

文章编号:1671-8879(2015)01-0084-07

# 简支体系实际刚度分布推算方法

王凌波<sup>1</sup>, 康馨<sup>2</sup>, 蒋培文<sup>3</sup>

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 密苏里科技大学 土木工程实验室, 密苏里 65409; 3. 陕西省交通运输厅基本建设工程质量监督站, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**以正确识别简支梁桥实际刚度分布为目标,建立了集中荷载作用下单梁区段刚度与挠度间的关系方程组,结合位移互等定理推导了全梁多区段的实际刚度分布表达式;建立了标准双轴车与三轴车移动过桥时其跨中挠度曲线向集中荷载作用影响线转换的关系方程,从而凭借双轴车与三轴车低速行驶过桥时采集的跨中挠度时程曲线推导简支梁桥纵桥向的实际刚度分布状况,分析全桥实际病害分布范围及损伤程度;编制了配套计算软件,对比验证了桥梁刚度分布识别算例与相关研究资料。研究表明:由于损伤原因的多样性及复杂性,简支梁各区段损伤程度各不相同,梁体实际刚度分布沿纵桥向呈非线性变化,不宜采用设计规范提出的全梁整体刚度作为在役简支梁桥运营过程中局部损伤和病害的评判计算标准;给出算法得到的简支梁桥纵桥向实际刚度分布与实际工程受损情况吻合良好,可应用该方法快速、真实、可靠地反映在役桥梁整体损伤状况,锁定简支梁桥损伤范围并正确估算其损伤程度。

**关键词:**桥梁工程;桥梁检测;纵向刚度分布;损伤识别;刚度衰减估算

**中图分类号:**U446 **文献标志码:**A

## Real stiffness distribution calculation method in simply supported structure

WANG Ling-bo<sup>1</sup>, KANG-Xin<sup>2</sup>, JIANG Pei-wen<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Civil Engineering Laboratory, Missouri University of Science and Technology, Rolla 65409, Missouri, USA; 3. Basic Construction Project Quality Supervision Station, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper focused on studying the real stiffness distribution in a simply supported beam. The relation equations between stiffness and deflection in a bridge segment has been established. based on the material mechanics, numerical modeling, and reciprocal displacement theorem. The relation equation of the conversion of the deflection curve at mid span to the concentrated load effect curve resulted from three axle vehicle passing over the bridge has been developed so that, by measuring the deflection curve caused by low speed of the vehicle passing over the bridge, the longitudinal real stiffness distribution of the bridge could then be obtained and the assessment of the bridge damage and its distribution range could be carried out. Compatible software was developed in accordance with the proposed stiffness calculation method. It's found that the software worked well in predicting the stiffness distribution and the test results indicated that the

收稿日期:2014-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50908017);广东省交通运输厅科技项目(科技-2014-02-022);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(201493212002)

作者简介:王凌波(1984-),女,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:dr. wlb@qq. com。

proposed prediction method was applicable. The test results showed that the stiffness distribution in longitudinal direction varied significantly, which is due to the different degrees of damage. The analysis showed that it is not suitable to use the overall stiffness as the criteria to evaluate the damage of the whole beam. The measured data matched pretty well with the calculated stiffness distribution and the proposed method presented its applicability in engineering practice, such as predicting the stiffness decay, detecting the damage area, and estimating the degree of damage. 6 figs, 18 refs.

**Key words:** bridge engineering; bridge detection; longitudinal stiffness distribution; invisible damage; damage assessment

## 0 引言

中国经济长期高速发展在大幅度提高人民生活水平的同时,也使中国桥梁建设进入了全新的高速发展时期。一方面,中国建造桥梁的增长速率在 30 年间飞速攀升;另一方面,受到外界气候、环境等自然因素的影响,已建桥梁的工程材料逐渐老化,加之早期桥梁设计规范与日益提高的现行荷载间存在差异,致使桥梁构件的实际力学性能不断削弱,从而出现混凝土开裂、钢筋锈蚀、预应力缺损等,造成梁体刚度衰减、承载力下降的损伤或病害。建设速度与病害发展的矛盾关系,构成了桥梁寿命普遍缩短、桥梁垮塌事故频发的重要原因之一。轻则影响结构的正常使用,重则威胁人民的生命安全<sup>[1-3]</sup>。

中国检测桥梁结构实际承载能力状况时,多采用外观检测评定与荷载试验评定相结合的办法。外观检测工作冗长繁琐,其优点是经探索可锁定桥梁细部的病害和损伤的种类及范围,缺点是无法给出精确的承载能力定量指标以准确评估实际桥梁结构的整体工作状态;荷载试验工作费时费力,其优点是可对桥梁整体承载力进行较精确的定量分析,缺点是无法判定损伤分布的范围及细部病害状况<sup>[4]</sup>。外观检测与荷载试验相结合无疑弥补了单独使用 2 种检测方法的缺点,互为补充,却也继承了 2 种检测方法的特点,既费时费力,又冗长繁琐。因此,对桥梁检测、评定技术展开研究,快速而全面地掌握在役桥梁运营期整体结构及局部构件的损伤分布及承载能力状况,具有极其重要的意义。

国内外众多学者近年来对桥梁实际状态的测定评估进行了多方面的研究。赵虎等提出用桥梁结构双侧响应模态差对结构的横向联系完整性进行评估,进而对桥梁结构的横向刚度进行探讨<sup>[5]</sup>;元成方等对松花江大桥进行了不同冻融损伤下的氯离子侵蚀规律试验研究,在此基础上对大桥进行了不同冻融损伤下的氯离子侵蚀寿命预测<sup>[6]</sup>;Yang 等讨论了

预弯梁等效弯曲刚度即开裂后偏转的计算方法,以预测在役弯梁使用寿命<sup>[7]</sup>;姚晓飞等研究了带横向连接损伤的 T 梁桥模型极限承载力<sup>[8]</sup>;单德山等基于移动车辆引起的桥梁振动,采用模式识别的聚类分析方法对桥梁结构损伤定位及损伤程度估计进行了研究<sup>[9]</sup>;Zhao 等采用双重编码遗传算法计算在役桥梁承载能力<sup>[10]</sup>;袁永新等在假定有限元模型的质量矩阵与刚度矩阵均为对称阵,并且质量矩阵是精确的情况下,提出了一种修正刚度矩阵的新方法<sup>[11]</sup>;朱红兵等利用 Miner 线性累积损伤准则和 Corten Dolan 累积损伤准则,推导出了等效的等幅疲劳应力幅值计算公式,用于评估疲劳寿命<sup>[12]</sup>;梁鹏等采用截面非线性全过程分析方法得到通用图中桥梁关键截面的弯矩与开裂高度的对应函数,并建立裂缝特征库,计算新的承载能力检算系数,并对抗力进行修正<sup>[13]</sup>;吕大伟等以常见中小跨径梁桥为样本研究了桥面铺装对各单梁最不利横向分布系数的影响及各梁横向分布系数的分布特点<sup>[14]</sup>。

上述研究成果表明,目前学者们对桥梁检测多偏重于对刚度算法、损伤成因、极限承载能力等方面的研究,部分学者采用动力法对桥梁结构损伤及程度进行定位评测。动力法主要适用于高墩大跨等柔性体系桥梁,而针对中小跨径桥梁结构内部损伤程度(如梁体开裂程度、钢筋锈蚀程度、预应力损失等)还没有一种成熟的无损测试方法可以对其进行量化分析。桥梁结构中各式各样的病害最终均会引发桥梁结构或构件各区域产生不同程度的刚度衰减。基于此,本文以中国分布最广、建设技术最成熟的简支梁桥为例,从单梁的实际刚度推算方法入手,建立常规双轴车和三轴车过桥时的跨中挠度变化曲线与简支梁体纵向多区段的刚度关系方程组,推算简支梁桥纵桥向的实际刚度分布状况,反映桥梁全桥刚度衰减趋势、锁定实际病害分布范围并估算其损伤程度。

# 1 跨中挠度影响线与区段刚度的对应关系

## 1.1 平面梁单元有限元方程的建立

公路简支梁桥在活载的作用下只有弯矩、剪力,不产生轴力。对于无轴力作用的平面梁单元,其 4 个独立自由度分别为梁体两端的竖向位移  $v_1$ 、 $v_2$  以及梁体两端的转角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ,如图 1 所示。

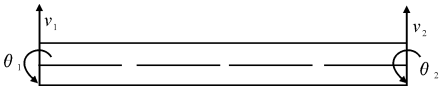


图 1 无轴力平面梁单元

Fig. 1 Plane beam element without axial force

由有限元相关理论可知,单刚度平面梁单元的有限元求解方程为<sup>[11]</sup>

$$\mathbf{K}^e \mathbf{q}^e = \mathbf{P}^e \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}^e$  为无轴力作用下的平面梁单元刚度矩阵<sup>[15]</sup>, $\mathbf{K}^e$  矩阵的各项参数如式(2)所示, $E$  为梁体弹性模量, $I$  为梁体抗弯惯性矩, $l$  为单刚度梁体长度。

$$\mathbf{K}^e = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} \\ -\frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} & \frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{q}^e$  为平面梁单元的节点位移矩阵, $\mathbf{q}^e = [v_1 \ \theta_1 \ v_2 \ \theta_2]^T$ ;  $\mathbf{P}^e$  为平面梁单元的节点力矩阵, $\mathbf{P}^e = [p_1 \ M_1 \ p_2 \ M_2]^T$ ,  $p_i$  对应  $v_i$  方向的力,  $M_i$  对应  $\theta_i$  方向产生的弯矩。

## 1.2 跨中挠度影响线与区段刚度关系方程的建立

以简支梁桥为例,将梁体沿纵桥向划分为  $N$  个区段,跨中挠度影响线即可离散为当单位集中荷载  $F_i$  分别位于各区段中部时所对应的跨中挠度值组

$$\left. \begin{aligned} EI_1 \left( \frac{12}{l^3} v_1 + \frac{6}{l^2} \theta_1 - \frac{12}{l^3} v_2 + \frac{6}{l^2} \theta_2 \right) &= P_1 \\ EI_1 \left( \frac{6}{l^2} v_1 + \frac{4}{l} \theta_1 - \frac{6}{l^2} v_2 + \frac{2}{l} \theta_2 \right) &= M_1 \\ EI_i \left( -\frac{12}{l^3} v_i - \frac{6}{l^2} \theta_i + \frac{12}{l^3} v_{i+1} - \frac{6}{l^2} \theta_{i+1} \right) + EI_{i+1} \left( \frac{12}{l^3} v_{i+1} + \frac{6}{l^2} \theta_{i+1} - \frac{12}{l^3} v_{i+2} + \frac{6}{l^2} \theta_{i+2} \right) &= P_{i+1} \quad (i=1 \sim 2N-1) \\ EI_i \left( \frac{6}{l^2} v_i + \frac{2}{l} \theta_i - \frac{6}{l^2} v_{i+1} + \frac{4}{l} \theta_{i+1} \right) + EI_{i+1} \left( \frac{6}{l^2} v_{i+1} + \frac{4}{l} \theta_{i+1} - \frac{6}{l^2} v_{i+2} + \frac{2}{l} \theta_{i+2} \right) &= M_{i+1} \quad (i=1 \sim 2N-1) \\ EI_{2N} \left( -\frac{12}{l^3} v_{2N} - \frac{6}{l^2} \theta_{2N} + \frac{12}{l^3} v_{2N+1} - \frac{6}{l^2} \theta_{2N+1} \right) &= P_{2N+1} \\ EI_{2N} \left( -\frac{6}{l^2} v_{2N} + \frac{2}{l} \theta_{2N} - \frac{6}{l^2} v_{2N+1} + \frac{4}{l} \theta_{2N+1} \right) &= M_{2N+1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

成的  $N$  个数据点。由于荷载的移动,每个数据点均对应一个力学工况,进行联立求解难度较大。由结构力学可知在同一线弹性变形体系中,同样大小的外力,作用在  $i$  点对  $j$  点的位移和作用在  $j$  点对  $i$  点的位移大小、方向完全相等(位移互等定理)。由此定理可知,作用于第  $N$  个区段中心的单位荷载在跨中处产生的挠度完全等同于作用于跨中的单位荷载在第  $N$  个区段中心所产生的挠度。故当跨中挠度影响线为已知时,可将其视为单位集中力作用于跨中, $N$  个区段中心处的挠度为已知,方便进行方程的建立及求解。由于各区段中心处尚无节点,为方便计算挠度数据,将每个区段划分为 2 个小区段,全梁共转化为  $2N$  个区段,计算模型的转化如图 2 所示。

对于已建成桥梁,适合通过移动车辆过桥并采集跨中挠度数据推算刚度分布(计算模型 1),移动车辆与单位荷载间的关系转换详见第 2 节;对于实验室和预制场中的梁体,可直接采用跨中加载并采集各区段挠度的方法推算刚度分布(计算模型 2)。

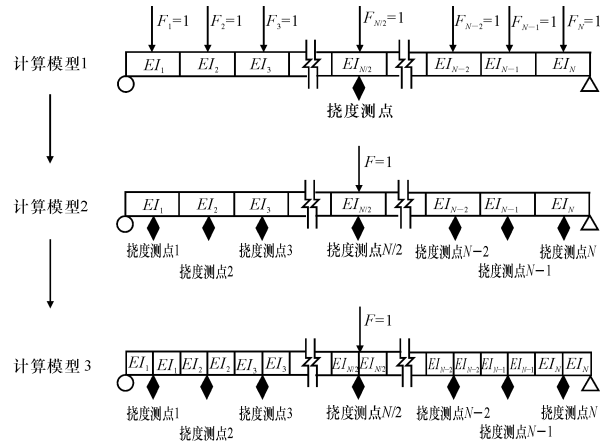


图 2 计算模型转化

Fig. 2 Transformation of calculation model

对图 2 所示计算模型 3 中的  $2N$  个小区段,运用有限元理论进行单元刚度矩阵拼装,化简后得到结构的荷载、挠度、刚度之间的关系方程组,如式(3)所示。

式中:  $EI_i$  为各区段刚度 ( $i=1\sim 2N$ );  $v_i$  为各节点竖向挠度 ( $i=1\sim 2N+1$ );  $\theta_i$  为各节点转角 ( $i=1\sim 2N+1$ );  $P_i$  为各节点竖向荷载 ( $i=1\sim 2N+1$ );  $M_i$  为各节点弯矩 ( $i=1\sim 2N+1$ );  $l_i$  为各区段长度 ( $i=1\sim 2N$ ), 合计  $12N+4$  个参数。

式(3)中的已知条件及附加条件为

$$\left. \begin{aligned} v_1=v_{2N+1}=0, v_i (i=2,4,6,\dots,2N) \text{ 可由影响线竖标得到} \\ P_{N+1}=1, P_i (i=2,3,4,\dots,N,N+2,N+3,\dots,2N)=0 \\ M_i=0 (i=1,2,3,\dots,2N+1) \\ l_i=\frac{L}{2N} \text{ (} L \text{ 为桥梁路径, } i=1,2,3,\dots,2N) \\ EI_i=EI_{i+1} (i=1,3,5,\dots,2N-1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 1.3 挠度刚度方程的求解

Maple 是目前世界上最为通用的数学和工程计算软件之一,在数学和科学领域享有盛誉,有“数学家

$$\left. \begin{aligned} A_{i,j} &= \begin{cases} (24j^2-24j+8)(2N-2i+1) & (\text{当 } i>j \text{ 且 } j\leq \frac{N}{2}) \\ (-24m^2+24m+24mN-12N-8)(2N-2i+1) & (\text{当 } N>j>\frac{N}{2} \text{ 且 } i>j, \text{ 并令 } m=N-j+1) \\ (-24m^2+24m+24mN-12N-8)(2m-1)-6mN+5N & (\text{当 } i=j>\frac{N}{2}, \text{ 并令 } m=N-i+1) \\ A_{N+1-i, N+1-j} & (\text{当 } i\leq \frac{N}{2} \text{ 或 } j>i) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{i,j} &= \begin{cases} (24j^2-24j+8)(2N-2i+1) & (\text{当 } i>j \text{ 且 } j<\frac{N}{2}) \\ (-24m^2+24m+24mN-12N-8)(2N-2i+1) & (\text{当 } N>j>\frac{N+1}{2} \text{ 且 } i>j, \text{ 并令 } m=N-j+1) \\ (-24m^2+24m+24mN-12N-8)(2m-1)-6mN+5N & (\text{当 } i=j>\frac{N+1}{2}, \text{ 并令 } m=N-i+1) \\ A_{N+1-i, N+1-j} & (\text{当 } i<\frac{N}{2} \text{ 或 } j>i) \\ 6N^3-3N & (\text{当 } i=N \text{ 且 } j=\frac{N+1}{2}) \\ (6N^2-3N)(2N-2i+1) & (\text{当 } \frac{N+1}{2}<i<N \text{ 且 } j=\frac{N+1}{2}) \\ 2N(3N^2-3N+1) & (\text{当 } i=j=\frac{N+1}{2}) \\ A_{N+1-i,j} & (\text{当 } i<\frac{N+1}{2} \text{ 且 } j=\frac{N+1}{2}) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

结合式(5)~式(8),即可根据各区段的已知挠度推算出各区段的刚度  $EI_i$  ( $i=1\sim 2N$ ),从而直观有效地确定梁体的实际刚度及工作状态。

## 2 跨中挠度影响线转换方法

由第 1 节可知,当跨中挠度影响线已知时,即可

的软件”之称。该软件尤其擅长符号运算,非常适合各种数学模型的解析研究<sup>[16-18]</sup>。由式(3)结合式(4)所示条件共  $12N+4$  个等式对所有参数运用 Maple 进行联立求解分析,可以发现该方程组存在解析解,各区段刚度  $EI_i$  ( $i=1\sim 2N$ )可表示为

$$EI_i=EI_{i+1}=\frac{L^3}{96N^4B_i} \quad (i=1,3,5,\dots,2N-1) \quad (5)$$

式中:  $B_i$  为列矩阵  $\mathbf{B}$  中的第  $i$  行元素,列矩阵  $\mathbf{B}$  可按式(6)求得

$$\mathbf{B}=\mathbf{A}^{-1}\mathbf{f} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{f}$  为跨中单位荷载下各区段的已知挠度,即  $v_i$  ( $i=2,4,6,\dots,2N$ )所依次组成的位移矩阵;矩阵  $\mathbf{A}$  则较为复杂,其中各元素  $A_{i,j}$ 按照  $N$  的奇偶性可分为 2 种情况:

(1)当  $N$  为偶数时

$$\left. \begin{aligned} &(\text{当 } i>j \text{ 且 } j\leq \frac{N}{2}) \\ &(\text{当 } N>j>\frac{N}{2} \text{ 且 } i>j, \text{ 并令 } m=N-j+1) \\ &(\text{当 } i=j>\frac{N}{2}, \text{ 并令 } m=N-i+1) \\ &(\text{当 } i\leq \frac{N}{2} \text{ 或 } j>i) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} &(\text{当 } i>j \text{ 且 } j<\frac{N}{2}) \\ &(\text{当 } N>j>\frac{N+1}{2} \text{ 且 } i>j, \text{ 并令 } m=N-j+1) \\ &(\text{当 } i=j>\frac{N+1}{2}, \text{ 并令 } m=N-i+1) \\ &(\text{当 } i<\frac{N}{2} \text{ 或 } j>i) \\ &(\text{当 } i=N \text{ 且 } j=\frac{N+1}{2}) \\ &(\text{当 } \frac{N+1}{2}<i<N \text{ 且 } j=\frac{N+1}{2}) \\ &(\text{当 } i=j=\frac{N+1}{2}) \\ &(\text{当 } i<\frac{N+1}{2} \text{ 且 } j=\frac{N+1}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

推算出全梁实际刚度分布。而实际中难以使用单位集中力移动过桥,在此可采用双轴或三轴重车低速(建议 5 km/h)通过桥梁并采集跨中挠度时称曲线。车辆低速行驶时可基本忽略桥梁结构的动力响应,并将多轴车辆近似视为作用于车辆重心处的单一集中荷载。对于常见的双轴车辆与三轴车辆,转换后

的集中荷载大小和位置见图 3 及式(9)~式(12)。图中: $L_1$  对应双轴车时为前轮与后轮的轴距,对应三轴车时为前轮与中轮的轴距; $L_2$  为三轴车中轮与后轮的轴距; $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  依次分别为双轴车辆的前后轴重或三轴车辆的前中后轴重。

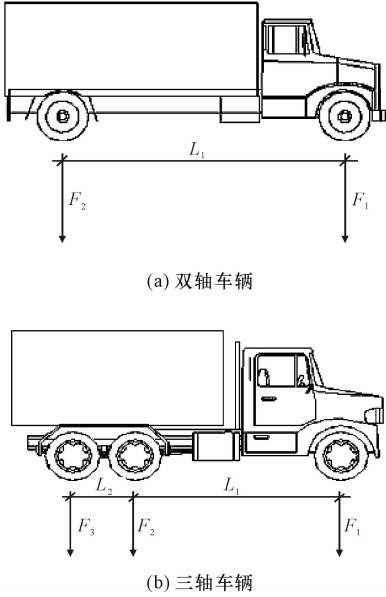


图 3 车辆参数

Fig. 3 Vehicle parameters

#### (1) 双轴车辆

如图 3(a)所示双轴车辆,转换后的集中荷载  $F$  及其距前轴距离  $L$  见式(9)、式(10)。

$$F = F_1 + F_2 \quad (9)$$

$$L = \frac{F_2 L_1}{F_1 + F_2} \quad (10)$$

#### (2) 三轴车辆

如图 3(b)所示三轴车辆,转换后的集中荷载  $F$  及其距前轴距离  $L$  见式(11)、式(12)。

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (11)$$

$$L = \frac{F_2 L_1 + F_3 (L_1 + L_2)}{F_1 + F_2 + F_3} \quad (12)$$

当多轴荷载转换为单一集中荷载后,再结合集中荷载与单位荷载的线性关系,即可将车辆过桥时产生的跨中挠度曲线转换为跨中挠度影响线,进而推算出全梁刚度分布。

### 3 算例分析及应用软件开发

以分段数取 4 段为例给出一座跨径为  $l$  的简支梁刚度推算过程,当图 2 中计算模型 1 或计算模型 2 的各挠度数据  $D_1 \sim D_4$  已得到时,各区段实际刚度推算流程如下。

根据式(7),当  $N=4$  时得

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 36 & 88 & 56 & 8 \\ 40 & 236 & 168 & 24 \\ 24 & 168 & 236 & 40 \\ 8 & 56 & 88 & 36 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{f} = 10^{-5} \begin{bmatrix} 4 \ 082 D_1 - 1 \ 990 D_2 + 308 D_3 - 83 D_4 \\ -949 D_1 + 1 \ 263 D_2 - 749 D_3 + 201 D_4 \\ 201 D_1 - 749 D_2 + 1 \ 263 D_3 - 949 D_4 \\ -83 D_1 + 308 D_2 - 1 \ 990 D_3 + 4 \ 802 D_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

进而根据式(5)即可求得各区段刚度,例如当  $i=1$  时

$$EI_1 = EI_2 = \frac{L^3}{96 \times 4^4 B_1} = \frac{L^3}{1 \ 180.1 D_1 - 489.1 D_2 + 75.7 D_3 - 20.4 D_4} \quad (15)$$

式(15)即为 4 区段时的简支梁刚度推算公式,与文献[12]所得结果吻合良好。

根据以上的计算过程发现,当分段数  $N$  较大时,系数矩阵  $\mathbf{A}$  及  $\mathbf{A}^{-1}$  的计算较为复杂。为了使该方法更加易于操作,基于本文刚度分布推算方法,编制相应的可视化计算软件并申请著作权。当输入刚度分段数、简支梁全长及挠度影响线参数时,即可快速推算出各区段实际刚度值,如下页图 4 所示。

以一座服役年限较长的 20 m 简支梁为例,将梁体分为 100 个区段,现场通过双轴车辆低速行驶得到跨中挠度时程曲线。按 1.1 小节所示方法换算后的跨中挠度影响线如下页图 5 所示,运用已开发的“简支梁纵向刚度分布推算系统”得到的全梁刚度分布曲线如下页图 6 所示。

由计算结果可见,根据本文提出的方法,采用简支梁跨中挠度影响线(图 5)推算全梁刚度分布状况。由图 6 可知,该简支梁刚度最小值为 4.09 mm,最大值为 4.71 mm,梁体最大刚度偏差率达 14%;1/4 跨径处至跨中附近刚度衰减较大,刚度偏差率达 11.4%,健康状况较差;跨中至 3/4 跨径附近则刚度衰减较小,刚度偏差率达 2.5%,健康状况较好。对实际工程中全梁的裂缝开展情况进行观测统计后可知,理论推算刚度分布结果与外观检测(主要是裂缝分布观测)规律吻合良好。由此可见,推算梁体纵桥向刚度分布图有助于了解简支梁实际工作状态,大致锁定主要病害范围,从而进一步对桥梁进

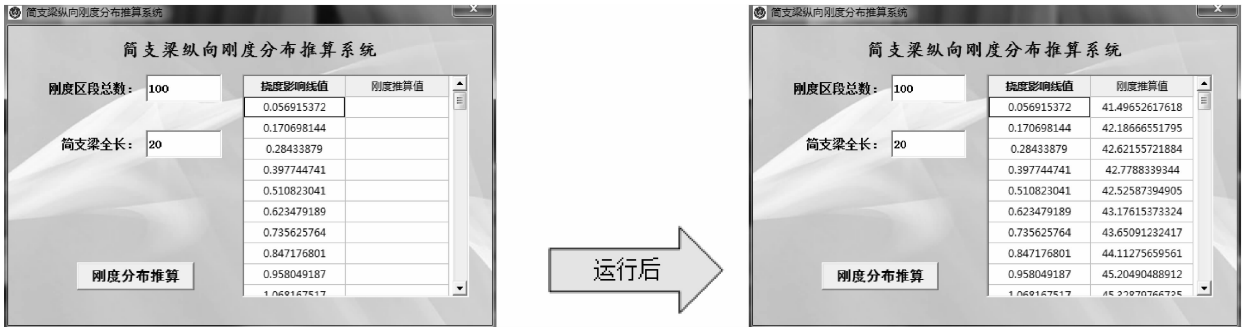


图 4 软件运行界面

Fig. 4 Software operation interface

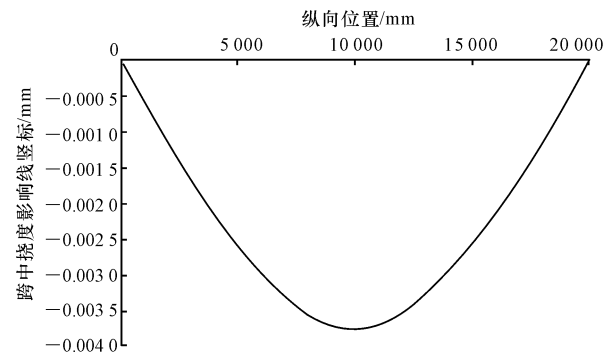


图 5 跨中挠度影响线

Fig. 5 Mid-span deflection influence line

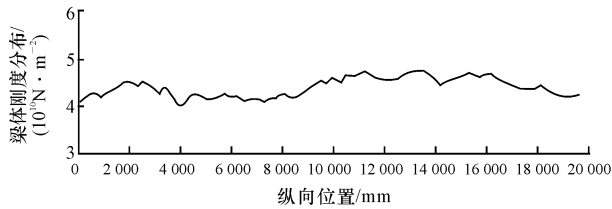


图 6 梁体刚度分布

Fig. 6 Beam stiffness distribution

行检测或进行必要的加固。

4 结 语

(1)以中国分布最广、建设技术最成熟的简支梁桥为例,结合有限元相关理论,建立了常规双轴车和三轴车过桥时的跨中挠度变化曲线与简支梁体纵向多区段的刚度关系方程组,推算了简支梁桥纵桥向的实际刚度分布状况,结合数学分析软件进行求解。结果表明,多段刚度-时程挠度方程组存在解析解,可根据单位荷载作用下的跨中挠度影响线数据推算梁体的实际刚度分布状态。对于连续梁桥等复杂体系桥梁结构,多段刚度-时程挠度方程组的建立及求解更加困难,可参考本文方法进行深入研究。

(2)建立了标准双轴车与三轴车移动过桥时其跨中挠度曲线向集中荷载作用影响线转换的关系方

程,从而快速获取双轴车与三轴车低速行驶过桥时采集的跨中挠度时程曲线,以便推导简支梁桥纵桥向的实际刚度分布状况,减少现场测试工作量。

(3)对于分段区段中涉及分段数  $N$  取值较大、计算工作繁重的情况,编制开发了配套计算软件,并通过算例对软件的有效性 with 实用性进行了验证。计算结果表明,桥梁结构纵桥向各区段刚度不尽相同,应用本文算法及软件可快速、真实、可靠地反映在役桥梁整体损伤状况,弥补部分损伤无法测定的缺憾,锁定简支梁桥损伤范围并正确估算其损伤程度,为桥梁健康状况评定及加固维修提供一定的理论依据。

(4)尽管采用本文方法可通过车辆过桥时的跨中挠度变化曲线推算简支梁桥纵桥向的实际刚度分布状况,但由于实际工程中受实验人员技术水平或测试精度等因素的影响,实测挠度曲线误差有时会引起实际刚度分布状态的推算误差,如何在保持快速的前提下提高测试精度,尚需进一步的研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] 贺冬冬,单成林.关于旧桥承载力评定方法适应性的探讨[J].广东公路交通,2009(1):36-39.  
HE Dong-dong, SHAN Cheng-lin. Discussion on the evaluating method of bearing strength to existing bridge [J]. Guangdong Highway Communications, 2009(1):36-39. (in Chinese)

[ 2 ] 王克海,李 冲,李 悦.中国公路桥梁抗震设计规范中存在的问题及改进建议[J].建筑科学与工程学报,2013,30(2):95-103.  
WANG Ke-hai, LI Chong, LI Yue. Problems in chinese highway bridge seismic specifications and suggestions for improvement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2):95-103. (in Chinese)

[ 3 ] 梁 鹏,李 斌,王晓光,等.基于桥梁健康监测的传

- 感器优化布置研究现状与发展趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 120-129.
- LIANG Peng, LI Bin, WANG Xiao-guang, et al. Research status and development trend of optimal sensor placement based on bridge health monitoring [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 120-129. (in Chinese)
- [4] 徐文平, 杨 梓. 既有混凝土桥梁承载能力鉴定标准的研讨[J]. 城市道桥与防洪, 2010(10): 174-176.
- XU Wen-ping, YANG Zi. Discussion of bearing capacity appraisal standard for concrete bridges[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010(10): 174-176. (in Chinese)
- [5] 赵 虎, 蒲黔辉, 施 洲. 基于横向模态差的桥梁横联构件损伤识别[J]. 铁道标准设计, 2010(7): 77-81.
- ZHAO Hu, PU Qian-hui, SHI Zhou. Bridge transverse component damage based on horizontal mode differences[J]. Railway Standard Design, 2010(7): 77-81. (in Chinese)
- [6] 元成方, 牛获涛, 盖青山, 等. 考虑冻融损伤的钢筋混凝土桥梁氯离子侵蚀寿命预测研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(2): 256-260.
- YUAN Cheng-fang, NIU Di-tao, GAI Qing-shan, et al. Research on chloride penetration life prediction of reinforced concrete bridge with consideration of the damage caused by freeze-thaw cycles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(2): 256-260. (in Chinese)
- [7] Yang M, Huang Q, Wang D J. Equivalent bending stiffness of simply supported preflex beam bridge with variable cross-section[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 17(1): 13-17.
- [8] 姚晓飞, 徐 岳, 付迎春, 等. 体系损伤混凝土 T 梁桥极限承载力试验[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2009, 34(2): 144-149.
- YAO Xiao-fei, XU Yue, FU Ying-chun, et al. Experimental study on ultimate bearing capacity of damaged concrete T-beam bridge systems[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2009, 34(2): 144-149. (in Chinese)
- [9] 单德山, 李 乔. 基于车致振动的桥梁损伤识别[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 60-65.
- SHAN De-shan, LI Qiao. Damage detection of bridge structures based on moving vehicle caused vibration [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(1): 60-65. (in Chinese)
- [10] Zhao H M, Wang H L, Jin J, et al. Beam shaping with limited amplitude weight values for satellite active phased array antenna[J]. Engineering Sciences, 2010, 8(2): 62-66.
- [11] 袁永新, 蒋家尚. 一种修正刚度矩阵的直接方法[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2010, 24(2): 193-196.
- YUAN Yong-xin, JIANG Jia-shang. A direct updating method for the stiffness matrix[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 24(2): 193-196. (in Chinese)
- [12] 朱红兵, 余志武, 蒋丽忠. 基于 Corten-Dolan 累积损伤准则的等效幅疲劳应力幅值计算方法[J]. 公路交通科技, 2010(1): 54-57.
- ZHU Hong-bing, YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong. Calculation method of equivalent fatigue stress range based on corten-dolan accumulative damage rule[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010(1): 54-57. (in Chinese)
- [13] 梁 鹏, 王秀兰, 楼灿洪. 基于裂缝特征库的混凝土梁桥承载力快速评定[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 32-41.
- LIANG Peng, WANG Xiu-lan, LOU Can-hong. Rapid evaluation of load-bearing capacity of concrete beam bridge based on crack feature library[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(8): 32-41. (in Chinese)
- [14] 吕大伟, 袁卓亚, 石雄伟. 中小跨径梁桥试验荷载效率[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(6): 59-67.
- LU Da-wei, YUAN Zhuo-ya, SHI Xiong-wei. Load test efficiency for girder bridges with short or medium span[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(6): 59-67. (in Chinese)
- [15] 王凌波, 贺拴海, 赵 煜, 等. 基于有限元的在役桥梁综合损伤评测法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2011, 36(1): 94-100.
- WANG Ling-bo, HE Shuan-hai, ZHAO Yu, et al. A comprehensive evaluation method of damage in in-service girder bridges based on the finite element method[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36(1): 94-100. (in Chinese)
- [16] Webb A R. Statistical pattern recognition (Second Edition) [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [17] Sohn H, Allen D W, Worden K, et al. Statistical damage classification using sequential probability ratio tests [J]. International Journal of Structural Health Monitoring, 2003, 2(1): 57-74.
- [18] Sohn H, Czarnecki J J, Farrar C R. Structural health monitoring using statistical process control [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(11): 1356-1363.