

考虑铺装层的空心板桥荷载横向分布系数计算

苏 佩, 钱若霖, 赵春晨

(陕西工业职业技术学院 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:传统铰接板法计算空心板桥的横向分布并未考虑铺装层对整体刚度的贡献作用, 尤其针对大铺装层或采用整体化铺装加固的桥梁工程, 该方法过于保守。为精确计算, 节约设计成本, 考虑桥面铺装层对于空心板桥横向分布的影响, 通过理论分析推导考虑整体化铺装的横向分布计算方法, 结合有限元分析和实桥荷载试验反算横向分布结果, 验证了理论的正确性。结果表明, 铺装层提高了桥梁截面刚度, 考虑铺装的修正铰接板法更加契合空心板桥实际受力状况, 并有效提高了各板承载能力的均匀性, 有效避免单板受力的情况。

关键词:铺装层; 铰接板法; 有限元; 荷载横向分布

中图分类号: U443.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)01-0039-05

0 引言

我国现有梁式桥中无论新建桥梁还是旧桥, 空心板桥型在公路桥梁中仍占有很大的比例。对于这类桥的横向分布计算, 美国 AASHTO 规范于 1994 年和 2007 年先后提出了活载横向分布计算公式^[1], 前者仅考虑主梁间距和类型, 后者综合考虑了跨径、铺装层厚度、间距和纵向刚度等因素, 使计算更加精确。我国目前采用的空心板桥横向分布计算多采用铰接板法^[2], 该方法忽略了铺装层对梁体结构截面刚度的贡献作用, 而这种作用, 铺装层越厚则越明显。高鹏飞^[3]考虑铺装层厚度由 8 cm 逐级递增到 20 cm, 对跨中截面抗弯承载力的变化情况展开研究, 随着铺装层厚度的增加, 跨中截面抗弯承载力成线性增长趋势; 王锋^[4]通过室内试验和有限元分析发现采用现有铰接板法求得的荷载横向分布结果与有限元相差较大, 且随着铺装厚度的增加, 荷载分布趋于均匀; 王渠等^[5]提出了一种考虑铺装厚度的拼宽桥荷载横向分布计算方法, 相应计算结果与试验偏差仅为 2.7%; 刘发水^[6]以装配式空心板桥为研究对象, 讨论了不同跨径下整体化铺装层理论最优厚度, 以满足承载力要求; 赵伟光等^[7]就单板受力现象提出并验证了通过设置一定厚度的桥面铺装可以有效恢复桥梁上部结构受力, 进而提高桥梁使用寿命。

实际结构中, 桥面铺装与主梁连接紧密, 一定程度上参与了结构整体受力, 尤其针对采用整体化铺装加固的桥梁或者拼宽桥梁结构的整体铺装层, 铺装结构层对于横向分布的计算影响不容忽视^[7-9]。这说明铺装对于结构受力的影响逐渐突显, 尤其对于大厚度铺装层的桥梁, 对于考虑铺装影响的横向分布研究很有必要。因此, 以空心板桥梁为研究对象, 在传统铰接板法的基础上提出一种考虑铺装层的修正铰接板法用以计算横向分布, 并依托工程实例, 通过有限元模型分析和实桥荷载试验挠度反算验证了理论的正确性。

1 考虑整体化铺装横向分布计算

1.1 传统铰接板法横向分布计算方法

对于空心板桥, 传统的铰接板法并未考虑铺装层的影响, 仅仅以主梁截面的截面特性值展开计算, 假设梁板间的铰缝只传递竖向的剪力, 如图 1 所示, 引入赘余力素剪力 $q_i, i=1, 2, \dots, n-1, n$ 为空心板数

收稿日期: 2021-11-25 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20210246

基金项目: 陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目(20JK0501); 陕西工业职业技术学院院级科研基金资助项目(2021YKYB-069)

作者简介: 苏佩(1993—), 女, 助教, 研究方向为桥梁结构分析。E-mail: 137122325@qq.com

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.

量。根据力法原理建立方程

$$\delta_{ij}X + \Delta_{ip} = 0 \tag{1}$$

式中, X 为赘余剪力; δ_{ij} 为单位荷载作用在 j 板上在第 i 块板处引起的变位; Δ_{ip} 为外荷载 p 在第 i 块板处引起的变位。

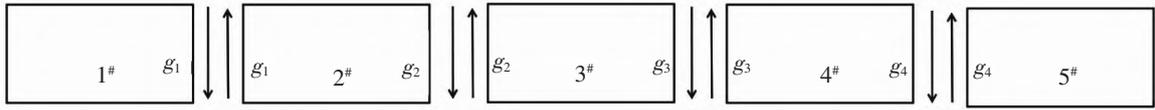


图 1 传统方法受力体系

1.2 考虑整体化铺装的横向分布计算方法

根据传统铰接板法理论, 铰缝仅传递竖向剪力, 从而达到各板均摊受力的效果, 而整体化铺装层是一个完整的结构面, 将其分割成 i 片与主梁材料和截面特性都不同的板, 各板之间除传递剪力外, 还有弯矩, 这与铰接板梁法的基本体系类似, 只不过在铺装层截面之间考虑了多余的弯矩, 因此考虑整体化铺装的空心板桥(以四梁式为例说明)简化为图 2 所示基本体系。

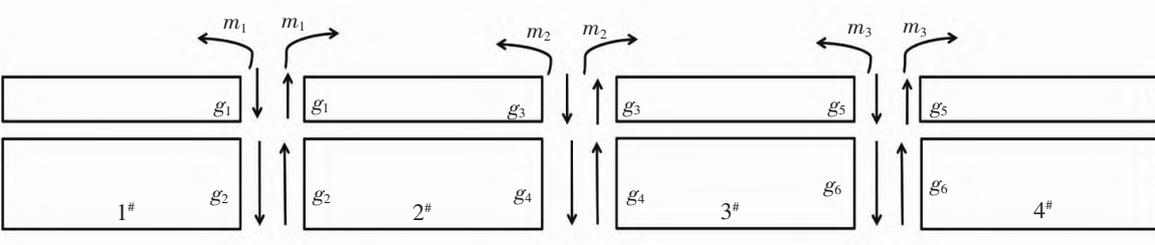


图 2 结构基本体系

因为结构中未知力个数较多, 按原有理论计算方程数不足, 无法求解, 还考虑到铺装层材料特性与既有结构不同, 故先对不同材料层的弹性模量和截面抗弯惯矩进行等效转换, 继而将假设切割面剪力代数和叠加以减少未知数个数, 最终计算求解影响线竖标值。

1.2.1 既有板梁和铺装层整体截面特性

既有空心板结构采用统一的混凝土材料浇筑而成, 其截面抗弯惯矩 I 易求, 混凝土材料的各向同性也保证了其弹性模量的一致性。但无论是水泥路面还是沥青路面, 尤其是大厚度铺装层, 其面层、基层、底基层均采用不同材料碾压铺筑而成, 且厚度不能忽视, 若均采用混凝土的材料特性则会造成较大误差, 因此, 引入一个平均刚度值的概念, 用来表示带铺装层的空心板整体平均刚度值 EI , 将其代入力法方程进一步求解赘余力, 精确计算。

假设既有空心板截面抗弯惯矩为 I_0 , 材料弹性模量为 E_0 , 其上铺装层不同层截面抗弯惯矩和弹性模量分别为 I_i, E_i , 不同的抗弯惯矩代表截面对于弯矩的抵抗能力, 故按照加权平均的原则计算平均刚度值 EI , 如式(2)所示。

$$EI = E_0 \frac{I_0^2}{\sum_{i=0}^n I_i} + \sum_{i=1}^n \frac{E_i I_i^2}{\sum_{i=0}^n I_i} \tag{2}$$

式中, EI 为结构刚度换算平均值; i 为铺装层第 i 层, 共计 n 层。

1.2.2 考虑整体化铺装层的剪力计算

基于结构刚度的换算平均值, 各赘余力素前系数值便可计算出来, 考虑到假设切割面的剪力叠加, 同时忽略桥面板截面的纵向剪力和法向力, 将其剪力之和视为一个未知数, 建立力法方程如式(3)所示, 其未知力个数与方程数量一致。

$$\begin{cases} \delta_{11}(g_1 + g_2) + \delta_{12}(g_3 + g_4) + \delta_{13}(g_5 + g_6) + \delta_{14}m_1 + \delta_{15}m_2 + \delta_{16}m_3 + \delta_{1p} = 0 \\ \delta_{21}(g_1 + g_2) + \delta_{22}(g_3 + g_4) + \delta_{23}(g_5 + g_6) + \delta_{24}m_1 + \delta_{25}m_2 + \delta_{26}m_3 + \delta_{2p} = 0 \\ \delta_{31}(g_1 + g_2) + \delta_{32}(g_3 + g_4) + \delta_{33}(g_5 + g_6) + \delta_{34}m_1 + \delta_{35}m_2 + \delta_{36}m_3 + \delta_{3p} = 0 \\ \delta_{41}(g_1 + g_2) + \delta_{42}(g_3 + g_4) + \delta_{43}(g_5 + g_6) + \delta_{44}m_1 + \delta_{45}m_2 + \delta_{46}m_3 + \delta_{4p} = 0 \\ \delta_{51}(g_1 + g_2) + \delta_{52}(g_3 + g_4) + \delta_{53}(g_5 + g_6) + \delta_{54}m_1 + \delta_{55}m_2 + \delta_{56}m_3 + \delta_{5p} = 0 \\ \delta_{61}(g_1 + g_2) + \delta_{62}(g_3 + g_4) + \delta_{63}(g_5 + g_6) + \delta_{64}m_1 + \delta_{65}m_2 + \delta_{66}m_3 + \delta_{6p} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

进一步,以 1# 梁为例,将计算结果代入式(4),各梁横向分布影响线竖标值计算如下

$$\begin{cases} \eta_{11} = 1 - (g_1 + g_2) \\ \eta_{12} = (g_1 + g_2) - (g_3 + g_4) \\ \eta_{13} = (g_3 + g_4) - (g_5 + g_6) \\ \eta_{14} = g_5 + g_6 \end{cases} \quad (4)$$

式中, η 为影响线竖标值; g 为铰缝处剪力值。

2 有限元仿真横向分布分析

为研究整体化铺装对桥梁受力性能的影响,以一跨径 13 m 的 5 梁式标准空心板桥为研究对象,统一采用相同的材料和截面特性参数,分别以 8、10、12 cm 厚度铺装采用有限元进行建模分析,分别以点荷载形式作用于各梁的跨中处,提取每种工况下模型各梁跨中挠度值,按式(5)计算横向分布影响线竖标值,并绘制影响线。

$$\eta = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^5 f_i} \quad (5)$$

式中, η 为反算竖标值; f 为各梁挠度值。

以 3# 中梁的影响线图为例,由图 3 可以看出,随着铺装层厚度从 8 cm 增加到 12 cm,竖标值大小逐渐趋于均匀,峰值点从 0.257 减小至 0.228,减小幅度达 11.3%,这说明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;而且随着整体化铺装加固工艺的成熟,很多既有空心板桥加固采用大铺装整体混凝土结构层,并采用合理的配筋和构造措施,使得铺装层不再是单纯的结构层,它参与整体受力,并起到有效提高桥梁承载力水平的作用。

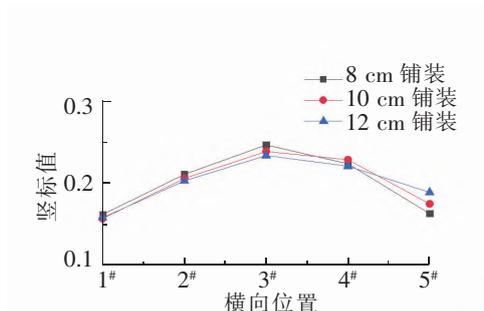


图 3 不同铺装厚度影响线

3 实桥分析验证

以一座 9 梁式空心板桥为例,跨径 13 m,空心板采用 C50 混凝土,容重 25 kN/m³,弹性模量为 3.45 × 10⁴ MPa。加固铺装层厚度取 250 mm,分为 150 mm 厚 C50 混凝土现浇基层和 100 mm 沥青面层 2 部分,各材料特征值经试验确定,弹性模量分别取 3.45 × 10⁴ MPa 和 1 500 MPa。空心板截面如图 4 所示。

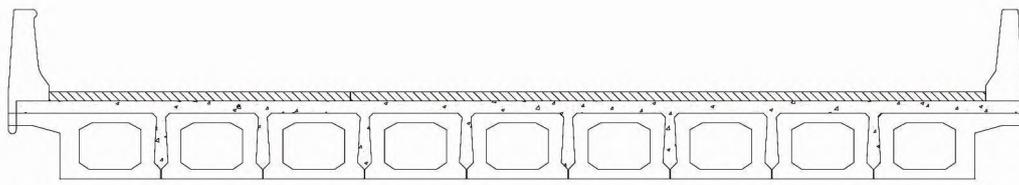


图 4 空心板标准横断面

分别采用传统铰接板法、考虑铺装后的修正铰接板法、有限元法进行计算。铰接板法按查表法计算;考虑铺装影响,根据式(2)~式(5),代入空心板截面参数特征值,进行多元线性方程的求解可得各梁影响

线竖标值;对于有限元法,采用梁格法进行建模并附加整体板单元来考虑铺装的影响,梁体和铺装材料特征值按上述参数在模型中输入相应参数,分别以单位集中力作用于各梁,提取不同工况下挠度值,以 5# 梁为例,图 5 为集中力作用在 5# 梁跨中位置处挠度云图。按照式(5)反算影响线竖标值。

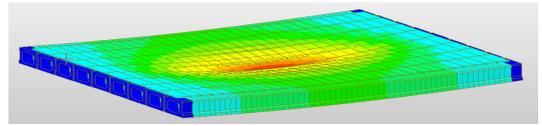


图 5 空心板有限元挠度云图

实桥荷载试验纵桥向按跨中截面弯矩及挠度最不利位置布载,横桥向为中载布置,如图 6 所示。实桥荷载试验中载作用下跨中横向分布系数为在式(5)的基础上乘以车道数 n ,即

$$\eta = n \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \tag{6}$$

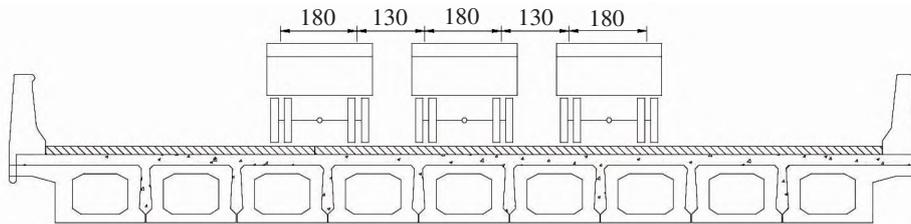


图 6 横桥向中载示意(单位:cm)

以中梁 5# 梁为例,将不同计算方法下的竖标值列于表 1,分别绘制 3 种计算方法下的影响线,如图 7 所示,进一步以实桥荷载试验工况布车方案进行布车,求得横向分布系数。

表 1 竖标值及横向分布系数

梁号	传统铰接板法	考虑铺装后	有限元法	荷载试验实测挠度值/mm
1#	0.070	0.071	0.070	5.8
2#	0.082	0.084	0.084	6.3
3#	0.108	0.109	0.108	6.3
4#	0.151	0.154	0.155	6.3
5#	0.178	0.165	0.166	6.3
6#	0.151	0.154	0.155	6.3
7#	0.108	0.109	0.108	6.2
8#	0.082	0.084	0.084	6.2
9#	0.070	0.071	0.070	6.1
横向分布系数	0.347	0.337	0.342	0.339

由表 1 和图 7 可以看出,考虑铺装的影响后,各梁影响线竖标值发生变化,其中 5# 梁峰值处分担的荷载明显降低,约为 9%,其他板梁处分担的荷载不同程度有所增加,这是因为铺装层的整体结构将上部力更加有效地传递给了相邻板梁,与 5# 板相邻的梁体竖标值增加最多,随着距离的增加,越靠近边梁则传力削弱越明显,增加幅度有限;考虑铺装影响的修正铰接板法与有限元计算和实桥荷载试验结果更加接近,说明计算精度有所提高,也验证了有限元法的正确性;从 5# 梁的横向分布系数值可以看出,在最不利布载作用下,考虑铺装后的计算方法横向系数值从 0.347 减小至 0.337,

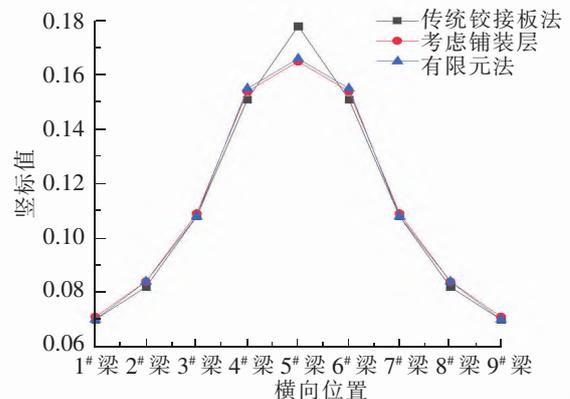


图 7 3 种方法的影响线

这是因为各块板和铺装层形成受力整体,从整体考虑可以认为体系刚度提高了约 2.9%,这说明铺装层的存在将荷载更均匀地分布于各梁板上,有效地避免了单板集中受力现象。

4 结论

(1)铺装层对于空心板桥的荷载横向分布性能有所提高,有效增加了桥梁截面刚度达 2.9%,形成受力整体,使荷载分布趋于均匀。

(2)考虑铺装层的铰接板梁法计算荷载横向分布精度更高,符合实际受力特点,为同类桥梁采用整体式铺装加固工程提供参考。

参 考 文 献

- [1]AASHTO LRFD. Bridge design specification[S]. 4th ed. Washington DC:American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO), 2007.
- [2]贺栓海. 公路桥梁荷载横向分布计算方法[M]. 北京:人民交通出版社, 1999.
- [3]高鹏飞. 装配式箱梁桥整体化层合理厚度分析[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [4]王锋. 桥面整体化铺装层加固空心板受力性能研究[D]. 福州:福州大学, 2015.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]赵伟光, 崔学坤, 康新亮. 大厚度整体化桥面铺装 in 旧桥加固中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015 (5): 234-235.
- [8]常诚. 现浇箱梁横向分布调整系数的实体有限元计算研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5):112-115.
- [9]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.

Calculation of Horizontal Load Distribution of Hollow Slab Bridge with Pavement

Su Pei, Qian Ruolin, Zhao Chunchen

(College of Civil Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: The traditional hinged plate method calculates the lateral distribution of the hollow slab bridge without considering the contribution of the pavement layer to the overall stiffness, especially for large pavement layers or bridge projects with integrated pavement reinforcement, therefore, it is often considered to be too conservative. In order to calculate accurately and save design costs, the article considered the influence of the bridge deck pavement on the horizontal distribution of the hollow slab bridge, and derived the calculation method of the horizontal distribution considering the integrated pavement through theoretical analysis, and combined the finite element analysis and the inverse calculation of the actual bridge load test. The horizontal distribution results verify the correctness of the theory. The results show that the pavement layer improves the rigidity of the bridge section, and the modified hinged plate method considering the paving is more suitable for the actual force condition of the hollow slab bridge, and effectively improves the uniformity of the load-bearing capacity of each slab, and effectively avoids the force of the veneer.

Key words: pavement layer; hinged plate method; finite element method; horizontal load distribution