

引用本文:张文武,张荣凤,齐兴军,等. 基于静动力模型修正的简支梁桥承载力评定方法[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(6):122-132.  
ZHANG Wen-wu, ZHANG Rong-feng, QI Xing-jun, et al. Simple-supported Beam Bridge Bearing Capacity Assessment Method Based on Static and Dynamic Model Modification[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(6): 122-132.

DOI:10.19815/j.jace.2021.07145

# 基于静动力模型修正的简支梁桥承载力评定方法

张文武<sup>1</sup>, 张荣凤<sup>2</sup>, 齐兴军<sup>2</sup>, 米家禾<sup>2</sup>

(1. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098; 2. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:**为快速完成对桥梁安全状况的评定,采用基于静动力试验模型修正的方法对某装配式钢筋混凝土简支梁桥进行桥梁承载力评定。利用单辆车缓慢驶过桥面测得桥梁关键测点的挠度影响线,基于环境激励对桥梁进行模态测试,测得桥梁的前 5 阶自振频率,依据图纸建立桥梁的初始有限元模型,利用现场实测挠度影响线和频率修正初始有限元模型,得到代表桥梁实际工作状态的基准有限元模型;在基准有限元模型上施加与传统荷载试验相同的试验荷载,计算得到修正后桥梁的挠度和应变响应,根据相关评定规程计算实际桥梁的校验系数,从而评定桥梁承载力。结果表明:联合单辆重车实测位移影响线和频率进行模型修正,能够得到精准的有限元修正模型;利用静动力模型修正的模型对桥梁进行承载力评定的评价结果与传统荷载试验非常接近,精度达到 90% 以上,该评定方法省时省力、便捷快速,具有很强的高效性与可行性。

**关键词:**模型修正;校验系数;承载力评定;影响线;频率

**中图分类号:**TU311

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-2049(2022)06-0122-11

## Simple-supported Beam Bridge Bearing Capacity Assessment Method Based on Static and Dynamic Model Modification

ZHANG Wen-wu<sup>1</sup>, ZHANG Rong-feng<sup>2</sup>, QI Xing-jun<sup>2</sup>, MI Jia-he<sup>2</sup>

(1. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China;

2. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** In order to complete the evaluation of bridge safety quickly, the method based on static and dynamic test model correction was used to evaluate the bearing capacity of a fabricated reinforced concrete simply-supported beam bridge. Using a single vehicle to drive slowly across the bridge deck, the deflection influence line of key measuring points of the bridge was measured, the modal test on the bridge based on environmental excitation was conducted, and the first five natural vibration frequencies of the bridge were measured. The initial finite element model of the bridge according to the drawings was established, and the benchmark finite element model representing the actual working state of the bridge was obtained by using the field measured deflection influence line and frequency modified initial finite element model. The same test load as the traditional load test was arranged on the benchmark finite element model, and the deflection and strain response of the modified bridge were calculated. The verification coefficient of the

收稿日期:2021-07-26

基金项目:山东省交通运输厅科技计划项目(2020B69);山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目(XTM201904)

作者简介:张文武(1981-),男,山东济宁人,高级工程师,工学硕士,E-mail:147849246@qq.com。

actual bridge was calculated according to the relevant evaluation regulations, so as to evaluate the bearing capacity of the bridge. The results show that the accurate finite element correction model can be obtained by combining the measured displacement influence line and frequency of a single heavy vehicle. The evaluation results of bridge bearing capacity evaluation using the model modified by static and dynamic models are very close to the traditional load test, and the accuracy is more than 90%. The evaluation method is time-saving, labor-saving, convenient and fast, and has strong efficiency and feasibility.

**Key words:** model modification; verification coefficient; bearing capacity evaluation; influence line; frequency

## 0 引言

近年来,“桥梁养护管理与检测加固技术交流”、“桥梁结构智能检测与安全评价技术论坛”等会议在中国频繁召开,工程界与学术界对桥梁检测养护等系列问题展开深入研究和实践。国内外学者对不同的承载力评定方法开展理论研究,并将各种方法逐渐应用于实际工程中。

在众多评定方法中,荷载试验法以其直观可靠的特点被广泛应用于中小公路桥梁承载力评定中,现已发展成为最成熟的评定方法,但该方法存在需要耗费大量的人力物力、中断交通等缺点。基于有限元模型修正的桥梁承载力评定是在修正后的有限元模型基础上,对桥梁结构进行评定,本质上属于荷载试验的范畴,但相比荷载试验,该方法避免了试验过程耗费大量人力物力的缺点。海内外不少学者对有限元模型修正技术做了大量研究,姚昌荣等<sup>[1]</sup>对基于动静力数据的模型修正方法做了详细介绍,李波等<sup>[2-3]</sup>研究了基于有限元模型的结构损伤检测方法。Schommer等<sup>[4-5]</sup>通过识别更新模型和原始模型之间的差异来检测损伤是否发生以及损伤位置。宋晓东等<sup>[6]</sup>通过计算每个子结构少量低阶模态,得到整体结构的特征解及特征解灵敏度,进而缩短模型修正时间。刘宇飞等<sup>[7-8]</sup>利用模型修正方法对桥梁结构承载力进行了评定。

准静力影响线是通过移动荷载的作用得出,对结构的特殊截面具有全局性施加荷载的优点,相比于传统静载试验,避免了工况少、数据少的缺点<sup>[9]</sup>。史文军等<sup>[10-11]</sup>利用准静力影响线实现了对桥梁的损伤识别、寿命预测及承载力评定。

1987年,国外学者提出利用实测应力影响线修正初始有限元模型来得到一个精确的有限元模型,从而实现了对桥梁评定的目的<sup>[12]</sup>。它用适当的优化算法对理论和实测影响线之间的残差进行优化,从

而使模型能够代表实际桥梁的工作状况,这种方法思路清晰,简洁高效,具有重要的实用价值。郭亮<sup>[13]</sup>利用应变影响线对一座预应力混凝土连续箱梁桥进行模型修正,采用拟荷载试验法对桥梁进行承载力评定。肖祥等<sup>[14]</sup>利用实测位移影响线对一座斜拉桥进行多尺度有限元模型修正,提高了对桥梁整体位移和局部应力的分析精度。Chen等<sup>[15]</sup>在实测中增加传感器数量,改变测点到损害位置来提升影响线评定结构损伤的准确性。

本文基于模型修正的桥梁承载力评定方法,首先利用实测数据进行模型修正,得到能够代表桥梁实际工作状态的基准有限元模型;然后在基准有限元模型上施加与传统荷载试验相同的试验荷载,计算桥梁的位移及应变响应;最后根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》计算校验系数,对桥梁进行承载力评定。

## 1 有限元模型修正方法

按照不同修正算法技术,有限元模型修正可分为基于频响函数的模型修正、基于人工神经网络的模型修正、基于模拟退火算法的模型修正、基于优化理论的模型修正和基于遗传算法的模型修正<sup>[16]</sup>。基于优化理论参数修正能够利用静动载试验结果,不断调整初始有限元模型的几何尺寸、物理参数等数值,在保证自身精度的前提下,使修正后的有限元模型计算结果趋于实测值,从而可以对结构的安全可靠性做出评价。

桥梁结构现场测试通常分为静力测试与动力测试,静力测试获得的位移和动力测试获得的频率精度高,能够反映结构的整体效应。为了提高修正模型的可靠性,克服单独运用静力或动力测试数据进行修正的局限性,采用联合位移和频率的方法进行模型修正,使修正后的模型更准确地反映结构的静力性能和动力性能。

本文选择基于优化理论的参数修正方法进行研究,利用大型通用软件 ANSYS 或对其进行二次开发实现对结构的模型修正。联合位移影响线和频率构造目标函数为

$$f_s(x) = \frac{\sum_{i=1}^k (u_{mi} - u_{ei})^2}{\sum_{i=1}^k u_{mi}^2} \quad (1)$$

$$f_{s1}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \min |u_{mi} - u_{ei}|}{\sum_{i=1}^n \min |u_{mi}|} \quad (2)$$

$$f_m(x) = \frac{\sum_{i=1}^j (\lambda_{mi} - \lambda_{ei})^2}{\sum_{i=1}^j \lambda_{mi}^2} \quad (3)$$

$$f_{m1}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \max |\lambda_{mi} - \lambda_{ei}|}{\sum_{i=1}^n \max |\lambda_{mi}|} \quad (4)$$

$$F_1 = \beta_s f_s + \beta_m f_m \quad (5)$$

$$F_2 = f_{s1} + f_{m1} \quad (6)$$

式中:  $f_s$  为基于静力参数位移的目标函数;  $u_m$  为位移实测值;  $u_e$  为位移理论计算值;  $f_{s1}$  为基于位移的状态变量;  $f_m$  为基于动力参数频率的目标函数;  $\lambda_m$  为频率实测值;  $\lambda_e$  为频率理论计算值;  $f_{m1}$  为动力参数状态变量;  $F_1$  为联合动静力参数的目标函数;  $\beta_s$  为静力目标函数权重系数,取值为  $1/k$ ;  $\beta_m$  为动力目标函数权重系数,取值为  $1/j$ ;  $F_2$  为联合动静力参数的状态变量;  $n$  为修正的状态变量个数;  $k$  为影响线个数;  $j$  为频率阶数。

ANSYS 提供的优化方法有零阶优化算法和一阶优化算法两类。零阶优化算法是一种完善的通用算法,采用该方法能够迅速获得优化结果,可以有效地处理大多数工程问题。本文利用零阶算法进行模型修正。联合位移影响线和频率的模型修正方法主要过程如下:①利用一辆测试车沿指定路径缓慢驶过桥面,采集试验桥跨中截面梁底不同测点的位移影响线,对试验桥进行模态测试,获取试验桥的前 5 阶频率;②建立试验桥初始有限元模型,获得理论影响线与频率;③利用实测数据与理论数据,借助 ANSYS 优化设计模块对桥梁初始有限元模型进行修正,得到能够代表桥梁实际工作状态的基准有限元模型。

## 2 简支梁桥有限元模型修正

### 2.1 有限元建模与现场测试

某高速公路的佟家庄大桥全长 270.66 m,跨径组合为  $13 \times 20$  m,桥面总宽度为  $2 \times 11.2$  m,横向布置为 0.5 m 护栏 + 10.25 m 净宽 + 1.5 m 中分带 + 10.25 m 净宽 + 0.5 m 护栏。上部结构为 C40 简支钢筋混凝土 T 型梁,下部结构为肋板台、柱式墩、桩基础。该桥于 1993 年建成通车,设计荷载等级为汽-20、挂-100。现桥面铺装为 C40 混凝土铺装层 + 7 cm 厚的沥青铺装层,混凝土铺装层厚度从桥面外侧的 8 cm 渐变到内侧的 24.8 cm,形成 1.5% 的桥面横坡。该桥整体外观图及桥梁横断面、立面如图 1、2 所示。



(a) 桥梁正面



(b) 桥梁立面

图 1 佟家庄大桥整体外观

Fig. 1 Overall Appearance of Tongjiashuang Bridge

对佟家庄大桥第 7 跨支座及上部结构建立有限元分析模型。初始模型的截面尺寸、材料信息根据设计资料确定。主梁采用 Shell63 单元模拟,混凝土弹性模量为 3 250 MPa,密度为  $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,泊松比为 0.167; T 梁翼缘板之间的连接采用共节点,各片装配式 T 梁桥之间的横梁实际尺寸采用梁单元模拟;板式橡胶支座用 Combin14 单元模拟,支座设置在距梁端 0.25 m 处,采用简支约束,竖向刚

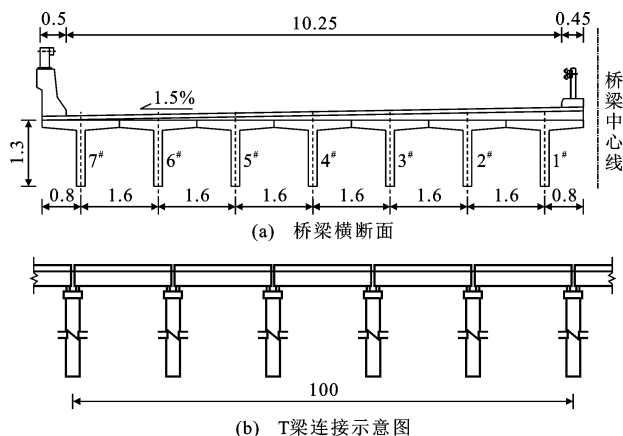


图2 桥梁横断面与立面(单位:m)

Fig. 2 Bridge Cross Section and Elevation (Unit:m)

度为  $1 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。公路桥梁设计中,一般不考虑桥面系参与结构受力,将其作为二期恒载作用在主梁上,因此,初始模型不考虑铺装层参与抗力,采用质量单元 Mass21 模拟。桥梁外侧护栏采用 Beam4 单元模拟,内侧波形护栏采用 Mass21 单元模拟。根据以上信息,桥梁初始有限元模型如图 3 所示。

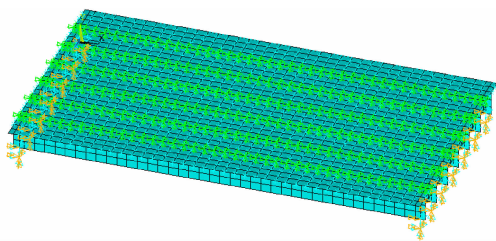


图3 佟家庄大桥初始有限元模型

Fig. 3 Initial Finite Element Model of Tongjiashuang Bridge

位移影响线测试工况为:测试车车道距离桥梁内侧 4.2 m,单辆测试车以小于  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度匀速通过桥梁,连续采集数据。其中,测试车辆轴距分别为 1.45 m 和 4.10 m,轴重分别为 13.46、13.46、9.94 t。数据采集系统的采样频率为 100 Hz,同一测试路径测试车行驶 3 次。频率采用现场模态测试获取,影响线与频率测试工况、测点布置如图 4、5 所示。

## 2.2 修正参数选取

考虑到混凝土铺装层一般配置 1~2 层钢筋网,其对结构刚度贡献也较大<sup>[17]</sup>,因此,本文在模型修正过程中采用 Soild65 单元模拟混凝土铺装层,使其参与结构抗力,通过有限元模型修正技术获取铺装层参与结构抗力的厚度。

联合经验法与灵敏度的方法,结合桥梁设计图

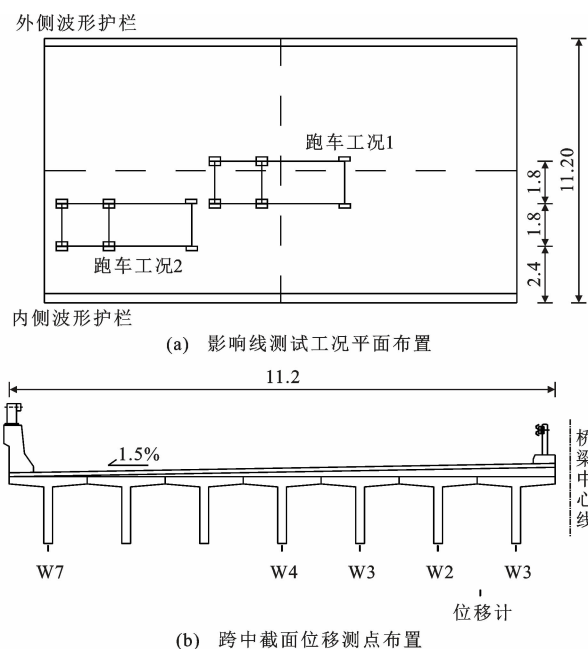
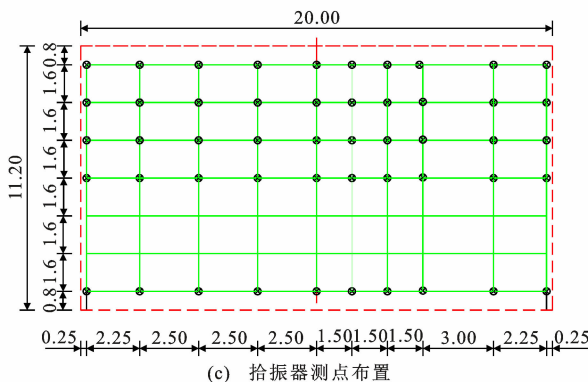


图4 测试工况及测点布置(单位:m)

Fig. 4 Testing Conditions and Arrangement of Measuring Points (Unit:m)



纸、现场实测桥梁相关信息,进行修正参数的选择。试验桥设计说明中主梁混凝土弹性模量  $E_1$  为 3 250 MPa,桥面铺装混凝土弹性模量  $E_2$  为 3 150 MPa,考虑混凝土配合、浇筑以及相关研究表明实际混凝土弹性模量可能会大于规范值<sup>[18]</sup>等因素,混凝土弹性模量及密度  $D$  修正范围上下浮动 20%;泊松比  $\nu$  根据经验取值,修正范围为 0.16~0.2;T梁腹板厚度  $L_1$  参考设计规范,修正范围为 16~20 cm,翼缘板厚度边缘到根部  $L_2 \sim L_4$  的设计尺寸分别上下变化 2 cm,混凝土铺装层厚度初始值取 0,铺装层实际为外侧 8 cm 到内侧 24.8 cm 的变厚度,因此桥梁外侧  $T_1$  到内侧  $T_2$  铺装层渐变厚度的上限值分别为 8 cm 和 24.8 cm。敏感参数分布如图 6 所示。从图 6 可以看出:均值历史曲线趋于平稳,说明样本数目足够多,对跨中梁底位移敏感的参数有  $E_1$ 、 $L_1$ 、 $\nu$ 、 $L_2$ 、



表 1 有限元模型修正参数取值范围

Table 1 Range of Modified Parameters of Finite Element Model

修正参数	初始值	修正值下限	修正值上限
$E_1/\text{MPa}$	3 250	2 600	3 900
$D/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 500	2 000	3 250
$E_2/\text{MPa}$	3 150	2 520	3 780
$\nu$	0.167	0.160	0.200
$L_1/\text{cm}$	18	16	20
$L_2/\text{cm}$	8	6	10
$L_3/\text{cm}$	11.38	9.38	13.38
$L_4/\text{cm}$	14.76	12.76	16.76
$T_1/\text{cm}$	0.0	0.0	8.0
$T_2/\text{cm}$	0.0	0.0	24.8

2.3 基于动静力的有限元模型修正

2.3.1 实测值与理论值对比

对现场实测的位移数据在时间上离散,以测试车前轴进入试验跨为起点,前轴离开试验跨为终点,从位移时程曲线中提取影响线。由于现场采集仪器采样频率高,得到的位移数据量很大,位移时程每 0.5 m 取一个数据,绘制实测影响线。为了尽可能消除测试车速度大小带来的误差,取 3 次测试值的平均值作为最终实测值,得到的实测最小值与初始有限元模型理论计算最小值如表 2 示。本文中所有位移向下为负,向上为正。

表 2 位移实测最小值与理论最小值对比

Table 2 Comparison of Measured and Theoretical Minimum Values of Displacement

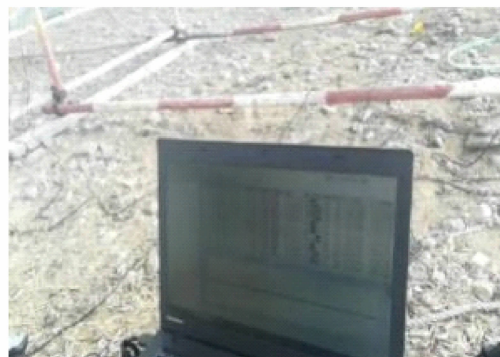
测点编号	位移实测值/mm	位移理论值/mm	相对误差/%
1	-2.580	-4.282	-66.0
2	-2.708	-4.171	-54.0
3	-2.670	-4.062	-52.1
4	-2.658	-3.783	-42.3
7	-1.231	-2.392	-94.4

由表 2 可知,两个工况下测点 7 相对误差最大,这是由于测点 7 位于桥梁外侧,位移测量数值本身很小,过小的测量数值容易造成较大误差,在有限元模型修正时可能会影响整体优化效果,因此优化过程不采用测点 7 的数据。其他测点实测影响线与理论影响线如图 7 所示,横坐标为车辆前轴沿桥面纵向移动位置,纵坐标为位移值。

由图 7 可知:各测点的位移最值并不在跨中位置 10 m 处,具有一定的偏移,这是由于测试车的轴重和轴距不相等,在加载过程中,将前轮刚进入桥跨时的位置作为位移或应变的起点,而跨中的位移或

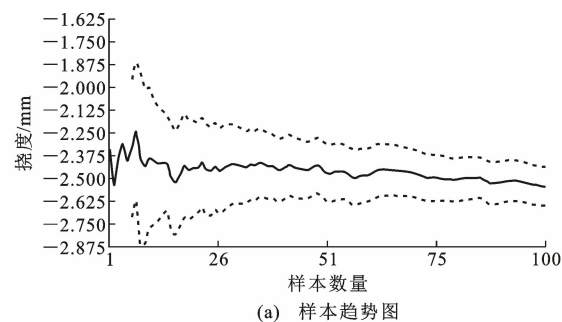


(a) 影响线测试车

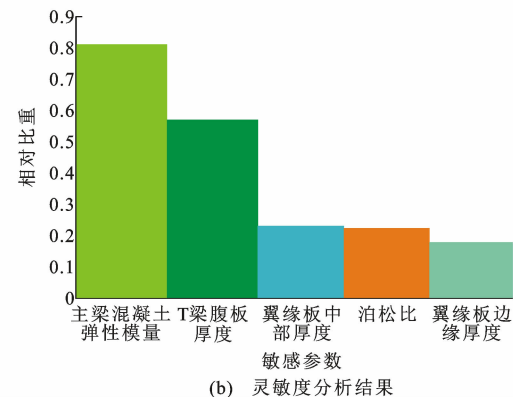


(b) 影响线数据采集

图 5 现场测试  
Fig. 5 Field Testing



(a) 样本趋势图



(b) 灵敏度分析结果

图 6 位移灵敏度分析结果

Fig. 6 Displacement Sensitivity Analysis Results

$L_3$ 、 $L_4$  等。

综上分析,选取的修正参数及取值范围如表 1 所示。

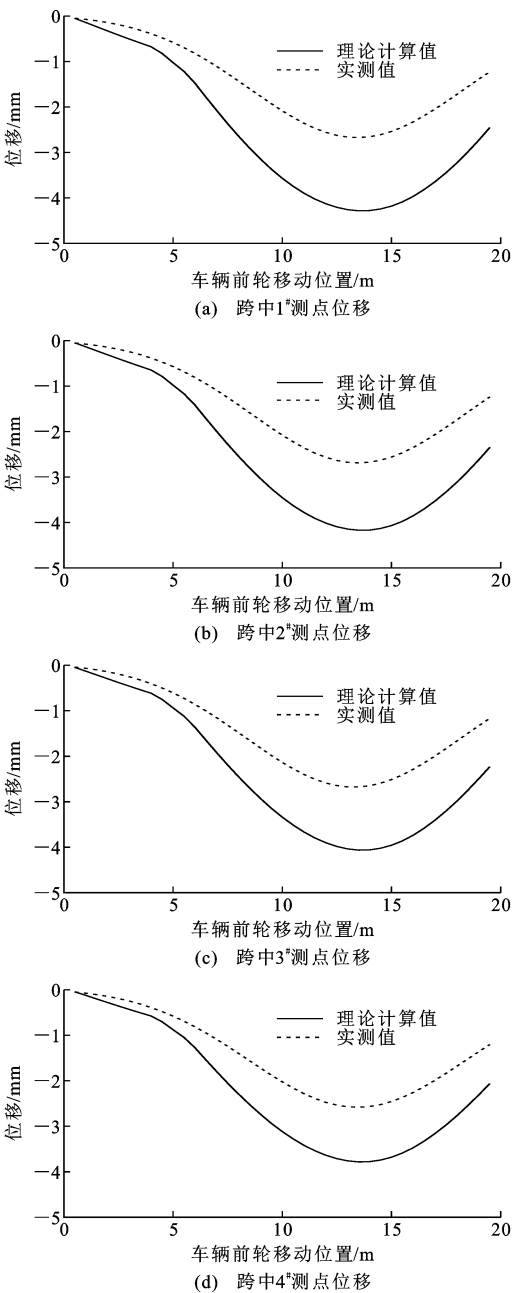


图 7 位移影响线理论值与实测值

Fig. 7 Theoretical and Measured Values of Displacement Influence Line

应变响应是由测试车辆前后轮共同作用的组合效应所致<sup>[19]</sup>;测试车前轴刚进入试验跨时,各测点位移在 0 mm 附近波动,测试车前轴离开试验跨时,各测点位移并不为 0 mm,这与测试车中后轴仍在桥上的现象相符。由表 2 可知,由初始模型计算得到的位移影响线数值偏大,且各测点误差均较大。误差可能来自初始模型,计算时忽略了混凝土铺装层提供的抗力,导致理论数据与实测值误差过大,由此说明铺装层对桥梁结构刚度的贡献不能忽略。

对桥面 50 个拾振器测量的主梁竖向振动加速

度数据选取合适的模态识别方法进行处理,获取桥梁的前 5 阶频率  $f_1 \sim f_5$ ,得到的实测频率与理论频率误差如表 3 所示。

表 3 桥梁实测频率与理论频率

Table 3 Measured and Theoretical Frequencies of Bridge			
频率	频率实测值/Hz	频率理论值/Hz	相对误差/%
$f_1$	5.31	3.99	24.9
$f_2$	6.47	5.62	13.1
$f_3$	16.36	13.82	15.5
$f_4$	17.03	16.57	2.7
$f_5$	20.51	17.72	13.6

由表 3 可知,桥梁前 5 阶频率的实测值均大于理论值,最大相对误差为 24.9%,最小相对误差为 2.7%。利用零阶优化算法联合位移影响线与频率对初始模型进行修正。

2.3.2 修正结果

模型修正后最优序列的各设计参数变化值如表 4 所示。

表 4 设计参数修正数值及变化率

Table 4 Modification Value and Change Rate of Design Parameters			
修正参数	参数初始值	参数修正值	变化率/%
$E_1/\text{MPa}$	3 250	3 330	-2.5
$D/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 500	2 869	-14.8
$E_2/\text{MPa}$	3 150	2 690	14.6
$\nu$	0.167	0.199	-19.2
$L_1/\text{cm}$	18.0	19.8	-10.0
$L_2/\text{cm}$	8.0	7.9	1.3
$L_3/\text{cm}$	11.38	11.28	0.9
$L_4/\text{cm}$	14.76	14.66	0.7
$T_1/\text{cm}$	0.0	6.4	
$T_2/\text{cm}$	0.0	18.2	

由表 4 可知,桥面铺装混凝土弹性模量与翼缘板厚度减小,其他设计参数增大,混凝土铺装层修正后厚度由桥梁外侧 6.4 cm 渐变到内侧 18.2 cm。将修正参数替换到初始有限元模型中重新加载计算,分析修正前后各测点位移数值与桥梁前 5 阶频率,结果如表 5、6 所示。各测点位移影响线的理论值、实测值、修正后计算值结果如图 8 所示。

由表 5、6 可知:联合位移影响线和频率对初始模型修正后,位移实测值与修正值相对误差最大为 2.6%,最小为 1.3%;频率实测值与修正值相对误差最大为 13.0%,最小为 0.6%,模型修正后位移与频率误差明显减小。结合图 8 可知,模型修正后,位移与频率的修正值与实测值非常接近,表明联合静

表 5 模型修正前后最小位移值对比

Table 5 Comparison of Minimum Displacement Values Before and After Model Modification

测点编号	位移实测值/mm	位移修正值/mm	相对误差/%
1	-2.658	-2.589	2.6
2	-2.670	-2.614	2.1
3	-2.708	-2.639	2.5
4	-2.580	-2.547	1.3

表 6 模型修正前后频率值对比

Table 6 Comparison of Frequency Values Before and After Model Modification

频率	频率实测值/Hz	频率修正值/Hz	相对误差/%
$f_1$	5.31	4.62	13.0
$f_2$	6.47	6.43	0.6
$f_3$	16.36	15.59	4.7
$f_4$	17.03	18.70	9.8
$f_5$	20.51	19.43	5.3

动力参数的模型修正方法可以有效地提高模型精度,修正模型能够反映试验桥的实际工作状态。

3 桥梁承载力评定

3.1 基于传统荷载试验的桥梁承载力评定

3.1.1 传统荷载试验

选择试验桥的第 7 跨两个四分点截面及跨中截面为控制截面,测试截面如图 9 所示。

两个四分点截面外侧 4 片梁以及跨中截面的 7 片梁底分别布置位移传感器,跨中截面的 7 片梁底分别布置应变传感器,所有传感器布置如图 10、11 所示。

选择边梁跨中挂-100 荷载最大弯矩为试验控制指标,选用 3 辆三轴加载车,加载车辆信息如表 7 所示,采用三级加载方式进行加载试验,计算加载效率为 0.96,其中车辆编号同时代表逐级加载的顺序,加载车布置及现场试验如图 12 所示。

3.1.2 试验结果

在试验荷载作用下,试验跨控制截面实测应变、位移数据如表 8、9 所示。

由表 8、9 可知,跨中截面 2# 测点应变校验系数与位移校验系数均大于 1#、3#~7# 测点,应变校验系数分布范围为 0.71~0.99,位移校验系数分布范围为 0.47~0.70,相对残余应变最大值为 3.88%,相对残余位移最大值为 8.46%;截面 I ( $L/4$  截面)位移校验系数范围为 0.50~0.59,相对残余位移最大值为 5.59%;截面 III ( $3L/4$  截面)位移校验系数范围为 0.54~0.64,相对残余位移最大值为 4.34%。

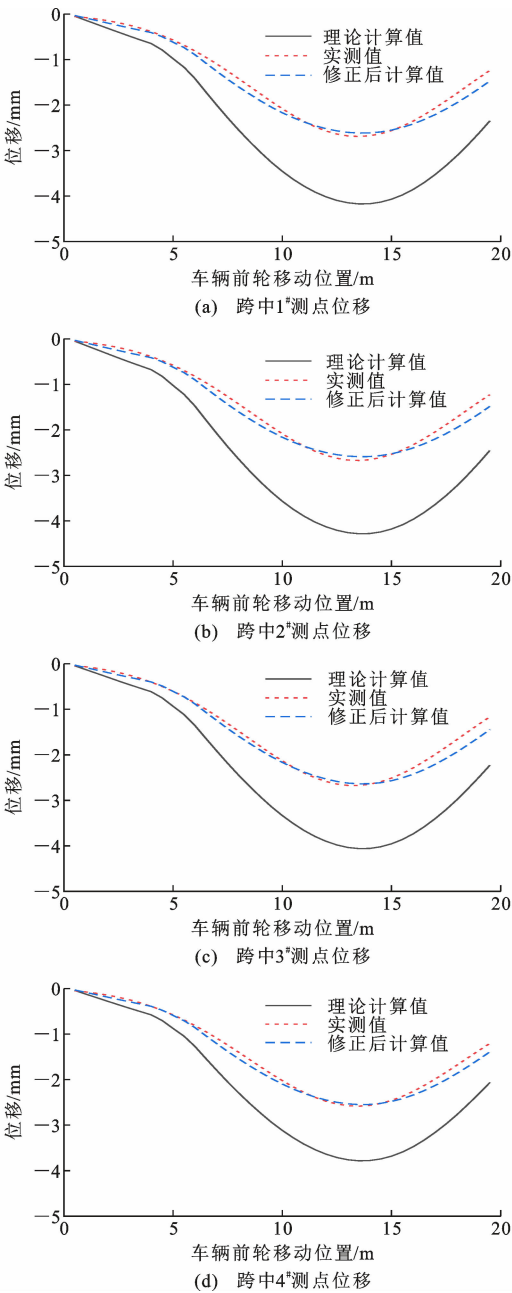


图 8 模型修正前后位移影响线

Fig. 8 Displacement Influence Lines Before and After Model Modification

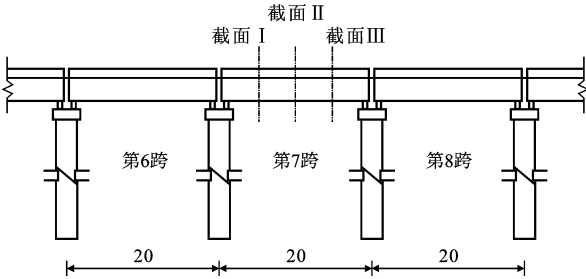


图 9 试验桥测试截面(单位:m)

Fig. 9 Test Section of Test Bridge (Unit:m)

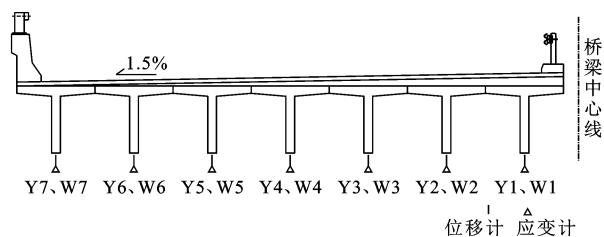


图 10 截面 II 测点布置

Fig. 10 Arrangement of Measuring Points in Section II

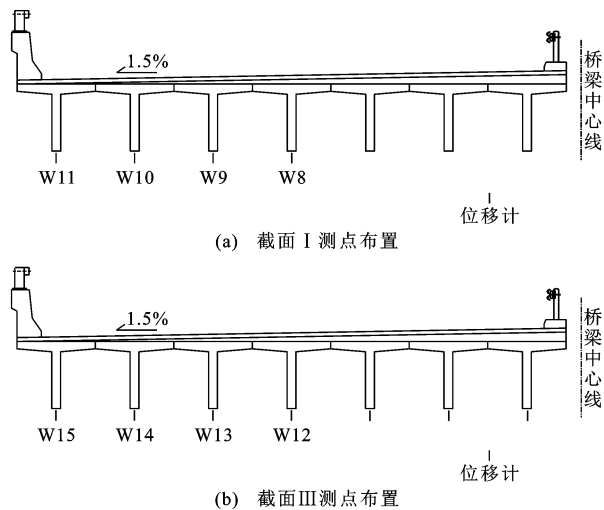


图 11 截面测点布置

Fig. 11 Arrangement of Section Measuring Points

表 7 加载车辆尺寸及轴重

车辆编号	轴重/t				轴距/m	
	总重	前轴	中轴	后轴	前中轴距	中后轴距
1	37.16	9.30	13.93	13.93	3.85	1.35
2	36.10	10.00	13.05	13.05	3.85	1.35
3	36.86	9.94	13.46	13.46	4.10	1.45

荷载试验下最大残余系数小于 20%，表明桥梁结构处于弹性工作状态，2# 测点应变校验系数与位移校验系数均大于 1，不满足承载力评定规程中静力荷载试验校验系数小于 1 的要求，表明桥梁实际承载力不满足设计要求。

3.2 基于模型修正的桥梁承载力评定

在基准有限元模型上施加试验荷载，此时得到的桥梁结构响应值与传统荷载试验下得到的桥梁结构响应值具有等效作用；通过基于基准有限元模型计算的应变或位移与初始模型下设计理论应变或位移的比值来计算校验系数，从而能够评定桥梁的承载能力。本文利用 ANSYS 有限元软件进行计算分析，试验桥跨的测试截面、测点布置、试验工况等均与第 3.1 节一致，计算结果如表 10、11 所示。

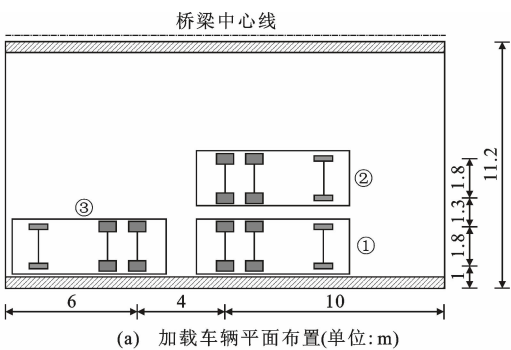


图 12 车辆布置及现场试验

Fig. 12 Vehicle Layout and Field Test

由表 10、11 可知：基于模型修正的试验方法计算得到的跨中截面 1#、2# 测点的应变校验系数与位移校验系数大于 1；3#~7# 测点应变校验系数分布范围为 0.68~0.99，位移校验系数分布范围为 0.48~0.66；截面 I 位移校验系数范围为 0.50~0.58；截面 III 位移校验系数范围为 0.50~0.59。1#、2# 测点应变及位移校验系数大于 1，不满足承载力评定规程中静力荷载试验校验系数小于 1 的要求，表明结构不满足刚度要求，该桥梁承载力不满足设计要求，评定结果与传统荷载试验一致。

3.3 两种评定方法对比

对第 3.1 节与第 3.2 节的计算结果统计分析，得到传统试验与模型修正试验的校验系数误差，见表 12。

由表 12 可知：2#~7# 测点应变校验系数相对误差最大为 7.3%，位移校验系数相对误差最大为 7.4%；两个四分点截面位移校验系数最大相对误差分别为 2.9%、8.1%，所有测点相对误差均在 10% 以内。跨中应变校验系数相对误差平均值为 3.9%，位移校验系数相对误差平均值为 4.7%；两个四分点截面位移校验系数误差平均值分别为 1.8%、5.7%。因此，基于模型修正的试验方法得到的各校验系数精度分别达到传统荷载试验的 96%、95%、



表 8 截面实测应变

Table 8 Measured Strain of Cross Section

测点	三级加载实测应变/ $10^{-6}$	卸载后残余应变/ $10^{-6}$	相对残余应变/%	实测弹性应变/ $10^{-6}$	理论应变/ $10^{-6}$	校验系数
Y1	55.800	-1.700	-3.05	57.500	-17.300	
Y2	71.600	-1.500	-2.09	73.100	55.100	1.33
Y3	136.500	5.300	3.88	131.200	133.100	0.99
Y4	174.800	2.500	1.43	172.300	210.800	0.82
Y5	227.300	8.600	3.78	218.700	307.500	0.71
Y6	248.300	4.900	1.97	243.400	341.700	0.71
Y7	304.200	5.900	1.94	298.300	402.300	0.74

表 9 截面实测位移

Table 9 Measured Displacement of Cross Section

测点	三级加载实测位移/mm	卸载后残余位移/mm	相对残余位移/%	实测弹性位移/mm	理论位移/mm	校验系数
W1	-1.383	-0.117	8.46	-1.266	0.619	
W2	-2.586	-0.095	3.67	-2.491	-2.306	1.08
W3	-3.798	-0.198	5.21	-3.600	-5.167	0.70
W4	-5.379	-0.178	3.31	-5.201	-8.268	0.63
W5	-6.483	0.134	-2.07	-6.617	-11.328	0.58
W6	-7.260	-0.249	3.43	-7.011	-14.034	0.50
W7	-7.835	-0.063	0.80	-7.772	-16.644	0.47
W8	-3.345	-0.187	5.59	-3.158	-5.337	0.59
W9	-4.314	-0.173	4.01	-4.141	-7.422	0.56
W10	-5.115	-0.118	2.31	-4.997	-9.559	0.52
W11	-5.842	-0.083	1.42	-5.759	-11.519	0.50
W12	-3.796	-0.141	3.71	-3.655	-5.693	0.64
W13	-4.449	-0.160	3.60	-4.289	-7.646	0.56
W14	-5.277	-0.229	4.34	-5.048	-9.419	0.54
W15	-6.242	-0.270	4.33	-5.972	-11.080	0.54

表 10 模型修正后截面应变

Table 10 Strain of Cross Section After Model Modification

测点	修正值/ $10^{-6}$	理论值/ $10^{-6}$	校验系数
Y1	73.700	56.200	1.31
Y2	106.600	84.000	1.27
Y3	138.400	139.500	0.99
Y4	167.400	197.700	0.85
Y5	187.700	277.800	0.68
Y6	208.900	273.300	0.76
Y7	236.600	328.100	0.72

98%、94%，表明基于模型修正的试验方法具备可行性与可靠性，能够准确快速地评定桥梁承载力。

4 结 语

(1)利用优化算法对佟家庄大桥进行模型修正，在修正后的基准有限元模型上施加控制荷载，计算梁底的位移应变校验系数对桥梁进行承载力评定，同时与传统荷载试验结果对比。

(2)联合单辆重车实测位移影响线和频率进行

模型修正，能够得到精准的有限元修正模型；利用静动力模型修正的模型对桥梁进行承载力评定，评价结果与传统荷载试验非常接近，精度达到 90%以上，该评定方法省时省力、便捷快速，具有很强的高效性与可行性。

参考文献：  
References：

[ 1 ] 姚昌荣,李亚东. 基于静动力测试数据的斜拉桥模型修正[J]. 铁道学报,2008,30(3):65-70.  
YAO Chang-rong, LI Ya-dong. Updating of Cable-stayed Bridges Model Based on Static and Dynamic Test Data[J]. Journal of the China Railway Society, 2008,30(3):65-70.

[ 2 ] 李 波,屈文忠,曾又林. 基于有限元模型修正技术的结构损伤检测[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(5):102-105.  
LI Bo, QU Wen-zhong, ZENG You-lin. Research on Structural Damage Detection Based on Finite Element

表 11 模型修正后截面位移

Table 11 Displacement of Cross Section After Model Modification

测点	修正后位移/mm	理论位移/mm	校验系数
W1	−2.479	−2.140	1.16
W2	−3.422	−3.398	1.01
W3	−4.412	−6.733	0.66
W4	−5.428	−9.207	0.59
W5	−6.415	−11.855	0.54
W6	−7.313	−14.502	0.50
W7	−8.168	−16.980	0.48
W8	−3.67	−6.365	0.58
W9	−4.28	−7.912	0.54
W10	−4.87	−9.455	0.52
W11	−5.43	−10.909	0.50
W12	−3.75	−6.369	0.59
W13	−4.46	−8.289	0.54
W14	−5.11	−10.215	0.50
W15	−5.73	−11.049	0.52
W13	−4.46	−8.289	0.54
W14	−5.11	−10.215	0.50
W15	−5.73	−11.049	0.52

表 12 传统荷载试验与模型修正试验校验系数对比

Table 12 Comparison of Calibration Coefficients Between Traditional Load Test and Model Modification Test

测点	校验系数 1	校验系数 2	相对误差/%	测点	校验系数 1	校验系数 2	相对误差/%
Y1				W1			
Y2	1.33	1.27	4.4	W2	1.08	1.01	6.5
Y3	0.99	0.99	0.6	W3	0.70	0.66	5.9
Y4	0.82	0.85	3.6	W4	0.63	0.59	6.3
Y5	0.71	0.68	5.0	W5	0.58	0.54	7.4
Y6	0.71	0.76	7.3	W6	0.50	0.50	0.9
Y7	0.74	0.72	2.7	W7	0.47	0.48	3.0
W8	0.59	0.58	2.4	W12	0.64	0.59	8.1
W9	0.56	0.54	2.9	W13	0.56	0.54	4.0
W10	0.52	0.52	1.3	W14	0.54	0.50	6.7
W11	0.50	0.50	0.3	W15	0.54	0.52	3.8

注:校验系数 1 为在传统荷载试验下求得,校验系数 2 为在模型修正试验下求得。

[ 7 ] 刘宇飞. 基于模型修正与图像处理的多尺度结构损伤识别[D]. 北京:清华大学,2015.  
LIU Yu-fei. Multi-scale Structural Damage Assessment Based on Model Updating and Image Processing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[ 8 ] 谢瑞杰. 基于静动力有限元模型修正的既有钢筋混凝土拱桥承载能力评估[D]. 长沙:中南大学,2010.  
XIE Rui-jie. Evaluation of Carrying Capacity of Existing Reinforced Concrete Arch Bridge Based on Modified Static Power Finite Element Model[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[ 9 ] 李贤东. 基于准静态广义影响线的双曲拱桥承载力评定初步研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.  
LI Xian-dong. Preliminary Study on Load Rating of Two-way Curved Arch Bridge Based on Quasi-static Generalized Influence Line [ D ]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.

[10] 史文军. 基于准静态影响线的桥梁承载能力评估方法研究[D]. 天津:河北工业大学,2012.  
SHI Wen-jun. Study of the Bridges Carrying Capacity Evaluation Method Based on the Quasi-static Influence Line[D]. Tianjin: Hebei University of Tech-

Model Updating[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(5): 102-105.

- nology, 2012.
- [11] 曹广谦. 基于应变影响线的简支梁桥结构损伤识别及寿命预测[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- CAO Guang-qian. Damage Identification and Life Prediction of Simply Supported Girder Bridge Based on Strain Influence Line[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [12] GOBLE G G, SAOUMA V, FRANGOPOL D M. Simple Load Capacity Tests for Bridges to Determine Safe Loading Posting Levels, 1987-1990 [R]. Boulder: University of Colorado Boulder, 1990.
- [13] 郭亮. 基于影响线有限元模型修正的桥梁承载能力评定方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- GUO Liang. The Research of Evaluation Method of Bridge Load-bearing Capacity Based on Correcting Finite Element Model Using the Influence Line[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [14] 肖祥, 赵曼, 陈一, 等. 基于实测影响线的大跨度桥梁有限元模型修正[J]. 工程与建设, 2020, 34(1): 48-52.
- XIAO Xiang, ZHAO Man, CHEN Yi, et al. A Element Model Updating Method Based on the Measured Influence Line for Large-span Bridges[J]. Engineering and Construction, 2020, 34(1): 48-52.
- [15] CHEN Z W, CAI Q L, ZHU S Y. Damage Quantification of Beam Structures Using Deflection Influence Lines[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(11): e2242.
- [16] 朱宏平, 黄民水. 基于环境激励的桥梁结构动力有限元模型修正研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(1): 1-11.
- ZHU Hong-ping, HUANG Min-shui. Study on Dynamic Finite Element Model Updating of Bridge Structures Based on Ambient Excitation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2009, 26(1): 1-11.
- [17] 李伟钊, 王宗林, 李荣达, 等. 简支梁桥承载力以动代静快速评估方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(增1): 191-195.
- LI Wei-zhao, WANG Zong-lin, LI Rong-da, et al. Rapid Assessment of Load-bearing Capacity About Simple-supported Girder Bridge Based on Dynamic Test Instead of Static Loading Test[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(S1): 191-195.
- [18] 李鸿波, 于品德. 装配式梁桥荷载试验计算模型精细化分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(10): 207-209.
- LI Hong-bo, YU Pin-de. Fine Analysis of Prefabricated Beam Bridge Load Test[J]. Highway Traffic Technology, 2017, 13(10): 207-209.
- [19] 廖敬波, 唐光武, 张又进, 等. 实测准静态广义影响线在桥梁结构静载试验中的应用研究[J]. 公路交通技术, 2009, 25(6): 65-68.
- LIAO Jing-bo, TANG Guang-wu, ZHANG You-jin, et al. Research on Application of Measured Quasistatic Generalized Influence Line in Static Load Test for Bridge Structure[J]. Technology of Highway and Transport, 2009, 25(6): 65-68.