

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022041824021997

文章编号: 1674-599X(2024)01-0090-09

引用格式: 肖铎润, 宁晓骏. 铰缝损伤及铺装层对空心板桥横向刚度的影响[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 90-98.

Citation: XIAO Huarun, NING Xiaojun. Effect of paving layer on transverse stiffness of hollow slab bridge after joint damage[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 90-98.

铰缝损伤及铺装层对空心板桥横向刚度的影响

肖铎润, 宁晓骏

(昆明理工大学 建筑与工程学院, 云南 昆明 650000)

摘 要: 铰缝损伤是空心板桥梁较易出现的病害。为研究铺装层在铰缝损伤后对空心板桥梁横向刚度的影响, 根据铰接板法理论, 采用梁格法和Midas civil软件建立其有限元模型, 对铰缝损伤后空心板桥梁的横向受力性能进行计算分析。研究结果表明: 铺装层在空心板桥梁铰缝损伤后可起荷载横向传递的作用, 提高了桥梁的横向受力性能, 并且在多铰缝出现损伤时, 提升效果更为明显; 同时当铺装层厚度为10~20 cm时, 铺装层厚度越大, 桥梁的横向刚度越大, 但对结构横向刚度的提升效果并不明显。

关键词: 空心板桥; 横向刚度; 梁格法; 铰缝损伤; 铺装层

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

Effect of paving layer on transverse stiffness of hollow slab bridge after joint damage

XIAO Huarun, NING Xiaojun

(School of Architecture and Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: Hinge damage is a common problem in hollow slab bridge. In order to study the influence of paving layer on the lateral stiffness of hollow slab bridge after hinge joint damage, a finite element analysis model is established by using beam lattice method. The results show that after damage to the hinge joints of hollow slab bridges, the paving layer can act as a lateral load transfer, which improves the transverse force performance of bridges. And the lifting effect is even more pronounced when the damage occurs in multi-pass seams. At the same time, when the thickness of the paving layer is 10 ~ 20 cm, the greater the thickness of the paving layer, the greater the transverse stiffness of the bridge, however, the influence of the transverse stiffness on the structure is not obvious.

Key words: hollow slab bridge; transverse stiffness; beam lattice method; hinge joint damage; paving layer

空心板桥因其梁高较小、施工工艺简单、质量控制技术成熟等优点在中小跨径桥梁中被广泛应用。空心板的荷载横向传递主要通过铰缝和铺装层实现, 但因其常采用后浇筑工艺, 是空心板桥最易出现病害的部位, 易出现“单板受力”。

对于铺装层刚度、铰缝损伤对空心板结构的影响, 国内已有研究表明: 在桥梁完好的情况下, 铺装

层对空心板桥梁的横向受力、抗弯承载力和竖向基频都有影响^[1-4]。杨中等^[5]基于桥面铺装层在不同弹性模量和荷载条件下应力分布的研究为双层桥面铺装层提供了理论依据。当铰缝损伤后, 空心板的横向传力性能将显著下降^[6-7], 同时, 由于铰缝的损伤, 导致空心板桥梁整体刚度降低^[8], 对桥梁自振特性也会产生影响^[9], 并影响了车辆荷载对桥梁的冲击作用。

收稿日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51068012); 云南省“万人计划”青年拔尖人才发展专项资助项目(QT-21011.01)

作者简介: 肖铎润(1997—), 男, 昆明理工大学硕士生。E-mail: 527552248@qq.com

国内外针对铰缝损伤和铺装层对空心板的横向传力性能影响的研究,主要集中在对其中一种结构的分析和探讨。然而在实际工程中,铺装层和主梁通常由钢筋连接形成叠合结构,对于已出现铰缝损伤的空心板,铺装层对空心板的荷载横向传递仍具有较大影响,并对此进行研究的少见。因此,本研究拟以云南某空心板桥梁为例,采用Midas civil软件建立有限元模型,计算分析铰缝损伤及铺装层厚度对空心板桥横向刚度的影响,以期类似工程设计和施工提供借鉴。

1 空心板桥力学模型的建立

1.1 桥梁完好时各板间相对关系

铰缝作为空心板荷载横向传递的主要构件,由于铰缝结构的刚性相对于主梁较弱,因此,在竖向荷载作用下,通常认为铰缝只传递竖向剪力而不传递弯矩^[10],可忽略铰缝处其他力对主梁的影响,因此,铰缝与主梁的横向连接可视为铰接。具体受力如图1所示。

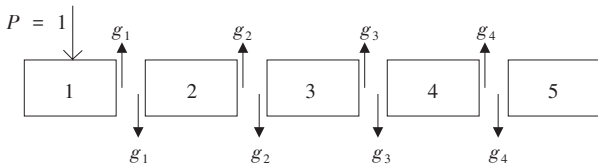


图1 铰缝受力图示

Fig. 1 The force diagram of hinge joint

在桥梁完好的情况下,在图1中,相邻两板之间有一对大小相等、方向相反的铰接力,由于相邻两板之间的竖向相对位移为零,则可以对铰接力峰值 g_i 进行求解,并用力法求解单块板的荷载。根据力的平衡方程,可得

$$\begin{cases} P_{11} = 1 - g_1 \\ P_{21} = g_1 - g_2 \\ P_{31} = g_2 - g_3 \\ P_{41} = g_3 - g_4 \\ P_{51} = g_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{i1} 为每片空心板主梁分担的竖向荷载铰接力的峰值; g_i 为第 i 个铰缝的铰内竖向剪力。

在第 i 个铰缝处可建立相邻板之间的相对位移计算式

$$\sum_{k=1}^n \delta_{ik} g_i + \delta_{ip} = 0 \quad (2)$$

式中: δ_{ik} 为第 k 个铰缝处作用单位竖向剪力时,在第

i 个铰缝处引起的竖向位移; δ_{ip} 为荷载 $p=1$ 时在第 i 个铰缝处引起的竖向位移。

1.2 铰缝损伤后各板间相对关系

对于空心板桥结构,铰缝连接处是一个比较脆弱的部位。当铰缝损伤时,铰缝两侧的板在荷载作用下产生相对位移 Δ 。假设铰缝完全失效后,相邻板在铰缝处的最大相对位移为 ω 。此时,铰缝的损伤率 $\mu = [0, 1)$,而 μ 与 Δ 呈线性相关,则:

$$\Delta = \mu \cdot \omega \quad (3)$$

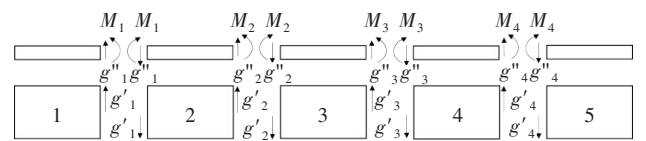
对于第 i 个铰缝,利用力学原理可得式(4):

$$\sum_{k=1}^n \delta_{ik} g_i + \delta_{ip} = -g_i \Delta = -g_i \mu_i \omega \quad (4)$$

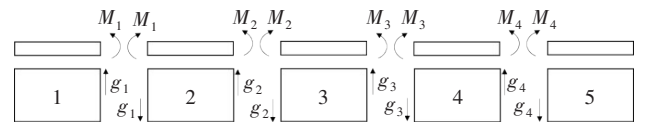
1.3 铺装层的空心板桥受力分析

在铰接板法中,只考虑相邻板间的竖向剪力传递,而实际工程中,铺装层也有助于提高空心板桥梁的横向刚度。因铺装层多采用现浇钢筋混凝土,且混凝土强度等级较高,铺装层具有一定刚度^[11],有利于空心板荷载的横向传递。因此,当对桥梁实际受力情况进行分析时,不能把铺装层仅作为空心板桥的保护层,防止过往车辆对主梁进行磨损,应考虑铺装层整体作用及铰缝对空心板桥的影响。

从空心板桥梁的荷载横向传递的实际情况可知,桥面铺装层为整体刚接,即能传递弯矩,也能传递剪力;而铰缝从铰接来考虑,只传递剪力,不传递弯矩,其他力忽略不计,其受力示意如图2所示。



(a) 主梁间传力示意



(b) 简化后主梁间传力示意

图2 考虑铺装层的空心板桥受力图示

Fig. 2 The force diagram of hollow slab bridge considering pavement layer

为便于计算,将铺装层与铰缝所传递的剪力相加为 g_i ,如图2(b)所示。空心板在剪力作用时的变形仍可采用铰接板法进行分析,其在横向弯矩作用下的变形如图3所示。在图3中, b 为单块空心板的横截面宽度。

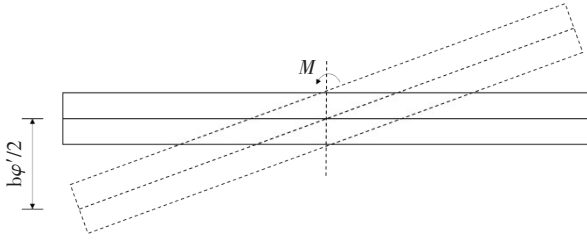


图3 空心板在弯矩作用下的变形示意

Fig. 3 Analysis of deformation of hollow plate under bending moment

根据任意弯矩作用下空心板的变形可得

$$\frac{m_i}{\varphi} = \frac{M_i}{\varphi'} \quad (5)$$

式中: m_i 为偏心的正弦铰接力在空心板跨中引起的弯矩; φ 为 m_i 引起的板的跨中扭角; M_i 为铺装层传递的弯矩; φ' 为 M_i 作用引起的跨中扭角。

当 m_i 为单位铰接力引起的跨中弯矩, 即 $m_i =$

$b/2$; M_i 为单位弯矩时, 由弯矩引起的跨中扭角 φ' 可表示为

$$\varphi' = \frac{\varphi M_i}{m_i} = \frac{\varphi}{b/2} = \frac{2\varphi}{b} \quad (6)$$

根据相邻两块板之间的竖向相对位移为0或在对称弯矩作用下铰缝两侧不产生相对挠度等两个变形协调条件, 可对铰缝处 g_i 及 M_i 进行求解。铰缝两侧的剪切位移不引起相对转角。在第 i 个铰缝处, 可建立等式

$$[\delta_{ij}][x_i] + [\delta_{ip}] = 0 \quad (7)$$

式中: δ_{ij} 为正则方程中位于 g_i 及 M_i 值前的计算系数, 当 $g_i = 1$ 或 $M_i = 1$ 时, 在 i 处引起的相对变形位移; δ_{ip} 为外荷载 p 在铰接缝 i 处引起的相对变位, x_i 为在铰缝 i 处力的峰值。

$[\delta_{ij}]$ 的表达式为(8), 根据式(6)中 φ' 与 φ 的关系, 可将系数矩阵表达式写为式(9)。

$$[\delta_{ij}] = \begin{bmatrix} 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & 0 & 0 & \frac{b}{2}\varphi' & 0 & 0 \\ -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & \frac{b}{2}\varphi' & 0 \\ 0 & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & \frac{b}{2}\varphi' \\ 0 & 0 & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 \\ 0 & -\varphi & 0 & 0 & 2\varphi' & -\varphi' & 0 & 0 \\ \varphi & 0 & -\varphi & 0 & -\varphi' & 2\varphi' & \varphi' & 0 \\ 0 & \varphi & 0 & -\varphi & 0 & -\varphi' & 2\varphi' & -\varphi' \\ 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & 0 & -\varphi' & 2\varphi' \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[\delta_{ij}]' = \begin{bmatrix} 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & 0 & 0 & \frac{b}{2}\varphi' & 0 & 0 \\ -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & \frac{b}{2}\varphi' & 0 \\ 0 & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & \frac{b}{2}\varphi' \\ 0 & 0 & -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) & 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) & 0 & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 \\ 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & 0 & 2\varphi' & -\varphi' & 0 & 0 \\ \frac{b}{2}\varphi' & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & -\varphi' & 2\varphi' & \varphi' & 0 \\ 0 & \frac{b}{2}\varphi' & 0 & -\frac{b}{2}\varphi' & 0 & -\varphi' & 2\varphi' & -\varphi' \\ 0 & 0 & \frac{b}{2}\varphi' & 0 & 0 & 0 & -\varphi' & 2\varphi' \end{bmatrix} \quad (9)$$

则 g_i 及 M_i 的正则方程为:

$$\begin{bmatrix}
 2(1+\gamma) & -(1-\gamma) & 0 & 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 \\
 -(1-\gamma) & 2(1+\gamma) & -(1-\gamma) & 0 & -\gamma & 0 & \gamma & 0 \\
 0 & -(1-\gamma) & 2(1+\gamma) & -(1-\gamma) & 0 & -\gamma & 0 & \gamma \\
 0 & 0 & -(1-\gamma) & 2(1+\gamma) & 0 & 0 & -\gamma & 0 \\
 0 & -\gamma & 0 & 0 & 2\gamma & -\gamma & 0 & 0 \\
 \gamma & 0 & -\gamma & 0 & -\gamma & 2\gamma & -\gamma & 0 \\
 0 & \gamma & 0 & -\gamma & 0 & -\gamma & 2\gamma & -\gamma \\
 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & -\gamma & 2\gamma
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 g_1 \\
 g_2 \\
 g_3 \\
 g_4 \\
 \frac{2}{b}M_1 \\
 \frac{2}{b}M_2 \\
 \frac{2}{b}M_3 \\
 \frac{2}{b}M_4
 \end{bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (10)$$

由式(10)可得到各板之间的剪力和弯矩值。根据式(1)计算得到铺装层与铰缝的剪力和 g_i ,再根据力的平衡原理,由式(1)得到空心板主梁的横向分布影响线,用同样的方法可得到其余梁的横向分布影响线。对于考虑铺装层刚性连接作用的空心板桥,正则方程比较复杂,空心板桥的荷载横向分布计算量也会大大增加。在工程实例中,采用有限元模型计算空心板桥铰缝损伤后铺装层对荷载横向传递的影响。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

云南某空心板桥,桥梁全长23.50 m,其上部结构为1~13 m预应力混凝土空心板,板长12.96 m,板厚0.75 m,桥面宽度为8.5 m(7.5 m(行车道)+2×0.5 m(护栏)),横向由6块预制空心板组成。各单板的横截面尺寸大小如图4所示。主梁、铰缝及现浇铺装层采用C50混凝土,容重26 kN/m³,弹性模量3.45×10⁴ MPa,预应力钢筋采用公称直径为15.2 mm的低松弛高强度钢绞线。

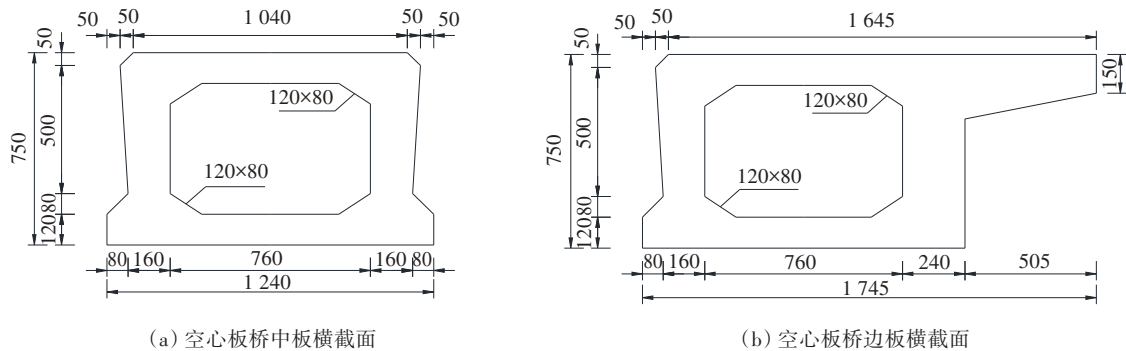


图4 空心板桥横截面示意(单位:mm)

Fig. 4 Cross-section diagram of hollow slab bridge(unit:mm)

2.2 有限元模型的建立

采用梁格法和Midas civil软件建立空心板桥梁的有限元模型。假设:将板的纵向刚度集中在纵向主梁上;空心板横向联系采用虚拟横梁模拟,横向刚度集中在虚拟横梁上,虚拟横梁只考虑刚度,不计重量,铰缝及铺装层自重作为荷载作用于纵向主梁上。每个虚拟横梁用两个单元进行模拟,通过释放其中一个单元的梁端弯矩约束,模拟铰接缝,只传递剪力,不传递弯矩。全桥有限元模型网

格划分如图5所示。共276个单元,231个节点。

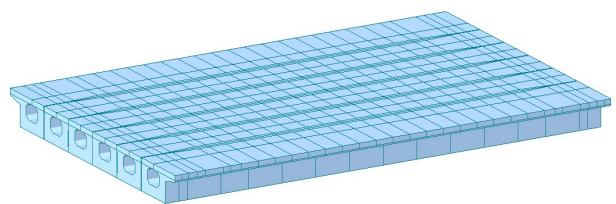


图5 空心板桥梁格法有限元模型

Fig. 5 Beam lattice method finite element model of hollow slab bridge

2.3 当桥梁完好时对空心板整体铺装层的影响

对于空心板桥梁,各主梁之间的横向连接情况决定了结构的横向刚度。当空心板桥的横向刚度越大时,荷载在结构横向的传递效应越明显。因此,分别对空心板桥在有无铺装层时进行有限元分析,研究铺装层在桥梁完好时对结构横向受力的影响。

通过有限元模型计算,得到1#板的横向影响线,并与铰接板理论及本研究中空心板桥整体铺装层作用计算结果作对比。

在桥梁完好时,分别用不同的方法计算得到的1#板的荷载横向分布曲线如图6所示。

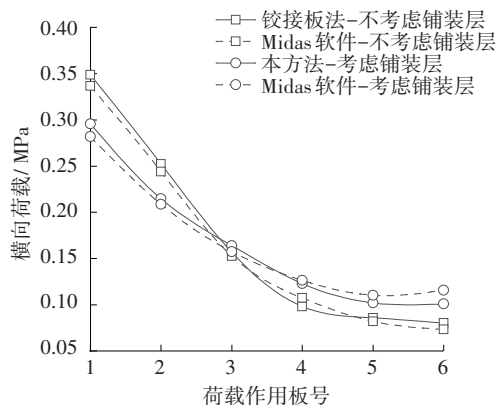


图6 桥梁完好时1#板横向荷载分布

Fig. 6 Distribution of the lateral load on the slab 1 when the bridge is in good condition

从图6可以看出,当不考虑铺装层时,铰接板法与Midas civil计算结果相互吻合。当考虑10 cm铺装层后,按本研究计算方法得到的结果与利用Midas civil建立的空心板桥的实际受力模型的计算结果基本吻合,表明:本模型可用于空心板桥整体铺装层对横向刚度的影响研究。

从图6还可看出,在考虑铺装层后,荷载横向分布更趋于平缓,整体受力也得到一定的改善,表明:铺装层对空心板荷载的横向分布的影响较大。

2.4 铰缝损伤时对空心板整体铺装层的影响

2.4.1 铰缝损伤后对空心板桥横向刚度的影响

1) 损伤位置对空心板桥横向刚度的影响。

因在荷载作用下跨中位置正弯矩最大,空心板桥在跨中位置的铰缝最容易出现损伤。但在桥梁实际运营过程中,因为施工质量、通行条件及实际运营环境等因素的影响,最先出现铰缝损伤的位置不一定在跨中。为了研究铰缝在不同位置损伤时

对结构横向刚度的影响,假定在图7中分别取边板单侧1#铰缝在空心板桥的 $L/8$ 、 $L/4$ 和 $L/2$ (L 为桥梁跨径)处3个不同损伤位置,损伤率为100%,损伤长度为 $0.2L$ 时,计算边板单侧铰缝损伤后1#板的荷载横向分布影响线通过选择相应的单元来释放虚拟横梁的梁端约束,模拟铰缝的损伤位置。



图7 1#铰缝损伤示意

Fig. 7 Damage diagram of No.1 hinge joint

图8为1#铰缝分别在桥梁的 $L/8$ 、 $L/4$ 及跨中位置损伤后的荷载横向分布曲线。从图8可以看出,当铰缝损伤位置越靠近跨中时,横向荷载曲率更大,对空心板桥的横向受力影响越大。对比图6可知,当空心板桥在 $L/4$ 和 $L/8$ 位置出现损伤时,1#板的横向影响线变化较小,对空心板桥荷载的横向传递影响不大,表明:在日常养护过程中,应重视跨中部位出现铰缝损伤的情况。

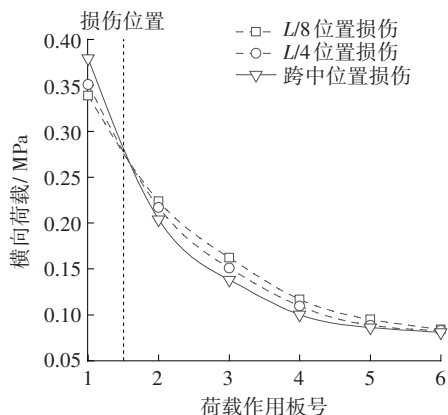


图8 1#铰缝损伤后1#板横向荷载分布

Fig. 8 Distribution of the lateral load on the slab No.1 after damage of hinge joint No.1

2) 损伤长度及损伤率对空心板桥横向刚度的影响。

当铰缝在跨中损伤时,对空心板桥横向刚度的影响最大。假定图9中3#铰缝在跨中位置对称开裂,计算中板单侧铰缝损伤后3#板的横向影响线。通过选择相应的虚拟横梁单元,释放梁端约束的长度和比例,模拟铰缝的损伤长度和损伤率,研究空心板桥在铰缝不同损伤长度及不同损伤率的条件下对整体横向刚度的影响。

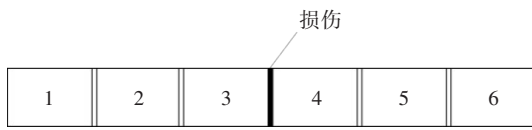


图9 3#铰缝损伤示意

Fig. 9 Diagram of joint damage at No.3

图10为3#铰缝无损伤和损伤率为100%且损伤长度分别为 $0.2L$ 、 $0.5L$ 、 $0.8L$ 、 L 时,3#板的荷载横向影响线。从图10可以看出,当桥梁铰缝损伤后,与荷载作用位置处于同一侧板的横向荷载增大,而另一侧板的横向荷载减小,横向荷载的变化值与损伤长度呈正相关,这是因为当铰缝损伤后,荷载的横向传递会在受损铰缝处受到影响,而随着损伤长度的增加,整个空心板桥荷载横向传递受到的影响也相应增大。

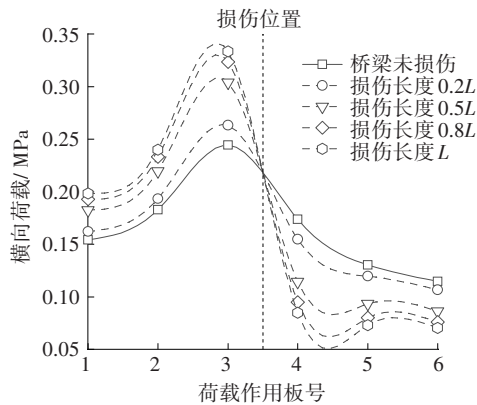


图10 铰缝不同损伤长度时3#板横向荷载分布

Fig. 10 Distribution of the lateral load on the slab No. 3 when the injury length of hinges are different

图11为3#铰缝损伤长度为 L ,且损伤率分别为0%、25%、50%、75%、100%时3#板的横向荷载。从图11可以看出,当损伤率从0%变化到75%时,3#板横向荷载逐渐变大,但变化率趋于平缓,但是损伤率变为100%后,3#板横向荷载突增,表明:当铰缝未完全损坏时仍保有一定的荷载横向传递能力,而当铰缝完全损坏后,荷载横向传递的能力大大降低。

从图10~11还可以看出,当损伤长度或损伤率较小时,对整个空心板桥横向刚度的影响也较小;而当损伤长度或损伤率较大时,空心板桥的荷载横向传递能力均大幅降低,所以在日常管理养护工作中,应该格外注意损伤严重的铰缝,并及时加固处治。

2.4.2 铰缝损伤后桥面铺装层对空心板桥的影响

1) 铺装层对空心板桥横向刚度的贡献。

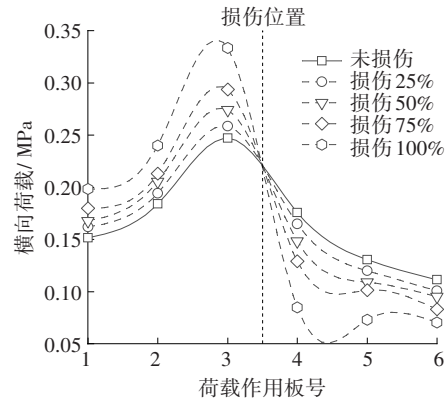


图11 铰缝不同损伤率下3#板横向荷载分布

Fig. 11 Distribution of the lateral load on the slab No. 3 when the damage rate of hinges are different

根据已有的研究成果^[2],本研究将荷载横向分布均匀系数 κ 作为评价指标,以横向荷载分布的平均值与其最大值的比值来评价荷载横向分布的均匀性,并反映铺装层对空心板桥横向刚度的贡献。其计算式如下:

$$\kappa = \frac{\xi}{\xi_{\max}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\Delta\kappa = \kappa_2 - \kappa_1 \quad (12)$$

式中: ξ 为荷载横向分布的平均值; ξ_{\max} 为荷载横向分布的最大值; κ_1 为只考虑铰缝损伤时横向分布均匀性系数; κ_2 为考虑铰缝及铺装层共同损伤时横向分布均匀性系数。

当铰缝损伤位置在跨中时,损伤长度或损伤率越大,对空心板桥横向刚度的影响越大。而在桥梁实际运营过程中,存在多个铰缝同时损伤的情况,因此,对表1中铰缝损伤的3种模拟工况进行对比,3种工况均假设铰缝在跨中位置损坏,损伤率为100%,损伤长度为 $0.5L$,并研究铺装层及铰缝损伤后对空心板桥横向刚度的影响。

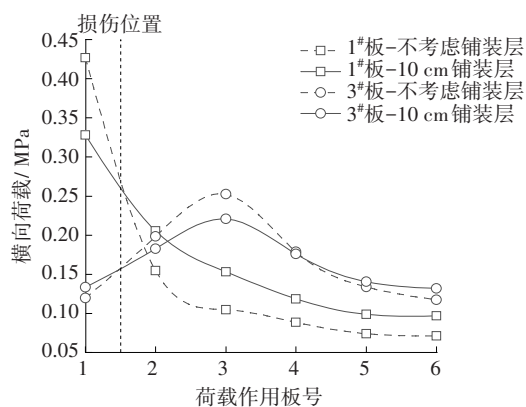
表1 铰缝损伤模拟工况及类型

Table 1 hinge damage simulation conditions and types

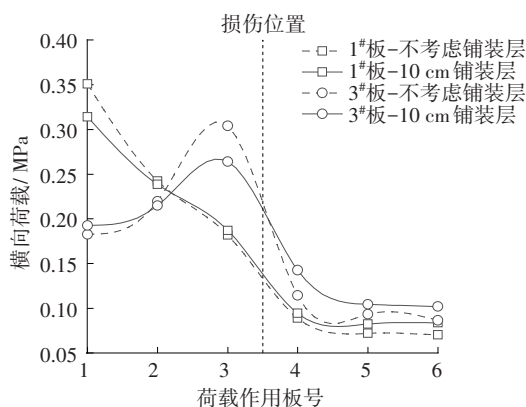
工况类别	铺装层/cm	损伤描述
工况1	10	边板单侧铰缝(1#铰缝)破损
工况2		中板单侧铰缝(3#铰缝)破损
工况3		中板双侧铰缝(2#、3#铰缝)破损

图12为3种工况下铰缝损伤后1#号板和3#板的横向影响线。从图12可以看出,在考虑铺装层之后,各板的横向影响线均变得更加平缓。从图12可

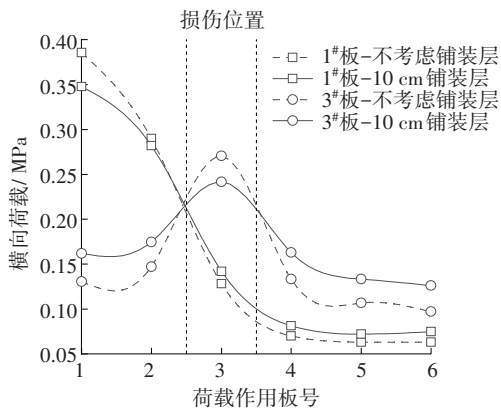
以看出,当1#板铰缝损伤时,1#板横向荷载分布的变化幅度大于3#板横向荷载分布的变化幅度;当3#板铰缝损伤时,3#板横向荷载分布的变化幅度大于1#板横向荷载分布的变化幅度。这表明:当空心板桥铰缝受损后,与受损铰缝横向距离越近的板受到的影响越大,而铺装层能增强结构的横向受力性能。为进一步研究铺装层在铰缝损伤后对空心板桥横向受力性能的提升,利用荷载横向分布曲线计算得到的荷载横向分布均匀系数 κ ,见表2。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图12 不同工况下铰缝损伤后1#、3#板横向荷载分布
Fig. 12 Distribution of the lateral load on the slab No. 1, 3 after hinge joint damage under different working conditions

表2 荷载横向分布均匀系数

Table 2 Uniformity coefficient of distribution of the lateral load

工况类别	横向分布均匀系数			
	不考虑铺装层		铺装层 10 cm	
	1#板	3#板	1#板	3#板
工况 1	0.359 1	0.660 2	0.508 2	0.743 3
工况 2	0.478 2	0.548 4	0.530 8	0.643 8
工况 3	0.412 1	0.545 1	0.479 3	0.689 6

表2为各工况不考虑铺装层和考虑10 cm铺装层时1#和3#板的荷载横向分布均匀系数。由表2可知,当考虑铺装层后,1#、3#空心板的荷载横向分布均匀系数均有提高,表明:桥梁的荷载横向传递性能也得到提升。在铰缝损伤后,铺装层仍然发挥着一定荷载横向传递的作用。其中,表2中同一块空心板的不同 κ 值的差值 $\Delta\kappa$ 为荷载横向分布均匀系数变化值,见表3。

表3 荷载横向分布均匀系数变化值

Table 3 Variation in uniformity coefficient of distribution of the lateral load

工况类别	均匀系数变化值	
	1#板	3#板
工况 1	0.149 1	0.083 1
工况 2	0.052 7	0.095 5
工况 3	0.067 2	0.144 5

表3为各工况下1#和3#板的荷载横向分布均匀性系数变化值 $\Delta\kappa$,由表3可知,当1#板单侧铰缝(1#铰缝)破损时,铺装层对1#板横向分布均匀性约提升14.9%,而当3#板单侧铰缝(3#铰缝)受损时,铺装层对3#板横向分布均匀性约提升9.6%。

对比工况2与工况3发现,当3#铰缝受损时,铺装层对1#板与3#板的横向分布均匀性提升率约为5.3%和9.6%,而当2#和3#铰缝同时受损时,铺装层对1#板与3#板的横向分布均匀性提升率约为6.7%和14.5%。当多铰缝出现受损时,各板会更容易发生破坏,铺装层在这种情况下更能起到保护各板之间的连接作用。

2) 不同铺装层厚度的影响。

铺装层在桥梁完好及铰缝损伤时都在一定程度上提高了空心板桥的横向刚度,以工况 2 时 3#板的横向影响线为例,分析不同铺装层厚度对空心板桥横向刚度的影响。表 4 为工况 2 时分别为不同铺装层厚度时 3#板的横向分布值。

表 4 3#板荷载横向分布影响线数值

Table 4 Numerical value of distribution of the lateral load in plate No.3

荷载作用 板号	铺装层厚度/ cm			
	0	10	15	20
1	0.182 36	0.192 34	0.191 17	0.190 19
2	0.219 66	0.21 48	0.210 15	0.206 66
3	0.303 93	0.264 04	0.253 25	0.246 40
4	0.114 27	0.142 56	0.127 62	0.131 14
5	0.093 47	0.104 33	0.109 31	0.112 49
6	0.086 31	0.101 94	0.105 13	0.111 17

利用荷载横向分布影响线,计算得到 3#板铺装层厚度分别为 0、10、15、20 cm 荷载横向分布均匀系数,分别为 κ_1 、 κ_2 、 κ_3 和 κ_4 ,见表 5。

表 5 荷载横向分布均匀系数

Table 5 Uniformity coefficient of distribution of the lateral load κ

κ	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4
横向分布均匀 系数	0.548 4	0.643 8	0.655 6	0.674 9

由表 5 可知,随着铺装层厚度的增加,空心板桥的荷载横向分布均系数也在递增,表明:桥梁的横向刚度随铺装层厚度的增加而增加。表 5 中不同铺装层厚度的不同荷载横向分布均匀系数的差值为 $\Delta\kappa$,见表 6。得到 3#板的荷载横向分布均匀系数的变化值。

表 6 荷载横向分布均匀性系数变化值 $\Delta\kappa$

Table 6 Variation in uniformity coefficient of distribution of the lateral load $\Delta\kappa$

$\kappa_{i+1} - \kappa_i$	$\kappa_2 - \kappa_1$	$\kappa_3 - \kappa_2$	$\kappa_4 - \kappa_3$
$\Delta\kappa$	0.095 5	0.011 8	0.019 3

由表 6 可知,在单侧铰缝损伤时,铺装层厚度从 0 cm 增加至 10 cm 时, $\Delta\kappa$ 的值最大。这表明:当考虑铺装层厚度增加为 10 cm 时,对桥梁结构横向刚度的加强效果最明显。而当铺装层厚度从 10 cm 逐渐提升到 20 cm 时,横向分布均匀性系数变化差 $\Delta\kappa$ 仅为 0.01~0.02,表明:在铰缝损伤后铺装层厚度从 10 cm 增加到 20 cm 时,对结构横向刚度的提升并不明显。因此,铺装层厚度的增加,加强了空心板桥的横向刚度,但铺装层厚度不宜太大,这样可以节省工程造价及减轻铺装层自重。

3 结论

1) 当铰缝损伤位置越靠近跨中时,对空心板桥的横向受力影响越大。在日常养护过程中,应该重点关注跨中部位铰缝的病害。

2) 空心板桥荷载的横向传递效应跟铰缝损伤长度和损伤率都有关系,当损伤长度或损伤率较大时,空心板桥的荷载横向传递能力均大幅降低。

3) 当空心板桥铰缝损伤后,铺装层仍然承担着板块之间一部分力的传递,提高了各板的荷载横向分布均匀性系数,加强了桥梁的横向受力性能。

4) 相对于单处铰缝损伤,当出现多处铰缝受损时,铺装层对空心板桥横向刚度的影响更明显,更能起到保护各板之间的连接作用。

5) 当铺装层厚度取 10~20 cm 时,铺装层越厚,铰缝损伤后结构的横向刚度越大,但随着铺装层的持续加厚,对结构的横向刚度的加强效果则显著降低。

参考文献(References):

[1] 刘聪聪,张永亮,朱尚清,等. 桥面铺装层刚度对简支空心板桥竖向基频的影响[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程. 2019, 11(3):247-253.
LIU Congcong, ZHANG Yongliang, ZHU Shangqing, et al. Effect of bridge deck pavement stiffness on vertical fundamental frequency of simply supported hollow slab bridges[J]. Journal of Engineering Studies. 2019, 11(3): 247-253.

[2] 姜燕玲. 水泥砼桥面铺装对空心板桥横向刚度的影响研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
JIANG Yanling. Study on lateral stiffness of hollow slab

- bridge with parameters of cement concrete bridge pavement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [3] 张学会, 王哲, 乔国胜. 考虑桥面铺装影响的空心板梁抗弯承载力研究[J]. 低温建筑技术. 2020, 42(12): 92-94.
- ZHANG Xuehui, WANG Zhe, QIAO Guosheng. Research on flexural bearing capacity of hollow core slab girder considering the influence of bridge deck pavement [J]. Cryogenic Construction Technology. 2020, 42(12): 92-94.
- [4] 曹晓喆. 考虑整体铺装层影响的斜空心板桥静力性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- CAO Xiaozhe. Theoretical static performance analysis of skew hollow slab bridge considering the influence of overall pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [5] 杨中才, 王根宝, 陈继红. 基于有限元分析的双层桥面铺装方案研究[J]. 交通科学与工程. 2019, 35(4): 52-56.
- YANG Zhongcai, WANG Genbao, CHEN Jihong. Research on the double-layered bridge deck scheme based on finite element analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 52-56.
- [6] 刘旭政, 郭维, 吴刚, 等. 铰缝损伤对装配式空心板桥受力性能影响研究[J]. 华东交通大学学报. 2021, 38(3): 23-30.
- LIU Xuzheng, GUO Wei, WU Gang, et al. Influence of hinge joint damage on the structural performance of precast hollow slab bridge [J]. Journal of East China Jiaotong University. 2021, 38(3): 23-30.
- [7] 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 Chunliang, LIN Zhihao, ZHAO Luoluo. Effect of damaged hinge joint and damaged slab on transverse force of hollow slab bridge[J]. Journal of Jilin University (Engineering edition), 2021, 51(2): 611-619.
- [8] 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(1): 118-120, 125.
- QIAN Ruolin, SHU Pei, YANG Qian. Research on load lateral distribution coefficient of hollow slab bridge based on damage analysis[J]. Roads and motoring. 2021(1): 118-120, 125.
- [9] 王玉田, 姜福香, 李福如. 铰缝损伤对斜交空心板桥自振特性的影响[J]. 公路. 2014, 59(3): 48-53.
- WANG Yutian, JIANG Fuxiang, LI Furu. Influence of hinge joint damage on the self-vibration characteristics of skew hollow slab bridge[J]. Highway. 2014, 59(3): 48-53.
- [10] 刘龄嘉. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- LIU Lingjia. Bridge engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [11] 班游, 蒋倩灵, 杨建军. 水泥混凝土路面加铺沥青层结构应力分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版). 2019, 16(4): 64-72.
- BAN You, JIANG Qianlingxiang, YANG Jianjun. Stress analysis of asphalt layer on cement concrete pavement [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science Edition). 2019, 16(4): 64-72.
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 李脉; 英文编辑: 郭一鹏)