	主要构件有较大的缺陷,对桥梁的使用功能影响严重;或影响承载能力,不能保证正常使用,桥梁处于危险状态	40-60	黄色
5级	主要构件存在严重缺陷,已经不能正常使用,桥梁安全无法保证,处于极度危险状态	0-40	绿色

其中健康状态评定分数s根据整体刚度校验系数 ξ_w 与临界整体刚度校验系数 ξ_{w0} 计算得到。

规定:当 $\xi_w=1$ 时,对应 $s=100$;

当 $\xi_w=\xi_{w0}$ 时,对应 $s=60$;

当 $\xi_{w0} < \xi_w < 1$ 时,相应的s通过线性插值计算得到,即

$$s=60+(100-60) \times \frac{\xi_w-\xi_{w0}}{1-\xi_{w0}} \quad (1.6)$$

例如对烈士河大桥而言,其整体刚度校验系数 $\xi_w=0.77$,介于 ξ_{w0} 和1之间,所以由式1.6得其健康状态评定分数 $s=78.1$,查表8可知带裂缝烈士河大桥的健康状态评定等级为3级。

烈士河大桥健康状态评定分数s与整体刚度校验系数 ξ_w 关系表见表9。

表9 烈士河大桥健康状态评定分数s与整体刚度校验系数 ξ_w 关系表

s	ξ_w
60	0.580
70	0.685
80	0.790
90	0.895
95	0.948
100	1

注意到每一级桥梁健康状态都有其对应的颜色,所以我们将桥梁每跨为单位,在BIM模型中根据其健康状

态评定等级对各构件附上相应的颜色,可视化展示桥梁的健康状态,如图5所示。

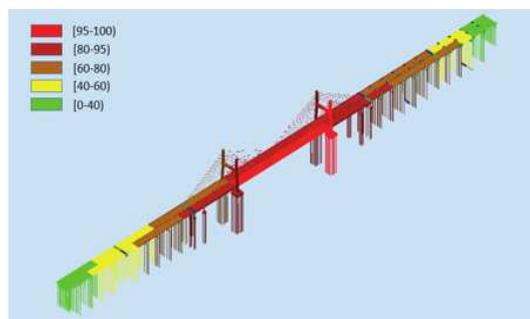


图5 桥梁各跨实时健康状态评分

3 结论

本文通过结合BIM和FEM技术解决实际病害的模拟问题,并通过理论分析并结合数值模拟,以有限元方法为基准,完成桥梁健康状态评估,得到以下结论:

(1) 基于BIM-FEM技术可实现桥梁病害有限元模拟和BIM模型到有限元模型的转换,达到裂缝信息无损传递的效果;

(2) 用基频校验系数、挠度校验系数和整体刚度校验系数定量描述桥梁健康状态,并且对桥梁健康状态进行分级,根据整体刚度校验系数和相应得临界值计算桥梁健康状态评定分数,用各级健康状态对应不同颜色的方式实现了桥梁健康状态可视化。

参考文献:

- [1]杰里·莱瑟林,王新.美国BIM应用的观察与启示[J].时代建筑,2013(02):16-21.
- [2]McGuire B M.Using building information modeling to track and assess the structural condition of bridges[D].Colorado State University, 2014.
- [3]方传俊.预应力混凝土刚构-连续组合箱梁桥裂缝形成原因[J].城市地理,2017(6X):145-145.
- [4]中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司.基于三维建模仿真的大型桥梁结构健康监测方法:CN201110340541.5[P].2012-05-02.