

基于监测数据的装配式箱梁桥湿接缝 连接建模与分析

张挺钧

(宁波市市政设施中心, 浙江 宁波 315000)

摘要: 针对装配式小箱梁桥湿接缝开裂问题,对湿接缝横向连接作用采用共节点弹簧建模方法,并采用湿接缝局部分析和响应面方法求解共节点弹簧刚度,建立小箱梁桥共节点弹簧有限元模型,最终通过对比共节点弹簧模型、梁格模型、壳单元模型的小箱梁桥动力特性,验证共节点弹簧刚度值的可用性和适用性。结果表明:3个模型的桥梁动力特性结果一致,采用共节点弹簧模型可准确表征湿接缝横向连接作用,可用于装配式小箱梁桥的损伤分析。

关键词: 湿接缝;共节点;弹簧;模型修正;响应面法

中图分类号: U443.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0139-04

Modeling and Analysis on Wet Joint Connection of Assembled Box Girder Bridge Based on Monitoring Data

ZHANG Tingjun

(Ningbo Municipal Facilities Center, Ningbo 315000, China)

Abstract: Aiming at the problem of wet joint cracking of assembled small box girder bridge, the common node spring modeling method is used for the transverse connection of wet joint. And the local analysis and response surface method of the wet joint are used to solve the common joint spring stiffness. The finite element model of the common node spring of small box girder bridge is established. Finally, the availability and applicability of common node spring stiffness values are verified by comparing the dynamic characteristics of common node spring model, beam lattice model and shell element model of small box girder bridge. The results show that the dynamic characteristics of the three models are consistent, and the common node spring model can accurately characterize the transverse connection of wet joints, which can be used for the damage analysis of assembled small box girder bridges.

Keywords: wet joint; common node; spring; model updating; response surface method

0 引言

由于有限元模型经常与实际桥梁结构存在一定的结构误差、特征参数误差,未经修正的初始有限元模型很难反应桥梁结构的真实响应,致使影响桥梁结构分析、静动力特性、损伤识别及状态评估的准确性,导致仿真结果与实桥健康监测的特征参数存在一定的差异^[1-2]。有限元模型修正一般是仿真模型的优化问题,模型修正常用方法包括静力修正法、动力修正法以及联合静动力修正法^[3]。模型修正就是将模型参数、结构刚度或质量矩阵元素作为待修正参数,采用寻优目标函数计算更新待修正参数,使得修

正后的模型结果与实测结果趋于一致^[4]。静力法修正一般需对实桥进行荷载试验,需要中断交通,测量数据有限;动力法修正无需中断交通,对实桥模态参数的损伤识别和状态评估比较准确有效,常用于桥梁结构健康监测。

目前,不少学者提出了一些有效的模型修正方法。宗周红等^[5]基于响应面模型修正和单元模态应变能指标进行了支座损伤识别。付波等^[6]结合实桥监测数据,采用中心复合设计方法(CCD)与响应面法对混凝土连续刚构桥模型进行修正。郭力等^[7]采用复域灵敏度分析方法,通过引入特征载荷把动力特性模型的修正转化为静力模型修正。宋彦朋等^[8]提出了一种基于静力数据的贝叶斯模型修正方法,修正结果的精度和稳定性优于静力灵敏度分析方法和位移残差优化分析方法。

收稿日期: 2024-11-27

作者简介: 张挺钧(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道路、桥梁等市政工程建设及各类市政设施维修项目管理工作。

本文以一座装配式连续小箱梁桥为工程背景,开展湿接缝损伤与模型优化研究。湿接缝的横向连接主要传递竖向剪切作用和横向弯矩作用,随着损伤的增加,其横向连接作用降低,至最后仅有竖向剪切作用。目前,小箱梁桥的湿接缝主要采用实体单元、壳单元、虚拟横梁单元进行模拟,对于湿接缝的损伤通过修改材料的弹性模量,使得剪切力和弯矩同时下降。以上方法均不能准确模拟湿接缝损伤全过程,为了更加准确的模拟湿接缝的横向连接作用,本文开展湿接缝共节点弹簧建模方法的研究。

1 实桥监测系统简介

某高速公路装配式连续小箱梁桥,对其桥梁检测发现有湿接缝裂缝、U形裂缝等病害。为掌握该桥梁长期性能变化规律与承载力变化水平,在此大桥安装健康监测系统。

结构的振动特性充分反映桥梁整体安全和桥梁状态,桥梁振动数据经过处理并结合损伤识别与定位方法,可通过振动加速度监测数据判断桥梁结构是否发生损伤。本文主要采用桥梁加速度响应数据进行分析,因此不对桥梁应变、挠度等监测数据进行介绍。选择在小箱梁跨中主梁底板位置安装单向振动传感器采集竖向的加速度响应数据,传感器安装位置见图1。

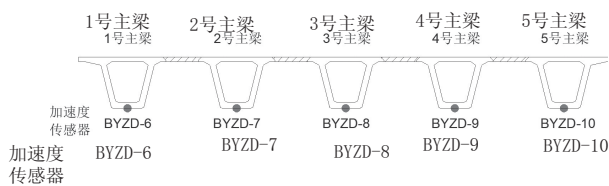


图1 跨中振动测点图

2 共节点弹簧建模

2.1 共节点弹簧模型

为深入探讨湿接缝的有限元模拟问题,提出了采用共节点弹簧模型。共节点弹簧模型中,共节点是指湿接缝单元和弹簧单元的一端共用一个节点,且主梁延伸刚臂至湿接缝节点位置处,刚臂节点和湿接缝节点共位置,即两个刚臂节点和一个湿接缝节点有相同的X、Y、Z坐标,见图2。刚臂节点和湿接缝节点通过单自由度弹簧进行连接,因刚臂节点和湿接缝节点之间有6个自由度,其分别为X、Y、Z方向剪切弹簧、X、Y、Z方向扭转弹簧。

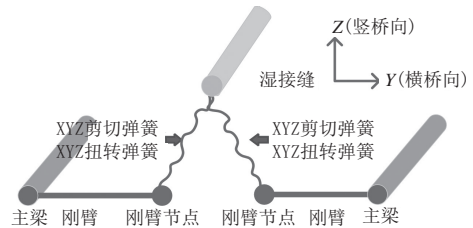


图2 共节点弹簧示意图

装配式梁桥的5个钢筋混凝土小箱梁和4个湿接缝均采用BEAM189梁单元,弹簧采用COMBIN39弹簧单元连接,模拟湿接缝的横向连接作用,刚臂采用CERIG命令建立。针对湿接缝局部分析采用壳单元建立湿接缝局部模型,局部湿接缝在桥梁模型中的位置,见图3。局部湿接缝模型的横桥向和竖向湿接缝尺寸按照实桥湿接缝尺寸设置,局部湿接缝横桥向顶部、底部宽度分别为1.22、1.02 m,高度为0.14 m。

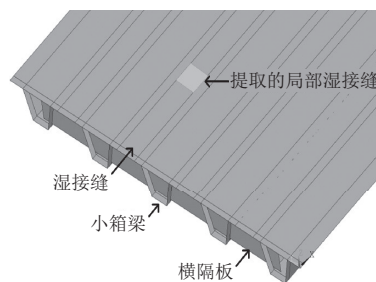


图3 局部湿接缝示意图

2.2 弹簧刚度计算

为求解某一方向剪切刚度,通过对局部湿接缝模型施加1 m的单位强制位移,见图4,提取反力计算得到共节点剪切弹簧的刚度值。由局部湿接缝模型外力平衡可得外荷载f等于支反力。最终,由式(1)可计算得到剪切弹簧的弹簧刚度值。X、Y、Z方向剪切弹簧刚度值见表1。

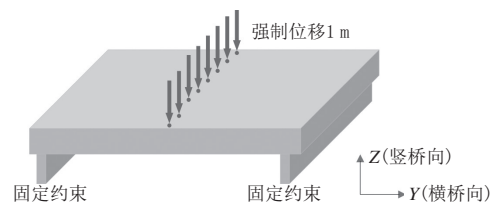


图4 强制位移示意图

$$k = \frac{f}{d} \tag{1}$$

式中:k为剪切弹簧刚度值;f为外荷载,即局部湿接缝左右两端的总支反力;d为湿接缝荷载处位移值。

表1 弹簧剪切与扭转刚度值

方向	X	Y	Z
剪切刚度值/(N·m ⁻¹)	7.9×10 ⁸	5.7×10 ⁹	3.9×10 ⁷
扭转刚度值/(N·m·rad ⁻¹)	9.5×10 ⁶	7.8×10 ⁷	1.9×10 ⁶

为求解 X 方向的扭转弹簧刚度,首先按照局部湿接缝尺寸建立有限元模型,并在模型 Y 方向两端设置固定约束;然后,通过 D 命令在湿接缝模型的一端施加 1 rad 的 X 轴强制转动,见图 5。随后,在局部湿接缝端部约束处提取弯矩,因局部湿接缝处于平衡状态,外荷载等于固定约束处的弯矩。最终,将上述的外荷载弯矩和因外荷载的 1 rad 转动带入式 (2),计算可得扭转弹簧的刚度值, X、Y、Z 方向的扭转弹簧刚度值见表 1。

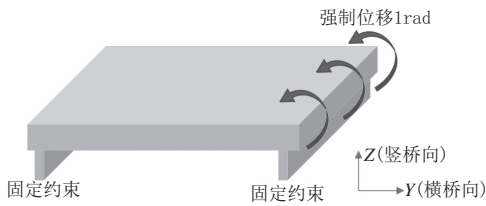


图5 强制转动示意图

$$k = \frac{T}{\psi} \quad (2)$$

式中: k 为扭转弹簧刚度值; T 为局部湿接缝的弯矩; ψ 为局部湿接缝发生的转动角度。

将表 1 弹簧刚度带入共节点弹簧模型,并对比分析壳单元模型、梁格模型、共节点弹簧模型跨中位移响应见表 2,壳单元的主梁位移和梁格模型的主梁位移基本一致,但共节点弹簧模型的位移明显小于另两个模型的位移值。由此说明共节点弹簧刚度值与正确的弹簧刚度还有差距,需对共节点弹簧的刚度值进行修正。

表2 各主梁位移值表 单位: 10^{-4} m

主梁	壳单元模型	梁格模型	共节点弹簧
1号主梁	-3.98	-3.45	-2.91
2号主梁	-6.14	-5.64	-4.87
3号主梁	-9.29	-9.03	-7.46
4号主梁	-6.49	-5.63	-4.87
5号主梁	-3.98	-3.45	-2.94

2.3 弹簧刚度单因素方差分析

共节点弹簧中共有 6 个自由度方向的弹簧,需要通过方差分析对 6 个弹簧刚度的显著性进行分析。采用方差分析模型时,单因素 A 实验中因素 A 取 r 个水平,每个水平重复做 n_i 次实验。单因素方差分析的模型可表示为下式:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

式中: y_{ij} 为单因素 A 的实验结果,其表示因素 A 在第 i 个水平 A_i 下第 j 次重复试验的响应值 ($i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, n_i$); μ 为桥梁响应的总均值; α_i 为

因素 A 在第 i 个水平的主效应,其中, $\sum_{i=1}^r n_i \alpha_i = 0, \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$;

单因素方差分析的因子个数为共节点弹簧个数即 6 个,桥梁响应为 1~10 阶自振频率。按照以上因子信息和桥梁响应信息共设计 64 个计算方案,经计算,共节点弹簧 F 检验见图 6。

阶段	X轴剪切	Y轴剪切	Z轴剪切	X轴扭转	Y轴扭转	Z轴扭转
10	0.0001	0.3637	0.2204	0.0001	0.0001	0.7671
9	0.0001	0.0823	0.1677	0.0001	0.0001	0.7881
8	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0633
7	0.0001	0.0001	0.7418	0.0001	0.0001	0.9089
6	0.0001	0.0001	0.7318	0.0022	0.0001	0.8008
5	0.0001	0.0120	0.0497	0.0001	0.0001	0.0748
4	0.0001	0.0618	0.8936	0.0191	0.0001	0.9322
3	0.0001	0.0412	0.8563	0.0004	0.0001	0.8789
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.8905
1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.1940

图6 单因素显著性 P 值图

在方差分析检验中,一般准则是:检验显著水平的临界值为 0.05,当 $F \geq F_{1-0.05}$ 即 $P \leq 0.05$ 时,表明弹簧刚度因素对桥梁响应的影响显著;当 $0 \leq P \leq 0.001$ 时,弹簧刚度因素对桥梁响应的影响高度显著;当 $P > 0.05$ 时,表明弹簧刚度因素对桥梁响应的影响不显著,在随后的分析中可以不进行考虑,即无需修正弹簧刚度。

在上图 6 个共节点弹簧刚度中, Z 方向扭转弹簧的 1~10 阶频率 P 值均大于 0.05,其余弹簧的 1~10 阶自振频率 P 值基本都小于 0.000 1,偶有 P 值超过 0.05,其中 Z 轴剪切弹簧对 1 阶、2 阶、5 阶、8 阶频率的影响显著。F 检验结果表明 X、Y、Z 方向剪切弹簧刚度和 X、Y 方向扭转弹簧刚度对桥梁响应的影响是十分显著的;而 Z 方向扭转弹簧刚度的 P 值均大于 0.05,表明 Z 方向扭转弹簧刚度对桥梁响应的影响不显著。综上所述, X、Y、Z 方向剪切弹簧和 X、Y 方向扭转弹簧刚度作为响应面修正参数, Z 方向扭转弹簧刚度为 1.9×10^6 N/m。

2.4 基于响应面的弹簧刚度修正

响应面方法 (Response Surface Method, RSM) 通过结合统计分析和优化设计,用简洁明了的显示函数表达出输入变量和输出变量之间隐藏的复杂函数关系^[9]。

采用 Box-Behnken 法设计实验,使用五因素 (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)、三水平 (-1, 0, 1) 设计实验,试验点为立方体的每条棱的中点。实验总数为 $2^k + 2k + M_0$, 其中 k

为自变量总数, M_0 为中心点实验数, BBD 设计中常取 6 组, 因此共计 46 组实验。将实验数据进行拟合, 可得二阶多项式的响应面模型, 其公式为:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k \beta_{j,l} x_j x_l + \sum_{j=1}^k \beta_{j,j} x_j^2 + \varepsilon \quad (4)$$

式中: Y 为响应变量; K 为有 k 个因子, 其水平分别记为 x_1, x_2, \dots, x_k ; β_0 为截距项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为 k 个因子的线性效应, $\beta_{1,2}, \beta_{1,3}, \dots, \beta_{(k-1),k}$ 为两个因子之间的相互交互的效应, $\beta_{1,1}, \beta_{2,2}, \dots, \beta_{k,k}$ 为因子的二次效应; ε 为随机误差项。

弹簧刚度参数单因素的显著性和因素之间的相互影响的显著性分析结果见图 7。显著性结果图中, X 轴为弹簧刚度参数以及交互项; Y 轴为桥梁响应; Z 轴为 P 值。在 X 轴中, A 为 X 方向剪切弹簧刚度; B 为 Y 方向剪切弹簧刚度; C 为 Z 方向剪切弹簧刚度; D 为 X 方向扭转弹簧刚度; E 为 Y 方向扭转弹簧刚度。最终由桥梁不同弹簧刚度的桥梁频率值建立响应面模型。

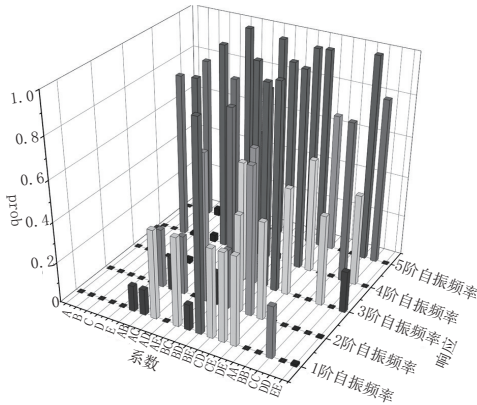


图7 弹簧刚度参数的显著性 P 值图

将梁格模型和壳单元模型的前 20 阶频率作为各个响应的目标值, 基于目标达到法对目标函数进行迭代计算, 最终计算得到修正后的参数值见表 3。本响应面模型的拟合精度均符合“3R”准则, R^2 准则值、 R_{adj}^2 准则值、 R_{pred}^2 准则值均接近于 1, 响应面模型的拟合精度高, 此响应面模型能够准确表示共节点弹簧刚度参数与桥梁响应值(频率)之间的关系。

表3 修正后弹簧刚度值表

弹簧类型	弹簧刚度值
X 方向剪切弹簧/($N \cdot m^{-1}$)	$4.457\ 59 \times 10^8$
Y 方向剪切弹簧/($N \cdot m^{-1}$)	$7.815\ 44 \times 10^9$
Z 方向剪切弹簧/($N \cdot m^{-1}$)	$4.434\ 17 \times 10^7$
X 方向扭转弹簧/($N \cdot m \cdot rad^{-1}$)	$1.008\ 71 \times 10^6$
Y 方向扭转弹簧/($N \cdot m \cdot rad^{-1}$)	$7.659\ 41 \times 10^6$
Z 方向扭转弹簧/($N \cdot m \cdot rad^{-1}$)	1.90×10^6

2.5 基于结构动力特性的弹簧刚度评估

为验证响应面模型计算得到的共节点弹簧刚度值准确性, 将通过对比分析不同建模方法的小箱梁桥动力特性, 由此判断共节点弹簧模型的修正效果, 评估弹簧刚度的正确性。

由于在结构动力特性中, 结构前若干阶自振频率和振型起控制作用, 因此只分析结构的前 4 阶自振频率和振型(见表 4)。可知, 梁格法模型、板壳法模型和共节点弹簧法有限元模型的前 4 阶振型一致。梁格法与共节点弹簧法的频率相差最大为 1.76%, 板壳法与共节点弹簧法的频率相差最大为 4.85%, 3 种不同的湿接缝模拟方法的频率相差较小。由此验证响应面修正的弹簧刚度值的正确性, 因此采用共节点弹簧小箱梁模型能够准确计算桥梁响应, 后续研究可采用共节点弹簧模型。

表4 自振频率与振型

阶次	梁格模型		壳单元模型		共节点弹簧模型	
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型
1	2.802 5	竖弯	2.796 8	竖弯	2.848 8	竖弯
2	3.258 5	竖弯	3.343 5	竖弯	3.305 0	竖弯
3	4.067 0	扭转	4.325 4	扭转	4.125 5	扭转
4	4.245 8	扭转	4.374 5	扭转	4.321 7	扭转

3 结 语

针对湿接缝损伤模拟问题, 提出共节点弹簧方法模拟湿接缝, 并采用湿接缝局部分析和响应面方法求解共节点弹簧刚度, 建立小箱梁桥共节点弹簧有限元模型。现得出以下结论。

(1) 通过对湿接缝在集中力或弯矩作用的应力进行湿接缝局部分析可得湿接缝各个方向的刚度, 此刚度值的共节点弹簧模型挠度值和壳单元模型还是有一定差距。

(2) 桥梁动力特性能够反映桥梁的刚度情况, 通过对比梁格模型、壳单元模型和共节点弹簧模型的动力特性(频率和振型), 说明共节点弹簧模型的准确性。本文提出共节点弹簧模型能够准确反映出湿接缝在实际工程中的复杂行为。

参考文献:

[1] 张立业, 汪波, 王兵见, 等. 基于响应面法的斜拉桥动力模型修正方法[J]. 公路交通科技, 2022, 39(8): 46-52, 61.
 [2] 许世展, 李杨, 冯冠杰, 等. 基于响应面法的桥梁节段参数模型修正[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(6): 1658-1665.
 [3] 李琦, 齐东春, 杨虎, 等. 基于联合静动力修正的混凝土斜拉桥主梁挠度变化规律研究[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 111-118.

(下转第 153 页)