

## 简支梁桥承载力以动代静快速评估方法

李伟钊<sup>1</sup>, 王宗林<sup>1</sup>, 李荣达<sup>2</sup>, 李忠龙<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 中交路桥技术有限公司, 北京 100029)

**摘要:**通过对等截面简支梁的分析, 推导跨中挠度校验系数( $\eta_v$ )与一阶竖弯频率校验系数( $\eta_f$ )的关系; 对某6梁式简支T梁桥的进行仿真分析, 探讨在支座刚度变化、边界条件变异、桥面系参与受力以及承重构件损伤等各种情况下 $\eta_v$ 和 $1/\eta_f^2$ 的变化规律以及两者的差异。对两座装配式T梁桥进行静载试验以及动力特性测试, 并分析各种试验工况下实测 $\eta_v$ 以及 $1/\eta_f^2$ 。仿真分析和实桥试验结果表明: $1/\eta_f^2$ 能代替 $\eta_v$ 来反映简支梁桥整体刚度, 快速评定其承载力。

**关键词:**简支梁桥; 承载力; 快速评定; 挠度校验系数; 频率校验系数

**中图分类号:** U441+.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-4764(2012)S1-0191-05

## Rapid Assessment of Load-Bearing Capacity About Simple-Supported Girder Bridge Based on Dynamic Test instead of Static Loading Test

LI Weizhao<sup>1</sup>, WANG Zonglin<sup>1</sup>, LI Rongda<sup>2</sup>, LI Zhonglong<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090, P. R. China;

2. cccc road and bridge consultants co. ltd, Beijing 100029, P. R. China)

**Abstract:** The relation between the deflection check coefficient ( $\eta_v$ ) of mid-span and first vertical flexural frequency check coefficient ( $\eta_f$ ) was established based on theory of the uniform cross-section simple-supported beam. The variation and difference between the  $\eta_v$  and  $1/\eta_f^2$  of a simple-supported six girder bridge were researched by simulation under these situations: change of the bearing stiffness; change of the boundary conditions; the floor system enhanced the structural stiffness; local damage of the superstructure. The static loading test and dynamic characteristic test of two fabricated simple-supported T girder bridges were taken to get the measured  $\eta_v$  and  $1/\eta_f^2$ . Simulation and experimental results show that  $1/\eta_f^2$  can instead  $\eta_v$  to reflect the structural stiffness of the simple-supported girder bridge and rapid assess its load-bearing capacity.

**Key words:** Simple-supported girder bridge; load-bearing capacity; rapid assessment; deflection check coefficient; frequency check coefficient;

结构刚度是评定桥梁承载力的一项重要指标, 也是桥梁健康运行监测及结构性能快速评价的主要依据。通过静力挠度校验系数评价桥梁结构刚度, 是目前广泛采用的方法, 这种方法已在实践中得到验证, 被认为是可靠有效的。在某些特殊环境条件(跨江河峡谷)下, 静力挠度只能采用光学仪器(水准仪、全站仪等)进行挠度测量, 受测试方法、测试仪器的限制, 挠度测试结果往往带有较大的随机性, 且静力挠度测试需要中断交通, 测试时间长, 试验效率低。随着振动理论及动态测试仪器的的发展, 许多学者开始对研究桥梁的动力评估方法。目前, 动力法研究集中在以下3类: 动力指标直接比较法<sup>[1-3]</sup>, 根据实测指标与理论值直接进行比较; 动力指纹类方法<sup>[4-8]</sup>, 根据与结构动力特性相关的动力指纹在损伤前后的变化来判断结构的状态; 模型修正类方法<sup>[9-11]</sup>, 利用实测得到的结构振动响应数据, 修改一些影响结构动力特性的参数, 根据修改前后参数的变化来评估结构的状态。上述3

类动力评估方法中, 直接比较法一般只能定性分析, 作为静力评价的补充; 动力指纹法和模型修正法需要准确获取结构的若干阶频率、振型和阻尼等基本动力参数。但是, 目前除了少数低阶频率之外, 振型、阻尼很难达到理想的精度, 导致动力评估法的研究成果多集中在理论分析和模型试验, 距实桥推广应用尚有距离。

对于简支梁桥, 一阶竖弯频率容易获得, 其与挠度一样跟结构刚度以及边界条件密切相关, 部分学者开始研究静力挠度与一阶竖弯频率的关系, 以寻求用频率代替静力挠度对结构刚度进行评定<sup>[12-16]</sup>。对于实际桥梁, 由于其状态在服役期间是不断变化的, 结构的边界条件变异、桥面系参与受力、结构局部损伤等均会使结构挠度、频率产生变化, 频率取代挠度进行结构刚度评价是否可行, 有待于进一步研究。文中基于一座六梁式简支T梁桥进行分析, 探求各种因素变化对频率和挠度影响; 并对2座实桥进行试验验证。

## 1 理论分析

对于梁式桥梁,结构静力挠度可以由下式表示:

$$y(x) = \frac{1}{EI(x)} \int \int M(x) dx dx, \quad (1)$$

式中: $M(x)$ 为结构截面弯矩; $EI(x)$ 为结构的抗弯刚度;在静力荷载试验中,采用挠度校验系数 $\eta_y$ 来评价桥梁结构的刚度

$$\eta_y = \frac{y_r(x)}{y_d(x)}, \quad (2)$$

式中: $y_d(x)$ 为按设计参数计算的结构挠度; $y_r(x)$ 为在等效荷载作用下结构的实测挠度。由式(1)、式(2)得:

$$\eta_y(x) = \frac{y_r(x)}{y_d(x)} = \frac{E_d I_d(x)}{E_r I_r(x)}, \quad (3)$$

对于等截面简支梁,一阶竖弯频率 $f_1$ 为

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (4)$$

由式(4)得:

$$EI = \frac{4l^4 m f_1^2}{\pi^2}. \quad (5)$$

把式(5)代入式(3)得

$$\eta_y(x) = \frac{y_r(x)}{y_d(x)} = \frac{E_d I_d(x)}{E_r I_r(x)} = \frac{f_{1d}^2}{f_{1r}^2}, \quad (6)$$

式中: $f_{1r}$ 为实测一阶竖弯频率; $f_{1d}$ 为理论一阶竖弯频率。

定义 $\eta_f = f_{1r}/f_{1d}$ 为一阶竖弯频率校验系数,则 $\eta_y = 1/\eta_f^2$ 。频率测试简单,若利用 $1/\eta_f^2$ 代替 $\eta_y$ 来评定桥梁的刚度,则可达到快速经济的目的。公路简支梁桥一般由多片主梁装配而成,属于空间结构,且一般为变截面结构,边界条件跟理想的简支状态也有差别。在其服役过程中,结构状态的不断变化,比如支座失效、伸缩缝失效,结构损伤等, $\eta_y$ 跟 $1/\eta_f^2$ 的变化规律是否一致,下文结合实例进一步探讨。

## 2 仿真分析

吉林省集锡线上单跨跨径为20 m的3跨钢筋混凝土简支T梁桥,混凝土为C40,横向布置6片,桥面布置为0.5 m防撞护栏+11 m,行车道+0.5 m防撞护栏,设计荷载为公路I级。梁高为1.5 m,主梁腹板为线性变厚度,梁端厚度为0.35 m,跨中厚度为0.18 m,从梁端1.0 m处至1/4点为渐变段。全桥共设5道横隔梁,各主梁间通过0.6 m宽的湿接缝连接。相邻梁横向中心间距2.0 m。防撞护栏底座为0.5 m×0.3 m实体C40混凝土,通过预埋钢筋与边梁浇注在一起。混凝土桥面铺装为8 cm的C40防水混凝土+10 cm沥青混凝土。桥梁支座为250 mm×300 mm×37 mm板式橡胶支座,剪切模量取 $G=1.2$  MPa。桥梁横截面布置如图1所示。

采用通用有限元软件对桥梁进行分析,上部结构采用板单元模拟;橡胶支座采用弹簧单元模拟。支座的竖向刚度 $K_y=508 \times 10^6$  N/m,水平刚度为 $K_x=2.5 \times 10^6$  N/m;基准模型不考虑桥面铺装以及栏杆对结构刚度的影响,但考虑其对结构质量的影响。

静力加载采用文献[17]中汽-20中的标准主车(轴重60 kN+120 kN+120 kN,轴距4.0 m+1.4 m)。汽车中轴在在主梁跨中位置,车辆横向布置见图1,分别计算在3种车辆横向布置工况下,各主梁跨中挠度。由于频率反映的是结

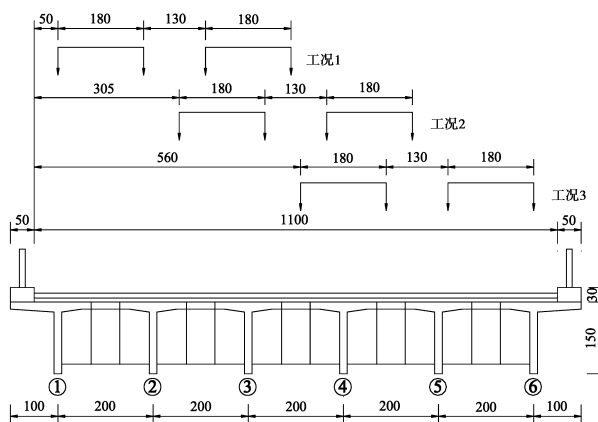


图1 集锡线筒支梁桥横截面布置(单位:cm)

构的整体刚度,所以取3种布载方式下各主梁跨中挠度之和的最大值做比较。计算得到基准模型的一阶竖弯频率 $f_1$ 为4.560 1 Hz,振型见下图2;最大挠度之和 $Y_{all}$ 为0.027 0 m。

### 2.1 支座刚度的影响

通过改变支座的剪切模量 $G$ 来改变支座的刚度,分别考虑剪切模量在0.4~2.0 Pa之间变化时 $\eta_y$ 和 $1/\eta_f^2$ 的变化以及他们间的关系,可以看出, $\eta_y$ 和 $1/\eta_f^2$ 均随着支座刚度的增大而增大,且两者之间的差值 $\delta$ 很小,最大为0.4 Pa时达到1.9%,可以认为支座刚度对 $\eta_y$ 和 $1/\eta_f^2$ 的影响是一致的。

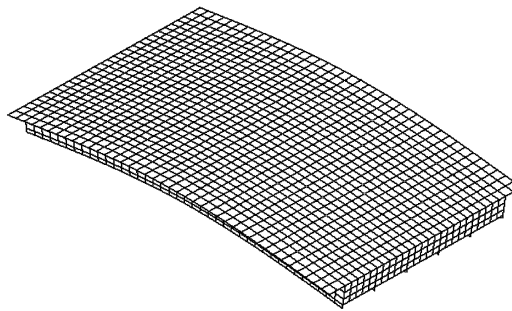


图2 集锡线筒支梁桥一阶竖弯振型

表1 不同支座刚度下 $\eta_y$ 和 $1/\eta_f^2$ 的关系

项目	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
$Y_{all}/m$	0.028 0	0.027 2	0.026 9	0.026 7	0.026 5
$f_1/Hz$	4.435 6	4.537 3	4.576 6	4.599 8	4.616 4
$\eta_y$	1.037	1.007	0.996	0.987	0.982
$1/\eta_f^2$	1.057	1.010	0.993	0.983	0.976
$\delta/\%$	1.9	0.3	-0.3	-0.5	-0.7

### 2.2 边界条件变异的影响

为了模拟简支梁桥的边界条件变异,支座堵塞、伸缩缝堵塞、桥面连续等影响,下边分别考虑水平刚度不变、竖向刚度为 $K_y$ 为10、100、1 000倍和竖向刚度不变、横向刚度为 $K_x$ 为10、100、1 000倍时 $\eta_y$ 和 $1/\eta_f^2$ 的变化规律,结果汇总于表2。可以看出, $K_y$ 变化对 $Y_{all}$ 和以及 $f_1$ 的影响较小,当1 000 $K_y$ 时, $\eta_y$ 为0.978, $1/\eta_f^2$ 为0.966,两者差值 $\delta$ 为-1.2%;但 $K_x$ 变异对结构跨中挠度以及一阶竖向频率的影

响较大,当  $1\ 000K_x$  时,  $\eta_y$  为 0.456,  $1/\eta_f^2$  为 0.429, 两者差值  $\delta$  为 -6.0%。桥梁顺桥向约束的增强会导致  $\eta_y$  和  $1/\eta_f^2$  迅速减低,但两者的变化规律基本一致,两者差值较小。

### 2.3 桥面系参与受力影响

在常规设计中,公路桥梁一般不考虑桥面系参与结构受力,仅将其作为 2 期恒载作用在主梁上。近年来,公路上的桥梁混凝土防撞护栏或护栏底座与主梁结构固结在一起,参与结构受力。对与混凝土铺装层,一般配置 1~2 层钢筋网,其对结构刚度贡献也较大。分别考虑其不同程度参与结构受力时,  $\eta_y$  和  $1/\eta_f^2$  的变化情况,计算结果汇总如下表 3。可以看出,护栏底座和混凝土铺装层对结构刚度贡献较大,考虑 30 cm 高的护栏底座完全参与结构受力时,  $\eta_y$  为 0.942,  $1/\eta_f^2$  为 0.940;考虑 8 cm 混凝土完全参与结构受力时,  $\eta_y$  为 0.830,  $1/\eta_f^2$  为 0.832。桥面系参与受力时,  $\eta_y$  和  $1/\eta_f^2$  的变化一致,两者最大误差为 0.3%。

表 2 边界条件变异时  $\eta_f$  和  $1/\eta_f^2$  的关系

项目	10K <sub>y</sub>	100K <sub>y</sub>	1000K <sub>y</sub>	10K <sub>x</sub>	100K <sub>x</sub>	1000K <sub>x</sub>
Y <sub>all</sub> /m	0.026 5	0.026 4	0.026 4	0.025 5	0.018 5	0.012 3
f <sub>1</sub> /Hz	4.632 3	4.639 6	4.640 3	4.698 2	5.569 5	6.959 5
$\eta_y$	0.980	0.978	0.978	0.944	0.686	0.457
$1/\eta_f^2$	0.969	0.966	0.966	0.942	0.670	0.429
$\delta/\%$	-1.1	-1.2	-1.2	-0.3	-2.3	-6.0

表 3 桥面系参与受力时  $\eta_y$  和  $1/\eta_f^2$  的关系

项目	护栏底座参与 受力厚度/cm		桥面铺装参与与受力厚度/cm		
	15	30	3	6	8
Y <sub>all</sub> /m	0.025 9	0.025 4	0.025 0	0.023 4	0.022 4
f <sub>1</sub> /Hz	4.659 9	4.703 5	4.735 6	4.897 3	4.999 8
$\eta_y$	0.959	0.942	0.927	0.866	0.830
$1/\eta_f^2$	0.958	0.940	0.927	0.867	0.832
$\delta/\%$	-0.2	-0.2	0.1	0.1	0.3

### 2.4 承重构件损伤影响

假定主梁损伤区域如下图 3 所示,分 3 个区域,横隔梁损伤区域如图 4 所示,为各横隔梁中心 0.4 m 范围。分别考虑以下 5 种损伤情况,探讨损伤对 Y<sub>all</sub> 以及 f<sub>1</sub> 的影响。

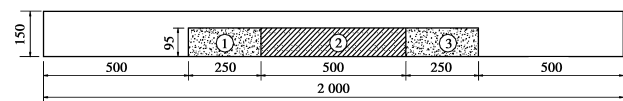


图 3 主梁损伤区域(单位:cm)

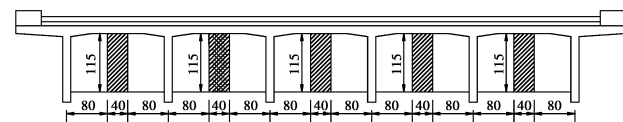


图 4 各道横隔梁损伤区域(单位:cm)

- 损伤 2:2 号主梁 1、2、3 区域损伤 30%;
- 损伤 3:3 号主梁 1、2、3 区域损伤 30%;
- 损伤 4:1~6 号主梁 2 区域损伤 30%;
- 损伤 5:第 2、3、4 道横隔梁阴影区域损伤 30%;

各种损伤情况下计算结果汇总于表 4。可以看出,对于程度相同的单片主梁损伤,边梁损伤对 Y<sub>all</sub> 以及 f<sub>1</sub> 的影响要大于内梁,从外到内影响依次减小。横隔梁损伤对 Y<sub>all</sub> 和 f<sub>1</sub> 的影响较小,  $1/\eta_f^2$  不能反映横向联系的损伤,应辅以外观检查加以判断。各种损伤对  $\eta_y$  和  $1/\eta_f^2$  的影响基本一致,两者间误差较小。

表 4 结构局部损伤时  $\eta_y$  和  $1/\eta_f^2$  的关系

	损伤 1	损伤 2	损伤 3	损伤 4	损伤 5
Y <sub>all</sub> /m	0.028 9	0.028 5	0.028 1	0.031 3	0.027 1
f <sub>1</sub> /Hz	4.439 3	4.482 2	4.495 0	4.290 0	4.559 9
$\eta_y$	1.070	1.054	1.041	1.158	1.002
$1/\eta_f^2$	1.055	1.035	1.029	1.130	1.000
$\delta/\%$	-1.4	-1.8	-1.2	-2.5	-0.2

## 3 工程实例

实桥试验中主梁挠度采用拓普康 DL-102C 精密电子水准仪进行观测;振动特性测试采用江苏东华 DHDAS\_5920 动态信号采集系统进行采集,拾振器采用中国地震局工程力学研究所 941B 超低频拾振器。

### 3.1 实桥 1

实桥 1 为数值分析实例中的原桥,如图 5 所示。静载试验加载车 2 台采用中国重汽 HOWO 自卸车,车辆轴距 4.025 m+1.35 m,车辆全重为 300 kN,轴重分布为 60 kN+120 kN+120 kN,如图 6 所示。



图 5 集锡线某简支梁桥照片



图 6 静载试验加载车

损伤 1:1 号主梁 1、2、3 区域损伤 30%;

外观检查中,该桥主梁状态较好,横向连接未发现断裂破损;上部结构主要承重构件技术评定为 2 类,实测混凝土强度推定值为 42.3 MPa。按照第 2 节数值分析中的载位进行布载,分别测试各片主梁的静力挠度;利用跑车余振曲线分析得到桥梁的一阶竖向频率。实测结果如下表 5 所示。工况 1 时各主梁总挠度校验系数  $\eta_y$  最大,为 0.757,  $1/\eta_f^2$  为 0.776,误差为 2.5%,用  $1/\eta_f^2$  可以代替  $\eta_y$  评定结构的总体刚度。

表 5 集锡线某简支梁桥实测结果

项目	各工况下主梁挠度和 $Y_{all}/m$			$f_1/Hz$
	工况 1	工况 2	工况 3	
理论值	0.027 1	0.027 0	0.027 1	4.560
实测数	0.020 5	0.019 8	0.020 1	5.176
$\eta_y (1/\eta_f^2)$	0.757	0.733	0.743	0.776

### 3.2 实桥 2

实桥 2 为黑龙江省依安乌裕河大桥,结构形式为预应力钢筋混凝土简支 T 梁桥,跨径 27.5 m,桥面净宽 8.5 m,设计荷载为汽-15 挂-80;混凝土设计标号为 400 号。桥梁横向 5 片 T 梁组成,主梁间距 162 cm,梁高 135 cm, T 梁带马蹄,马蹄宽度 46 cm,梁端腹板厚度 30 cm,跨中腹板厚度 14 cm;厚度在梁端到第 2 道横隔梁内渐变。悬臂板端部厚度为 8 cm,悬臂板根部过渡到 18 cm。沿桥纵向共设置 6 道横隔梁,间距为 536 cm,横隔梁高度 105 cm,厚度为 13 cm。桥梁固定支座为钢支座,滑动支座为混凝土垫层支座。桥面铺装为 400 号混凝土,中心厚度为 14 cm,边沿厚度为 8 cm。桥梁的实际照片见图 7。



图 7 伊安乌裕河大桥照片

外观检查发现,该桥主梁存在沿管道裂缝,但未发现受弯裂缝;横向连接未发现断裂破损;上部结构主要承重构件技术评定为 3 类,实测混凝土强度推定值为 43.6 MPa。支座滚轴锈蚀严重,转动功能受约束。静载试验加载车采用长春一汽生产的 FAW 翻倒车,轴距为 3.25 m+1.25 m,车辆全重为 300 kN,轴重分布为 50 kN+125 kN+125 kN。试验分 3 个工况进行加载;车辆横向布置见图 8,各工况纵向布置见图 9。分别测试各片主梁的静力挠度;利用跑车余振曲线分析得到桥梁的一阶竖向频率。理论计算模型中不考虑桥面系参与结构受力,但考虑其对结构质量的影响。

实测结果如表 6 所示。工况 3 时各主梁总挠度校验系数  $\eta_y$  最大,为 0.431,  $1/\eta_f^2$  为 0.433,两者基本一致,用  $1/\eta_f^2$  可以代替  $\eta_y$  评定结构的总体刚度。校验系数较小,说明桥面铺装混凝土、栏杆底座参与受力,支座锈蚀约束等因素对大大地增大了桥梁结构的承载潜力。

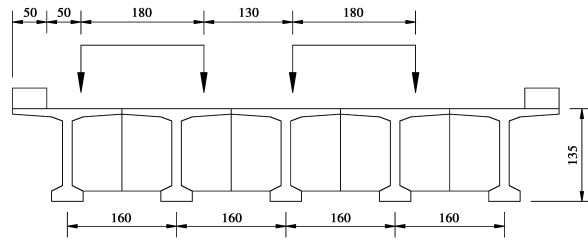


图 8 乌裕河大桥静载试验车辆横向布置(单位:cm)

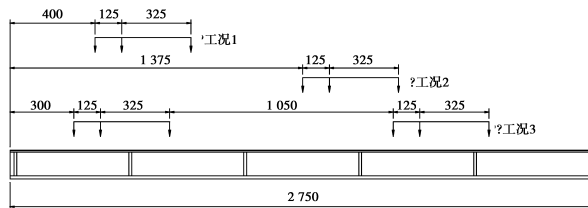


图 9 乌裕河大桥静载试验车辆纵向布置(单位:cm)

表 6 集锡线某简支梁桥实测结果

项目	各工况下主梁挠度和 $Y_{all}/m$			$f_1/Hz$
	工况 1	工况 2	工况 3	
理论值	0.042 6	0.078 5	0.099 6	2.829
实测数	0.016 6	0.031 4	0.042 9	4.300
$\eta_y (1/\eta_f^2)$	0.390	0.400	0.431	0.433

## 4 结 论

1) 挠度与频率校验系数均反映结构的刚度;频率跟结构刚度以及质量相关,在计算理论值时,结构质量的准确计算是频率校验系数正确反映结构刚度的关键。频率校验系数反映的是结构的整体刚度变化,应取各主梁挠度之和的校验系数与之比较。

2) 仿真分析表明,支座刚度变化对  $\eta_y$  及  $1/\eta_f^2$  的影响较小,边界条件变异及桥面系参与结构受力对  $\eta_y$  及  $1/\eta_f^2$  的影响较大,桥梁纵向约束增强以及桥面系参与受力能大大提高桥梁的承载潜力。主梁局部损伤对  $\eta_y$  及  $1/\eta_f^2$  的影响较

大,外梁损伤影响大于内梁损伤;横隔梁损伤对 $\eta_v$ 及 $1/\eta_f^2$ 的影响很小, $1/\eta_f^2$ 不能反映横向联系的损伤,应辅以外观检查加以判断。各种情况下, $\eta_v$ 及 $1/\eta_f^2$ 的变化基本一致,两者差异很小。

3)试验实测结果表明,集锡线简支梁桥最大 $\eta_v$ 为0.757, $1/\eta_f^2$ 为0.776,误差为2.5%;伊安乌逊河大桥最大 $\eta_v$ 为0.431, $1/\eta_f^2$ 为0.433,误差为0.5%; $1/\eta_f^2$ 可代替 $\eta_v$ 评定结构的总体刚度;据此合理选定旧桥检算系数 $Z_2$ ,再结合外观检查情况,则可快速评定桥梁的承载力。

#### 参考文献:

- [1] 李广馥,周连成. 桥梁动力测定评价方法[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2000, 16(2): 99-100.  
LI Guangfu, ZHOU Liancheng. Evaluation method of bridge dynamic measurement[J]. Journal of Shenyang Arch. and Civ. Eng. Inst, 2000, 16(2): 99-100.
- [2] Kwasniewski L, Wekezer J, Garry R, et al. Experiment evaluation of dynamic effects for a selected highway bridge[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2006, 20(3): 253-260.
- [3] 李德建,彭彦. 既有简支铰接空心板T梁桥结构状况动力评估[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 24-29.  
LI Dejian, PENG Yan. Dynamic assessment about existing simply-supported hinge joint cellular slab bridges[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 24-29.
- [4] Olaf H, Glauco F, Johan M, et al. Damage identification using modal data: experiences on a prestressed concrete bridge[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(12): 1898-1910.
- [5] Reynders E, Guido de R, Pelin G B, et al. Damage identification on the tilff bridge by vibration monitoring using optical fiber strain sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2007, 133(2): 185-193.
- [6] Mustafa G, Necati F C. Ambient vibration data analysis for structural identification and global condition assessment[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2008, 134(8): 650-662.
- [7] Zhou Z J, Leon D, Wegner B F. Vibration-based detection of small-scale damage on a bridge deck[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007, 133(9): 1257-1267.
- [8] Hsieh K H, Marvin W H, Paul J B, et al. Structural damage detection using dynamic properties determined from laboratory and field testing[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2008, 22(4): 238-244.
- [9] Brownjohn J M W, Pilate M, Omenzetter P, et al. Assessment of highway bridge upgrading by dynamic testing and finite-element modal updating[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2003, 8(3): 162-172.
- [10] Hsu T Y, Loh C H. Damage diagnosis of frame structures using modified modal strain energy change method[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2008, 131(11): 1000-1012.
- [11] Chen Y B, Maria Q F, Tan C A. Bridge structural condition assessment based on vibration and traffic monitoring[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2009, 135(8): 747-758.
- [12] 贺拴海,郭琦,宋一凡,等. RC桥梁健康状况及承载能力的动力评估试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2003, 23(6): 36-39.  
HE Shuanhai, GUO Qi, SONG Yifan, et al. Health condition and load carrying capacity evaluation of RC beam based on dynamic testing[J]. Journal of Chang an University: Natural Science Edition, 2003, 23(6): 36-39.
- [13] 王岐峰,李炎,李万恒,等. 桥梁自振特性与承载能力分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 93-95.  
WANG Qifeng, LI Yan, LI Wangheng, et al. Vibration characters and bridge load-bearing capacity analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 93-95.
- [14] 周牧,贺拴海,袁万城. RC梁桥承载力的振动测试评估方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 62-67.  
ZHOU Mi, HE Shuanhai, YUAN Wancheng. Capacity evaluation of RC girder bridge with vibration testing technique[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 62-67.
- [15] 龚亨胜. 基于动力特性测试的桥梁检测研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(31): 328-329.  
GONG Xiangsheng. The bridge detection research based on dynamic characteristics test[J]. Shangxi Architecture, 2009, 35(31): 328-329.
- [16] 邹兰林,彭冬. 基于频率校验系数快速评定桥梁结构承载力[J]. 山东交通学院学报, 2010, 18(3): 31-35.  
ZOU Lanlin, PENG Dong. Rapid assessment of bridge structures bearing capacity based on frequency coefficient[J]. Journal of Shandong Jiao tong University, 2010, 18(3): 31-35.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范(JTJ021-89)[S]. 北京:人民交通出版社, 1989, 20-22.

(编辑 陈移峰)