

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202004054

基于铰缝损伤度的空心板桥铰缝损伤识别方法*

项长生^{1,2}, 党聪¹, 周宇³

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了对空心板桥铰缝损伤进行损伤识别, 根据铰缝受力和变形形式, 将铰缝的剪切变形和横向拉压变形加以考虑, 建立了一种弹簧铰连杆体系的铰缝计算模型, 进而与空心板共同组成空心板桥结构计算模型。基于该结构模型详细叙述了铰缝损伤度的计算方法, 并根据铰缝损伤度的大小来进行铰缝工作性能的评估。通过 ANSYS 数值分析和桥梁试验对该方法的准确性和实用性进行了验证。结果表明: 该铰缝损伤识别方法能够准确识别数值模拟和实际桥梁的铰缝损伤; 而且铰缝内力的计算结果与数值模拟能够很好的吻合; 但铰缝损伤度大小与加载位置到损伤铰缝的距离成反比, 因此建议加载位置应尽量靠近可能有损伤的铰缝。

关键词: 空心板桥; 铰缝; 损伤度; 数值模拟; 桥梁试验

中图分类号: TU997 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0523-11

Hinge Joint Damage Identification Method of Hollow Slab Bridge based on Hinge Joint Damage Degree

XIANG Changshen^{1,2}, DANG Cong¹, ZHOU Yu³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to identify the damage to hinge joints of hollow slab bridges, a hinge joint calculation model of the spring hinge link system is established based on force and deformation modes of hinge joints. The model considers the shear deformation and lateral deformation of hinge joints. Furthermore, the hinge joint model and the hollow slab form the calculation model of the hollow slab bridge structure. Based on the structural calculation model, the calculation method of damage degree of hinge joints is described, and the working performance of hinge joints is evaluated according to the damage degree. The accuracy and practicability of the method are verified by ANSYS numerical analyses and bridge tests. The results show that the damage identification method can accurately identify the damage of hinge joints in numerical simulation and actual bridges. Moreover, the calculation results of internal force at the hinge joint are in good agreement with numerical simulation. However, the calculated value of damage degree at the hinge joint is inversely proportional to the distance from the loading position to the damaged joint, so it is recommended that the loading position should be as close as possible to the hinge joint that may be damaged.

Keywords: hollow slab bridge; hinge joint; damage degree; numerical simulation; bridge test

* 收稿日期: 2020-04-18; 修回日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868045)、安徽省高校省级自然科学基金重点项目(KJ2019A0746)、安徽建筑大学博士启动基金项目(2019QDZ08)资助

作者简介: 项长生(1976—), 男, 副教授, 硕导。主要从事桥梁健康监测方面的研究。E-mail: xiangcs@lut.edu.cn

引言

近几年空心板桥在中小桥梁中广泛应用,该类桥梁由数个预制空心板通过混凝土铰缝连接成整体,共同承担荷载作用^[1-2]。然而,在重载交通作用下,铰缝作为结构横向连接构件极易产生损伤^[3-4]。有调查显示:吉林省500多条高速公路中的空心板桥铰缝损伤发生率最高可达83.3%^[5]。当空心板桥铰缝发生严重损伤时会导致空心板处于“单板受力”的状态,严重影响结构的整体性和安全性^[6-8]。因此,研究铰缝的传力机理和对铰缝的损伤做出准确的评估具有重要意义。

在传统铰接板理论中,铰缝被看作只传递竖向剪力的构造^[9],这与铰缝的实际受力状态明显不符。宋宇锋等^[4]通过有限元分析和模型试验指出横向正应力是铰缝开裂的主要原因之一;李宏江等^[10]认为铰缝一般处于拉压弯剪的复合受力状态,其中受剪作用相对突出;H.B.Yi等^[11]通过对空心板桥进行桥梁试验,指出铰缝破坏主要是由于铰缝与空心板之间的结合面弯曲和抗拉强度不够引起的;刘晓春等^[12]引入铰缝的剪切变形,建立了考虑铰缝损伤的空心板桥受力分析模型;可见研究人员越来越关注导致铰缝损伤的全面原因。所以传统铰接板理论需要进一步进行改进和优化。

近年来,专家学者们对结构损伤识别方法进行了大量研究。孙增寿等^[13]通过小波变换和桥梁运营时产生的结构加速度响应进行了结构损伤识别;周宇等^[14]提出了一种基于柔度曲率差变化率的损伤识别方法,并在系杆拱桥损伤识别中成功应用;X.Wen等^[15]提出了一种相邻空心板的应变相关系数,用以表征横向协同工作性能。但是,这些方法无法在铰缝损伤识别中很好应用,不能对铰缝损伤进行定量分析,因此寻求更准确、适合铰缝损伤的损伤识别方法具有重要意义。

基于现有研究,对空心板桥的铰缝受力和变形进行了理论分析,提出了一种考虑铰缝横向受力以及竖向剪力的铰缝损伤度计算式,建立有限元模型计算进行对比验证,对铰缝损伤进行识别和定量描述,并根据桥梁静载试验结果进一步验证理论计算。

1 空心板桥计算模型

1.1 铰缝受力简化

空心板桥是由数根狭长预制空心板通过铰缝

连接成整体从而共同承受荷载。当跨中受力时,空心板桥的变形,如图1所示。此时空心板桥铰缝处于复杂受力的状态,而且由于铰缝的尺寸、纵向抗弯刚度等均小于预制空心板,所以铰缝通常是空心板桥的关键环节和薄弱环节,直接影响着结构的整体工作性能和结构可靠性。

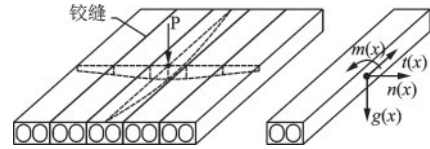


图1 空心板桥受力简图
Fig.1 Force diagram of the hollow slab bridge

根据传统铰接板理论,铰缝的设计尺寸小、深度浅、钢筋少,即被设计为“小铰缝”,但随着铰缝病害不断加重。人们意识到“小铰缝”的不足,并进行不断改进^[16],即加大铰缝尺寸、深度加深,铰缝内增设钢筋,从而形成了“中铰缝”、“大铰缝”等。尽管如此,铰缝仍是该桥的薄弱处。这因为铰缝始终处于拉压弯剪的复合应力状态,如图2所示。

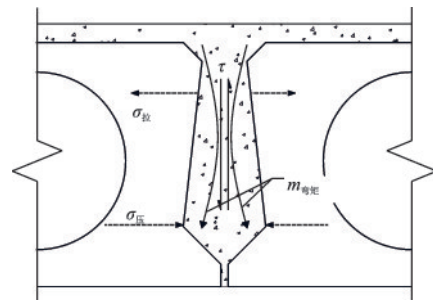


图2 铰缝混凝土受力状态
Fig.2 Concrete stress state of the hinge joint

根据铰缝的受力状态,本文考虑了铰缝受拉压、受弯和受剪的共同作用。其中,弯矩能够用力与力矩的乘积表示,因此可以将铰缝的变形和受力简化为铰缝剪力 g 和一组横向力 n^a 和 n^b 共同作用,如图3所示。

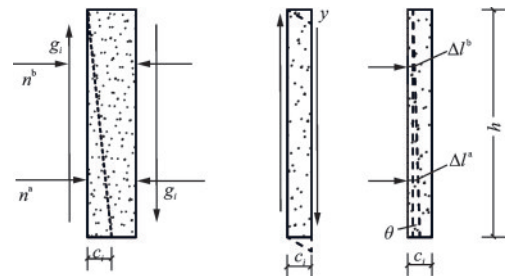


图3 铰缝变形简化
Fig.3 Simplified deformation of the hinge joint

1.2 铰缝计算模型

根据上述铰缝受力模式,建立铰缝计算模型,该模型由弹簧和理想铰接杆组合,弹簧与铰连杆的两端均与空心板铰接,如图4所示。

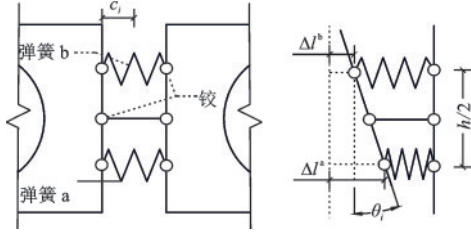


图4 铰缝计算模型

Fig.4 Calculation model of the hinge joint

弹簧负责传递铰缝横向力 n^a 和 n^b ,通过 a、b 弹簧的变形差从而考虑铰缝处相邻空心板的相对转角;铰接杆只传递铰缝剪力,根据铰接杆的剪切变形考虑铰缝处相邻空心板的相对位移。

由胡克定律可知,刚度为 k 的弹簧在力 F 的作用下的变形量 Δl 可由下式计算:

$$\Delta l = \frac{F}{k} \quad (1)$$

根据材料力学可知,剪切作用所引起的挠度 w_i 的计算式为:

$$\frac{dw_i}{dy} = \frac{\kappa V}{GA} = \frac{\kappa g_i}{Gh_i} \quad (2)$$

由于铰缝横向尺寸较小,铰缝内的横向剪应力可视为在铰缝横向内保持不变,因此在计算宽度 c_i 内剪切作用所引起的挠度计算式为:

$$w_i = \int_0^{c_i} \frac{\kappa V}{GA} dy = \frac{\kappa g_i c_i}{Gh_i} \quad (3)$$

式中, G 是剪切模量; h_i 是铰缝高度; V/A 是截面平均剪应力; κ 为截面的剪切系数,对矩形截面, $\kappa=3/2$ 。

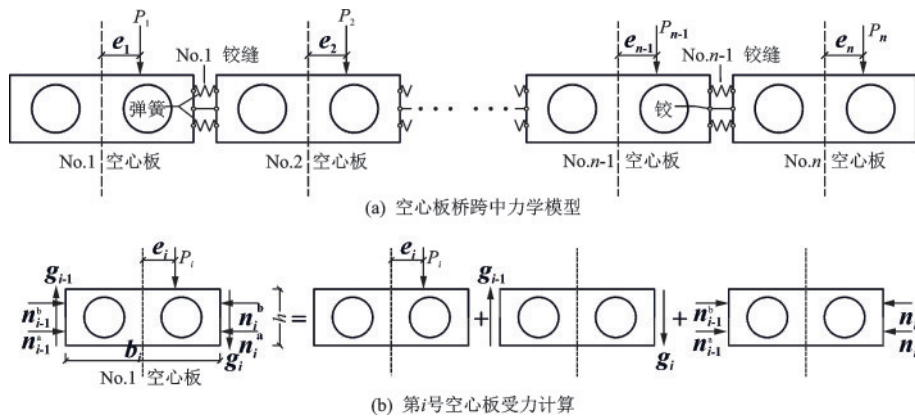


图5 空心板桥结构计算模型

Fig.5 Calculation model of the hollow slab bridge structure

1.3 基本假定

本文基于铰接板桥的基本理论^[9]并考虑铰缝混凝土横向应力、铰缝损伤和变形,提出以下基本假定:

- (1)空心板只产生纵向挠曲,横向是刚性的;
- (2)空心板上荷载、铰缝剪力、空心板的位移、铰缝横向力等沿跨径方向为半波正弦分布;
- (3)考虑铰缝传递竖向剪力和横向力,不考虑可能传递的纵向剪力等其他作用;
- (4)不考虑材料泊松比 ν 的影响。

1.4 空心板桥结构计算模型

为了计算方便,首先规定相关物理量的正方向:

- (1)空心板上竖向荷载和竖向位移以向下为正;
- (2)竖向荷载的横向偏心及铰缝的剪力以使预制空心板发生顺时针转动为正;
- (3)铰缝处相邻空心板间相对位移以左侧板向下右侧板向上为正;
- (4)横向力以铰缝混凝土受压为正;
- (5)铰缝处相邻空心板间相对转角以左侧板顺时针旋转,右侧板逆时针旋转为正。

由上述假定和铰缝计算模型,空心板桥将被视为一系列空心板与弹簧和铰链杆连接的结构。空心板编号从左到右依次为1到 n ,铰缝编号从左到右依次为1到 $(n-1)$,如图5(a)所示(图中物理量均是正方向)。对于第 i 号空心板,其受力可看成竖向荷载 P_i 、横向铰缝剪力 g_i 、横向力 n_i 的相互叠加,如图5(b)所示。

2 空心板桥结构力法方程建立

2.1 外荷载转化计算

在计算之前,首先要对外部集中荷载进行处理。将集中力 P_i 用一个峰值为 p_i 半波正弦荷载代替,设桥梁的计算跨径为 L ,则峰值 p_i 可由下式计算:

$$p_i = \frac{2P_i}{L} \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \quad (4)$$

式中, x_i 为集中力到支座的距离。

2.2 考虑相对位移的力法方程建立

在传统铰接板理论中假定铰缝抗剪刚度 G 足够大,使各个预制空心板整体受力,不考虑铰缝变形。但是实际工程中由于各种不利因素的影响,铰缝处空心板相对位移不为零。在本模型中考虑该相对位移,并且认为抗剪刚度与材料弹性模量相关,以抗剪刚度退化的方式来模拟铰缝损伤。设空心板桥中第 j 条铰缝的实际抗剪强度由 G_j 退化为 $(1-D_j)G_j$,根据公式(3),第 j 条铰缝处空心板间的相对位移 Δ_j 的近似计算式为:

$$\Delta_j \approx -w_j = -\frac{\kappa g_j c_j}{(1-D_j)G_j h_j} \quad (5)$$

由此作为第 j 条铰缝的剪切变形协调条件,可得考虑相邻空心板间相对位移的力法方程:

$$\sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij}^g g_j + \sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij}^p p_j + \sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij}^n n_j = -\frac{\kappa g_j c_j}{(1-D_j)G_j h_j} \quad (6)$$

($i = 1, 2, \dots, n-1$)

式中, δ_{ij}^g , δ_{ij}^p 和 δ_{ij}^n 分别为第 j 条铰缝处单位铰缝剪力、第 j 块空心板上单位竖向荷载以及第 j 条铰缝处单位横向力在第 i 条铰缝处产生的相对位移; g_j 为第 j 条铰缝处的铰缝剪力; p_j 为第 j 块空心板上的竖向荷载,其相对第 j 块空心板中心的偏心为 e_j , n_j 为第 j 条铰缝内的横向力, $n_j = n_j^b - n_j^a$ 。

2.3 考虑相对转角的力法方程建立

考虑到铰缝受横向力的影响,假定铰缝混凝土与空心板的连接性完好。根据图4,即可计算相对转角,设弹簧计算刚度 k 相等,则第 j 条铰缝处相邻空心板相对转角 θ_j 的计算式如下:

$$\theta_j \approx \tan \theta_j = 2 \frac{\Delta l_j^a - \Delta l_j^b}{h_j} = -\frac{2n_j}{kh_j} \quad (7)$$

由此作为第 j 条铰缝的拉压变形协调条件,可得考虑相邻空心板相对转角的力法方程:

$$\sum_{j=1}^{n-1} \theta_{ij}^g g_j + \sum_{j=1}^{n-1} \theta_{ij}^p p_j + \sum_{j=1}^{n-1} \theta_{ij}^n n_j = -\frac{2n_j}{kh_j} \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n-1)$$

式中, θ_{ij}^g , θ_{ij}^p 和 θ_{ij}^n 分别为第 j 条铰缝处单位铰缝剪力、第 j 块空心板上单位竖向荷载以及第 j 条铰缝处单位横向力在第 i 条铰缝处产生的相对转角。

2.4 单位力作用下空心板相对位移和转角的计算

假设各个空心板计算宽度均为 b ; θ^g , θ^p 和 θ^n 分别为单位力剪力 g 、竖向荷载 p 和横向力 n 作用下空心板的转角。根据力的叠加原理,分别得到在单位剪力、荷载、横向力作用下的空心板变位,如图6~8所示。

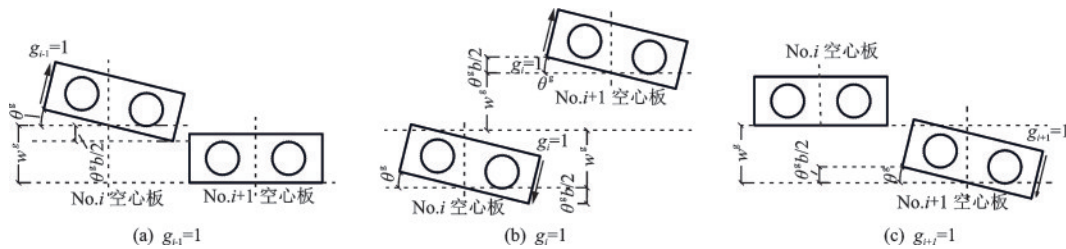


图6 单位铰缝剪力产生的空心板变位

Fig.6 Displacement of the hollow slab caused by a unit shear force at the hinge joint

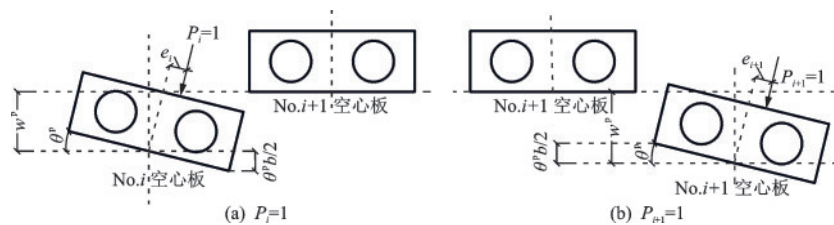


图7 单位荷载产生的空心板变位

Fig.7 Displacement of the hollow slab caused by a unit load

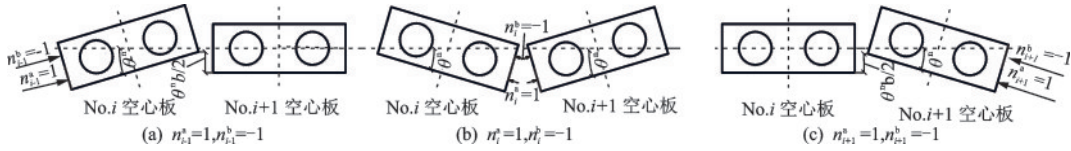


图8 单位铰缝横向力产生的空心板变位

Fig.8 Displacement of the hollow slab caused by the lateral force at the hinge joint

根据图7~8,分别计算 $\delta_{ij}^g, \delta_{ij}^p$ 和 δ_{ij}^n ;结果如下:

$$\delta_{ij}^g = \begin{cases} -(\omega^g - \theta^g b/2) & , j = i - 1 \\ 2(\omega^g + \theta^g b/2) & , j = i \\ -(\omega^g - \theta^g b/2) & , j = i + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta_{ij}^p = \begin{cases} \omega^p - \theta^p b/2 & , j = i \\ -(\omega^p - \theta^p b/2) & , j = i + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$\delta_{ij}^n = \begin{cases} -\theta^n b/2 & , j = i - 1 \\ \theta^n b/2 & , j = i + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

注意:式(9)和式(10)中 ω^g, ω^p 数值相等,均是单位力产生的竖向挠度 w ,但由不同性质的力产生。这里的 ω^g 和 θ^g 可由下式计算:

$$\begin{cases} \omega^g = w = \frac{l^4}{\pi^4 EI} \\ \theta^g = \varphi = \frac{l^2}{\pi^2 GI_r} \end{cases} \quad (12)$$

式中, φ 为作用在空心板边缘的单位力产生的转角; E, G 为空心板材料弹性模量和剪切模量; I 为空心板横截面抗弯惯性矩; I_r 为空心板横截面抗扭惯性矩,计算方法可参见文献[9]; l 为桥梁计算跨径。

同理,根据图6~8分别计算单位力作用下铰缝处空心板相对转角 $\theta_{ij}^g, \theta_{ij}^p$ 和 θ_{ij}^n 。结果如下:

$$\theta_{ij}^g = \begin{cases} \theta^g & , j = i - 1 \\ -\theta^g & , j = i + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$\theta_{ij}^p = \begin{cases} \theta^p & , j = i - 1 \\ -\theta^p & , j = i + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$\theta_{ij}^n = \begin{cases} -\theta^n & , j = i - 1 \\ 2\theta^n & , j = i \\ -\theta^n & , j = i + 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

上式中 θ^p 和 θ^n 可由下式计算:

$$\begin{cases} \theta^p = 2e\theta^g/b \\ \theta^n = h\theta^g/2b \end{cases} \quad (16)$$

式中, e 为竖向荷载 p 的偏心距。

2.5 铰缝剪力计算

文献[15]可知:当一组纵向正弦分布荷载作用在空心板桥上时,同一横截面上的各个空心板的中心竖向位移 f 与其分布荷载 Q 成正比。假设各个空心板横截面尺寸相同,此时铰缝剪力 g 可通过式(16)计算:

$$Q_i = \sum_i^n p_i \frac{f_i}{\sum_i^n f_i} \quad (17)$$

$$\begin{cases} g_1 = Q_1 - p_1 \\ g_2 = Q_2 + g_2 - p_2 \\ \dots \\ g_{n-1} = Q_{n-1} + g_{n-1} - p_{n-1} \end{cases} \quad (18)$$

3 损伤程度 D_i 求解

设空心板的截面尺寸、材料均相同,根据计算式(4)、(8)、(13)、(14)和(15)整理和化简可得到式(19),如下式所示:

$$A_1 \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_{n-1} \end{bmatrix} + B_1 \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_{n-1} \end{bmatrix} + C_1 \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_{n-1} \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

式中, A_1, B_1 和 C_1 为 $(n-1)$ 阶方阵,具体如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & & & \\ 1 & 0 & -1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & 0 & -1 \\ & & & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \epsilon_1^p & -\epsilon_2^p & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \epsilon_{n-2}^p & -\epsilon_{n-1}^p & \\ & & & \epsilon_{n-1}^p & \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$C_1 = \epsilon^n \begin{bmatrix} 2 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 2 \end{bmatrix} + \alpha E \quad (22)$$

式中, $\epsilon^n = h/2b$; $\epsilon_j^p = 2e_j/b$; $\alpha = 2/kh\theta^g$; E 为单位

矩阵。

再据计算式(6)、(9)、(10)和(11)整理和化简可得到式(23),如下式所示:

$$A_2 \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_{n-1} \end{bmatrix} + B_2 \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_{n-1} \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_{n-1} \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

式中, A_2 、 B_2 和 C_2 为 $(n-1)$ 阶方阵,具体如下:

$$A_2 = M + N \quad (24)$$

$$M = \begin{bmatrix} 2u & -v & & & \\ -v & 2u & -v & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -v & 2u & -v \\ & & & -v & 2u \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中, $u=1+\gamma$; $v=1-\gamma$ 。

$$N = \beta \begin{bmatrix} \zeta_1 & & & & \\ & \zeta_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \zeta_{n-2} & \\ & & & & \zeta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 + \lambda_1 & -(1 - \lambda_2) & & & \\ & \ddots & & \ddots & \\ & & & 1 + \lambda_{n-2} & -(1 - \lambda_{n-1}) \\ & & & & 1 + \lambda_{n-1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$C_2 = \varepsilon^n \gamma \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & \\ -1 & 0 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 0 & 1 \\ & & & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中, $\lambda_i = \varepsilon_i^p \gamma$; $\gamma = \frac{\theta^s b/2}{w}$; $\beta = \frac{\kappa c}{Ghw}$; $\zeta_i = \frac{1}{1 - D_i}$ 。

铰缝损伤度 D 的计算过程如下:

(1) 根据桥梁尺寸和材料特性计算 ε^n 、 ε^p 、 γ 、 α 和 β ;

(2) 根据式(4)转化外荷载向量 p_i ;

(3) 根据式(17)和(18)计算铰缝剪力向量 g_i ;

(4) 将 ε^n 、 ε^p 、 α 、铰缝剪力向量 g_i 和外荷载向量 p_i 带入式(19)~(22)求得铰缝横向力向量 n_i ;

(5) 将 ε^n 、 ε^p 、 γ 、 β 、铰缝剪力向量 g_i 、外荷载向量 p_i 和铰缝横向力向量 n_i 带入式(23)~(28), 计算得到 ζ_i ;

(6) 再根据式(29)求得铰缝损伤度 D_i 。损伤度 D_i 为负值时取值为0, 大于1时取为1, 表示铰缝失效。

$$D_i = 1 - \frac{1}{\zeta_i} \quad 0 \leq D_i \leq 1 \quad (29)$$

($i = 1, \dots, n-1$)

4 数值模拟

4.1 模型概况

为了验证本文提出的铰缝损伤度计算方法的正确性, 本文根据所提的空心板桥结构计算模型, 借助通用有限元软件 ANSYS 建立了有限元模型。数值模拟对象为单跨简支装配式空心板桥。桥梁跨径为 16 m, 由 10 片预制空心板铰接而成。空心板编号自左至右依次为 1[#]、2[#]、 \dots 、10[#], 铰缝编号自左至右依次为 No.1、No.2、 \dots 、No.9。空心板板宽 1.08 m, 板高 0.95 m, 相邻板中心距为 1.20 m, 空心板和铰缝的混凝土强度等级均为 C40, 模型横断面布置, 如图 9(a) 所示。

数值模型主要由两部分组成: 空心板单元(Hollow Slab Elements, HSE)和铰缝单元(Hinge Joint Elements, HJE)。HSE 采用 SOLID45 单元建立, HJE 采用 COMBIN14 单元建立, 如图 9(b) 所示。

特别注意: HJE 中有两种单元, 一种只传递横向力, 称为铰缝弹簧单元(Hinge Joint Spring Element, HJSE), 分别建立在空心板板高的 1/4 和 3/4 处; 另一种只传递竖向力, 称为铰缝连杆单元(Hinge Joint Rod Elements, HJRE), 设置在空心板板高的 1/2 上, 如图 9(c) 所示。另外 HJE 中的弹簧刚度与铰缝本身特性有关。可以通过式(30), 来计算铰缝单元的刚度。

$$\begin{cases} K_{\text{HJSE}} = \frac{E_c h l_e}{4c} \\ K_{\text{HJRE}} = \frac{G_c h l_e}{\kappa c} \end{cases} \quad (30)$$

式中, E_c 、 G_c 为铰缝混凝土弹性模量和剪切模量; c 为铰缝宽度; h 为铰缝深度; l_e 为 HJE 单元间距, 在本模型中取 400 mm。

4.2 荷载工况

在数值模型中, 外荷载为集中荷载 P ($P=100$ kN), 作用点位于桥梁跨中位置。在开始分析前, 首先将荷载 P 根据式(4)进行转化成一组半波正弦分布荷载, 再作用在数值模型中进行分析, 如图 10 所示。

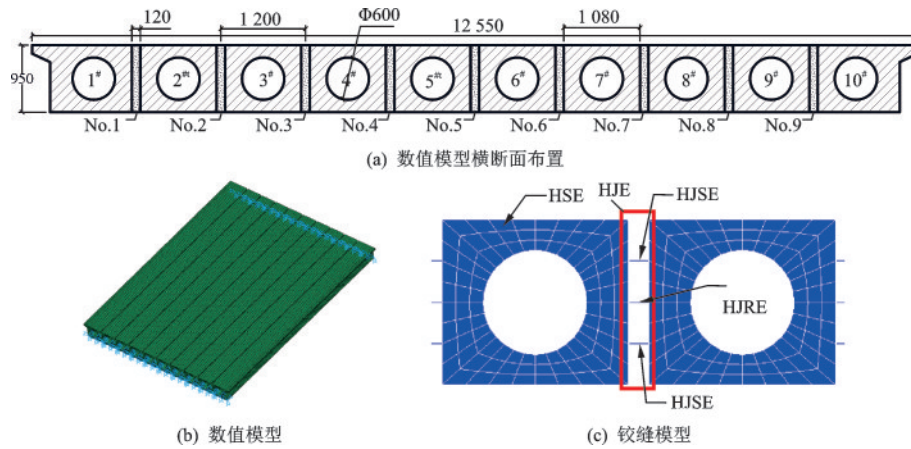


图9 空心板桥数值模型

Fig.9 Numerical model of the hollow slab bridge

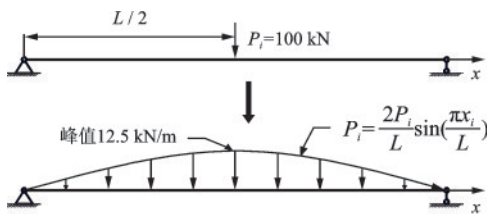


图10 集中荷载转化图

Fig.10 Concentrated load conversion diagram

荷载工况分为无损工况和损伤工况,见表1。

表1 荷载工况
Table 1 Load cases

无损工况		损伤工况			
工况编号	荷载位置	工况编号	荷载位置	损伤位置	损伤程度
一	2 [#]	一	2 [#]	No.1	50%
二	3 [#]	二	3 [#]	No.1	50%
三	4 [#]	三	4 [#]	No.1	50%
/	/	四	3 [#]	No.2	50%
/	/	五	2 [#]	No.1	25%

注:表中荷载位置用荷载作用的空心板编号表示,损伤位置用发生损伤的铰缝编号表示

4.3 结果分析

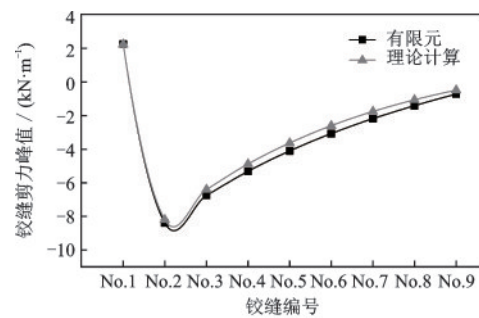
通过有限元数值计算结果和上述铰缝损伤度计算方法的计算结果进行对比分析,来验证计算方法的正确性,分析结果如下:

根据上述理论计算的铰缝剪力与数值模拟结果最为接近,如图11(a)所示。铰缝剪力最大误差出现在有损工况一,位置为No.6铰缝,差值为0.475 kN/m。

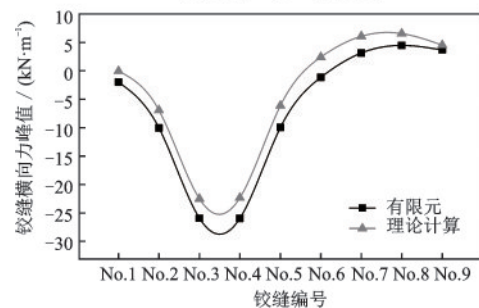
铰缝横向力理论计算值与数值模拟值较好吻合,如图11(b)所示。最大误差出现在损伤工况三,

位置为No.5铰缝处为3.832 kN/m。

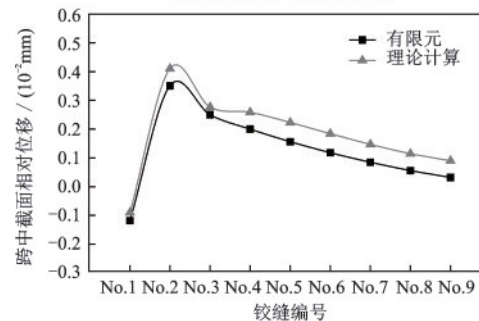
同样对于跨中截面,空心板铰缝处相对位移计算结果表明,最大误差在损伤工况一,位置为No.5铰缝,相差为 0.067×10^{-2} mm。如图11(c)所示。



(a) 损伤工况一铰缝剪力



(b) 损伤工况三铰缝横向力



(c) 损伤工况一相邻空心板相对位移

图11 分析结果对比

Fig.11 Comparison of analysis results

计算四个损伤工况的铰缝损伤度 D 。这里列出损伤工况一、四和五的结果,如图12所示。

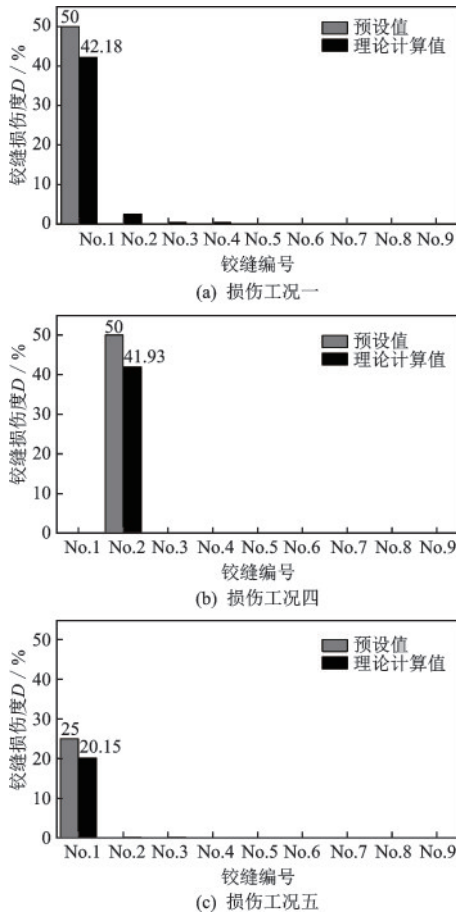


图12 损伤度 D 计算结果

Fig.12 Calculation results of the damage degree D

通过图12可以看出,据本文的铰缝损伤度计算方法可以实现铰缝损伤的准确定位,并得出损伤程度。

另外,对比损伤工况一、损伤工况二和损伤工况三的铰缝损伤度 D 的计算结果发现:当荷载越靠近损伤位置时,计算结果越接近损伤预设值,如图13所示。

由图13可知:损伤工况一计算的 D 为42.18%,误差为7.82%,而损伤工况二计算的 D 为33.66%,损伤工况三计算的 D 仅为25.77%。可见当荷载位置会影响损伤度 D 计算结果的精度,这可能是由于随荷载远离损伤铰缝时,在该处对应产生的内力逐渐减小,使 D 的敏感性降低。

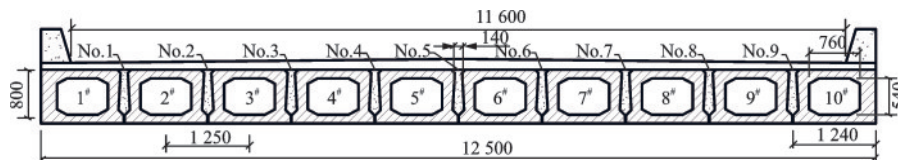


图15 试验桥梁横断面布置

Fig.15 Layout of test bridge cross section

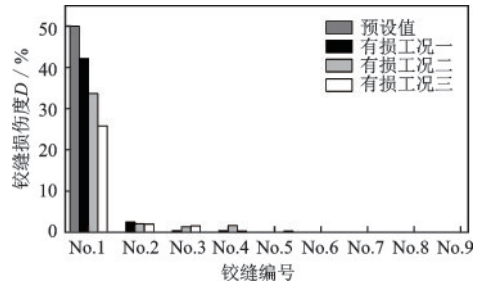


图13 加载位置对铰缝损伤度 D 计算的影响

Fig.13 Effect of loading position on calculation of the damage degree D at the hinge joint

综上所述,本文所提出的铰缝损伤度计算方法能够很好的识别出空心板桥铰缝损伤的位置,同时能够对铰缝的损伤程度进行量化描述。但是损伤程度的计算精度与加载位置到损伤铰缝的距离成反比,因此建议在施加荷载是应尽量靠近可能发生损伤的铰缝。

5 桥梁试验分析

5.1 桥梁概况

试验桥梁为单跨简支空心板桥。桥梁跨径为16 m,桥宽12.5 m。桥面铺装为沥青混凝土整体现浇层,两侧设混凝土防撞栏。桥梁实景,如图14所示。



图14 试验桥梁实景

Fig.14 Actual situation of the test bridge

试验桥梁由10片空心板通过9条铰缝连接而成。自南至北,空心板编号依次为1[#]、2[#]、...、10[#];铰缝编号依次为No.1、No.2、...、No.9。桥梁横断面,如图15所示。

5.2 荷载工况

在现场对空心板桥进行了桥梁静载试验,加载车辆为双轴卡车,如图 16 所示。

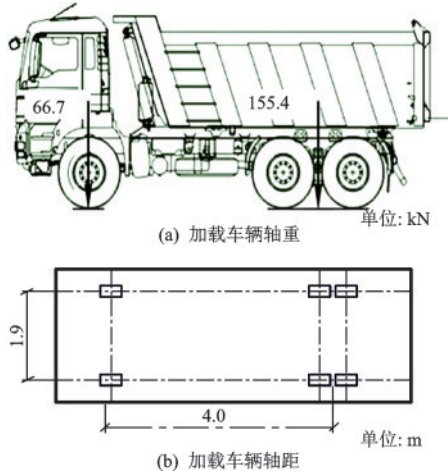


图 16 加载车辆尺寸

Fig.16 Loading vehicle dimensions

为获得荷载作用下的各空心板中心竖向挠度。据桥梁最不利荷载位置进行布载和数据采集。本试验在桥梁跨中段设置竖向位移测点,如图 17 所示。

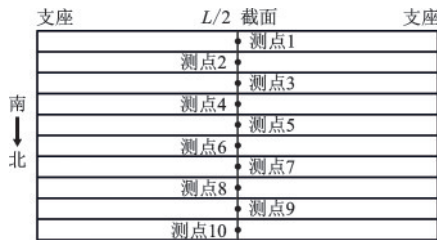


图 17 竖向位移测点布置与编号

Fig.17 Layout and numbering of vertical displacement measurement points

此外,试验过程中设置了两种荷载工况,如图 18 所示。荷载工况中均将加载车辆的较重轴布置在桥跨中截面,具体如下:

- (1)荷载工况一:加载车辆位于中心车道;
- (2)荷载工况二:加载车辆位于北侧车道。

5.3 试验结果

据现场调查发现 No.4 铰缝存在铰缝混凝土脱落现象,另外 No.5 铰缝发生铰缝开裂,如图 19 所示。

为了便于对比,本试验借助 Midas/Civil 软件,通过梁格法建立无损桥梁数值模型,如图 20 所示。

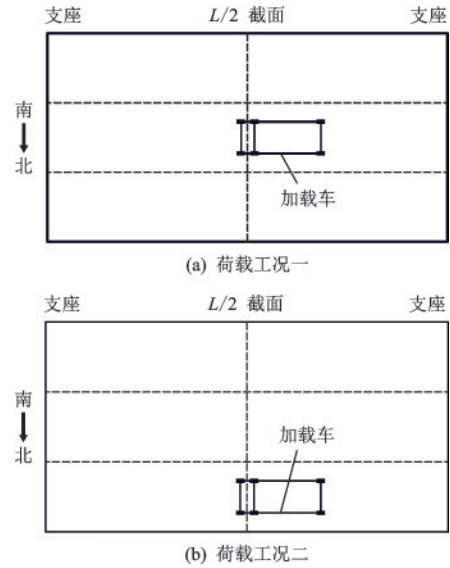


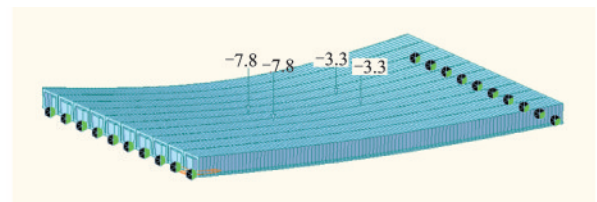
图 18 荷载工况布载方式

Fig.18 Loading method under load cases

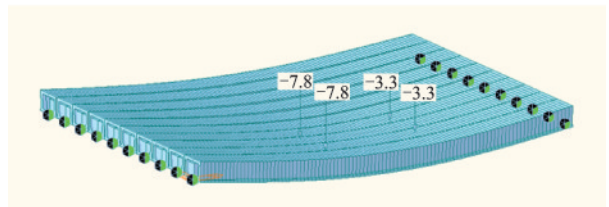


图 19 铰缝实际状态

Fig.19 Actual state of hinge joint



(a) 荷载工况一



(b) 荷载工况二

图 20 试验桥梁无损数值模型

Fig.20 Non-destructive numerical model of the test bridge

通过整理得到的空心板中心竖向位移的理论值和试验的实测值,见表 2。

5.4 铰缝损伤评估

根据第 3 节的铰缝损伤度 D 计算方法,分别计算铰缝伤程度 D 。结果见表 3。

表 2 空心板竖向位移理论值和实测值

Table 2 Theoretical and measured values of vertical displacement at the hollow slab

空心板编号	荷载工况一		荷载工况二	
	理论值	实测值	理论值	实测值
1#	0.649	0.474	0.293	0.205
2#	0.672	0.474	0.348	0.230
3#	0.700	0.493	0.413	0.243
4#	0.724	0.500	0.490	0.290
5#	0.717	0.160	0.582	0.270
6#	0.685	0.540	0.685	0.480
7#	0.627	0.500	0.794	0.530
8#	0.569	0.461	0.881	0.627
9#	0.518	0.352	0.954	0.595
10#	0.473	0.378	1.009	0.685

表 3 损伤度 D 计算结果

Table 3 Calculation results of damage degree D

铰缝编号	荷载工况一	荷载工况二
No.1	0	0
No.2	0	0
No.3	0	0
No.4	0.99	1
No.5	1	0.71
No.6	0	0
No.7	0	0.64
No.8	0.64	1
No.9	0	0.13

根据表 3 的铰缝损伤度 D 计算结果,取其平均值对铰缝进行综合评价。如图 21 所示。

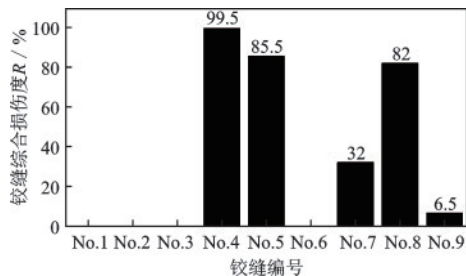


图 21 铰缝工作性能评价结果

Fig.21 Evaluation results of working performance at the hinge joint

根据图 21 的铰缝损伤度的计算结果,可以清楚的看到:No.4 铰缝几乎完全失效, No.5 和 No.8 铰缝存在较大损伤,对于这些铰缝建议进行维修或重做;另外, No.7 铰缝存在较小损伤,建议进行加固处理。

6 结 论

通过对铰缝的受力和变形的简化,建立了基于

弹簧铰连杆体系的空心板桥结构计算模型。基于该模型提出了一种基于铰缝损伤度的铰缝损伤识别方法。并通过数值模拟分析和桥梁试验分析对该方法的正确性和实用性进行了验证分析。结论如下:

(1) 本文的铰缝损伤识别方法在计算过程中同时考虑了铰缝传递剪力和横向力的影响,这是对原有铰接板理论的一次新的尝试和改进;

(2) 通过模拟分析和实桥试验分析,表明该损伤识别方法能够识别铰缝损伤的位置和损伤程度,而且铰缝内力的理论计算值与数值模拟分析结果相符合,这些说明了该方法的准确性和实用性;

(3) 另外,数值模拟分析显示铰缝损伤度的计算值准确度与加载位置有关。当荷载作用位置靠近受损铰缝时,铰缝损伤度的计算值越接近预设值。因此建议检测时,布载方式应尽量靠近可能损伤的铰缝。

参考文献:

- [1] 陈悦驰, 吴庆雄, 陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式有限元分析[J]. 工程力学, 2014, 31(增1): 51-58.
Chen Y C, Wu Q X, Chen B C. Failure mode of hinged joint in assembly voided slab bridge by finite element analysis [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(Sup1): 51-58. (in Chinese)
- [2] Hussein H H, Sargand S M, Khoury I, et al. Environment-induced behavior of transverse tie bars in adjacent prestressed box-girder bridges with partial depth shear keys[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(5): 1-13.
- [3] 邹毅松, 袁波波, 王银辉, 等. 基于瞬态动力分析的装配式板桥铰缝损伤识别[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(1): 1-3, 43.
Zou Y S, Yuan B B, Wang Y H, et al. Damage identification of hinged joints of prefabricated slab bridges based on transient dynamics analysis [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(1): 1-3, 43. (in Chinese)
- [4] 宋宇锋, 孙勇, 杨立坡. 空心装配式空心板桥铰缝受力特性与破坏模式的试验与理论研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 159-165.
Song Y F, Sun Y, Yang L P. Experimental and Theoretical research on the mechanical characteristics and failure mode of the joint of hollow slab hollow slab

- bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2): 159-165. (in Chinese)
- [5] Liu H, He X, Jiao Y. Damage identification algorithm of hinged joints for simply supported slab bridges based on modified hinge plate method and artificial bee colony algorithms[J]. Algorithms, 2018, 11(12): 198-212.
- [6] 黄民水, 朱宏平. 空心空心板桥“单板受力”病害机理及其加固处治研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008(2): 118-121.
Huang M S, Zhu H P. Study on mechanism and reinforcement processing of "single slab bearing" disease of hollow core slab beam bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008(2): 118-121. (in Chinese)
- [7] 王渠, 吴庆雄, 陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(增1): 115-120.
Wang Q, Wu Q X, Chen B C. Experimental study on failure mode of hinged joint in assembly voided slab bridge[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(Sup1): 115-120. (in Chinese)
- [8] Huckelvrige A A, El-esnawi H, Moses F. Shear key performance in multibeam box girder bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(4): 271-285.
- [9] 李国豪, 石洞. 公路桥梁荷载横向分布计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987: 87-95.
Li G H, Shi D. Calculation of lateral distribution of highway bridge loads[M]. Beijing: People's Communications Press, 1987: 87-95. (in Chinese)
- [10] 李宏江, 赵尚传, 李万恒, 等. 既有装配式梁桥横向连接构造评价技术进展[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 124-128.
Li H J, Zhao S C, Li W H, et al. Progress in evaluation technology of transverse connection structure of existing assembled beam bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(2): 124-128. (in Chinese)
- [11] Yi H B, Li C X, Dai L. Experimental study on the shear performance of shallow hinge joints for prefabricated hollow slab bridges[J]. Advances in Civil Engineering, 2018(2): 1-8.
- [12] 刘晓春, 卫军, 李沛, 等. 一种基于相对位移的铰缝传力性能评估方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3377-3383.
Liu X C, Wei J, Li P, et al. Load-transmitting performance evaluation method for hinge joint based on relative displacement[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3377-3383. (in Chinese)
- [13] 孙增寿, 张耀, 王希东. 基于运营环境和提升小波变换的桥梁损伤检测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 60-66.
Sun Z S, Zhang Y, Wang X D. Research on bridge damage detection based on operational environment and lifting wavelet transform[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 60-66. (in Chinese)
- [14] 周宇, 狄生奎, 王立宪, 等. 基于柔度指标的系杆拱桥损伤识别与寿命预测[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 1033-1043.
Zhou Y, Di S K, Wang L X, et al. Damage detection and life prediction of tied arch bridge based on flexibility-curvature-difference-rate[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 1033-1043. (in Chinese)
- [15] Wen X, Lei W, Dan D, et al. Study on a measurement index of transverse collaborative working performance of prefabricated girder bridges[J]. Advances in Structural Engineering 2017, 20(12): 1879-1890.
- [16] 吴庆雄, 黄宛昆, 陈宝春, 等. 结合面底部设开孔钢板的铰接空心板力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 45-54.
Wu Q X, Huang W K, Chen B C, et al. Mechanical property of hinged voided slab with perforated steel plates at bottom of junction surface[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 45-54. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)