

基于模型修正理论的装配式T梁桥荷载横向分布系数计算

黄模镇

(广东冠粤路桥有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 为了计算装配式T梁桥发生主梁损伤情况下的荷载横向分布系数, 在刚性横梁法的基础上, 选择主梁抗弯刚度损伤折减系数作为待修正参数, 再以实测和理论挠度值构造目标函数, 并基于L-M法与G-N法相结合法进行多目标优化, 得到修正后的荷载横向分布系数。为了验证计算方法的准确性, 以一座在役18年的装配式T梁桥为例, 进行了荷载试验。结果表明: 模型修正后的挠度计算值与实测值相比误差较小, 模型修正后的主梁荷载横向分布系数与实测值较为吻合, 最大误差仅为3.9%。

关键词: 桥梁工程; 装配式桥梁; 荷载横向分布系数; 刚性横梁法; 模型修正理论

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

Calculation of Transverse Load Distribution Coefficient of Prefabricated T-beam Bridge Based on Model Modification Theory

HUANG Mozhen

(Guangdong Guanyue Highway & Bridge Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China)

Abstract: In order to calculate the lateral distribution coefficient of load in the case of damage to the main beam of a prefabricated T-beam bridge, based on the rigid beam method, the bending stiffness damage reduction coefficient of the main beam is selected as the parameter to be corrected. Then, an objective function is constructed using measured and theoretical deflection values, and multi-objective optimization is carried out using the combination of L-M method and G-N method to obtain the corrected lateral distribution coefficient of load. In order to verify the accuracy of the calculation method, load tests were conducted on a prefabricated T-beam bridge that has been in service for 18 years. The results show that the calculated deflection value after model correction has a small error compared with the measured value, and the transverse distribution coefficient of the main beam load after model correction is in good agreement with the measured value, with a maximum error of only 3.9%.

Key words: bridge engineering; prefabricated bridges; transverse load distribution coefficient; rigid transverse beam method; model updating theory

根据《2022年交通运输行业发展统计公报》, 截至2022年底, 全国已建成103万座桥梁, 其中84%为中小桥梁, 中小桥梁绝大多数为装配式桥梁^[1]。装配式T梁桥在桥梁使用年限、交通量增长和其外部环境变化的多重压力下, 不同程度地存在病害。尤其是主梁构件, 作为主要受力构件, 当发生损伤时, 横向各片主梁抗弯刚度会存在不同程度的折减, 现有的荷载横向分布

计算方法也会失效, 故亟须解决桥梁发生损伤后的荷载横向分布系数的计算问题。

近几年在荷载横向分布系数计算方法上, 许多学者做了很多有益的工作。曹皓^[2]基于测试桥梁现场检测、试验以及有限元模拟数据, 构建“表观病害-荷载横向分布能力”关联分析的神经网络模型, 用于基于表观病害的空心板梁桥荷载横向分布能力评定。钱若霖^[3]综合考虑梁体和

收稿日期: 2023-07-28

作者简介: 黄模镇, 工程师, 本科, 研究方向为道路桥梁施工

铰缝均发生损伤情况，对桥梁损伤进行量化评估，推导适用于发生损伤空心板桥的修正铰接板法。宋国昕^[4]分析空心板桥荷载横向分布影响线在铰缝损伤下的变异性，提出三种识别铰缝损伤的方法。旷斌^[5]在铰接板梁法的基础上，考虑了铰缝的损伤，提出了一种计算桥梁损伤后荷载横向分布系数方法。周建庭^[6]针对装配式小箱梁桥的横向受力特点，提出了一种新型的横隔板构造形式。李文^[7]提出了九种可能存在损伤的工况，建立有限元模型，研究桥梁有横向损伤后装配式T梁桥荷载横向分布的变化规律。邬晓光^[8]在刚接梁法的基础上，考虑了湿接缝和主梁的损伤，提出了一种计算桥梁结构损伤后荷载横向分布系数方法。Gangone^[9]为了研究桥梁结构损伤对主梁荷载横向分布系数的影响，对两座已经运营多年的桥梁进行主梁应变参数监控。战家旺^[10]在铰接板法基础上，考虑板间接缝剪切变形，以桥梁的自振频率和振型构建目标函数，以竖向弹簧刚度、扭转弹簧刚度以及剪切弹簧刚度为待识别参数，提出一种基于模型修正技术的预制梁桥荷载横向分布系数简化分析方法。上述研究虽然涉及了桥梁发生损伤后的荷载横向分布系数研究，但损伤参数的确定往往较难量化，量化的工作量也是巨大的。而使用模型修正理论对损伤参数进行修正，则可以避免以上问题，使得损伤参数量化工作大大减少，计算模型也更加接近真实的受力情况。

本文以刚性横梁法为基础，建立考虑桥梁损伤的简化模型，研究装配式T梁桥主梁损伤后荷载横向分布的计算方法。

1 损伤评价指标

装配式梁桥经过几十年的发展，已经成为占比最大的桥梁结构形式，随着桥梁服役年限的增加，装配式梁桥也出现了不同程度的病害，尤其是早期建设的桥梁。桥梁出现病害后，需要及时进行检测及评估，以评判桥梁的损伤情况。对于装配式T梁桥而言，主梁是其主要构件，亟需对主梁的损伤情况进行评估。作为桥梁的主要组成构件，主梁抗弯刚度的损伤可以由主梁抗弯刚度损伤折减系数来表征^[11]。假定主梁损伤后，弯曲挠度的增加只与其抗弯刚度的折减相关，可定义主梁抗弯刚度损伤折减系数 ζ_k 为：

$$\zeta_i = \frac{K'_i}{K_i} \quad (1)$$

式中： K_i 、 K'_i 分别为梁体未损伤和出现损伤状况下的抗弯刚度。

2 基于刚性横梁法的损伤模型

为了更加准确地计算主梁发生损伤后的装配式T梁桥的荷载横向分布系数，在刚性横梁法的理论上，考虑各片主梁发生不同程度的损伤，引入主梁抗弯刚度损伤折减系数，进行理论推导。

2.1 竖向荷载作用

在竖向荷载 P 的作用下，由横梁假定是刚性的可知，各片梁的挠度相等，即：

$$\omega'_1 = \omega'_2 = \cdots = \omega'_n \quad (2)$$

在材料力学中简支梁与挠度有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \omega'_i &= \frac{R'_i l^3}{48EI} \\ R' &= CI_i \omega'_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $C = 48/l^3$ 。

由材料力学可知 EI 为主梁抗弯刚度，用参数 $K = EI$ 表示，当主梁抗弯刚度发生损伤时，引入主梁抗弯刚度折减系数 ζ 予以考虑，损伤后的主梁抗弯刚度用 $K' = \zeta K$ 表示。

由静力平衡条件代入上式可得：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n R'_i &= C \omega'_i \sum_{i=1}^n K'_i = C \omega'_i \sum_{i=1}^n \zeta_i K_i = P \\ C \omega'_i &= \frac{P}{\sum_{i=1}^n \zeta_i K_i} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中得：

$$R'_i = \frac{\zeta_i K \cdot P}{\sum_{i=1}^n \zeta_i K_i} \quad (5)$$

2.2 偏心力矩作用

在偏心力矩 $M = P \cdot e$ 的作用下，各片梁的竖向挠度有如下关系式：

$$\omega''_i = a_i \cdot \tan \theta \quad (6)$$

由式(3)，可知主梁荷载与挠度的关系式为：

$$R''_i = C \zeta_i K_i \omega''_i \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)中得：

$$R''_i = C \zeta_i K_i \cdot a_i \tan \theta = \beta \cdot a_i \cdot \zeta_i K_i, \beta = C \tan \theta \quad (8)$$

从力矩的平衡条件可知：

$$\sum_{i=1}^n R''_i \cdot a_i = \beta \sum_{i=1}^n a_i^2 \zeta_i K_i = P \cdot e \quad (9)$$

由式(8)可知 $\beta = R''_i / a_i \zeta_i K_i$ 。

将 β 代入式(9)可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \zeta_i K_i}{a_i \zeta_i K_i} \cdot R''_i &= P \cdot e \\ R''_i &= \frac{P \cdot e \cdot a_i \zeta_i K_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 \zeta_i K_i} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

则两种荷载作用下的总作用力叠加可得:

$$R_i = R'_i + R''_i = \frac{\zeta_i K_i}{\sum_{i=1}^n \zeta_i K_i} \cdot P + \frac{a_i \zeta_i K_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 \zeta_i K_i} \cdot P \cdot e \quad (11)$$

式(11)是根据主梁不同间距和刚度情况下推导出来的,目前装配式梁桥设计中大多数采用等间距、等刚度,则上式还可以简化为:

$$R_i = \frac{\zeta_i}{\sum_{i=1}^n \zeta_i} \cdot P + \frac{a_i \zeta_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 \zeta_i} \cdot P \cdot e \quad (12)$$

3 基于静力模型修正

结构静力模型修正是利用结构静力测试响应信息,使理论计算值与实测值尽可能保持一致。为了得到准确的主梁损伤情况,通过桥梁静载试验数据,对理论的识别参数进行不断地修正,以得到反映现场实际损伤情况的参数值。

3.1 识别参数

由上述的基于刚性横梁法的损伤模型可知,主梁损伤的情况是通过引入主梁抗弯刚度损伤折减系数来表示的。实际服役多年存在主梁病害桥梁,各片主梁都存在不同程度的破损,破损程度往往通过主梁抗弯刚度来表示,因此为了得到桥梁各片主梁的实际损伤情况,需要对主梁抗弯刚度进行准确评估。但对各片主梁抗弯刚度进行损伤识别时,容易出现数值计算截断误差,同时结合式(12)的计算需求,最终选择主梁刚度损伤折减系数作为待识别参数。由前文可知,从定义上主梁刚度损伤折减系数能够直接反映各片主梁的实际刚度损伤情况,而从桥梁构件的表观病害体现上,主梁刚度损伤折减系数与各片主梁的裂缝分布数量和范围直接相关,同时主梁刚度损伤折减系数与主梁损伤前后的挠度值也存在一定联系。因此,主梁刚度损伤折减系数能够实际反映桥梁主梁构件的实际工作情况。

为了减少模型修正的工作量,需对待识别参

数的修正范围做一定的约束,防止修正时出现不在参数范围内的数值。由上述分析可知主梁刚度损伤折减系数能够实际反映桥梁的工作情况,与桥梁的病害情况与挠度值存在相关性。因此,可根据桥梁的定检报告和荷载试验数据,进行初步的修正范围限制。对于一般主梁刚度损伤折减系数的上限值,考虑桥梁结构尺寸偏差和实际弹性模型的提高,其系数可以取 1.05 左右。对于主梁刚度损伤折减系数的下限值,根据现场各片主梁病害情况以及荷载试验数据确定。

3.2 目标函数

为了使桥梁静载试验的实测值响应值与模型参数值更加接近,需要构造一个目标函数,静载试验的主梁挠度值是比较合适的参数,根据静载试验不同的试验工况及测量数据来构造目标函数。

$$F(X) = \sum_{i=1}^n (1 - U_{ai}/U_{ui})^2 \quad (13)$$

式中: $F(X)$ 为构造的目标函数; U_{ui} 为荷载试验各片主梁挠度值; U_{ai} 为损伤模型计算的各片主梁挠度值; n 荷载试验数据测点数量。

为了使理论计算值与实测值两者差值最小,构建以下最优函数。

$$\min F(X) \quad (14)$$

$$s. t. X_1 \leq X \leq X_u \quad (15)$$

式中: X 为待修正的结构模型参数集; X_1 、 X_u 为结构模型参数集 X 的上限和下限,是优化问题的约束条件。

3.3 模型修正过程

本文采用 $L-M$ 法与 $G-N$ 法相结合的方法对目标函数进行优化,该方法能够较好地进行模型修正过程。具体的修正过程见图 1。

(1) 构建损伤理论模型,并以桥梁荷载试验实测挠度值作为模型输入值。

(2) 选择待修正的参数,由 3.1 节可知,选择主梁抗弯刚度损伤折减系数作为修正参数,能够较好地反映实际情况,同时对主梁抗弯刚度损伤折减系数的修正范围做一定限制,以减少修正工作量。

(3) 构造目标函数,以荷载试验挠度值和模型理论值构造目标函数,并根据设定的允许值进行判断,如果满足误差要求,则参数修正完成。如果不满足误差要求,则需要进一步修正输入参数值。

(4) 对目标函数进行优化,该过程主要是通

过 MATLAB 工具进行求解过程, 本文采用 $L-M$ 法和 $G-N$ 法相结合的方法进行优化, 加快运算过程。

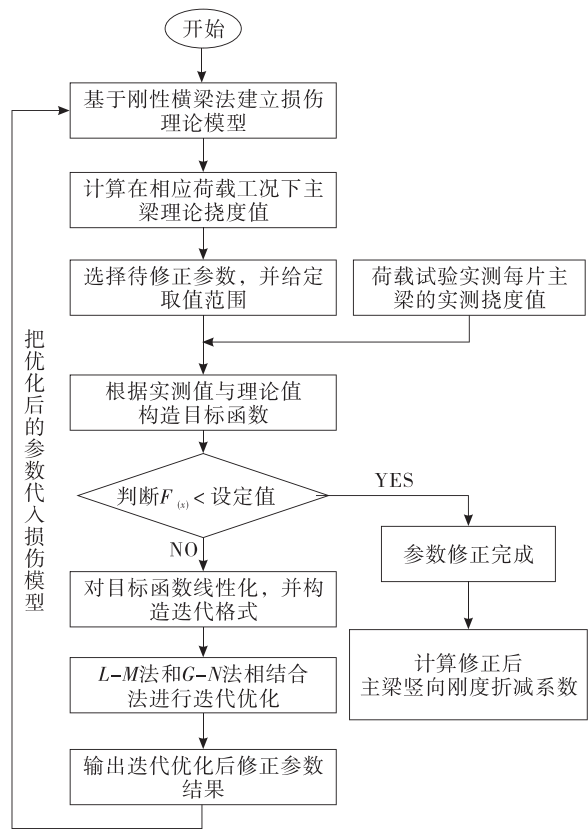


图1 模型修正流程图

4 实例验证

4.1 工程概述与荷载试验

4.1.1 工程概述

以中江高速改扩建项目的一座装配式T梁桥进行实例验证, 把模型修正后的计算结果与静载试验实测数据进行比对, 以验证计算方法的适用性和准确性。

某桥为 16 m×30 m 的装配式 T 梁桥, 桥宽为 14 m, 由 7 片主梁组成, 如图 2 所示。上部结构为 30 m 装配式 T 梁, 桥梁在 2005 年建成通车。

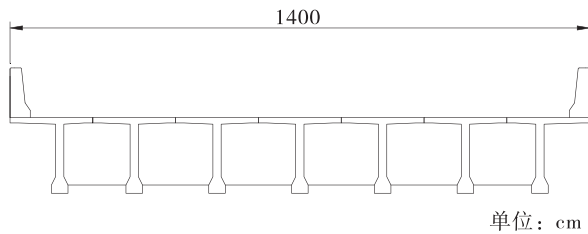


图2 桥梁横断面布置

4.1.2 荷载试验

在荷载试验前, 通过对桥梁的常规外观检

查, 初步排查桥梁病害情况, 发现第2跨1#~3#主梁梁底有纵横向裂缝, 腹板有竖向裂缝, 其他主梁病害较少, 如图3所示。因此选择第2跨进行荷载试验。荷载试验由静力荷载试验和单辆车加载试验组成, 通过静载试验可知每片主梁在静载试验工况下的竖向挠度值, 单辆车加载试验可获得每片实际主梁的荷载横向分布系数, 以验证该计算方法的准确性。

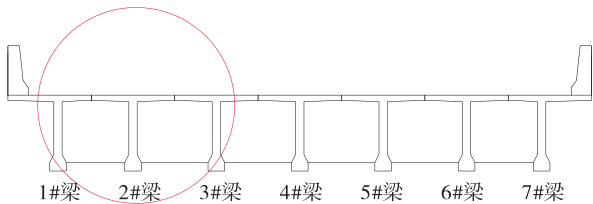
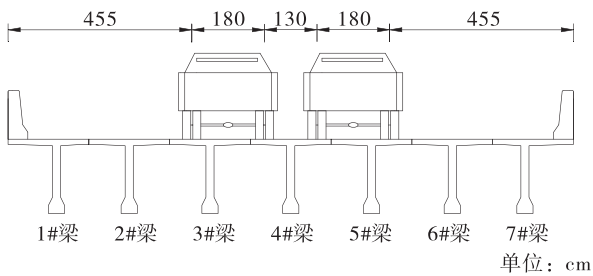
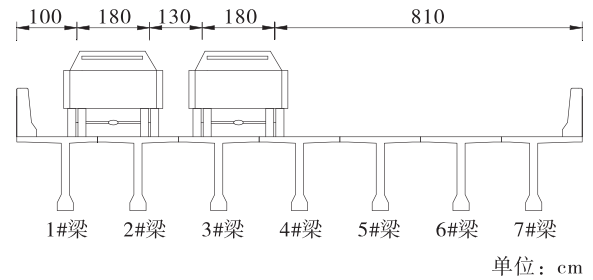


图3 桥梁病害示意图

通过静载试验得到主梁跨中挠度值, 以该值作为模型修正的响应值。试验跨选择第2跨进行试验, 加载方式分为中载与偏载两个工况, 车辆横向布载按照通用桥规加载, 如图4所示。车辆纵向加载点为跨中截面, 中载与偏载都为4辆车。在每片主梁底布置1个位移传感器。



(a) 中载



(b) 偏载



(c) 加载立面示意

图4 汽车荷载布载示意

通过布置在第2跨每片梁底的位移传感器, 可以得到汽车荷载中载和偏载情况下各片主梁的挠度数据和校验系数, 具体数据如表1。

表 1 静载试验挠度数据

测试位置	偏载/mm			中载/mm		
	实测 挠度	计算 挠度	校验 系数	实测 挠度	计算 挠度	校验 系数
1	3.85	4.92	0.78	0.58	0.76	0.77
2	2.81	2.73	1.03	2.22	2.19	1.01
3	1.42	1.68	0.85	2.83	3.47	0.82
4	0.47	0.54	0.87	3.51	3.92	0.90
5	0.12	0.135	0.89	3.17	3.47	0.91
6	0.04	0.043	0.93	2.03	2.19	0.93
7	-0.11	-0.118	0.93	0.72	0.76	0.96

由表 1 静载试验中载和偏载数据可知，实测挠度值与计算挠度值整体趋势一致。除 1#~3#主梁存在偏差外，其余主梁校验系数均大于 0.85，其中 2#主梁中载和偏载的校验系数分别为 1.01 和 1.03，相较于其他主梁偏大。这也验证了外观病害检查的结论，当主梁出现病害时，挠度的响应值会偏大。同时也说明了静载试验数据的准确性。

单梁车荷载加载位置见表 2 和图 5，参数 x 表示汽车荷载中心到护栏边缘的距离。

表 2 单车车横向布载示意 单位：cm

测点编号	1	2	3	4	5	6	7
车辆横向布载位置	120	300	500	700	900	1100	1280

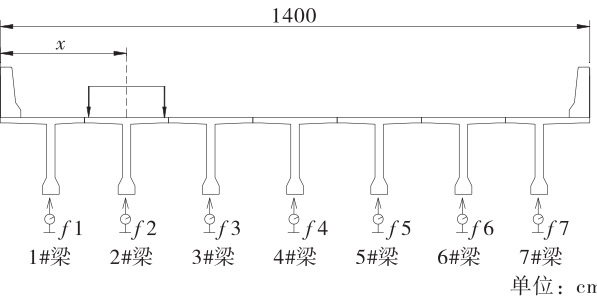


图 5 位移传感器和车辆荷载横向位置示意

4.2 模型修正结果

通过荷载试验挠度值作为响应输入值，在基于刚性横梁法的损伤模型中不断修正模型挠度计算值与主梁的抗弯刚度折减系数，模型修正值详见表 3、表 4。通过表 2 和图 6 得知，在模型修正前，各片主梁的挠度计算值与荷载试验的实测值误差较大，误差最大值为 27.8%，模型修正后各片主梁的挠度计算值与荷载试验的实测值误差明显减小，相对误差在 1.6%~4.6%之间，同时也验证了该方法的有效性与准确性。由于篇幅所限，下面仅列出偏载工况下的数值。

表 3 模型修正前后主梁挠度对比

测试 工况	测试 位置	实测值 /mm	计算值/mm		相对误差/%	
			修正前	修正后	修正前	修正后
偏载	1	3.85	4.92	3.91	27.8	1.6
	2	2.81	2.73	2.94	-2.8	4.6
	3	1.42	1.68	1.48	18.3	4.2
	4	0.47	0.54	0.49	14.9	4.3
	5	0.12	0.135	0.124	12.5	3.3
	6	0.04	0.043	0.041	7.5	2.5
	7	-0.11	-0.118	-0.112	7.3	1.8

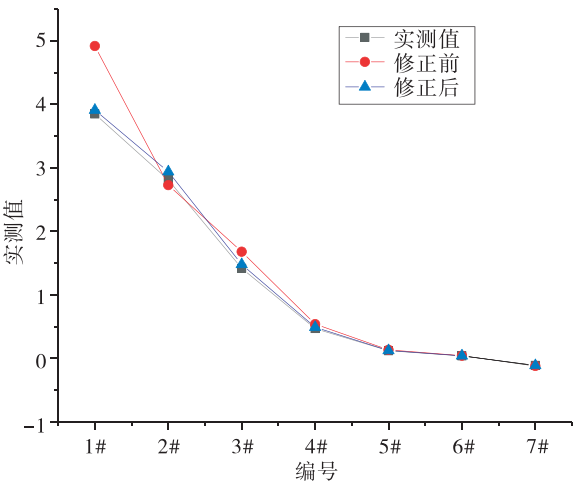


图 6 挠度在模型修正前后变化

以一座 7 片预制 T 梁桥为例。在对桥梁进行外观检查时，发现 1#~3#主梁有明显的损伤，同时为了减少模型修正的计算量，选择 1#~3#主梁抗弯刚度损伤折减系数作为待修正的参数。通过不断进行模型修正，可得最终修正数值。由表 4 和图 7 可知，2#主梁抗弯刚度下降最大，主梁抗弯刚度损伤折减系数为 0.75，1#主梁次之，3#主梁折减得最小。从桥梁外观检查得知，1#~2#主梁损伤得最严重，3#主梁次之，模型修正的参数也是与之对应，只是 1#主梁修正前数值未考虑防

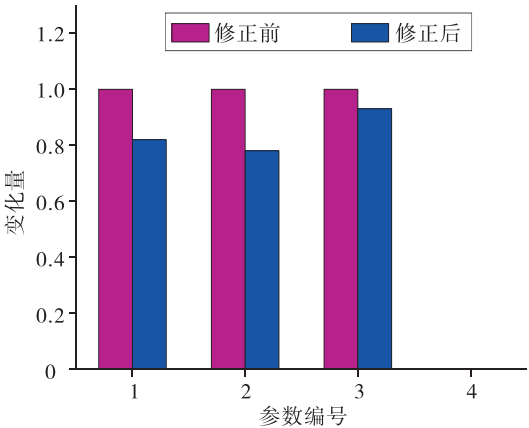


图 7 待修正参数变化

撞护栏对其抗弯能力有一定的协助作用，如果考虑此作用，则1#主梁自身的损伤程度是大于2#主梁的。

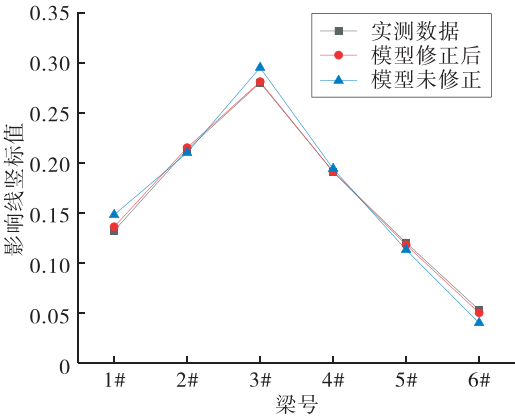
表4 模型参数修正前后对比

参数		修正前后对比		
		修正前	修正后	参数变化/%
主梁刚度 损伤折减系数	ζ_1	1	0.82	-18
	ζ_2	1	0.78	-22
	ζ_3	1	0.93	-7

通过上述模型修正流程，最终可得到1#~3#主梁修正后的主梁刚度损伤折减系数 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 ，再分别代入式(12)，通过基于刚性横梁法的损伤模型计算各片主梁挠度影响线和主梁荷载横向分布系数，具体数值详见表5。限于篇幅，仅列出1#~3#主梁横向分布影响线对比。

通过表5和图8可知，模型修正前的主梁挠度影响线与实测数据存在偏差，尤其是1#~2#主梁，模型修正后主梁挠度影响线与实测数据吻合较好。

在模型修正前，各片主梁的荷载横向分布系数与荷载试验的实测值误差较大，误差最大值为7.4%，模型修正后各片主梁的挠度计算值与荷载



(c) 3号板梁

图8 横向分布影响线对比

表5 模型修正前后荷载横向分布系数对比

方法与误差		梁号						
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
模型修正法	修正前	0.724	0.604	0.488	0.412	0.488	0.604	0.724
	修正后	0.7	0.584	0.498	0.402	0.476	0.602	0.709
实测值		0.672	0.674	0.566	0.491	0.394	0.465	0.588
相对误差/%	修正前	7.4	6.7	-0.6	4.6	4.9	2.7	3.4
	修正后	3.9	3.2	1.4	2.0	2.4	2.4	1.3

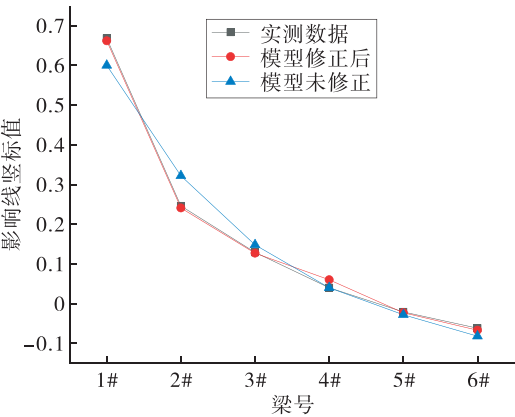
试验的实测值误差明显减小，相对误差在1.3%~3.9%之间，从而验证了模型的合理性与可靠性。

5 结论

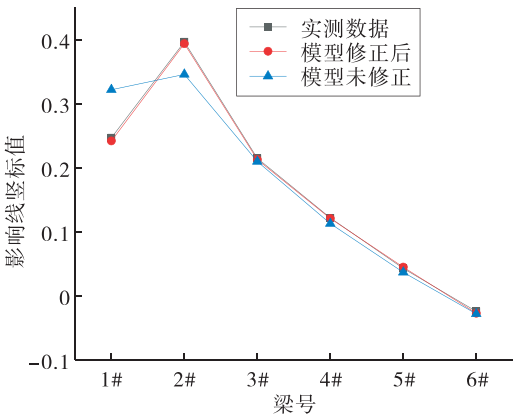
针对装配式多片T梁桥，基于刚性横梁法及模型修正理论，提出了改进方法，用来识别桥梁损伤程度，以及计算荷载横向分布系数。该方法是在刚性横梁法的基础上，考虑梁片不同程度的损伤，引入主梁抗弯刚度损伤折减系数，构建一个简化损伤模型，并通过模型修正理论对待识别参数进行不断修正，得到符合实际情况的主梁抗弯刚度损伤折减系数，通过算例进行验证。结果表明：通过模型修正理论修正的参数值与实测值误差较小，其中模型修正后的主梁挠度值与实测值误差范围在1.6%~5.1%之间，模型修正后的主梁荷载横向分布系数与实测值吻合较好，误差范围在1.3%~3.9%之间，各片主梁荷载横向分布系数与修正前比较都出现了不同程度的变化，其中发现病害情况较多的1#和2#梁荷载横向分布系数变小，而相邻的其他主梁荷载横向分布系数变大，出现了荷载横向重分布现象。

参考文献：

[1]交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报



(a) 1号板梁



(b) 2号板梁

- [N]. 中国交通报,2023-06-16(002).
- [2] 曹皓,孙敦华,王子琛,等. 空心板梁桥表观病害与荷载横向分布关联分析[J]. 中外公路,2023,43(3): 114-121.
- [3] 钱若霖,苏佩,杨谦. 基于损伤分析的空心板桥荷载横向分布系数研究[J]. 公路与汽运,2021,202(1): 118-120,125.
- [4] 宋国听. 基于荷载横向分布影响线的空心板桥铰缝损伤识别方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [5] 旷斌,李院军. 考虑铰缝损伤的装配式空心板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J]. 世界桥梁,2019,47(5): 74-78.
- [6] 周建庭,张华彬,陈磊,等. 新型小箱梁铰缝损伤前后荷载横向分布规律研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(11): 34-40.
- [7] 李文,杜伟强,武先梅. 移动荷载下横向损伤对 T 梁桥边梁荷载横向分布的影响[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2020,35(03): 54-58,77.
- [8] 邬晓光,黄成. 考虑旧桥损伤的拼宽 T 梁桥荷载横向分布计算[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(9): 2233-2239.
- [9] GANGONE M V, WHELAN M J. Damage identification in highway bridges using distribution factors[C]. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series,2017.
- [10] 战家旺,高胜星,闫宇智,等. 基于模型修正的公路简支板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J]. 中国公路学报,2019,32(05): 72-79.
- [11] 李院军,邬晓光,黄成,等. 考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数计算[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(06): 1459-1465.

(上接第 18 页)

3.2 雨天交通事故风险路段综合整治原则

对于判别为存在水漂风险的路段可以通过水膜厚度计算模型和水漂速度阈值计算模型进行影响因素敏感性和显著性分析,如路段纵横坡、路面类型、构造深度等;进行技术经济效果评估,优化和确定路段水漂风险整治方案。对于已有综合整治困难的道路或路段,也可以通过限制雨天车速的方式实现交通安全的目标。

4 结论

本研究提出了高速公路雨天交通事故多发的原因及机理,系雨天路面积水,车辆发生水漂失控所致;鉴于雨天交通事故多发路段实际上就是车辆水漂风险路段,提出并验证了高速公路雨天交通事故风险路段识别程序;提出了高速公路雨天交通事故风险路段综合整治措施和雨天允许行驶速度的确定方法。

参考文献:

- [1] 广东省交通运输厅. NO. 1! 高速公路改扩建迎来“广东模式”[EB/OL]. (2023-05-04) [2023-08-04]. http://td.gd.gov.cn/dtxw_n/gdjrxw/content/post_4174414.html.
- [2] SINGH S. Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey [R]. Washington, DC: National Center for Statistics and Analysis,2015.
- [3] South Carolina Department of Public Safety. South Carolina traffic collision fact book 2016 [M]. Columbia,SC: SCDPS,2017.
- [4] KHAN G, QIN X, NOYCE D A. Spatial analysis of weather crash patterns [J]. Transportation Engineering, 2008,134(5): 191-202.
- [5] JUNG S, JANG K, YOON Y, et al. Contributing factors to vehicle to vehicle crash frequency and severity under rainfall [J]. Safety Research,2014,50: 1-10.
- [6] BLACK G, JACKSON L E. Pavement surface water phenomena and traffic safety [J]. ITE J. 2000,70(2): 32-37.
- [7] GALLAWAY B M, IVEY L, HAYES G, et al. Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning [R]. Rep. No. HWA-RD-79-31. Washington, DC: FHWA. 1979.
- [8] ONG G P, FWA T F. Prediction of wet-pavement skid resistance and hydroplaning potential [J]. Transp. Res. Rec.,2007,(1): 160-171.
- [9] ANDERSON D A, HUEBNER R S, REED J R, et al. Improved surface drainage of pavements [R]. Washington,DC: Transportation Research Board,1998.
- [10] DEHNAD M H, KHODAI A. Effects of asphalt pavement texture on hydroplaning threshold speed [J] J. Cent. South Univ.,2019,26(1): 256-264.
- [11] HORNE W B. Tire hydroplaning and its effects on tire traction [J]. Highway Research Board,1968: 24-33.
- [12] GONG Y, CHEN X, YI J, et al. Hydrodynamics and friction estimation for wet tire/ground interactions [C]. San Diego: 2023 American Control Conference, 2023.