

装配式T梁桥主梁损伤后的横向力学性能

李春良¹, 侯磊¹, 赵珞珞¹, 刘翔², 张洪军³, 张云龙¹

(1. 吉林建筑大学 交通科学与工程学院, 长春 130118; 2. 中建七局第一建筑有限公司, 北京 100162; 3. 中庆建设有限责任公司, 长春 130062)

摘要:为研究主梁损伤对装配式T梁桥横向分布系数的影响,基于刚接梁法建立了主梁损伤后的桥梁横向力学模型,分析了主梁损伤后横向分布系数的改变程度。结果表明:主梁损伤程度越大、损伤梁数量越多,损伤梁的横向分布系数降低越大,而周围完好梁的横向分布系数增大越大,且增大率与距损伤梁的横向距离成反比;但主梁刚接时,损伤梁的横向卸载能力及其影响区域均比较接时的大。如未及时加固损伤梁,则距损伤梁越近的完好梁越先破坏。

关键词:桥梁工程;装配式T梁;主梁损伤;横向分布系数;刚接梁

中图分类号:U443.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)10-2869-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211370

Transverse mechanical properties of assembled T beam bridge after main girder damage

LI Chun-liang¹, HOU Lei¹, ZHAO Luo-luo¹, LIU Xiang², ZHANG Hong-jun³, ZHANG Yun-long¹

(1. School of Communication Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. The First Construction Co., Ltd. of CSCEC 7th Division, Beijing 100162, China; 3. Zhongqing Construction Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: In order to study the variation law of the transverse distribution coefficient of the assembled T beam bridge after any girder damage, based on the rigid-jointed beam method, a transverse mechanical model is established, which is suitable for the different positions and the numbers of girder damage. And the change degree of the transverse distribution coefficient is analyzed with the model. The results show that a transverse unloading occurs after the girder damage. And the larger the girder damage degree is or the more the damaged girders are, the larger the reduction rate of the transverse distribution coefficient of the damaged girder is, while the larger the increasing rate of the transverse distribution coefficient of the intact girder is. And the increasing rate is inversely proportional to the cross range to the damaged girder. In addition, when it is rigid connection between the girders, the transverse unloading capacity and the influence area of the damaged girder are larger than hinged connection between the girders. If the damaged girder is not reinforced in time, the intact girder will be damaged in the order of the closer to the damaged one, the earlier the damage occurs.

收稿日期:2021-12-15.

基金项目:吉林省教育厅科技研究项目(JJKH20220292KJ);吉林省科技发展计划项目(20190303138SF).

作者简介:李春良(1978-),男,教授,博士.研究方向:桥隧结构力学行为.E-mail:lichli3300@163.com

通信作者:张洪军(1978-),男,高级工程师.研究方向:桥梁结构施工控制.E-mail:550673296@qq.com

Key words: bridge engineering; assembled T beam; main girder damage; transverse distribution coefficients; rigid-connected beam

0 引言

随着使用时间的增加,装配式T梁桥中的部分主梁会发生不同程度的损伤,损伤的主梁会改变桥梁最初设计时的横向受力状态。对于装配式梁桥荷载横向受力的计算,美国国家公路与运输协会早在1994年发布的规范中(AASHTO)提出了荷载横向分布系数的计算公式,该公式考虑了主梁类型和间距的影响^[1,2];此后在发布的新版规范中提出了考虑桥梁跨度、桥面板厚度、主梁间距及纵向刚度等因素对横向分布系数影响的计算公式^[3]。日本的设计标准按照窄桥与宽桥,把桥梁荷载横向分布系数计算方法分为偏压修正法与G-M法^[4-7]。我国规范也提出了荷载横向分布系数与车道数量的关系。但以上公式都是基于各主梁刚度与间距均相等的条件下建立的。如果营运中的桥梁因主梁损伤或换梁等原因,导致梁的刚度和间距发生变化,若还采用以上方法计算桥梁的横向受力问题,将产生较大误差^[8],还会影响后期桥梁维护措施的选择。

目前国内外学者对这方面展开了一些研究。Eom^[9]通过桥梁荷载试验指出了AASHTO规范计算方法会低估实际桥梁的荷载横向分布系数。Fausett^[10]认为损伤后的桥梁横向分布系数与传统理论计算结果存在较大的误差,并用桥梁挠度和应变的监测数据创建和校准了有限元模型,获得实际的荷载横向分布系数。Zhang^[11]则提出了一套简化方法解决了AASHTO规范中对桥梁参数适用范围的限制条件。

国内学者邬晓光^[12,13]等认为损伤后主梁的挠度由梁完好时的挠度和梁损伤后的附加挠度组成,并以此为前提研究了主梁损伤后桥梁的横向受力问题。后续又研究了旧桥拼宽T梁的桥荷载横向分布系数计算方法,指出采用传统方法计算的拼宽桥梁荷载横向分布系数是不安全的。彭旺虎、李院军等^[14,15]通过对实桥检测数据分析,引入了主梁损伤系数、竖向基频、线刚度和宽跨比等因素,研究了主梁损伤后的桥梁荷载横向分布问题,随后又提出了一个同时考虑板和铰缝损伤的荷载横向分布系数模型。钱若霖等^[16]则以空心板桥

为例,引入了主梁刚度损伤系数和铰缝传力削减系数,提出了损伤后的空心板桥的横向分布系数计算公式。李春良^[17]、刘晓春^[18]、魏保立^[19]等则建立了空心板桥铰缝及板受损后的模型,揭示了铰缝及板损伤后对桥梁整体横向受力的影响程度。

以上研究中,有的研究成果仍是采用传统方法研究损伤梁的荷载横向分布系数问题;有的研究成果介绍了装配式T梁损伤后的横向分布系数计算方法,而没有指出带病工作的主梁会对整个桥跨结构的荷载横向受力状态的影响程度;还有部分研究成果是针对空心板桥铰缝及板损伤研究的。

本文针对装配式T梁桥中部分主梁损伤后,桥梁所形成新的横向受力状态进行研究。建立能考虑部分主梁损伤后桥梁的横向受力模型,揭示整个桥跨结构横向受力状态的变化规律,准确计算出主梁损伤后的各梁的荷载横向分布系数,并对未来各主梁可能发生的破坏顺序预测,为日后的桥梁维修与加固提供借鉴。

1 主梁损伤后横向力学模型的建立

1.1 主梁损伤后各主梁间的变形关系

为研究装配式T梁桥部分主梁损伤后各梁间相互的受力关系,将各主梁在拼接处断开,并施加竖向剪力 g_i 与弯矩 M_i ,如图1所示。现取第 i 、 $(i+1)$ 梁为研究对象,对其进行受力分析。

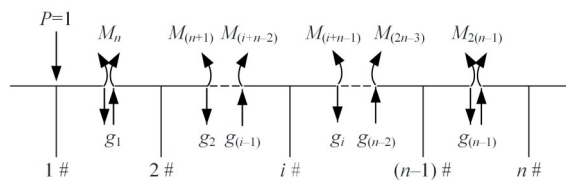


图1 主梁间受力简图

Fig. 1 Force diagram between beams

将图1中作用在拼接处的偏心剪力 g_i 移到梁中心线处,并在梁中心线处施加偏心扭矩 m_i 来等效偏心剪力 g_i 的作用效果,如图2所示。分析可知,中心剪力 $g_{i\#}$ 与 m_i 会对 i 梁产生竖向相对挠度,该相对挠度由三部分组成:分别为中心剪力 $g_{i\#}$ 对 i 、 $(i+1)$ 梁体中心产生的竖向挠度

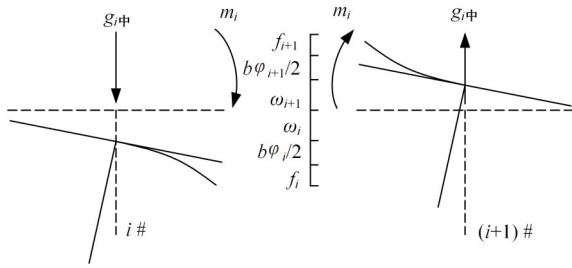


图 2 剪力作用下的梁变形

Fig. 2 Deformation of beams under shear force

ω_i 、 ω_{i+1} ; 偏心扭矩 m_i 对 $i\#$ 、 $(i+1)\#$ 梁整体扭转后产生的相对挠度 $\frac{b\varphi_i}{2}$ 、 $\frac{b\varphi_{i+1}}{2}$; 偏心扭矩 m_i 对 $i\#$ 、 $(i+1)\#$ 梁翼板边缘产生的挠度 f_i 、 f_{i+1} 。

另外,在图 1 中的在两梁翼板拼接处还存在弯矩 M_i 、 M_{i+1} 会对梁体产生相对转角,该相对转角由两部分组成:分别为弯矩 M_i 对 $i\#$ 、 $(i+1)\#$ 梁体中心产生的扭转角 φ'_i 、 φ'_{i+1} ; 弯矩 M_i 对 $i\#$ 、 $(i+1)\#$ 梁翼缘板端产生的挠曲角 τ_i 、 τ_{i+1} ,如图 3 所示。

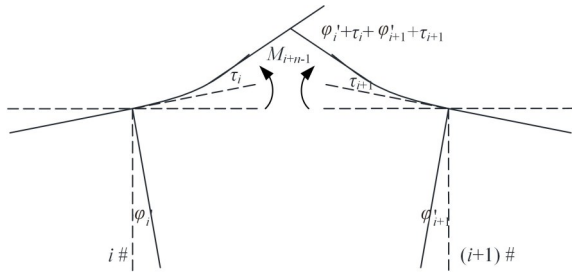


图 3 弯矩作用下梁的变形

Fig. 3 Deformation of beams under moment

1.2 ω_i 、 φ_i 、 φ'_i 、 f_i 和 τ_i 的表达式

通过对以上各变形关系的推导,求得图 2、图 3 中 $i\#$ 、 $(i+1)\#$ 梁翼板拼接处的相对挠度和相对转角表达式。

(1) 中心剪力 $g_{i\#}$ 对梁整体产生的竖向挠度 ω_i 通过简支梁的挠曲微分方程计算得:

$$x = \frac{l}{2} \text{ 时, } \omega_i\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{pl^4}{\pi^4 E_i I_i} \quad (1)$$

(2) 偏心扭矩 m_i 对梁整体产生的扭转角度 φ_i 通过简支梁的扭转微分方程计算得:

$$x = \frac{l}{2} \text{ 时, } \varphi_i\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{pb_i l^2}{2\pi^2 G_i I_{Ti}} \quad (2)$$

(3) 偏心扭矩 m_i 对 T 梁翼板端部产生的挠度 f_i

$$f_i = \frac{d_{li}^3}{3E_i I_{li}} \quad (3)$$

(4) 弯矩 M_i 对梁整体产生的扭转角 φ'_i

$$\varphi'_i = \frac{2}{b_i} \varphi_i \quad (4)$$

(5) 弯矩 M_i 对 T 梁翼板端部产生的挠曲角 τ_i

$$\tau_i = \frac{d_{li}}{E_i I_{li}} \quad (5)$$

式中: l 为计算跨径; x 为计算截面位置; b_i 、 d_{li} 为 $i\#$ 梁梁宽和梁翼板悬出长度; E_i 、 G_i 分别为 $i\#$ 梁混凝土的弹性模量和剪切模量; I_i 、 I_{Ti} 分别为 $i\#$ 梁抗弯惯性矩和抗扭惯性矩; I_{li} 为 $i\#$ 梁单位宽度翼板的抗弯惯性矩; p 为单位正弦荷载; ω_i 为中心剪力在 $i\#$ 梁跨中产生的竖向挠度; φ_i 为偏心扭矩 m_i 在 $i\#$ 梁跨中产生的扭转角; φ'_i 为弯矩 M_i 对梁体产生的扭转角; f_i 为偏心扭矩 m_i 在梁翼缘板端部挠度; τ_i 为弯矩 M_i 对梁翼缘板端部产生的挠曲角。

1.3 主梁损伤后各梁受力正则方程建立

当 $i\#$ 梁损伤后,主梁有效高度变为 h_i^* ,令其损伤率为 β_i ($\beta_i = 1 - h_i^*/h_i$),设 $\eta_i = I_i^*/I_i$ 为 $i\#$ 梁损伤前后的抗弯惯性矩之比, $\eta_{Ti} = I_{Ti}^*/I_{Ti}$ 为 $i\#$ 梁损伤前后的抗扭惯性矩之比。其中, I_i^* 、 I_{Ti}^* 分别为 $i\#$ 梁损伤后的抗弯惯性矩、抗扭惯性矩。

前文分析发现,主梁发生损伤,在荷载作用下相邻两片梁会产生相对位移和相对转角,此时能够建立主梁损伤后各梁受力正则方程:

$$\begin{bmatrix} \delta'_{1,1} & \cdots & \delta'_{1,(n-1)} & \delta'_{1,n} & \cdots & \delta'_{1,2(n-1)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta'_{(n-1),1} & \cdots & \delta'_{(n-1),(n-1)} & \delta'_{(n-1),n} & \cdots & \delta'_{(n-1),2(n-1)} \\ \delta'_{n,1} & \cdots & \delta'_{n,(n-1)} & \delta'_{n,n} & \cdots & \delta'_{n,2(n-1)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta'_{2(n-1),1} & \cdots & \delta'_{2(n-1),(n-1)} & \delta'_{2(n-1),n} & \cdots & \delta'_{2(n-1),2(n-1)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_{(n-1)} \\ \frac{2x'_n}{b} \\ \vdots \\ \frac{2x'_{2(n-1)}}{b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta'_{1,p} \\ \vdots \\ \delta'_{(n-1),p} \\ \delta'_{n,p} \\ \vdots \\ \delta'_{2(n-1),p} \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

将(6)式简化为:

$$[\delta'_{i,j}] \{x'_i\} + \{\delta'_{i,p}\} = 0 \quad (7)$$

i 或 $j = 1, 2, \dots, 2(n-1)$

式中: $\delta'_{i,j}$ 为主梁损伤后单位赘余力素峰值 $x_j = 1$ 在 $i\#$ 梁引起的相对变位(包括 $i=j$ 和 $i \neq j$ 的

情况); x'_i 为主梁损伤后 i 梁处的赘余力素的峰值; $\delta'_{i,p}$ 为主梁损伤后外荷载在 i 梁处的相对变位。

在求解式(6)中的 $\delta'_{i,j}$ 时, 为方便推导, 现规定在各主梁接缝任一侧的受力变化与赘余力素方向一致时取正, 反之取负。因此, 当外荷载作用在中梁和边梁时, 各主梁之间的受力方向会不同, 现分以下两种情况讨论 $\delta'_{i,j}$ 的表达式。

(1) $P=1$ 作用在 1# 或 n 梁时

当外荷载作用在 1# 梁和 n 梁时, 根据图 4 可得式(6)中矩阵中的各系数:

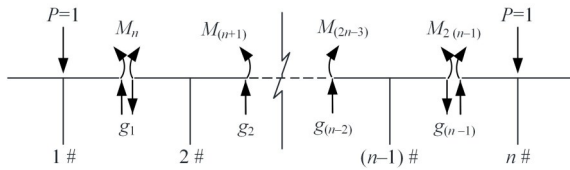


图 4 荷载作用在 1# 和 n 梁时各梁间受力图

Fig. 4 Force diagram between beams when load acts on 1# or n beam

$$\begin{cases} \delta'_{i,i} = \frac{\omega_i}{\eta_i} + \frac{b\varphi_i}{2\eta_{Ti}} + f_i + \frac{\omega_{i+1}}{\eta_{i+1}} + \frac{b\varphi_{i+1}}{2\eta_{T(i+1)}} + f_{i+1} \\ \delta'_{(i+n-1),(i+n-1)} = \frac{\varphi'_i}{\eta_{Ti}} + \tau_i + \frac{\varphi'_{i+1}}{\eta_{T(i+1)}} + \tau_{i+1} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \delta'_{i,(i+n-1)} = \frac{b\varphi'_i}{2\eta_{Ti}} + \frac{b\varphi'_{i+1}}{2\eta_{T(i+1)}} + f_i + f_{i+1} \\ \delta'_{(i+n-1),i} = \frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} + \frac{\varphi_{i+1}}{\eta_{T(i+1)}} + \tau_i + \tau_{i+1} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \delta'_{i,i-1} = \delta'_{i-1,i} = -(\frac{\omega_i}{\eta_i} - \frac{b\varphi_i}{2\eta_{Ti}}) \\ \delta'_{i+n-2,i+n-1} = \delta'_{i+n-1,i+n-2} = -\frac{\varphi'_i}{\eta_{Ti}} \\ \delta'_{i,i+n-2} = \delta'_{i+n-2,i} = -\frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} \\ \delta'_{i-1,i+n-1} = \delta'_{i+n-1,i-1} = \frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} \end{cases} \quad (10)$$

其余位置处的 $\delta'_{i,j}$ 均为 0, 其中 $i=1, 2, \dots, n-1$ 。

(2) $P=1$ 作用在 s 梁($s \in [2, n-1]$) 时

当外荷载作用在 s 梁时, 根据图 5 可得式(6)中矩阵中的各系数:

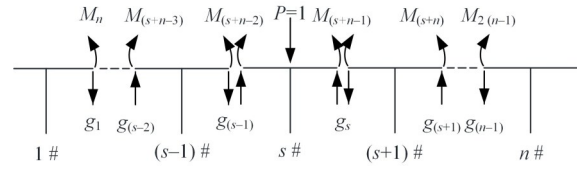


图 5 荷载作用在 s 梁时各梁间受力图

Fig. 5 Force diagram between beams when load acts on s beam

$$\begin{cases} \delta'_{i,i} = \frac{\omega_i}{\eta_i} + \frac{b\varphi_i}{2\eta_{Ti}} + f_i + \frac{\omega_{i+1}}{\eta_{i+1}} + \frac{b\varphi_{i+1}}{2\eta_{T(i+1)}} + f_{i+1} \\ \delta'_{(i+n-1),(i+n-1)} = \frac{\varphi'_i}{\eta_{Ti}} + \tau_i + \frac{\varphi'_{i+1}}{\eta_{T(i+1)}} + \tau_{i+1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \delta'_{i,(i+n-1)} = \frac{b\varphi'_i}{2\eta_{Ti}} + \frac{b\varphi'_{i+1}}{2\eta_{T(i+1)}} + f_i + f_{i+1} \\ \delta'_{(i+n-1),i} = \frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} + \frac{\varphi_{i+1}}{\eta_{T(i+1)}} + \tau_i + \tau_{i+1} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \delta'_{(i-1),i} = \delta'_{i,(i-1)} = (\frac{\omega_i}{\eta_i} - \frac{b\varphi_i}{2\eta_{Ti}}) \\ \delta'_{(i-1),(i+n-1)} = \delta'_{i,(i+n-2)} = -\frac{b\varphi'_i}{2\eta_{Ti}} \\ \delta'_{(i+n-2),i} = \delta'_{(i+n-1),(i-1)} = -\frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $s=i; i=2, 3, \dots, n-1$ 。

$$\delta'_{(i-1),i} = \delta'_{i,(i-1)} = -(\frac{\omega_i}{\eta_i} - \frac{b\varphi_i}{2\eta_{Ti}}) \quad (14)$$

式中: $s \neq i; i=2, 3, \dots, n-1$ 。

$$\begin{cases} \delta'_{(i-1),(i+n-1)} = -\delta'_{i,(i+n-2)} = -\frac{b\varphi'_i}{2\eta_{Ti}} \\ \delta'_{(i+n-2),i} = -\delta'_{(i+n-1),(i-1)} = \frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $s > i; i=2, 3, \dots, n-1$ 。

$$\begin{cases} \delta'_{(i-1),(i+n-1)} = -\delta'_{i,(i+n-2)} = \frac{b\varphi'_i}{2\eta_{Ti}} \\ \delta'_{(i+n-2),i} = -\delta'_{(i+n-1),(i-1)} = -\frac{\varphi_i}{\eta_{Ti}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $s < i; i=2, 3, \dots, n-1$ 。

$$\delta'_{(i+n-2),(i+n-1)} = \delta'_{(i+n-1),(i+n-2)} = -\frac{\varphi'_i}{\eta_{Ti}} \quad (17)$$

式中: $i=2, 3, \dots, n-1$ 。其余位置处的 $\delta'_{i,j}$ 均为 0。

1.4 主梁损伤后相对变位矩阵

将以上各系数代入式(7), 可得两种情况下的

相对变位矩阵,为方便表达,设 $[\delta'_{i,j}] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$,

A 、 B 、 C 、 D 的形式如下所示:

(1) $P=1$ 作用在 1# 或 n 号边梁时

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ A_3 & \cdots & A_4 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_5 & \cdots & A_6 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & A_7 & A_8 \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)} \quad (18)$$

式中: $A_1 = \frac{\omega_1}{\eta_1} + \frac{\omega_2}{\eta_2} + \frac{b\varphi_1}{2\eta_{T1}} + \frac{b\varphi_2}{2\eta_{T2}} + f_1 + f_2$; $A_2 = \frac{b\varphi_2}{2\eta_{T2}} -$

$\frac{\omega_2}{\eta_2}$; $A_3 = \frac{b\varphi_2}{2\eta_{T2}} - \frac{\omega_2}{\eta_2}$; $A_4 = \frac{b\varphi_3}{2\eta_{T3}} - \frac{\omega_3}{\eta_3}$; $A_5 = \frac{b\varphi_{(n-2)}}{2\eta_{T(n-2)}} -$

$\frac{\omega_{(n-2)}}{\eta_{(n-2)}}$; $A_6 = \frac{b\varphi_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}} - \frac{\omega_{(n-1)}}{\eta_{(n-1)}}$; $A_7 = \frac{b\varphi_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}} - \frac{\omega_{(n-1)}}{\eta_{(n-1)}}$; $A_8 =$

$= \frac{\omega_{(n-1)}}{\eta_{(n-1)}} + \frac{\omega_n}{\eta_n} + \frac{b\varphi_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}} + \frac{b\varphi_n}{2\eta_{Tn}} + f_{(n-1)} + f_n$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ B_3 & B_4 & B_5 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & B_6 & B_7 & B_8 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & B_9 & B_{10} \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)} \quad (19)$$

式中: $B_1 = \frac{b\varphi'_1}{2\eta_{T1}} + \frac{b\varphi'_2}{\eta_{T2}} + f_1 + f_2$; $B_2 = \frac{b\varphi'_2}{2\eta_{T2}}$; $B_3 = -\frac{b\varphi'_2}{2\eta_{T2}}$;

$B_4 = \frac{b\varphi'_2}{\eta_{T2}} + \frac{b\varphi'_3}{2\eta_{T3}} + f_2 + f_3$; $B_5 = \frac{b\varphi'_3}{2\eta_{T3}}$; $B_6 = -\frac{b\varphi'_{(n-2)}}{2\eta_{T(n-2)}}$; $B_7 =$

$= \frac{b\varphi'_{(n-2)}}{2\eta_{T(n-2)}} + \frac{b\varphi'_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}} + f_{(n-2)} + f_{(n-1)}$; $B_8 = \frac{b\varphi'_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}}$; $B_9 =$

$= -\frac{b\varphi'_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}}$; $B_{10} = \frac{b\varphi'_{(n-1)}}{2\eta_{T(n-1)}} + \frac{b\varphi'_n}{2\eta_{Tn}} + f_{(n-1)} + f_n$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ C_3 & C_4 & C_5 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & C_9 & C_{10} \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)} \quad (20)$$

式中: $C_1 = \frac{\varphi_1}{\eta_{T1}} + \frac{\varphi_2}{\eta_{T2}} + \tau_1 + \tau_2$; $C_2 = -\frac{\varphi_2}{\eta_{T2}}$; $C_3 = \frac{\varphi_2}{\eta_{T2}}$;

$C_4 = \frac{\varphi_2}{\eta_{T2}} + \frac{\varphi_3}{\eta_{T3}} + \tau_2 + \tau_3$; $C_5 = -\frac{\varphi_3}{\eta_{T3}}$; $C_6 = -\frac{\varphi_{(n-2)}}{\eta_{T(n-2)}}$; $C_7 =$

$= \frac{\varphi_{(n-2)}}{\eta_{T(n-2)}} + \frac{\varphi_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}} + \tau_{(n-2)} + \tau_{(n-1)}$; $C_8 = -\frac{\varphi_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}}$; $C_9 =$

$= \frac{\varphi_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}}$; $C_{10} = \frac{\varphi_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}} + \frac{\varphi_n}{\eta_{Tn}} + \tau_{(n-1)} + \tau_n$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ D_3 & D_4 & D_5 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & D_6 & D_7 & D_8 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & D_9 & D_{10} \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)} \quad (21)$$

式中: $D_1 = \frac{\varphi'_1}{\eta_{T1}} + \frac{\varphi'_2}{\eta_{T2}} + \tau_1 + \tau_2$; $D_2 = -\frac{\varphi'_2}{\eta_{T2}}$; $D_3 = -\frac{\varphi'_2}{\eta_{T2}}$;

$D_4 = \frac{\varphi'_2}{\eta_{T2}} + \frac{\varphi'_3}{\eta_{T3}} + \tau_2 + \tau_3$; $D_5 = -\frac{\varphi'_3}{\eta_{T3}}$; $D_6 = -\frac{\varphi'_{(n-2)}}{\eta_{T(n-2)}}$;

$D_7 = \frac{\varphi'_{(n-2)}}{\eta_{T(n-2)}} + \frac{\varphi'_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}} + \tau_{(n-2)} + \tau_{(n-1)}$; $D_8 = -\frac{\varphi'_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}}$;

$D_9 = -\frac{\varphi'_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}}$; $D_{10} = \frac{\varphi'_{(n-1)}}{\eta_{T(n-1)}} + \frac{\varphi'_n}{\eta_{Tn}} + \tau_{(n-1)} + \tau_n$

(2) $P=1$ 作用在 s 号中梁时

同理,可得到 $P=1$ 作用在 s 号中梁时条件下的各系数矩阵 A 、 B 、 C 、 D 的表达式,此处不再详细阐述。

1.5 赘余力素矩阵与外荷载引起的相对变位矩阵

通过推导得出主梁损伤后, $P=1$ 作用在不同位置梁时,式(7)中的赘余力素矩阵与外荷载引起的相对变位矩阵如下。

(1) $P=1$ 作用在 1# 边梁时

$$\{x'_i\} = \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ g_{n-1} \\ M_n \\ \vdots \\ \vdots \\ M_{2(n-1)} \end{bmatrix}_{2(n-1)}, \{\delta'_{i,p}\} = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_1}{\eta_1} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{2(n-1)}$$

(2) $P=1$ 作用在 s 号中梁时

$$\{x'_i\} = \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ g_{(s-1)} \\ g_s \\ \vdots \\ g_{(n-1)} \\ M_n \\ \vdots \\ M_{2(n-1)} \end{bmatrix}_{2(n-1)}, \{\delta'_{i,p}\} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -\frac{\omega_{s-1}}{\eta_{s-1}} \\ -\frac{\omega_s}{\eta_s} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{2(n-1)}$$

(3) $P=1$ 作用在 n 号边梁时

$$\{x'_i\} = \begin{Bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_{n-1} \\ M_n \\ \vdots \\ M_{2(n-1)} \end{Bmatrix}_{2(n-1)}, \quad \{\delta'_{i,p}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -\frac{\omega_{(n-1)}}{\eta_{(n-1)}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_{2(n-1)}$$

根据以上推导可计算出主梁刚接时,主梁损伤后各梁的横向分布系数。如果在各主梁拼接断开处,仅施加竖向剪力,而不施加弯矩,此时通过调整以上公式中去掉拼接处与弯矩有关的系数,就能计算出主梁铰接时主梁损伤后各主梁的横向分布系数。

2 分析与讨论

2.1 算例验证

为验证模型的正确,以如图 6 中的装配式 T 梁桥^[20]为例,研究主梁刚接时梁损伤后的横向受力。

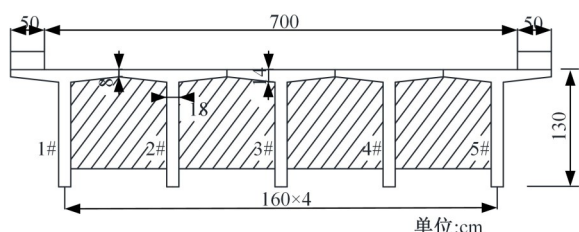


图 6 刚接梁横截面图

Fig. 6 Cross section of rigid-connected beam

现假定图 6 中的 1#、2#、3# 梁均损伤 20%，利用文中模型计算出损伤前后各梁的横向影响线，并与 ANSYS 结果和文献结果对比。

图 7、图 8、图 9 分别为 1#、2#、3# 梁损伤前后各梁的横向影响线图。观察发现,无论桥梁完好,还是发生损伤,本文的计算结果与 ANSYS 结果及文献结果间的最大计算误差均约为 4%，表明本文建立的模型可以准确计算桥梁损伤前后各主梁的横向影响线,可以用来分析任意主梁损伤前后桥梁横向受力性能。同时还发现,当 1#、2#、3# 梁分别损伤后,损伤梁自身的影响线走向发生了明显的改变,其中各损伤梁自身的影响线竖标值改变率分别达到了 23.1%、32.8%、70%。可见,主梁损伤将会明显影响桥梁整体的横向受力性能。

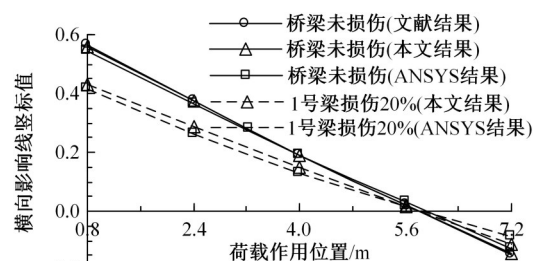


图 7 1#梁损伤前后的横向影响线

Fig. 7 Transverse influence lines of pre- and post- 1# beam damage

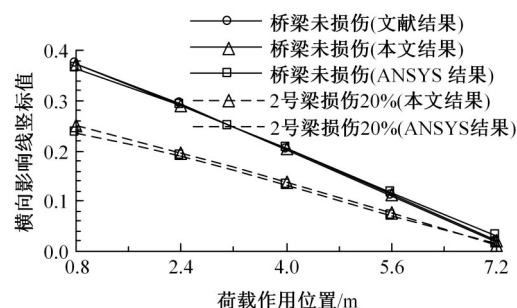


图 8 2#梁损伤前后的横向影响线

Fig. 8 Transverse influence lines of pre- and post-2# beam damage

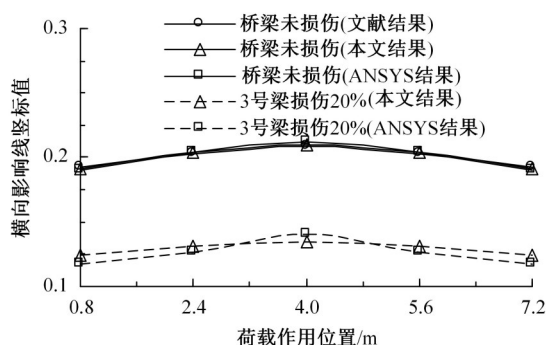


图 9 3#梁损伤前后的横向影响线

Fig. 9 Transverse influence lines of pre- and post-3# beam damage

2.2 主梁刚接时计算结果

(1) 主梁损伤对周围各梁横向影响线的影响

图 10、图 11 分别为 1#、3# 梁损伤前后周围各梁的横向影响线对比图。对比以上各图发现,图 11 中 3# 梁损伤后,3# 梁影响线竖标值降低最大,达到了 70%,而图 10 中 1# 梁损伤时,靠近 1# 梁最近的 2# 梁影响线竖标值增加最大,达到了 30%。并且,周围完好梁的影响线竖标值的增量,随着横向远离损伤梁距离的增大而逐渐降低。可见,距离损伤位置越近的主梁受到的影响越大,距离损伤位置越远的主梁受影响越小。

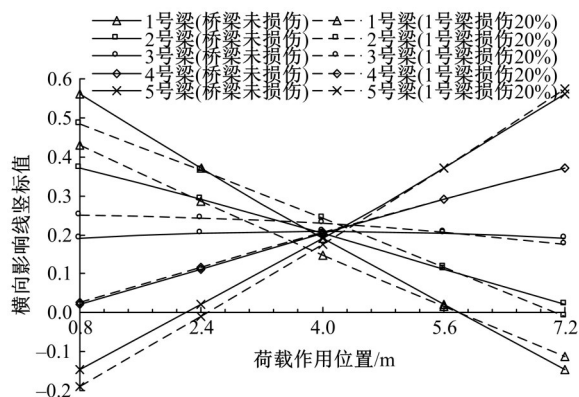


图 10 1#梁损伤前后各梁的横向影响线

Fig. 10 Transverse influence lines of beams of pre- and post-1# beam damage

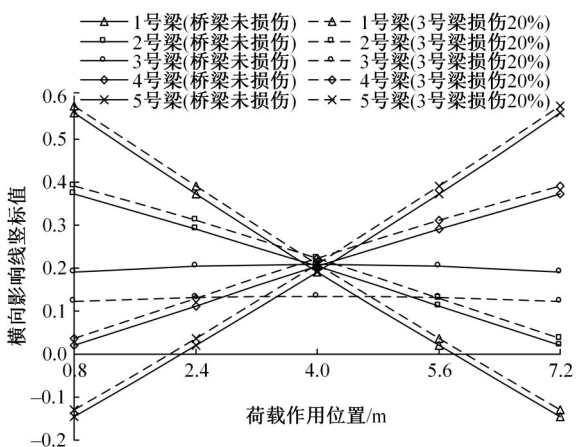


图 11 3#梁损伤前后各梁的横向影响线图

Fig. 11 Transverse influence lines of beams of pre- and post-3# beam damage

(2) 不同数量主梁损伤对周围梁横向分布系数的影响

利用文中模型计算了单梁、多梁损伤后,各主梁荷载横向分布系数改变情况计算结果如图 12、图 13、图 14 所示。

当单梁损伤时,观察图 12、图 13、图 14 中仅

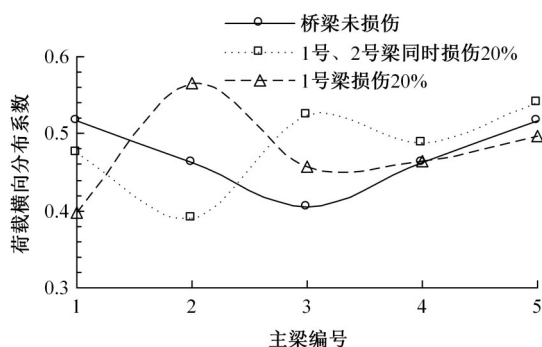


图 12 1#、2#梁损伤前后各梁横向分布系数

Fig. 12 Transverse distribution coefficients of beams of pre- and post-1# and 2# beams damage

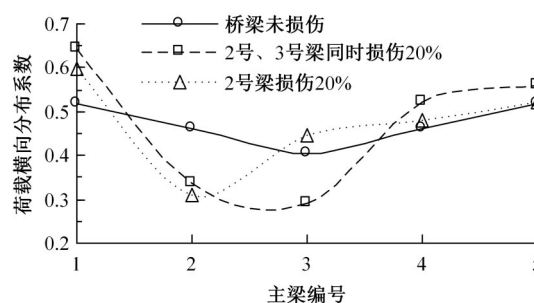


图 13 2#、3#梁损伤前后各梁横向分布系数

Fig. 13 Transverse distribution coefficients of beams of pre- and post-2# and 3# beams damage

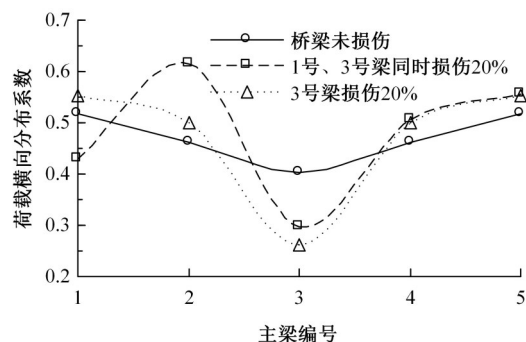


图 14 1#、3#梁损伤前后各梁横向分布系数

Fig. 14 Transverse distribution coefficients of beams of pre- and post-1# and 3# beams damage

1#梁、仅 2#梁、仅 3#梁损伤前后各梁的横向分布系数曲线发现,单主梁损伤后,损伤梁自身的横向分布系数会降低。如仅当 1#梁损伤时,1#梁的横向分布系数由 0.5172 降低到 0.397,降低了 23.24%;仅当 2#梁损伤时,2#梁的横向分布系数降低了 32.94%;仅当 3#梁损伤时,3#梁的横向分布系数降低了 35.44%,其中 3#梁的降低率最大。而周围完好梁的横向分布系数均会增大,增大率与距损伤梁的横向距离有关,距损伤梁横向越近,梁的横向分布系数增大率越大。如仅当 1#梁损伤后,周围未损伤的 2#、3#、4#梁的横向分布系数均增加,其中增加率最大的是距损伤梁最近的 2#梁,其横向分布系数由原来的 0.4622 增加到 0.5653,增加了 22.31%;仅当 2#梁损伤后,横向分布系数增加率最大的是距损伤梁最近的 1#梁,其横向分布系数增加了 15.64%;仅当 3#梁损伤后,其中增加率最大的梁为距损伤梁最近的 2#梁,其横向分布系数增加了 8.05%。同时发现,损伤梁的横向位置越靠近中间位置时,周围完好梁的横向分布系数增加率也较均衡。如中间的 3#梁损伤后,其周围各完好梁的横向分布系数增加率范围基本在 6%~8% 的范围浮动,而当靠近

边缘 1#梁、2#梁损伤后,其周围各梁的横向分布系数的增加率彼此相差较大。

当多梁损伤时,对比图 12、图 13、图 14 中多主梁同时损伤前后各梁的荷载横向分布系数曲线发现,多主梁同时损伤后,损伤梁的横向分布系数均降低,而周围完好梁的横向分布系数均增大,该规律仍与单梁损伤时的规律一致。但当多梁同时损伤时,未损伤梁横向分布系数的增大率明显要高于单片梁损伤时的情况,如:1#、2#梁同时损伤后,3#梁的横向分析系数增大率达到了 29.38%;2#、3#梁同时损伤后,1#梁的横向分析系数增大率达到了 24.67%;1#、3#梁同时损伤后,2#梁的横向分析系数增大率达到了 33.25%,表明多梁同时损伤对周围完好梁带来的危害比单梁损伤时的危害更大。

以上分析发现,主梁出现损伤后,损伤梁自身会出现横向卸载的现象,并且损伤梁数量越多,横向卸载现象越明显,并会导致周围完好梁横向分配到的荷载急剧增大,此时梁所承担到的荷载均会超过梁的原设计承载力。

(3)不同损伤程度对周围各梁横向影响线的影响

为分析主梁发生不同损伤程度后,各梁荷载横向分布系数的变化规律,现假定 1#、2#、3#梁分别损伤 5%、15%、20%、25%,各梁的荷载横向分布系数曲线如图 15、图 16、图 17 所示。

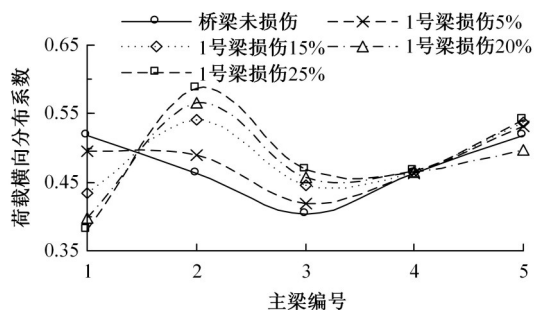


图 15 1#梁不同损伤程度下各梁的横向分布系数

Fig. 15 Transverse distribution coefficients of beams with 1# beam different damages

观察发现,随着主梁损伤程度的增大,损伤梁自身的横向分布系数变得越来越低,而周围完好梁的横向分布系数变的越来越大。说明主梁损伤程度越大,损伤的梁横向卸载现象越明显,给周围完好梁带来的承载负担越大,使周围主梁也更容易发生破坏,并且随着损伤梁损伤程度的增大,超过设计时采用的最大横向分布系数(0.5172)梁

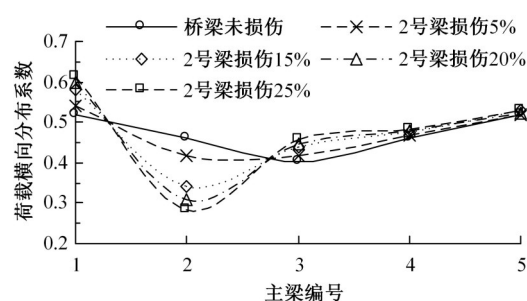


图 16 2#梁不同损伤程度下各梁的横向分布系数

Fig. 16 Transverse distribution coefficients of beams with 2# beam different damages

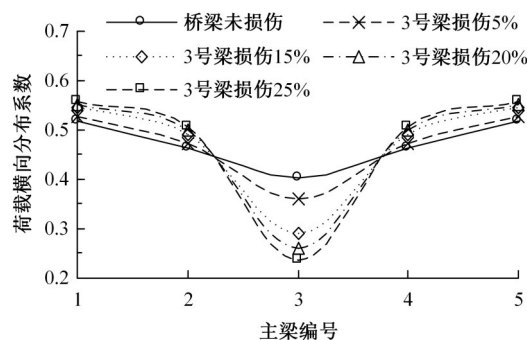


图 17 3#梁不同损伤程度下各梁的横向分布系数

Fig. 17 Transverse distribution coefficients of beams with 3# beam different damages

的数量也越来越多,并按照距损伤梁距离越近,越先破坏的顺序发生。

2.3 主梁铰接时的计算结果

前文指出,如在图 1 中各主梁拼接断开处仅施加竖向剪力,此时就能计算出主梁铰接时任意主梁损伤后各主梁的横向分布系数。

图 18 为各梁铰接时,1#、2#、3#梁分别损伤前后各梁的横向分布系数变化曲线图。观察发

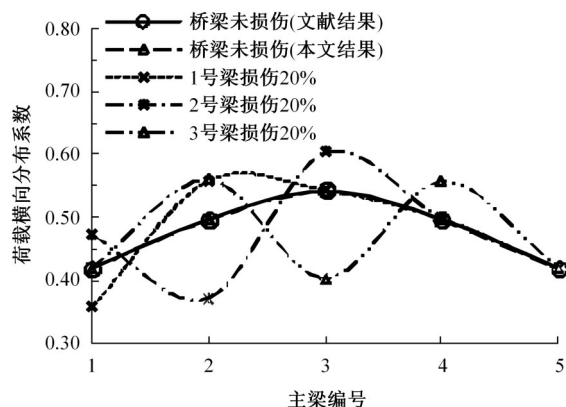


图 18 1#、2#、3#梁分别损伤前后各梁的横向分布系数

Fig. 18 Transverse distribution coefficients of beams of pre- and post-1#, 2# and 3# beams separate damage

现,主梁完好时,本文计算结果与文献内插法计算结果间的误差仅为 0.5%,说明文中方法对也适用装配铰接 T 梁桥的横向分布系数计算;同时与主梁刚接时对比,铰接时计算得到 3#梁的横向分布系数最大,而刚接时计算得到的 1#边梁、5#边梁的横向分布系数最大,这是因为刚性连接时桥梁的横向刚性明显强于铰接连接时的。

观察图 18 还发现,主梁铰接时,主梁发生损伤后损伤梁及周围完好梁的荷载横向分布系数变化规律仍与前文主梁刚接时得出的规律相同。所不同的是,主梁铰接时,损伤梁引起的各梁横向分布系数的变化区域只覆盖了损伤梁自身及与其左右两侧最近的梁,而其他较远处梁的横向分布系数没改变。但通过前文主梁刚接时的各梁荷载横向系数变化曲线图发现,主梁损伤后引起的各梁横向分布系数的变化区域几乎覆盖了所有梁。主要是因为,梁铰接时铰接处的刚性差,其横向整体传力性能弱于刚接连接,导致损伤梁的横向卸载能力及其横向影响区域均小于刚性连接梁的连接方式。

3 结 论

(1)主梁损伤后损伤梁的横向影响线向下发生偏移,周围完好梁的横向影响线向上发生偏移,桥梁原始的横向受力状态被改变。

(2)主梁损伤程度越大、损伤数量越多,损伤梁的横向分布系数降低越大,而周围完好梁的横向分布系数增大越大,其增大率与距损伤梁的横向距离成反比。但主梁刚接时,损伤梁的横向卸载能力及其产生的横向影响区域均要比主梁铰接时的大。

(3)主梁刚接时,越靠边的梁发生损伤,对桥梁横向受力的改变程度及所带来的隐患越大;而主梁铰接时,越靠左、右第三根梁处的梁发生损伤,对桥梁横向受力的改变程度及所带来的隐患越大。

(4)如未及时对损伤主梁进行加固,周围完好梁将按照横向距损伤梁越近越先破坏的顺序破坏。利用本文方法能准确计算出装配式梁桥主梁损伤后的横向分布系数,完成桥梁加固设计工作。

参考文献:

[1] Zaher Yousif, Riyadh Hindi. AASHTO-LRFD live

load distribution for beam-and-slab bridges: limitations and applicability[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6):765-773.

[2] Song Shin-tai, Chai Y H, Hida Susan E. Live-load distribution factors for concrete box-girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(5):273-280.

[3] Barr Paul J, Eberhard Marc O, Stanton John F. Live-load distribution factors in prestressed concrete girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(5):298-306.

[4] Mabsout Mounir E, Tarhini Kassim M, Frederick Gerald R, et al. Finite element analysis of steel girder highway bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 1997, 2(3): 83-87.

[5] Kim Woo Seok, Laman Jeffrey A, Linzell Daniel G. Live load radial moment distribution for horizontally curved bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 727-736.

[6] Khaloo Ali R, Mirzabozorg H. Load distribution factors in simply supported skew bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(4): 241-244.

[7] EN 1992-1-1. Eurocode 2: design for concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings[S].

[8] 王渠,吴庆雄,陈康明,等. 拼宽空心板桥荷载横向分布计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7):57-65.

Wang Qu, Wu Qing-xiong, Chen Kang-ming, et al. Calculation method of load transverse distribution for widening hollow slab bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 57-65.

[9] Eom J. Verification of lateral live load distribution factors for continuous steel girder bridges based on diagnostic testing results[J]. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2009, 13(4):180-187.

[10] Fausett Robert W. Live-load test and finite-element model analysis of an integral abutment concrete girder Bridge[D]. Logan: Utah State University, 2013.

[11] Zhang Shu-hai. Simplified live load distribution factor equations for tennessee highway bridge design[D]. Cookeville: Tennessee Technological University, 2012.

[12] 郭晓光,钱若霖,苏佩. 考虑刚度损伤的装配式 T 梁桥横向分布计算[J]. 公路交通科技, 2018, 35(6): 61-66.

Wu Xiao-guang, Qian Ruo-lin, Su Pei. Calculation of transverse distribution of assembled T beam bridge considering stiffness damage[J]. Journal of Highway

- and Transportation Research and Development, 2018, 35(6): 61-66.
- [13] 邬晓光, 黄成, 李院军, 等. 考虑旧桥损伤的拼宽 T 梁桥荷载横向分布计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2233-2239.
- Wu Xiao-guang, Huang-Cheng, Li Yuan-jun, et al. Calculation of load transverse distribution of widening T-beam bridge considering old bridge damage[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2233-2239.
- [14] 彭旺虎, 李院军, 刘嘉欣. 基于静力模型修正的装配式 T 梁桥荷载横向分布计算[J]. 公路交通科技, 2021, 38(4): 45-54.
- Peng Wang-hu, Li Yuan-jun, Liu Jia-xin. Calculation of transverse load distribution of prefabricated T beam bridge based on static model updating[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(4): 45-54.
- [15] 李院军, 邬晓光, 黄成, 等. 考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1459-1465.
- Li Yuan-jun, Wu Xiao-guang, Huang Cheng, et al. Calculation of transverse load distribution coefficient of assembled girder bridge considering main girder damage[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1459-1465.
- [16] 钱若霖, 苏佩, 杨谦. 基于损伤分析的空心板桥荷载横向分布系数研究[J]. 公路与汽运, 2021, 202(1): 118-120, 125.
- Qian Ruo-lin, Su Pei, Yang Qian. Study on the transverse distribution coefficient of hollow slab bridge load based on damage analysis[J]. Highways & Automotive Applications, 2021, 202(1): 118-120, 125.
- [17] 李春良, 林志豪, 赵珞珞. 铰缝及板损伤后对空心板桥横向受力的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(2): 611-619.
- Li Chun-liang, Lin Zhi-hao, Zhao Luo-luo. Effect of damaged hinge joint and damaged slab on transverse force of hollow slab bridge[J]. Journal of University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 611-619.
- [18] 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 Xiao-chun, Wei Jun, Li Pei, 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.
- [19] 魏保立, 邓苗毅. 损伤桥梁的荷载横向分布计算方法研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2015, 34(1): 102-108.
- Wei Bao-li, Deng Miao-yi. Computational method analysis for transverse load distribution of damage bridge[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(1): 102-108.
- [20] 李国豪, 石洞. 公路桥梁荷载横向分布系数[M]. 北京:人民交通出版社, 1984.