

装配式空心板梁桥铰缝损伤评估方法

邬晓光,李院军,时元绪,邓淇元

(长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘要 目的 推导一种装配式空心板桥铰缝损伤后跨中截面荷载横向分布系数的计算方法,解决装配式空心板梁桥铰缝损伤程度量化评估问题. 方法 基于传统铰接板梁法理论,以铰缝抗剪刚度的大小来表征铰缝的损伤程度,引入了一个空心板铰缝协同工作系数 φ ,并建立了其与铰缝抗剪刚度的模型关系以及与铰缝剪力抗力值、剪力效应值的功能函数关系,从而在正则方程中考虑铰缝损伤对荷载横向分布系数的影响,得到装配式空心板梁桥铰缝损伤的评估模型,计算其跨中截面荷载横向分布系数,并与实桥数据、有限元法(ANSYS)及传统铰接板梁法的计算结果进行对比. 结果 铰接板梁法计算结果与实桥数据相比其相对误差在5.9%~20.5%;ANSYS有限元法计算结果误差在2.7%~4.4%;修正铰接板梁法计算结果最大相对误差仅为2.7%. 结论 量化评估方法能够较好地适用于装配式空心板梁桥荷载横向分布系数的计算,计算结果与实桥数据较为接近,为实际工程中装配式空心板梁桥受力状况的评估可提供参考.

关键词 桥梁工程;装配式梁桥;量化评估;铰缝抗剪刚度;荷载横向分布系数

中图分类号 TU378.1 文献标志码 A

Damage Assessment Method for Hinged Joint of Fabricated Hollow Slab Girder Bridge

WU Xiaoguang, LI Yuanjun, SHI Yuanxu, DENG Qiyuan

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, China, 710064)

Abstract: A method for calculating the transverse distribution coefficient of load on the mid-span section of an assembled hollow slab bridge with hinged joints damaged is deduced to solve the problem of quantitative evaluation of hinged joints damaged in an assembled hollow slab bridge. Based on the traditional theory of articulated slab-beam method, the damage degree of articulated joints is represented by the shear stiffness of articulated joints. A hollow slab articulated joint cooperative working coefficient is introduced, and its model relationship with the shear stiffness of articulated joints and its functional relationship with the shear resistance value and shear effect value of

收稿日期:2019-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51778058);湖南省教育厅科研项目(14C0098);2016年度湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划项目(697)

作者简介:邬晓光(1961—),男,教授,博士,主要从事桥梁设计理论与桥梁检测加固方面研究.

articulated joints are established. Considering the influence of hinged joint damage on load transverse distribution coefficient, the evaluation model of hinged joint damage of assembled hollow slab girder bridge is obtained, and the load transverse distribution coefficient of mid-span section is calculated. The results are compared with those of real bridge data, finite element method (ANSYS) and traditional hinged slab-girder method. Compared with the actual bridge data, the relative error of the calculated results of articulated plate-girder method is 5.9% ~ 20.5%. The error of the calculated results of ANSYS finite element method is 2.7% ~ 4.4%. The maximum relative error of the modified articulated plate-girder method is only 2.7%. Quantitative evaluation method can be well applied to the calculation of transverse load distribution coefficients of assembled hollow slab girder bridges. The calculated results are close to the actual bridge data, which can provide a reference for the evaluation of stress conditions of assembled hollow slab girder bridges in practical projects.

Key words: bridge engineering; assembled beam bridge; quantitative evaluation; shear stiffness of hinge joint; transverse load distribution coefficient

现阶段桥梁养护工作严重滞后,导致了在役的装配式空心板梁桥的铰缝出现各种不同程度的损伤^[1],铰缝作为横向传力结构,对装配式桥梁的整体受力性能有很大的影响,严重时可能出现单板受力的情况,因此,亟须在役装配式空心板梁桥的铰缝损伤程度进行评估^[1].在铰缝发生损伤后,其约束条件、刚度和横向联系等都发生了改变,如果继续用传统的铰接板法计算荷载横向分布系数,则会导致计算结果与实际情况失真^[2-4].目前,国内外学者在空心板梁铰缝损伤方面提出了许多评定方法^[5-8],主要为外观检查评定方法和荷载试验方法,前者主要是通过外观来确定空心板铰缝损伤的位置、形状和大小,此方法只能从定性角度上进行评估,后者则是通过静载试验对桥梁横向分布进行定量评估,从而确定空心板之间铰缝的损伤程度.基于静力测试数据建立的损伤识别方法,通过对结构静力响应的改变与损伤位置、损伤程度建立联立方程,进行优化求解^[9].成琛等^[10]以铰接板梁法理论为基础,建立了在铰缝损伤情况下的横向分布模型,并结合遗传算法寻找损伤的位置和程度.窦勇芝等^[11]提出一种信赖域算法来优化对空心板梁桥铰缝横向连接刚度的参数识别,实现了对铰缝损伤的定量分析.学者对铰缝损伤引

起的相对位移、铰缝损伤的原因以及铰缝损伤对横向联系的影响等进行了研究^[12-16].然而,研究仅是通过荷载试验和有限元模型进行定量分析,缺少理论对铰缝损伤原因及如何影响桥梁受力的研究,同时对铰缝损伤后空心板梁的荷载横向分布研究较少.笔者针对在役装配式空心板梁桥发生铰缝损伤后的受力状态进行评估,对其跨中截面荷载横向分布系数进行研究,以铰接板梁法为基础,首先对损伤铰缝进行量化评估,鉴于铰缝损伤后两侧板梁间会产生相对位移的情况,在建立正则方程时考虑铰缝相对位移对横向分布的影响,最终建立一种装配式空心板梁桥铰缝损伤评估模型,通过该模型,得到了一种装配式空心板桥铰缝损伤后跨中截面荷载横向分布系数的计算方法.

1 铰缝损伤评估指标

随着桥梁服役年限的增加,在重载交通、温度、收缩徐变和腐蚀等作用下,空心板的接缝必然会出现不同程度的损伤,导致铰缝抗剪刚度降低,这将会使铰缝两侧空心板产生一个挠度差 $\Delta\omega_i$,把此挠度差称为附加挠度 $\Delta\omega_i$ (见图1).在荷载作用下,空心板铰缝损伤将会使相邻两空心板中受荷载的空心板增加一个附加挠度,而没有荷载作用的空心板

将会少一个附加挠度^[10].

$$\Delta\omega_i = \omega'_i - \omega_i \quad (1)$$

式中: ω'_i 为主梁第*i*条铰缝发生损伤后,正弦荷载作用下的主梁在该侧损伤铰缝处的实际挠度; ω_i 为正弦荷载作用下的主梁在铰缝处的理论挠度值.

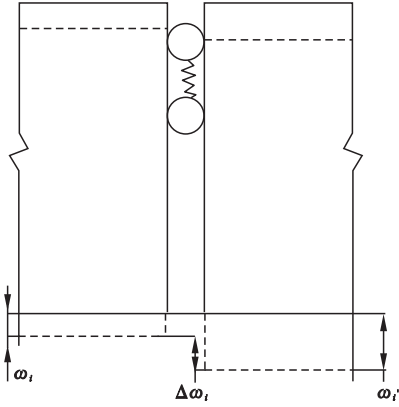


图1 铰缝计算图示

Fig. 1 Illustration of hinge joint calculation

引入刚度分配系数 ξ_i 来表征铰缝的损伤程度. 当铰缝无损伤时, $\xi_i = 0$, 铰缝抗剪刚度 k_i 不变, 表示不需主梁刚度来承担附加挠度, 因为此时附加挠度 $\Delta\omega_i = 0$; 当铰缝发生损伤时, $0 < \xi_i < 1$, $\Delta\omega_i > 0$, 则需要主梁分配一部分刚度来承担附加挠度, 即需要主梁分配一部分刚度来弥补铰缝损伤的抗剪刚度, 其表达式为

$$\begin{cases} \xi_i = \frac{\Delta\omega_i}{\omega_i} \\ 1 - \xi_i = \frac{\omega'_i}{\omega_i} \end{cases} \quad (2)$$

可用挠度值的变化来反映梁体刚度的分配情况.

$$(1 - \xi_i)B + \xi_i B = B \quad (3)$$

式中: B 为空心板梁的理论刚度,把各个空心板梁简化成具有同样大小的截面与刚度的板梁; $\xi_i B$ 为铰缝减少的抗剪刚度.

令 $\xi_i B = k'_i$, 则铰缝受损伤后实际抗剪刚度 k'_i 为

$$k''_i = k_i - k'_i \quad (4)$$

基于文献[6],引入参数 φ 来反映铰缝

对结构整体性能影响,称为空心板铰缝协同工作系数.

$$\varphi_i = \frac{\Delta\omega_i}{\omega_i} \quad (5)$$

$$\bar{\omega}_i = \frac{\omega_i^L + \omega_i^R}{2} \quad (6)$$

式中: $\bar{\omega}_i$ 为正弦荷载作用下某铰缝左右两侧空心板的平均挠度值; ω_i^L 为正弦荷载作用下某铰缝左侧空心板的右下端挠度值; ω_i^R 为正弦荷载作用下某铰缝的左侧空心板左下端挠度值.

对于式(6)中 $\bar{\omega}_i$ 无论铰缝是否发生损伤其值都为铰缝无损伤情况下空心板的理论挠度值,因为外荷载作用下引起的挠度值,由左右两侧的空心板承担,当发生铰缝发生损伤时,直接受外荷载作用的主梁多承担多一部分附加挠度 $\Delta\omega_i$,相邻的主梁少承担一部分附加挠度 $\Delta\omega_i$,但其平均值仍是不变的,因此式(2)、式(5)可以写为

$$\varphi_i = \xi_i = \frac{\Delta\omega_i}{\omega_i} \quad (7)$$

由文献[6]可知,参数 φ 与铰缝形状、混凝土强度参数、配筋率和铰缝损伤状态等因素有关,并考虑了桥面铺装的影响,通过数学回归分析得出空心板铰缝协同工作系数 φ 的表达式为

$$\varphi = \frac{A_j \left[x_1 \left(\frac{i}{h_0} \right)^2 + x_2 (1 - \mu_s) \frac{f'_c}{f_c} + x_3 (1 - \mu_s) \rho_s \right]}{A [(1 - \mu_{sv}) \rho_{sv}]} \quad (8)$$

式中: A_j 为铰缝截面积; A 为计算单元截面积; i 为铰缝形心到计算单元形心的距离; h_0 为计算截面的有效高度; μ_s 、 μ_{sv} 为铰缝纵、横向钢筋的锈蚀率; f'_c 、 f_c 分别为铰缝、空心板的混凝土强度; ρ_s 、 ρ_{sv} 分别为铰缝纵、横向配筋率; x_1 、 x_2 、 x_3 为回归系数.

由式(4)~式(8)便可计算出实际第*i*铰缝的实际刚度 ξ .

$$k''_i = k_i - \varphi_i B \quad (9)$$

即可以在用铰接板法计算空心板跨中截面荷载横向分布系数时,考虑空心板的铰缝损伤。

2 铰缝承载力评估

文献[5]分析了15座桥的损伤检测资料,建立了铰缝协同工作系数 φ 与铰缝损伤度函数关系,得出了3个铰缝损伤等级。第Ⅰ级, $\varphi \leq 0.18$,认为铰缝轻度损伤,及时日常维护即可;第Ⅱ级, $0.18 < \varphi \leq 0.57$,认为铰缝中度损伤,需要耐久性修复;第Ⅲ级, $0.57 < \varphi \leq 1.0$,认为铰缝失效,需要耐久性加固。

铰缝损伤后维修、加固的时机选择缺乏一个量化的标准,根据铰缝协同工作系数 φ 、剪力抗力与剪力效应值可确定一个功能函数,为铰缝损伤评估提供一个量化标准,计算式为

$$Z = [(1 - \varphi)g_v - \gamma_0 g_s] \quad (10)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,设计安全等级一级、二级和三级分别取1.1、1.0和0.9; g_v 、 g_s 分别为铰缝的实际剪力抗力与剪力效应值。

把式(8)代入式(10),得功能函数 $Z = f(R, S)$ 的表达式为

$$Z = f(g_v, g_s, A_j, A, i, h_0, \mu_s, \mu_{sv}, f'_c, f'_c, \rho_s, \rho_{sv}) \quad (11)$$

当 $Z < 0$ 时,表示铰缝的实际剪力抗力小于剪力效应值,需要加固;当 $Z \geq 0$ 时,表示铰缝的实际剪力抗力大于剪力效应值,不需要加固。

3 考虑铰缝损伤的修正铰接板梁法

3.1 基本假设与正则方程

笔者的研究对象是采用铰缝连接的装配式空心板梁桥,考虑其铰缝发生损伤,提出以下基本假设:①在竖向荷载作用下,结合缝内只传递竖向剪力;②空心板上荷载、铰缝剪力、板的位移和铰缝的相对位移等沿跨径方

向为半波正弦分布;③不考虑空心板的横向变形;④铰缝的相对位移与铰缝传递的剪力成正比,与铰缝的抗剪刚度成反比。

图2为铰接空心板桥计算图示,由 n 个板组合,从左到右序号依次为 $1, 2, \dots, n-1, n$,其中具有 $n-1$ 条铰缝,将每一条铰缝切开形成基本体系,利用两相邻板梁在铰接缝处的竖向相对位移为零的变形条件,就可以求出全部铰接力峰值,但是当铰缝发生损伤时,板梁间铰缝处会发生相对位移。

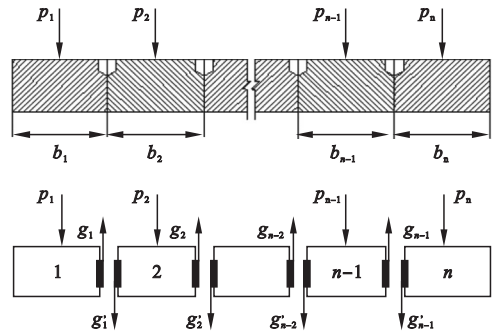


图2 铰接空心板桥计算

Fig. 2 Calculation of articulated hollow slab bridge

在建立正则方程时需要考虑板梁间铰缝处的相对位移,现根据假设④可以把原正则方程改写为

$$\sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij} g_j + \sum_{k=1}^n \delta_{ik} p_k + \frac{g_i}{k_i''} = 0 \quad (12)$$

式中: δ_{ij} 为第 j 条铰缝处作用单位正弦铰接力,在第 i 条铰缝处引起的竖向相对位移; δ_{ik} 为第 k 块板上作用单位竖向荷载在第 i 条铰缝处引起的竖向相对位移; g_j 和 g_i 分别在第 j 条铰缝处和第 i 条铰缝处的剪力; p_k 为在第 k 块板上作用的竖向荷载,作用点在板梁的中心; k_i'' 为第 i 条铰缝在受损伤后的实际抗剪刚度。

把式(9)代入式(10),便可以得到铰缝受损伤后的实际正则方程:

$$\sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij} g_j + \sum_{k=1}^n \delta_{ik} p_k = -\frac{g_i}{k_i - \varphi_i B} \quad (13)$$

式中: k_i 为第 i 条铰缝的理论抗剪刚度; φ_i 为第 i 条铰缝协同工作系数。

3.2 计算常数 δ_{ij} 、 δ_{ik}

板梁典型受力情况如图3所示.

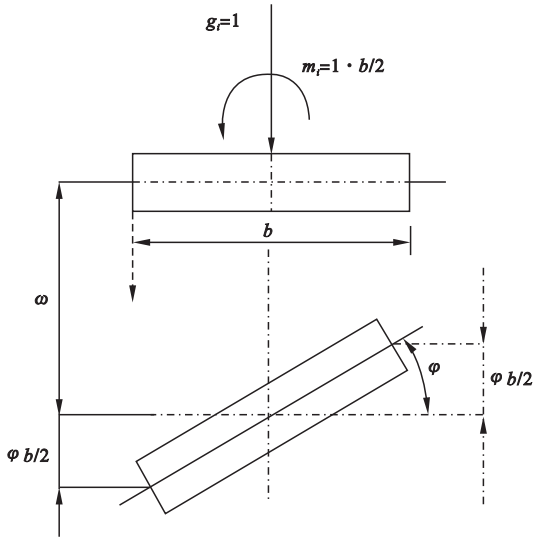


图3 板梁典型受力图

Fig. 3 Typical stress response of plate girder

截取跨中单位长板的变形来讨论,它的偏心铰接力可以化为作用于板中心的垂直力和一个扭矩.假设板的横向刚度无限大,不计板的横向变形,则板块左侧的挠度为 $\omega + \frac{b}{2}\varphi$, 板块右侧的挠度为 $\omega - \frac{b}{2}\varphi$, 同时计算时应遵守符号方向要求:当 δ_{ij} 与 g_i 的方向一致时取正号,反之取负号,则第 i 铰缝处产生的相对位移 δ_{ij} 可表示为

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right), & i=j; \\ -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right), & j=i\pm 1; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (14)$$

同理可计算出单位竖向荷载作用下在第 i 铰缝处引起的竖向相对位移 δ_{ik} 可表示为

$$f_{ik} = \begin{cases} \omega_k, & i=k+1; \\ -\omega_k, & j=k; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (15)$$

由一般力学公式可以计算出在正弦荷载下简支板梁的跨中竖向挠度 ω 和扭转角 φ 分别为

$$\begin{cases} \omega = \frac{pl^4}{\pi^4 EI}, \\ \varphi = \frac{pbl^2}{2\pi^2 GI_T}. \end{cases} \quad (16)$$

式中: l 为空心板的计算跨径; EI 为空心板的抗弯刚度; GI_T 为空心板的抗扭刚度.

由此可以得到刚度参数:

$$\gamma = \frac{b}{2} \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\pi^2 EI}{4GI_T} \left(\frac{b}{l}\right)^2. \quad (17)$$

3.3 铰缝剪力的计算

根据文献[17]知,在单位正弦荷载作用下,板梁的挠度、弯矩、剪力和外荷载的比例都为常数,即在同一横截面上各板梁中心的挠度 ω_i 与该板梁所承担的外荷载 Q_i 成正比,与其刚度 B_i 成反比,则有:

$$Q_i = -B_i \omega_i, \quad Q_j = -B_j \omega_j. \quad (18)$$

由在竖向的力学平衡条件 $\sum Q_i = \sum p_i$, 可得:

$$Q_i = \sum p_i \frac{B_i \omega_i}{\sum \omega_j B_j}. \quad (19)$$

对于大多数的装配式空心板梁,各个板梁的截面尺寸跟材料都一样,在同样的正弦荷载作用下各个板梁具有一样的竖向挠度值,则可以把式(18)简化为

$$Q_i = \sum p_i \frac{\omega_i}{\sum \omega_j}. \quad (20)$$

根据板梁在竖向的力学平衡可得:

$$\begin{cases} g_1 = Q_1 - p_1, \\ g_2 = Q_2 + g_1 - p_2, \\ \vdots \\ g_{n-2} = Q_{n-1} + g_{n-1} - p_{n-1}, \\ g_{n-1} = Q_n - p_n. \end{cases} \quad (21)$$

由式(19)便可以求得铰缝处的剪力,再根据剪力去求各板梁的横向影响线的竖标值.将式(12)~(15)代入式(11)式,并将正则方程展开,可简化为

$$\begin{bmatrix} 2(1+\gamma) & -(1-\gamma) & & & \\ -(1-\gamma) & 2(1+\gamma) & -(1-\gamma) & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -(1-\gamma) & 2(1+\gamma) & -(1-\gamma) \\ & & & -(1-\gamma) & 2(1+\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_{n-2} \\ g_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1 \\ & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n-2} \\ p_{n-1} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} 1/(k' - \varphi B) & & & & \\ & 1/(k' - \varphi B) & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 1/(k' - \varphi B) & \\ & & & & 1/(k' - \varphi B) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_{n-2} \\ g_{n-1} \end{bmatrix} = 0 \quad (22)$$

4 算例分析

以内蒙古省际通道左旗至满洲里一级公路太东中桥(右幅)装配式空心板梁桥为例,采用荷载试验结果,考虑铰缝损伤,先进行铰缝损伤程度评估,看是否需要耐久性修复或者加固,再分别采用铰接板梁法、修正铰接板梁法和有限元法(ANSYS)计算各片梁跨中截面荷载横向分布系数,并分别与实桥数据进行对比,以验证计算方法的适用性和准确性。

太东中桥(右幅)位于省际通道左旗至满洲里一级公路,中心桩号 K394+072,全长为 44.94 m,上部结构采用 2×20 m 预应力混凝土简支空心板梁,计算跨径 19.6 m;预制装配式梁间距 1.0 m,梁高 0.95 m,12 片板梁。经检查,该桥 11 条铰缝皆出现了不同情况的裂缝,裂缝长度为 3~10 mm,宽度为 0.3 mm 左右,混凝土强度等级为 C50。

荷载试验按照规范加载。有限元方法、考虑铰缝损伤的修正铰接板梁法和铰接板梁法皆用此加载方式。可根据相应工况下,实测的各片梁跨中截面挠度值与各片梁跨中截面挠度值之和之比来计算跨中截面实际荷载横向分布系数。

ANSYS 有限元模型采用 SOLID65 建模,通过铰缝混凝土模量折减来反映铰缝的受损程度,不考虑普通钢筋及预应力作用,建

立好模型后进行网格划分,加约束边界条件和车辆荷载加载,然后读取每片梁的挠度值进行荷载横向分布系数计算,有限元模型如图 4 所示。

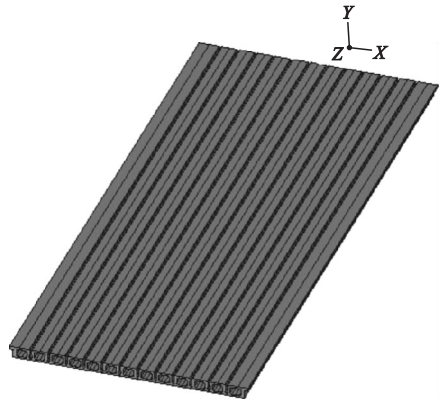


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

修正铰接板梁法和铰接板梁法按空心板梁的截面特性和最不利加载便可得到各片梁跨中截面荷载横向分布系数。该 20 m 装配式空心板梁桥在各种计算方法所得的具体结果如表 1 所示。由表 1 可以知:铰缝皆出现了不同程度的损伤,工作协同系数 φ 为 0.08~0.81,其中 1、2 和 11 号铰缝的工作协同系数 $\varphi \leq 0.18$,即属于轻度损伤,只需要进行日常耐久性维护即可;3、4、5、8、9 和 10 号铰缝的工作协同系数 $0.18 < \varphi \leq 0.57$,即属于中度损伤,需要进行耐久性修复;6 和 7 号铰缝的工作协同系数 $\varphi > 0.57$,即属于铰缝失效,需要进行耐久性加固。从功能函数数值角度来

看,5和6号梁的功能函数值 $Z < 0$,即认为该铰缝的剪力抗力值小于剪力效应值,需要进行耐久性加固。

表1 铰缝损伤评估指标

Table 1 Evaluation indices for hinged joint damage

铰缝号	δ	Z/kN
1	0.08	39.94
2	0.14	37.45
3	0.25	28.15
4	0.44	10.69
5	0.56	2.57
6	0.81	-3.47
7	0.63	-0.14
8	0.50	9.64
9	0.37	25.33
10	0.16	35.74
11	0.11	38.18

表2 不同计算方法所得荷载横向分布系数对比

Table 2 Comparison of load transverse distribution coefficients obtained by different calculation methods

梁号	荷载横向分布系数				铰接板梁法 误差/%	修正铰接板 梁法误差/%	ANSYS有限元 法相对误差/%
	铰接板梁法	修正铰接 板梁法	ANSYS 有限元法	实桥			
1#	0.255	0.278	0.283	0.271	-5.9	2.6	4.4
2#	0.249	0.273	0.280	0.269	-7.4	1.5	4.1
3#	0.237	0.273	0.275	0.266	-10.9	2.6	3.4
4#	0.226	0.269	0.271	0.262	-13.7	2.7	3.4
5#	0.218	0.255	0.267	0.260	-16.2	-1.9	2.7
6#	0.205	0.252	0.265	0.258	-20.5	-2.3	2.7

③ANSYS有限元法.从表2可看出,其误差在2.7%~4.4%,具有较高的精度,验证了模型建立的正确性.④此外,由表1、2可知,工作协同系数 φ 与铰接板梁法计算跨中截面荷载横向分布系数的相对误差成正比,即某空心板梁两侧的铰缝损伤越严重,该主梁实际的跨中截面荷载横向分布系数越大,与传统铰接板梁法的计算结果误差也越大,反之则越小。

5 结论

(1)得出的工作协同系数 φ 与功能函数

用铰接板梁法、修正铰接板梁法和ANSYS有限元法计算装配式空心板梁跨中截面荷载横向分布系数,并与实桥结果进行对比(见表2),结果表明:①铰接板梁法.由表2可看出,铰接板梁法计算结果与实桥数据相比其相对误差在5.9%~20.5%,远远超出了工程允许误差5%以内,这是由于传统的铰接板梁法是假设铰缝之间能够完全传递竖向剪力,并没有考虑铰缝损伤的情况,而且铰缝损伤越严重,铰接板梁法误差越大.②修正铰接板梁法.从表2可看出,其最大误差为2.7%,符合工程精度要求,这是因为修正铰接板梁法,把铰缝的损伤转换成了铰缝抗剪刚度的折减,在建立正则方程时考虑了铰缝损伤后引起的附加挠度与折减后的抗剪刚度。

值 Z 成反比,即工作协同系数 φ 越大,表示铰缝损伤程度越严重,功能函数数值越小,反之则越大。

(2)在铰缝损伤情况下,计算装配式空心板梁桥的荷载横向分布系数,通过实例验证的结果可知,铰接板梁法的计算结果误差已大于5%的工程允许误差,而修正铰接板梁法的计算结果最大误差为2.7%,能够较好地适用于装配式空心板梁桥荷载横向分布系数的计算,且计算结果较为准确。

参考文献

[1] 吴向男,徐岳,梁鹏,等.桥梁结构损伤识别研

- 究现状与展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 49-58.
(WU Xiangnan, XU Yue, LIANG Peng, et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification[J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2013, 33(6): 49-58.)
- [2] 邬晓光, 钱若霖, 苏佩. 考虑湿接缝刚度损伤的桥梁荷载横向分布计算方法[J]. 铁道建筑, 2018, 58(1): 93-95.
(WU Xiaoguang, QIAN Ruolin, SU Pei. Calculation method of lateral load distribution of bridges considering wet joint stiffness damage[J]. Railway engineering, 2008, 58(1): 93-95.)
- [3] 王凌波. 在役预应力梁桥残余承载力评估方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
(WANG Lingbo. Analysis for residual bearing capacity assessment method of in-service prestressed concrete girder bridges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [4] 赵煜, 周博, 贺拴海, 等. 基于裂缝特征的PC简支梁损伤刚度评估方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(4): 39-44.
(ZHAO Yu, ZHOU Bo, HE Shuanghai, et al. Damage stiffness assessment method based on fracture characteristics of PC simply-supported beam[J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2011, 31(4): 39-44.)
- [5] 于天来, 李海生, 赵云鹏, 等. 装配式铰接板桥的铰缝损伤评价[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 51-54.
(YU Tianlai, LI Haisheng, ZHAO Yunpeng, et al. Damage evaluation of hinged joints of assembled hinged slab bridges[J]. Bridge construction, 2016, 46(4): 51-54.)
- [6] 卫军, 李沛, 徐岳, 等. 空心板铰缝协同工作性能影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 29-33.
(WEI Jun, LI Pei, XU Yue, et al. Influencing factor analysis on coordinated working performance of hinge joint in hollow slab[J]. China journal of highway and transport, 2011, 24(2): 29-33.)
- [7] 卫军, 李沛, 张国法, 等. 空心板铰缝结构耐用性能的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 72-76.
(WEI Jun, LI Pei, ZHANG Guofa, et al. Experimental study on durability performance of hollow slab hinged joints[J]. Journal of Huazhong university of science and technology (natural science edition), 2012, 40(1): 72-76.)
- [8] 钱寅泉, 周正茂, 葛玮明, 等. 基于相对位移法的铰缝破损程度检测[J]. 公路交通科技, 2012, 29(7): 76-81.
(QIAN Yinquan, ZHOU Zhengmao, GE Weiming, et al. Deterioration inspection of hinge joints based on relative displacement method [J]. Journal of highway and transportation re-
- search and development, 2012, 29(7): 76-81.)
- [9] BAKHTIARI-NEJAD F, RAHAI A, ESFANDIARI A. A structural damage detection method using static noisy data [J]. Engineering structures, 2005, 27(12): 1784-1793.
- [10] 成琛, 沈成武, 许亮. 用铰接板(梁)法计算有损伤桥梁的横向分布系数[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(2): 229-231.
(CHENG Chen, SHEN Chengwu, XU Liang. The hinged-jointed plate method for calculating transverse load distribution on a damaged bridge [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2004, 28(2): 229-231.)
- [11] 窦勇芝, 王复明, 蔡迎春. 基于信赖域算法的板梁桥横向连接刚度的参数识别[J]. 结构工程师, 2006(6): 25-29.
(DOU Yongzhi, WANG Fuming, CAI Yingchun. Parameter identification of transverse coupling stiffness for plate girder bridges based on trust region algorithm [J]. Structural engineers, 2006(6): 25-29.)
- [12] MABSOUT M E, TARHINI K M, FREDERICK G R. Finite element analysis of steel girder highway bridges [J]. Journal of bridge engineering, 1997, 2(3): 83-87.
- [13] ALI R K, MIRZABOZORG H. Load distribution factors in simply supported skew bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2004(5): 55-57.
- [14] 刘华, 叶见曙, 俞博, 等. 桥梁荷载横向分布系数计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(1): 62-66.
(LIU Hua, YE Jianshu, YU Bo, et al. Calculation method of transversal distribution factor for bridge load [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2009, 9(1): 62-66.)
- [15] 聂瑞锋, 石雪飞, 阮欣, 等. 在役多车道空心板梁桥弯矩横向分布系数计算方法研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(2): 56-60.
(NIE Ruifeng, SHI Xuefei, RUAN Xin, et al. Research of calculation method for moment lateral distribution factors of multi-lane hollow slab beam bridges in service [J]. Bridge construction, 2014, 44(2): 56-60.)
- [16] 刘沛林. 装配式钢筋混凝土简支板梁桥铰缝受力性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
(LIU Peilin. Study on behaviors of hinge joints for fabricated reinforced concrete simply-supported plate girder bridges [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)
- [17] 范立础. 桥梁工程(上册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
(FAN Lichu. Bridge engineering (volume 1) [M]. Beijing: China Communications Publishing, 2014.)