

基于广义梁格法的整体化铺装加固空心板桥 荷载横向分布系数计算方法

王昊¹, 李广奇², 郭建民¹, 黄宛昆³

(1. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250101;

3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 由于整体化铺装加固后的空心板桥的铺装层较厚、横向整体性更突出, 因此荷载横向分布系数的计算必须考虑整体化铺装层的影响。基于此提出采用广义梁格法考虑整体化铺装层的影响, 在足尺模型试验和有限元计算的基础上, 对基于广义梁格法的整体化铺装层加固后的空心板桥荷载横向分布系数计算方法进行验证。结果表明, 广义梁格法的计算结果可以准确考虑采用整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布规律。不同宽度、不同跨径的空心板桥, 铺装层的高度折减系数取值在 0.5 ~ 0.8 之间时, 计算结果更加精确。桥越宽则折减系数取值越大, 跨径越大则折减系数取值越小。

关键词: 桥梁工程; 空心板桥; 荷载横向分布系数; 广义梁格法; 模型试验; 有限元计算

中图分类号: U443.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)03-0149-09

Transverse Load Distribution Factor of Integrated Pavement Strengthen Voided Slab Bridge Based on Generalized Grillage Method

WANG Hao¹, LI Guangqi², GUO Jianmin¹, HUANG Wankun³

(1. Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan, Shandong 250101, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Compared with the voided slab bridge with common deck pavement, the deck pavement of the voided slab bridge with integrated pavement is thicker, and the transverse integrity is more prominent. Therefore, the influence of integrated pavement must be taken into consideration in the calculation of the transverse load distribution factor. In this paper, the Generalized Grillage Method (GGM) is proposed to calculate the transverse load distribution factor of the voided slab bridge strengthened by integrated deck pavement. Based on the full-scale model test and finite element calculations, the transverse load distribution factor calculation method for voided slab bridges strengthened by the integrated pavement based on GGM is validated. The transverse load distribution factor calculation results indicate that GGM can precisely consider the transverse load distribution law of the voided slab bridges strengthened by integrated pavement. The different beam height reduction coefficients calculation and comparison with experimental and finite element results indicate that for voided slab bridges with different widths and spans, the calculation results are more accurate when the height reduction coefficient of the pavement layer is between 0.5 and 0.8. The wider the bridge, the larger the reduction coefficient value. The larger the span, the smaller the reduction coefficient value.

Keywords: bridge engineering; voided slab bridge; transverse load distribution factor; generalized grillage method; model test; finite element model calculation

收稿日期: 2024-02-10

修稿日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808126); 福州大学科研启动项目(XRC-23020)

作者简介: 王昊(1971—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事桥梁与隧道工程等方面工作。E-mail: WLL19991101@126.com

通讯作者: 黄宛昆(1982—), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事桥梁与隧道工程等方面工作。E-mail: 43127551@qq.com

随着经济社会的发展和交通量的不断增加,早期建设的空心板桥普遍存在材料老化、环境侵蚀的问题,因而不同程度地存在承载能力不足的问题,并出现开裂、下挠等病害^[1-2]。在检测评估^[3]的基础上,对空心板进行加固是一种通常的承载能力改造方法^[4-5],其中采用桥面整体化铺装层进行加固改造,由于可以同时弥补纵、横向桥梁承载能力的不足而得到广泛的应用^[6-7]。其具体做法为,将空心板的钢筋与桥面铺装的钢筋相连接,通过增加桥面铺装混凝土厚度,加强铺装层内横向钢筋来提高桥梁结构承载力^[8]。

为了研究整体化铺装层空心板桥的受力性能,美国加州大学圣地亚哥分校的 Seible 和 Latham^[9]在实梁的桥面板上加铺混凝土并进行承载力测试,结果表明加铺的混凝土可以提高主梁的承载能力。徐志华等^[10]针对桥面铺装层须与桥梁结构紧密结合并共同受力的问题,提出了考虑桥面铺装层协同空心板受力的预应力混凝土空心板梁抗弯承载力计算方法。曹晓喆^[11]研究整体铺装层对荷载作用下主梁变形的影响,进而提出考虑整体铺装层下主梁理论变形值的计算方法。李兴锋等^[12]开展不同整体化层厚度下铰缝受弯性能足尺试验研究,结果表明空心板梁的铰缝开裂荷载以及极限承载随整体化层加厚而增大。周湘君等^[13]通过采用无铰缝设计加大单片空心板梁宽和增强混凝土桥面铺装来改善空心板桥整体结构受力,结果表明该设计可以提高结构承载能力。赵亚娟^[14]对不同厚度桥面铺装加固单片空心板进行研究,结果表明增加桥面铺装层厚度对改善空心板的受力情况效果显著。

现有的空心板桥荷载横向分布通常采用铰接板法进行计算^[15],而且不考虑铺装层的影响。但是对于铺装层较厚、横向整体性更突出的整体化铺装层加固空心板桥,必须考虑铺装层对空心板桥荷载横向分布的影响^[16-18]。已有的研究表明,采用整体化铺装层加固后的空心板桥,铺装层厚度的变化对于空心板梁板之间的传力具有一定的贡献作用,且铺装层厚度从 8 cm 增大到 12 cm 时,荷载横向分布系数的差值最大可达 11.3%^[19]。美国 2007 年出版的 AASHTO 规范考虑了包括铺装层厚度在内的多项因素的影响,使荷载横向分布的计算更加精确^[20]。

为了对采用整体化铺装层加固后装配式空心板

桥的荷载横向分布系数进行计算,本文提出采用广义梁格法(Generalized Grillage Method,简称 GGM)考虑整体化铺装层的影响,在足尺模型试验和有限元计算的基础上,对基于广义梁格法的整体化铺装层加固后的空心板桥荷载横向分布系数计算方法进行验证,并提出整体化铺装层的计算刚度取值。

1 基于广义梁格法的荷载横向分布计算

1.1 荷载横向分布计算方法

广义梁格法的基本假定是将多片主梁的空间受力结构等效为纵横向主梁组成的梁格体系,并以支承在多片纵梁上的横梁为研究对象。广义梁格法的计算模型如图 1 所示。将多片纵梁(空心板)等效成弹性支承,支承在多片纵梁上的横梁等效成支承在弹性支承上的多跨连续梁。弹性支承的编号从内梁向外梁依次编号为 1、2、…、 n 。第 i 个弹性支承上承受的支承反力包括水平反力、竖向反力和固端弯矩分别为 H_i 、 V_i 和 T_i 。第 i 个弹性支承处的外荷载包括水平荷载和偏心的竖向荷载,即等效为作用于弹性支承点处的集中水平荷载 $P_{x,i}$ 、集中竖向荷载 $P_{y,i}$ 和集中扭转荷载 $T_{z,i}$ 。

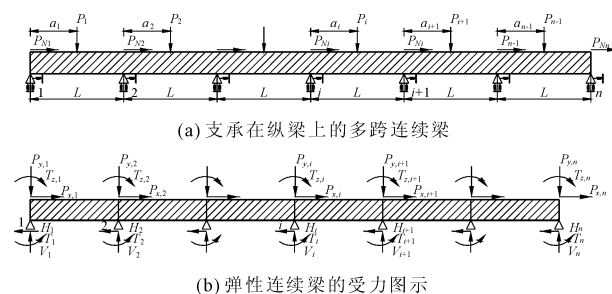
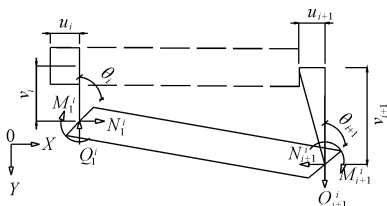


图 1 广义梁格法的计算模型

取多跨连续梁的第 i 跨为研究对象。此时其左端支承在第 i 个弹性支承上,右端支承在第 $i+1$ 个弹性支承上。对第 i 跨进行受力分析,如图 2 所示。横梁左、右端的梁端内力包括弯矩、剪力和轴力,梁端位移包括竖向位移、水平向位移和转角。

关于位移和内力的方向,参考结构力学的相关规定。局部坐标系 x 轴的方向以从构件的 i 端指向 $i+1$ 端为正, y 轴以向上为正。位移方向与局部坐标系 x 轴、 y 轴相同为正,转角方向遵循右手准则,即 i 端和 $i+1$ 端以逆时针方向为正。端弯矩、端剪力、端转角均以顺时针方向为正;端轴力以杆受压为正;端竖向位移和端水平位移均以与坐标轴正向一致为正。

图2 第*i*跨横梁的受力分析

注:上角标表示横梁的编号,下角标表示梁端的编号。 M_i^l 和 M_{i+1}^l 分别表示*i*号横梁*i*端和*i+1*端弯矩, Q_i^l 和 Q_{i+1}^l 分别表示*i*号横梁*i*端和*i+1*端剪力, N_i^l 和 N_{i+1}^l 分别表示*i*号横梁*i*端和*i+1*端轴力。 u_i 和 u_{i+1} 分别表示横梁*i*端和*i+1*端水平位移, v_i 和 v_{i+1} 分别表示横梁*i*端和*i+1*端竖向位移, θ_i 和 θ_{i+1} 分别表示横梁*i*端和*i+1*端的转角。

此时,第*i*跨横梁的内力和位移按下式计算:

$$\begin{Bmatrix} N_i^l \\ N_{i+1}^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA_{c,i}}{b_i} & -\frac{EA_{c,i}}{b_i} \\ -\frac{EA_{c,i}}{b_i} & \frac{EA_{c,i}}{b_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_i^l \\ M_{i+1}^l \\ Q_i^l \\ Q_{i+1}^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & \frac{4EI_{c,i}}{b_i} & \frac{2EI_{c,i}}{b_i} \\ \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & \frac{2EI_{c,i}}{b_i} & \frac{4EI_{c,i}}{b_i} \\ \frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & -\frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} \\ -\frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & \frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ v_{i+1} \\ \theta_i \\ \theta_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $EI_{c,i}$ 表示*i*号横梁的抗弯刚度; $EA_{c,i}$ 表示*i*号横梁的轴向刚度; b_i 表示*i*号横梁的长度,即*i*号主梁与*i+1*号主梁之间的中心距;上标*i*表示*i*号横梁;下标*c*表示横梁,下标*i*或*i+1*表示横梁的*i*端或*i+1*端。

对于任意截面处的横梁节段,同时承受集中水平力 H_i 、集中竖向力 V_i 和集中扭矩 T_i 的作用。此时,其荷载作用点处的水平位移 u 、竖向位移 v 和扭转角 φ 可表示为式(3)和式(4),且横梁在各弹性支承处的转角 θ 与各纵梁在相应位置的扭转角 φ 相等。

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{uH}(i) & 0 \\ 0 & C_{uH}(i+1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ H_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} v_i \\ v_{i+1} \\ \theta_i \\ \theta_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{vV}(i) & 0 & C_{vT}(i) & 0 \\ 0 & C_{vV}(i+1) & 0 & C_{vT}(i+1) \\ C_{\theta V}(i) & 0 & C_{\theta T}(i) & 0 \\ 0 & C_{\theta V}(i+1) & 0 & C_{\theta T}(i+1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ T_i \\ T_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中, $C_{uH}(i)$ 为集中水平力 $H=1$ 作用于*i*号横梁时,在该截面处产生的水平位移; $C_{vV}(i)$ 为集中竖向力 $V=1$ 作用于*i*号横梁时,在该截面处产生的竖向位移; $C_{vT}(i)$ 为集中扭矩 $T=1$ 作用于*i*号横梁时,在该截面处产生的竖向位移; $C_{\theta V}(i)$ 为集中竖向力 $V=1$ 作用于*i*号横梁时,在该截面处产生的扭转角; $C_{\theta T}(i)$ 表示集中扭矩 $T=1$ 作用于*i*号横梁时,在该截面处产生的扭转角。

将式(3)和式(4)代入式(1)和式(2),整理后可以得到*i*号横梁的内力与外荷载的线性方程组:

$$\begin{Bmatrix} N_i^l \\ N_{i+1}^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA_{c,i}}{b_i} & -\frac{EA_{c,i}}{b_i} \\ -\frac{EA_{c,i}}{b_i} & \frac{EA_{c,i}}{b_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{uH}(i) & 0 \\ 0 & C_{uH}(i+1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ H_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} M_i^l \\ M_{i+1}^l \\ Q_i^l \\ Q_{i+1}^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & \frac{4EI_{c,i}}{b_i} & \frac{2EI_{c,i}}{b_i} \\ \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & \frac{2EI_{c,i}}{b_i} & \frac{4EI_{c,i}}{b_i} \\ \frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & -\frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & \frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} \\ -\frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & \frac{12EI_{c,i}}{b_i^3} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} & -\frac{6EI_{c,i}}{b_i^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ T_i \\ T_{i+1} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{\theta V}(i) & 0 & C_{\theta T}(i) & 0 \\ 0 & C_{\theta V}(i+1) & 0 & C_{\theta T}(i+1) \\ C_{\theta V}(i) & 0 & C_{\theta T}(i) & 0 \\ 0 & C_{\theta V}(i+1) & 0 & C_{\theta T}(i+1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ T_i \\ T_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

对于非端点的弹性支承点而言,其受力分析如图3所示。以支承点为隔离体,节点的平衡方程如式(7)和(8):

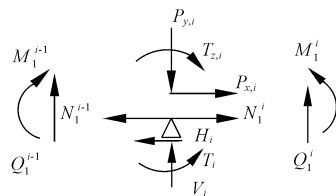


图3 弹性支承点处的受力分析

$$H_i + \begin{bmatrix} -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_i^{l-1} \\ N_i^l \end{Bmatrix} = -P_{x,i} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_i \\ T_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_i^{l-1} \\ Q_i^l \\ M_i^{l-1} \\ M_i^l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{y,i} \\ -T_{z,i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

利用式(8)求得竖向反力 V_i 和集中扭矩 T_i 的影响线,再代入纵向弯矩、剪力和扭矩的纵向影响线,就可以得到空心板梁在计算截面处的纵向弯矩、剪力和扭矩。求得的内力值即为单位竖向荷载作用下空心板梁在所受荷载 V_i 和 T_i 作用下的横向内力值,再利用式(9)可以得到内力横向分布影响线,并按荷载横向分布的方法进行计算。

$$nl_{ik} = \frac{NL_{ik}}{\sum_{i=1}^n NL_{ik}} \tag{9}$$

式中: nl_{ik} 为弯矩、剪力、扭矩对应的横向内力影响线值; NL_{ik} 为弯矩、剪力、扭矩对应的横向内力值。

1.2 整体化铺装层加固空心板桥荷载横向分布计算

基于广义梁格法的计算原理,利用自编程序^[21]对采用整体化铺装层加固的装配式空心板桥的荷载横向分布进行计算。对于整体化铺装层加固的空心板桥,其横向联系除了由空心板铰缝提供外,后加固采用的整体化铺装层也能增强横向整体性^[22]。因此,采用广义梁格法计算整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布时,所考虑的横梁既包括旧空心板桥铰缝提供的横向联系,也包括加固后空心板桥的整体化铺装层。

采用整体化铺装层的空心板板桥的横梁截面的抗弯惯性矩 I_c 为:

$$I_c = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}b(h_1 + h_2)^3 \tag{10}$$

式中: b 为横梁宽度; h 为考虑整体化铺装层的空心板桥等效横梁高度; h_1 为铰缝提供横向联系的等效横梁高度; h_2 为整体化铺装层提供横向联系的等效横梁高度。

已有的研究表明,旧空心板桥铰缝提供的横向联系,计算时横梁刚度按 0.5 倍铰缝高度进行计算^[23]。为了明确加固后空心板桥的整体化铺装层提供的横向联系刚度,应对整体化铺装层的横梁等效高度折减系数进行讨论。

当整体化铺装层提供的等效横梁高度 h_2 取0.9 倍整体化铺装层厚度时,荷载作用于不同空心板梁时,广义梁格法计算得到的空心板桥荷载横向分布系数计算结果见表 1 所示。可以看出,荷载作用下,整体化铺装层加固后的空心板桥荷载横向分布系数较为均匀。

2 结果与验证

2.1 足尺模型试验结果与验证

对一座 8 m 跨径的装配式空心板桥进行整体化

表 1 广义梁格法计算结果

板号	作用于不同板时的分项系数		
	1 号板	2 号板	3 号板
1	0.343	0.262	0.188
2	0.262	0.241	0.205
3	0.188	0.205	0.215
4	0.128	0.164	0.205
5	0.080	0.128	0.188

铺装层加固,并对加固后的荷载横向分布系数进行模型试验分析。试验模型横桥向由 5 片空心板组成,空心板参照旧标准图《装配式钢筋混凝土斜空心板桥上部构造》(JT/GQB 002—93)进行设计,梁高 40 cm。试验模型结构形式如图 4 所示。空心板上方铺设 22 cm 厚钢筋混凝土整体化铺装层进行加固,铺装层钢筋网采用上下两层钢筋网并采用植筋的方式与空心板连接,钢筋间距 10 cm×10 cm,钢筋直径为 φ16。空心板和整体化铺装层混凝土强度等级均为 C40。试验模型如图 5 所示,其中双层布置钢筋网的整体化铺装层的构造照片如图 6 所示。

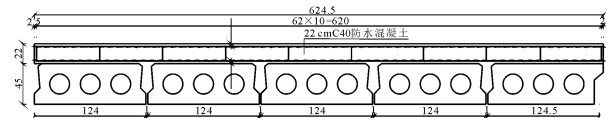


图 4 试验模型结构(单位:cm)



图 5 试验模型照片



图 6 整体化铺装层钢筋布置照片

试验加载方式采用单点加载的方式在每片空心板的跨中截面位置施加 50 kN 的竖向荷载,并对主梁的跨中截面挠度进行测量。利用各片空心板跨中

截面挠度与所有板挠度和的比值计算荷载横向分布系数。试验加载方式如图 7 所示,采用千斤顶和反力框架进行加载。

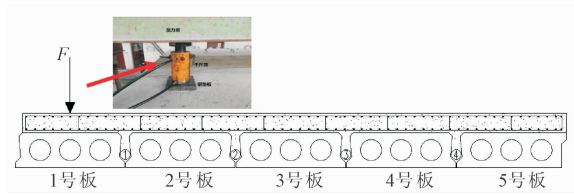


图 7 加载方式和加载设备

当荷载作用于不同空心板上时,各片空心板的荷载横向分布系数实测结果如表 2 所示。将基于广义梁格法计算采用整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布系数的计算结果与试验结果进行对比,并示于图 8 中。从图 8 结果可以看出,针对采用整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布系数,广义梁格法的计算方法可靠,结果精确。

表 2 实测荷载横向分布系数

板号	作用于不同板时的分项系数		
	1 号板	2 号板	3 号板
1	0.342	0.269	0.188
2	0.269	0.243	0.205
3	0.185	0.200	0.214
4	0.123	0.155	0.205
5	0.081	0.132	0.188

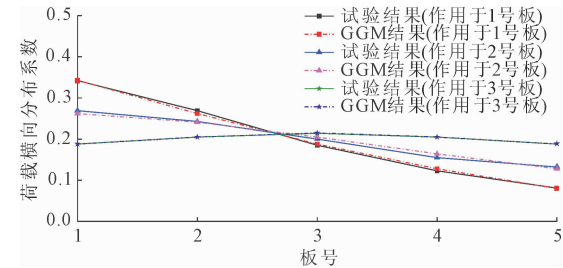


图 8 试验结果与计算结果比较

2.2 有限元计算结果与验证

为了进一步验证广义梁格法计算整体化铺装层加固空心板桥的可靠性,利用 Abaqus 有限元软件建立实体有限元模型,对不同宽度的采用整体化铺装层的空心板桥荷载横向分布进行计算。

空心板尺寸参照标准图进行设计,所选用的空心板尺寸如表 3 所示。选择与模型试验相同的材料进行建模计算。其中整体化铺装层与空心板之间因为有钢筋连接,在加载过程中不会发生相对滑移,因此采用“绑定”(Tied)功能来模拟整体化铺装层与

空心板的相互作用。所建立的跨径 8 m 横桥向 5 片板的桥梁有限元模型如图 9 所示。

表 3 空心板尺寸

跨径 /m	梁高 /m	梁宽 /m	铰缝高度 /m	铺装层厚度/m	横桥向片数
8	0.45	1.24	0.34	0.22	5、7、9、11
10	0.60	1.24	0.48	0.22	5
13	0.70	1.24	0.58	0.22	5
16	0.80	1.24	0.68	0.22	5

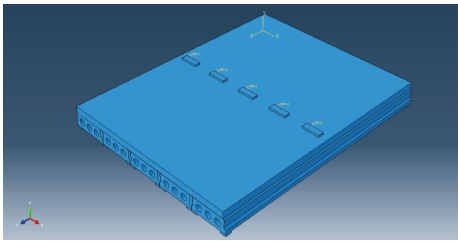


图 9 有限元模型

利用所建立的有限元模型计算横桥向 5 片板的空心板桥荷载横向分布系数,并将计算结果与试验结果进行比较,计算结果如图 10 所示。从计算结果可以看出,有限元计算得到的荷载横向分布系数与试验结果趋势一致且数值接近,因此所建立的有限元模型可以用于计算不同片数空心板的荷载横向分布系数。

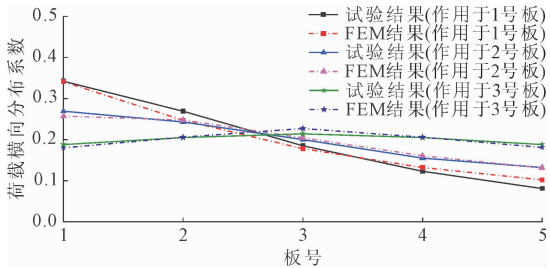


图 10 试验结果与有限元结果比较

利用所建立的有限元模型计算不同片数空心板的荷载横向分布系数,并将计算结果与广义梁格法的计算结果进行比较,结果如图 11 所示。从计算结果可以看出,利用广义梁格法计算得到的不同宽度的空心板桥的荷载横向分布系数与有限元计算结果趋势一致且数值十分接近,说明了广义梁格法计算方法的正确性,广义梁格法的计算结果可以正确考虑采用整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布规律。

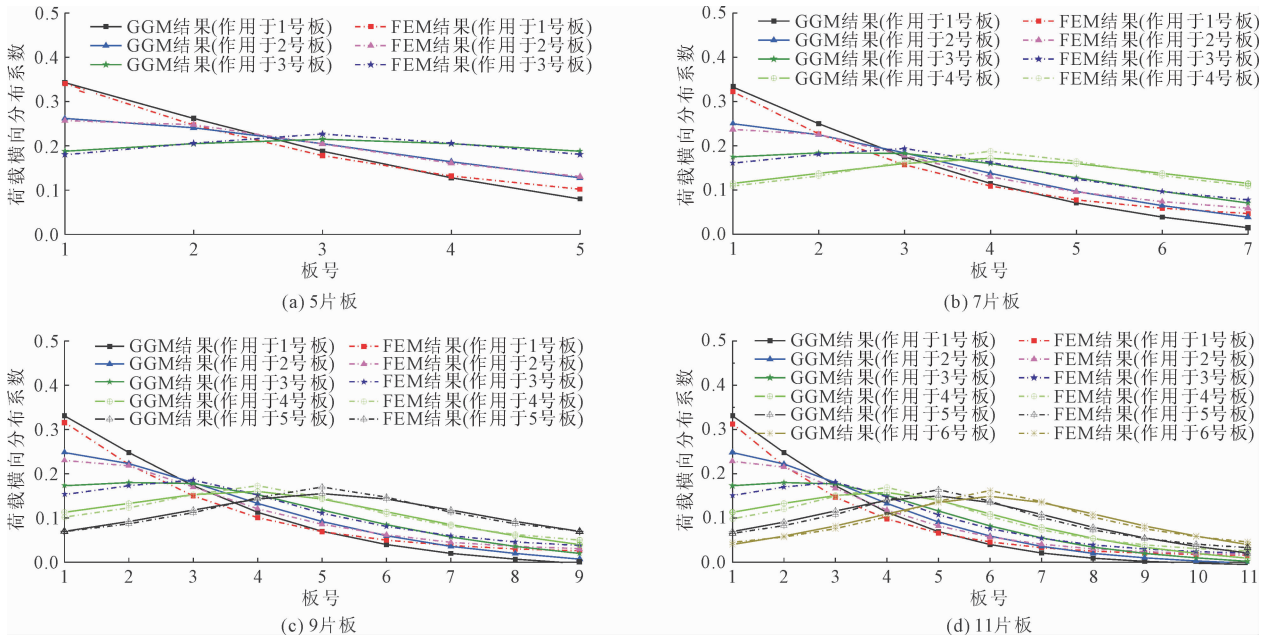


图 11 广义梁格法与有限元法的计算结果比较

3 整体化铺装层的等效横梁刚度取值

3.1 与试验结果的比较

采用广义梁格法进行整体化铺装层加固后空心板桥的荷载横向分布计算时,铺装层的等效横梁刚度取值是关键问题。为了讨论整体化铺装层的等效横梁刚度取值,通过设定不同的横梁等效高度折减系数计算横梁的等效刚度,并与试验结果进行比较。

利用广义梁格法计算不同横梁高度折减系数的取值对荷载横向分布计算结果的影响,并与试验结果进行比较,结果如图 12 所示。图 12 同样验证了广义梁格法计算荷载横向分布的可靠性。

利用试验测得的荷载横向分布系数为 η_{ij} ,利用广义梁格法计算得到的荷载横向分布系数为 η_{ij} 。其中 i 表示第 i 片空心板, j 表示荷载作用在第 j 片空心板上。对于本文 5 片板的空心板桥,利用广义梁格法计算得到的荷载横向分布系数与试验结果的平均方差 Δ 和最大方差 $\Delta_{\max}$ 为:

$$\Delta = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (\eta_{ij} - \overline{\eta_{ij}})^2 \quad (11)$$

$$\Delta_{\max} = \max((\eta_{ij} - \overline{\eta_{ij}})^2) \quad (12)$$

将不同等效横梁高度取值计算得到的平均方差和最大方差示于图 13 中。从图 13 所示计算结果可以看出,折减系数取为 0.8 时误差最小。因此,对于采用整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布计

算时,建议按铺装层厚度的 0.8 倍计算等效横梁高度。

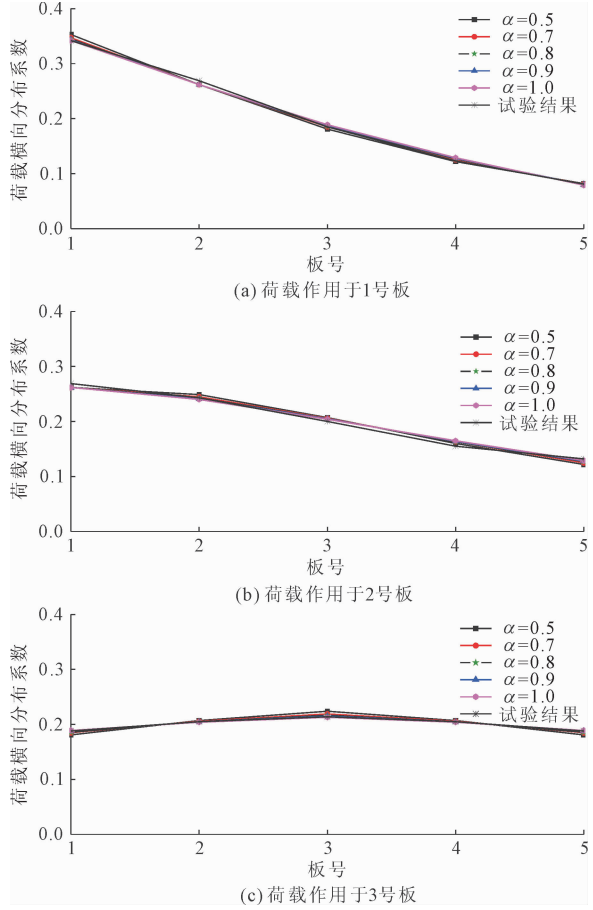


图 12 不同等效横梁高度对结果的影响

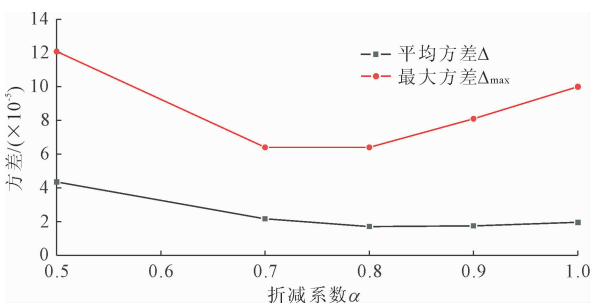


图 13 平均方差和最大方差计算结果

3.2 不同宽度桥梁的铺装层刚度取值

在设置不同横梁高度折减系数的情况下,利用

广义梁格法计算不同宽度的装配式空心板桥,采用整体化铺装层加固后的荷载横向分布系数,并将结果与有限元计算结果进行比较。其中,8 m 跨径 11 片板的空心板桥的荷载横向分布比较结果如图 14 所示。

参考 3.1 节关于广义梁格法与试验结果的平均方差和最大方差的计算方法,计算不同桥面宽度的情况下广义梁格法与有限元计算结果的平均方差,结果如图 15 所示。将不同空心板数量情况下,平均方差最小的折减系数取值示于图 16 中,可以看出,不同板数的空心板桥,铺装层的高度折减系数在 0.7~0.8 之间,桥越宽则取值越大。

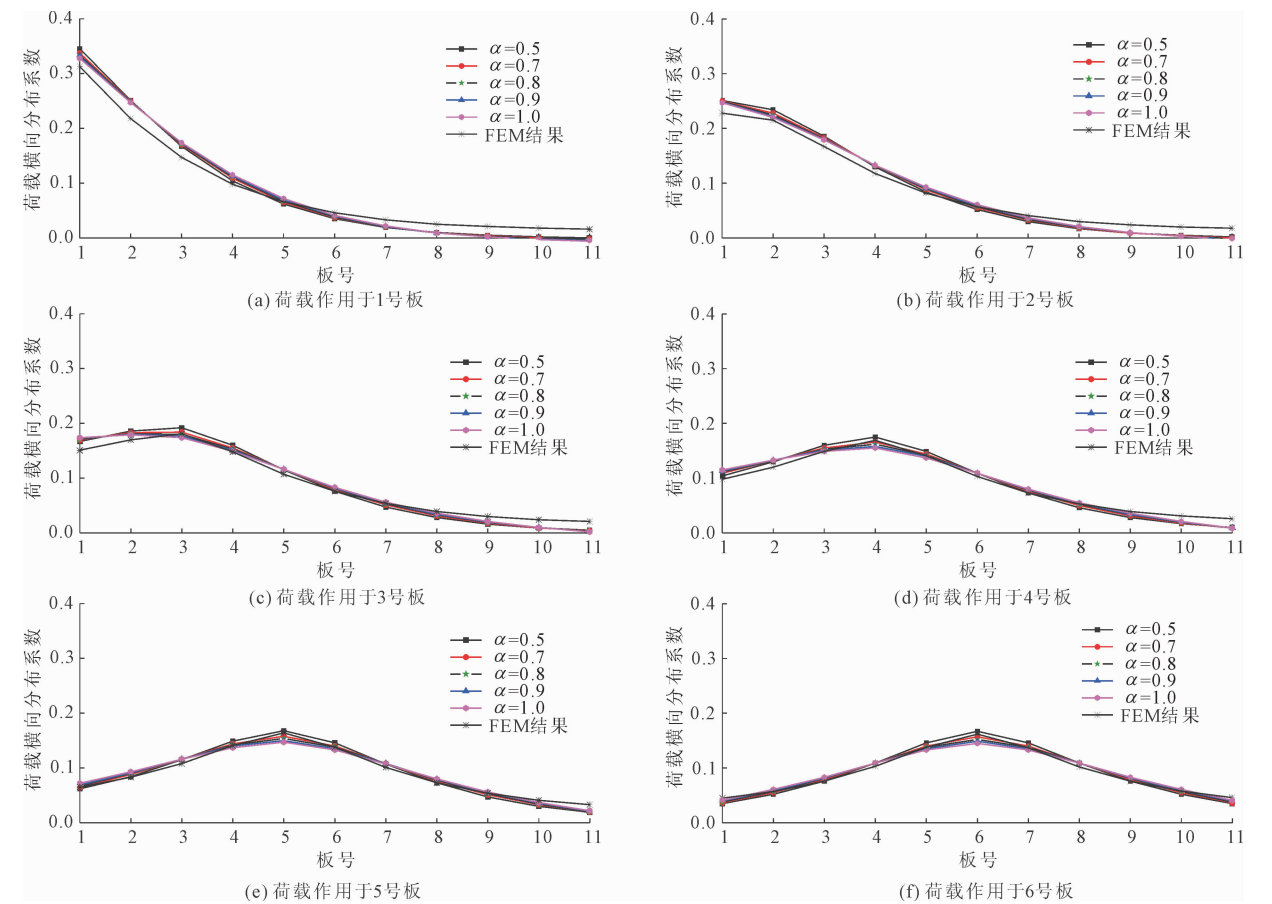


图 14 广义梁格法与有限元结果比较(11 片板)

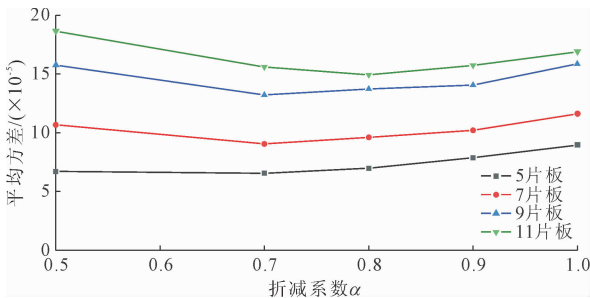


图 15 桥梁宽度对平均方差的影响

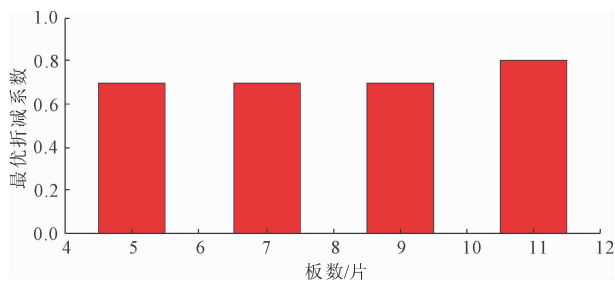


图 16 不同空心板数量的最优折减系数

3.3 不同跨径桥梁的铺装层刚度取值

在设置不同横梁高度折减系数的情况下,利用广义梁格法计算不同跨径的装配式空心板桥,采用整体化铺装层加固后的荷载横向分布系数,并将结果与有限元计算结果进行比较。16 m 跨径 5 片板的空心板桥的荷载横向分布比较结果如图 17 所示。

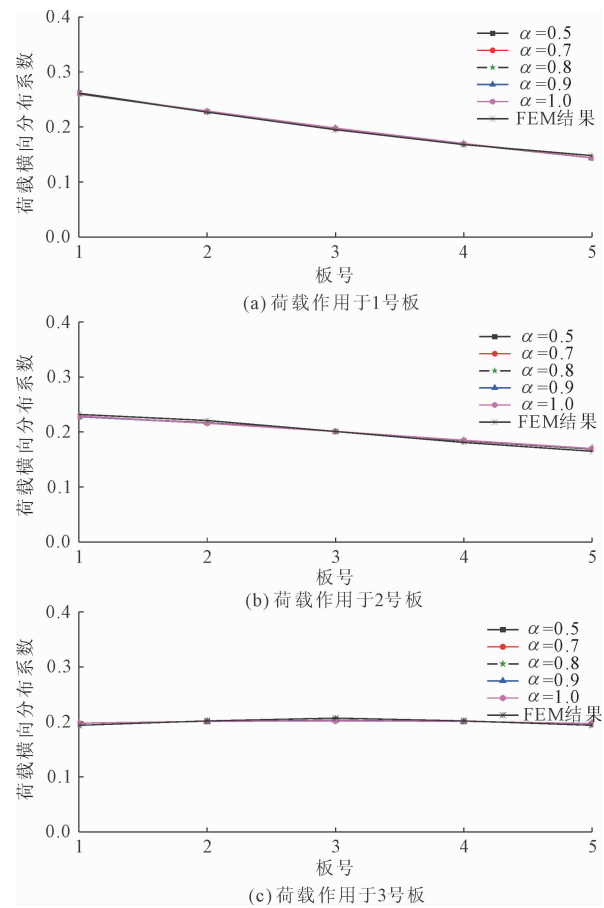


图 17 广义梁格法与有限元结果比较(16 m 跨径)

采用同样的方法计算不同跨径情况下广义梁格法与有限元计算结果的平均方差,结果如图 18 所示。将不同空心板数量情况下,平均方差最小的折减系数取值示于图 19 中,可以看出,不同跨径的空心板桥,铺装层的高度折减系数在 0.5~0.7 之间,跨径越大则取值越小。

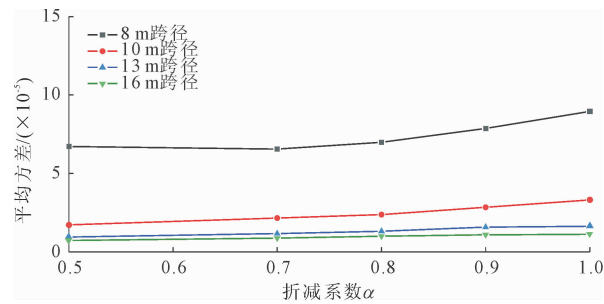


图 18 桥梁跨径对平均方差的影响

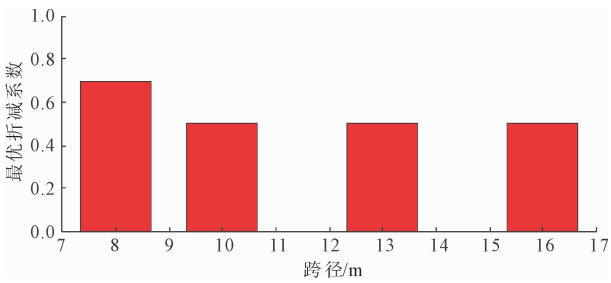


图 19 不同跨径的最优折减系数

4 结 论

- (1) 整体化铺装加固后的空心板桥的荷载横向分布系数的计算应考虑整体化铺装层的影响,本文提出基于广义梁格法对采用整体化铺装层加固的空心板桥的荷载横向分布进行计算。
- (2) 荷载横向分布系数计算结果表明,广义梁格法的计算结果可以准确考虑采用整体化铺装层加固空心板桥的荷载横向分布规律。
- (3) 不同横梁高度折减系数的计算并与试验和有限元结果对比表明,不同宽度、不同跨径的空心板桥,铺装层的高度折减系数取值在 0.5~0.8 之间时,计算结果更加精确。桥越宽则折减系数取值越大,跨径越大则折减系数取值越小。

参考文献:

[1] 刘红义,张劲泉,周建庭,等. PC 空心板梁裂缝变化抗弯足尺试验研究[J]. 桥梁建设,2021,51(6):92-98.

[2] 张劲泉,李鹏飞,董振华,等. 服役公路桥梁可靠性评估的若干问题探究[J]. 土木工程学报,2019,52(S1):159-173.

[3] Liang Zhuoxi, Xiong Zhihua, Cong Tuotuo, et al. Damage identification of Chi River bridge based on vehicle excitation and WPEVCR[J]. Advances in Bridge Engineering, 2023,21(4):1-14.

[4] 宋诗飞,邓明科,张阳玺. 纤维网格-高延性混凝土加固预制空心板抗弯性能试验研究[J/OL]. 工程力学:1-13[2024-04-10].

[5] 姚清涛,陈国友,洪 万,等. 空心板桥加固技术及效果评估[J]. 世界桥梁,2023,51(2):111-118.

[6] 原国华,黄 帅. 后浇混凝土铺装层加固预应力混凝土空心板的受剪性能研究[J]. 公路,2021,66(10):150-153.

[7] 王保群,邢德进,陈成勇,等. 高速公路改扩建既有桥梁承载力评定[J]. 公路,2021,66(8):216-220.

[8] 何肖斌. 整体化铺装层加固空心板桥受力性能试验研究[J]. 南昌大学学报(工科版),2023,45(3):268-274.

[9] Seible F, Lathem C T. Analysis and design for structural concrete bridge deck overlays [J]. Journal of Structural Engineering, 1990,116(10):2711-2726.

[10] 徐志华,彭德清,汪晓红,等. 桥面铺装协同受力的空心板梁抗弯承载力研究[J]. 公路交通技术,2022,38(5):49-57.

[11] 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,2021.

[12] 李兴锋,孔晨光,程烽雷,等. 空心板梁桥整体化层厚度对受弯失效模式的影响[J]. 公路,2020,65(9):119-124.

[13] 周湘君,廖睿轩,王俊杰,等. 无铰缝空心板桥设计与仿真分析[J]. 南昌大学学报(工科版),2023,45(3):261-267.

[14] 赵亚娟. 中小跨径空心板桥抗剪承载力提高方法研究[D]. 济南:山东交通学院,2024.

[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.

[16] 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.

[17] 郭建民,徐飞萍,康 良,等. 考虑整体化层作用的空心板梁桥荷载横向分布计算与承载能力分析[J]. 结构工程师,2021,37(2):194-199.

[18] 梁瑞卿,姜燕玲,王振宇,等. 桥面混凝土铺装层对空心板桥横向刚度影响试验[J]. 土木工程与管理学报,2022,39(4):99-106.

[19] 苏 佩,钱若霖,赵春晨. 考虑铺装层的空心板桥荷载横向分布系数计算[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):39-43.

[20] Aashto Lrfd. Bridge design specification 4th edition [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2007.

[21] 郑振飞,吴庆雄. 广义梁格法计算弯梁桥径向水平荷载的横向分布[J]. 福州大学学报(自然科学版),1999,27(3):1-6.

[22] 刘发水. 整体化铺装层加固空心板理论最优厚度分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):26-31,53.

[23] 黄宛昆. 采用改进型铰缝的装配式空心板桥受力性能与设计计算方法[D]. 福州:福州大学,2022.

(上接第 118 页)

[9] Vrakas A, Anagnostou G. Ground response to tunnel re-profiling under heavily squeezing conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(7):2753-2762.

[10] 张定邦,杨 盼,袁建议,等. 钻爆法开挖隧道围岩变形特征研究[J]. 湖北理工学院学报,2015,31(6):39-42.

[11] 陈志敏. 高地应力软岩隧道围岩压力研究和围岩与支护结构相互作用机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(3):647.

[12] Hoek E, Guevara R. Overcoming squeezing in the yacambú-quibor tunnel, venezuela[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000,42(2):389-418.

[13] 张顶立,孙振宇,陶伟明. 隧道围岩大变形灾害特点与主动控制方法[J]. 铁道标准设计,2023,67(1):1-9.

[14] 杨友彬,郑俊杰,赖汉江,等. 一种改进的隧道开挖应力释放率确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2251-2257.

[15] 宋应潞,潘建平. 基于强度折减与刚度退化小净距隧道围岩稳定性研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(9):24-30.