

桥面铺装层刚度对简支空心板桥竖向基频的影响

刘聪聪¹, 张永亮¹, 朱尚清², 汪振新¹, 徐瑾¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070;

2. 北京市政路桥管理养护集团有限公司, 北京 100097)

摘要: 混凝土桥面铺装层对简支空心板桥竖向基频的影响主要来源于铺装层的质量和刚度贡献, 其中刚度又分为纵向刚度和横向刚度。传统分析模型中一般仅考虑铺装层的质量贡献, 而结构在质量相同的情况下, 刚度越大、竖向基频越大。为探讨铺装层刚度对简支空心板桥竖向基频的影响, 提出了3种有限元动力计算模型。通过大量的统计分析, 系统研究了不同铺装层厚度对不同标准跨径的正、斜交简支空心板桥竖向基频的影响规律。结果表明: 铺装层刚度对简支空心板桥的竖向基频影响显著, 基频变化率在14%~29%, 建议空心板桥自振频率评定时应考虑铺装层刚度贡献, 否则将高估结构的受力性能。在建立动力计算模型时, 正交空心板桥既可建立单板模型, 也可建立梁格模型, 斜交空心板桥应建立梁格模型。

关键词: 简支空心板; 动力计算模型; 桥面铺装刚度; 竖向基频; 梁格模型

中图分类号: U441.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2019)03-0247-07

引言

简支空心板桥具有外形简单、架设方便等优点, 在中小跨径公路桥中得到了广泛的应用。空心板截面厚度通常在70~95 cm之间。《公路桥涵设计通用规范》^[1]规定: 混凝土铺装层厚度不宜小于8 cm。为了提高铺装层的抗裂性和抗冲击性, 桥面板上一般设置锚固钢筋和抗剪钢筋, 以保证铺装层与桥面板的良好结合。由此可见, 随着施工工艺的提高, 以及对桥梁结构整体性的要求, 混凝土桥面铺装层与主梁之间的粘结逐渐加强, 铺装层参与梁板整体的结构性逐渐增强。因此混凝土铺装层对中小跨径空心板桥受力性能的影响不可忽略。对简支空心板桥进行承载能力评定时, 主要考虑两大指标: 静力性能指标和动力性能指

标。其中静力性能指标包括挠度校验系数和应力校验系数。文献研究表明: 对于简支空心板桥, 桥面铺装层与主梁共同受力, 增加了结构纵向刚度, 使结构的挠度及应力明显减小^[2-4]。《公路桥梁荷载试验规程》^[5]考虑到桥面铺装层与预应力空心板桥的共同作用效应, 将挠度及应力校验系数通常值分别设置在0.20~0.40、0.20~0.50之间。动力性能指标主要以桥梁竖向基频为主。《公路桥梁承载能力检测评定规程》^[6]根据实测自振频率 f_{mi} 与理论计算频率 f_{di} 的比值将自振频率划分为5个评定标度, 如对上部结构 $f_{mi}/f_{di} \geq 1.1$ 时, 为评定标度1。但在该评定规程中, 桥梁自振频率评定标准的划分并未区分桥梁结构的类型, 即未考虑桥面铺装与主梁的共同作

收稿日期: 2019-06-07; 修回日期: 2019-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768037); 甘肃省科技计划资助(17JR5RA103)

作者简介: 刘聪聪(1995-), 男, 硕士研究生在读, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: lcc3598@163.com

张永亮(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: zhangyong_L@126.com

用效应, 这对于梁高较大的大跨桥梁影响较小, 但对于板厚相对较小的空心板桥影响较大, 有限元建模若不考虑二者的共同作用效应, 在桥梁自振频率评定时会导致偏不安全的评价结果。徐松等^[7]采用试验分析与实桥测试等方法研究了桥面铺装对连续刚构桥和连续梁桥自振频率的影响, 赵庆云^[8]等研究了某简支空心板桥试验、有限元模型及规范建议, 并计算得出了 3 种基频的差异, 但关于桥面铺装层刚度对不同跨度与斜交角度简支空心板桥动力特性的系统性研究相对较少。鉴于此, 本文以 3 种标准跨径的简支空心板桥为研究对象, 采用 Midas/civil 软件建立有限元计算模型, 系统讨论了桥面铺装的不同模拟方法对空心板桥动力特性的影响规律。通过大量算例比较, 提出了适合于空心板桥的合理的动力计算模型。

1 简支空心板桥结构信息

以标准跨径为 13m、16m、20m 预应力混凝土简支空心板桥为研究对象, 单幅桥宽为 12.75m, 横截面由 10 个单板组成, 见图 1。单板的横截面尺寸见图 2。3 种跨度对应的板厚 h 分别为 0.7m、0.8m、0.95m。铰接缝、空心板以及混凝土桥面铺装均采用 C50 混凝土。为了研究桥面铺装厚度对桥梁自振频率的影响, 假设混凝土桥面铺装厚度 d 分别为 8cm、10cm、12cm。考虑桥梁正、斜交两种情况, 斜交角度 (梁轴线与支撑边线垂线的夹角) 在 0~30 度之间变化。

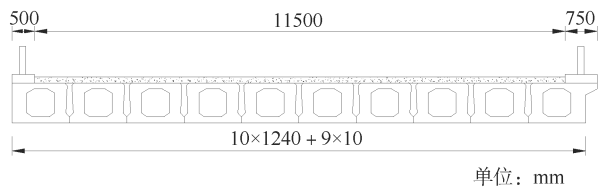


图 1 跨中横断面

2 有限元模型建立方法

对于简支空心板桥目前常用的建模方法为梁格法, 将板的纵向刚度集中于纵向梁内, 而横向

刚度集中于横向梁内^[9]。每一片空心板都用一根纵梁模拟, 各片纵梁间的连接用仅考虑刚度的虚拟横梁模拟 (忽略重量), 为了模拟铰缝的受力性能, 虚拟横梁在铰缝处的节点应释放绕纵梁转动的自由度, 见图 3。对于斜交空心板桥, 考虑到其受力的特点, 网格的划分宜采取虚拟横梁与纵梁互相垂直的划分方法, 见图 4。

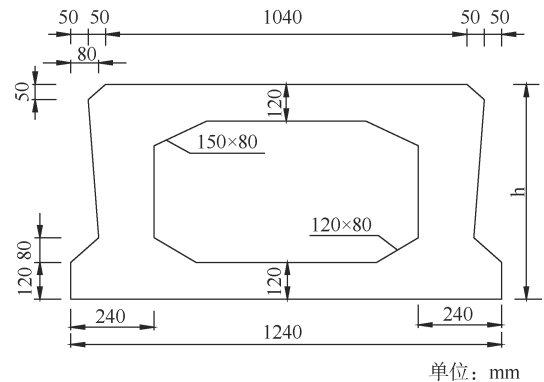


图 2 单板横断面

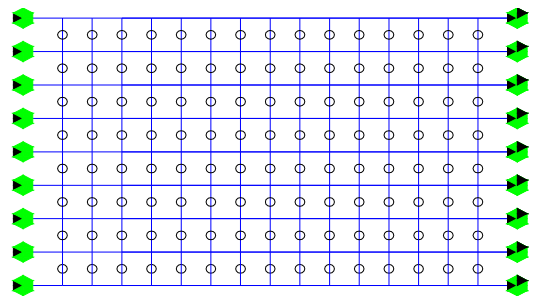


图 3 正交桥有限元模型

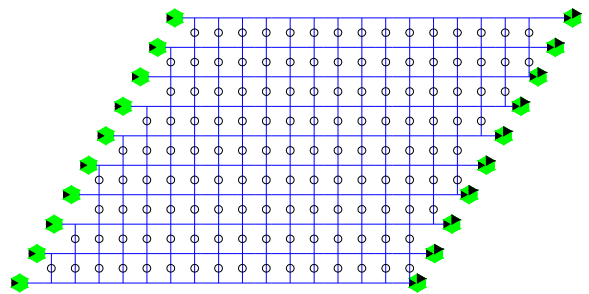


图 4 斜交桥有限元模型

为了研究桥面铺装与空心板的共同作用效应, 本文采用 3 种计算模型, 3 种模型均考虑了桥面铺装的质量贡献, 但桥面铺装的刚度贡献考虑方式不同。

模型 1: 不考虑桥面铺装的刚度贡献。梁格法

中纵、横梁的刚度仅考虑空心板自身的几何特性。

模型 2：仅考虑桥面铺装层在纵梁内的刚度贡献，纵梁建模时，将桥面铺装的厚度累加至空心板的顶板厚度中，而虚拟横梁的几何特性不考虑铺装层厚度的影响。

模型 3：同时考虑桥面铺装层在纵、横梁内的刚度贡献，纵、横梁建模时，将桥面铺装的厚度分别累加至空心板和虚拟横梁的顶板厚度中。

本文采用 Midas/civil 有限元软件，基于空心板桥的几何信息及受力特点，建立梁格模型。其中纵、横梁均采用空间梁单元模拟，纵梁采用空心板截面形式，横梁采用工字形截面形式。对于模型 1，在程序中通过将“二期荷载转化为质量”的方式来考虑桥面铺装的质量效应。对于模型 2、3，通过定义材料的容重来考虑桥面铺装的质量效应。3 种模型中纵、横梁的截面特征见图 5、图 6。

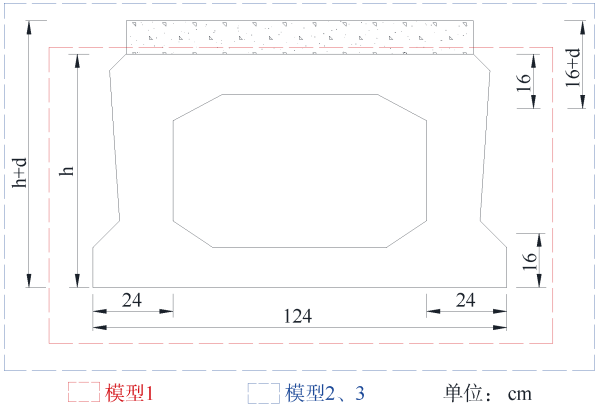


图 5 纵梁截面特征

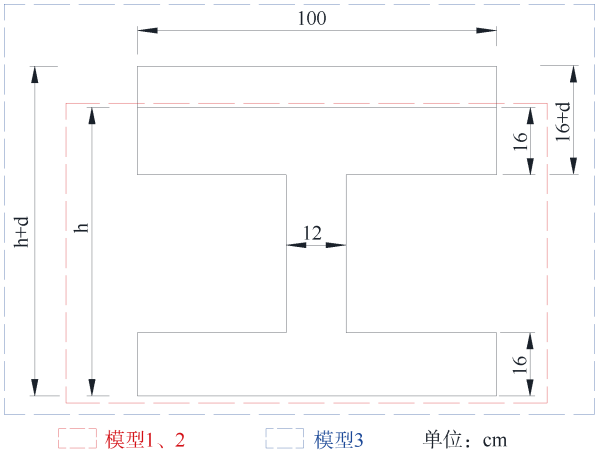


图 6 虚拟横梁截面特征

3 正交空心板桥分析结果

文献指出：结构竖向第一阶振动频率（也称基频）是结构整体刚度的重要评判指标^[10,11]。为了研究桥面铺装与空心板的共同作用效应，使用本文提出的 3 种计算模型分别对标准跨径 13m、16m、20m 的空心板桥进行建模分析，同时考虑桥面铺装层厚度分别为 8cm、10cm、12cm，相互组合共计建立 27 个计算模型。提取的正交空心板桥竖向基频见表 1，相应的一阶竖向振型图见图 7。为了便于定量描述桥面铺装层对空心板桥竖向基频的影响规律，引入了基频变化率。模型 1、3 的基频变化率定义为： $\Delta f_{1,3} = (f_3 - f_1) / f_1$ 。 f_1 、 f_3 分别为模型 1、3 的竖向基频。同理模型 1、2 与模型 1、3 的基频变化率分别为 $\Delta f_{1,2}$ 、 $\Delta f_{2,3}$ 。不同厚度的桥面铺装对各标准跨径的空心板桥竖向基频的影响程度见图 8。

表 1 正交空心板桥竖向基频汇总(Hz)

模型	铺装层 厚度 (cm)	跨度 (m)		
		13	16	20
模型 1	8	7.43	5.69	4.38
	10	7.27	5.58	4.30
	12	7.14	5.47	4.23
模型 2、3	8	8.88	6.71	5.08
	10	9.04	6.81	5.15
	12	9.19	6.92	5.22



图 7 正交桥竖向一阶竖向振型

由表 1 及图 7、图 8，可以得到如下结论。

(1) 对于标准跨径为 13~20m 的正交空心板桥，桥面铺装对桥梁的竖向基频影响显著，基频变化率在 15%~29%。因此建议在评定空心板桥的动力特性时，应考虑混凝土铺装层对主梁的刚度贡献，否则将导致理论计算值和实际情况不符。

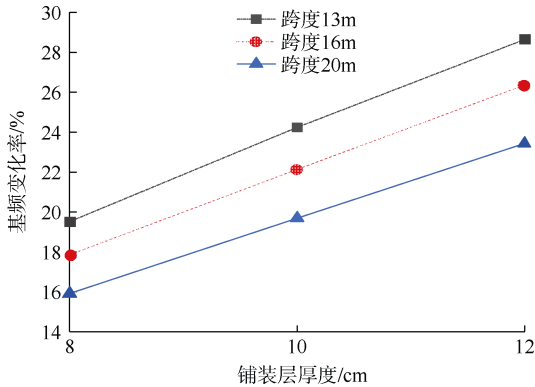


图 8 正交桥竖向基频变化率

(2) 当铺装层厚度不变时,随着跨度的增加,基频变化率越小,其中 20m 跨径、铺装层厚度为 8cm 时基频变化率最小,最小值为 15.91%;当跨度不变时,随着铺装层厚度的增加,基频变化率增大,其中 13m 跨径、铺装层厚度为 12cm 时基频变化率最大,最大值为 28.65%。根据以上结果可以看出,铺装层的作用实际上是增大了真实梁高,根据力学知识,主梁刚度和梁高成 3 次方关系,但与跨度成 4 次方关系。因此跨度越小,铺装层厚度对梁高影响越显著,进而对桥梁竖向基频的影响也越显著。

(3) 随着跨度的增加,各模型所计算的基频均减小。模型 1 的结构基频随着铺装层厚度的增

加逐渐减小,但模型 2、3 的结构基频变化规律与之相反,为逐渐增大。

(4) 模型 2、3 所计算的基频相等。表明对于各板刚度相等的正交空心板桥,全桥整体的竖向一阶振型与单板的竖向一阶振型相同,此时可用单板的竖向振动特性表征全桥特性,可忽略虚拟横梁的横向刚度贡献。若考虑混凝土桥面铺装层刚度的影响时,可仅将铺装层厚度按照等效刚度计入主梁的顶板中,用单梁模型代替全桥模型进行动力分析。

4 斜交空心板桥分析结果

4.1 斜交角度对空心板桥动力特性的影响

文献研究表明:斜交角度对简支空心板桥的基频有一定的影响^[12,13]。为了研究桥面铺装与斜交空心板共同作用效应,假设铺装层厚度为 10cm,以上述 3 种计算模型分别对标准跨径为 13m、16m、20m 的空心板桥进行建模分析,同时考虑斜交角度在 0~30 度之间,并以 5 度为间隔递增变化,相互组合共计建立 63 个计算模型。提取的斜交空心板桥竖向基频见表 2,相应的竖向一阶振型见图 9。桥面铺装对各斜交角度与标准跨径的空心板桥竖向基频的影响程度见图 10、图 11。

表 2 不同斜交角度空心板桥竖向基频汇总(Hz)

斜交角度 \ 跨度	13m			16m			20m		
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3
0	7.27	9.04	9.04	5.58	6.81	6.81	4.30	5.15	5.15
5	7.63	9.41	9.44	5.87	7.11	7.13	4.53	5.38	5.39
10	8.38	10.22	10.30	6.47	7.76	7.81	4.85	5.71	5.73
15	9.03	10.95	11.08	6.98	8.32	8.40	5.31	6.22	6.26
20	10.05	12.10	12.30	7.76	9.20	9.31	6.00	6.97	7.03
25	11.17	13.36	13.65	8.60	10.14	10.30	6.62	7.67	7.75
30	12.42	14.77	15.16	9.52	11.17	11.39	7.28	8.41	8.52



图 9 斜交桥一阶竖向振型

从表 2 及图 9~图 11 的计算结果可得到以下结论。

(1) 当铺装层厚度为 10cm,斜交角度在 0~30 度变化时,对 13m、16m、20m 跨径的空心板桥,

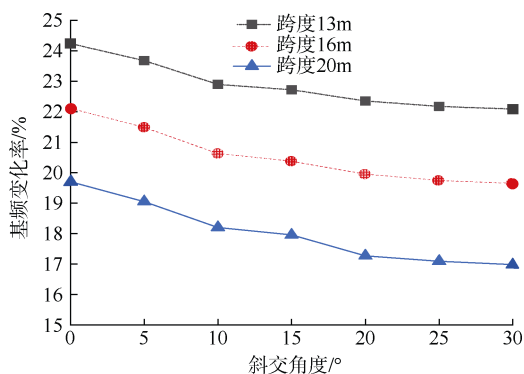


图 10 不同斜交角度模型 1、3 竖向基频变化率

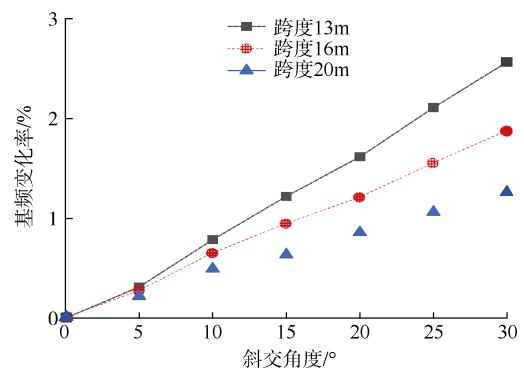


图 11 不同斜交角度模型 2、3 竖向基频变化率

$\Delta f_{1,3}$ 分别在 22%~25%、19%~23%、16%~20%之间变化，表明桥面铺装对空心板桥的竖向基频影响较大，尤其对板厚较小的小跨径空心板桥的影响更为显著。

（2）桥面铺装层对正交桥梁竖向基频的影响大于斜交桥梁，随着斜交角度的增大，桥面铺装的影响呈减小趋势。

（3）对于斜交角度在 0~30 度的斜交空心板桥，同一桥梁采用 3 种模型所计算的结构竖向基频不同，大小关系为： $f_1 < f_2 < f_3$ 。其中， $\Delta f_{1,3}$ 在 16%~25%之间，随着斜交角度的增大呈减小趋势。 $\Delta f_{2,3} < 3\%$ ，随着斜交角度的增大呈增大趋势。说明桥面铺装对空心板桥竖向弯曲刚度的影响是主要的。但当斜交角度较大时，桥面铺装在横向梁中的刚度贡献也不可忽略。建议对于斜交角度小于 30 度的空心板桥，可采用模型 2 进行竖向基频分析。对于斜交角度大于 30 度的空心板桥，应采用模型 3 进行竖向基频分析。

（4）与正交空心板桥相比，随着斜交角度的增大，斜交空心板桥有效跨径减小，结构纵向刚度增大，3 种模型所计算的结构竖向基频均逐渐增大，表明对于斜交空心板桥不能采用单梁模型按其斜交跨径进行动力特性分析，必须采用梁格法建立全桥有限元模型进行计算。

4.2 铺装层厚度对空心板桥动力特性的影响

假设斜交角度为 30 度，以上述 3 种计算模型分别对标准跨径为 13m、16m、20m 空心板桥建模，同时考虑桥面铺装层厚度分别为 8cm、10cm、12cm，相互组合共计建立 27 个计算模型。提取的斜交空心板桥竖向基频见表 3。桥面铺装对不同斜交角度与标准跨径的空心板桥竖向基频的影响程度见图 12、图 13。

表 3 不同铺装层厚度空心板桥竖向基频汇总(Hz)

模型	铺装层 厚度 (cm)	跨度 (m)		
		13	16	20
模型 1	8	12.68	9.71	7.42
	10	12.42	9.52	7.28
	12	12.17	9.34	7.15
模型 2	8	14.64	11.08	8.35
	10	14.77	11.17	8.41
	12	14.90	11.26	8.46
模型 3	8	15.01	11.29	8.46
	10	15.16	11.39	8.52
	12	15.38	11.53	8.59

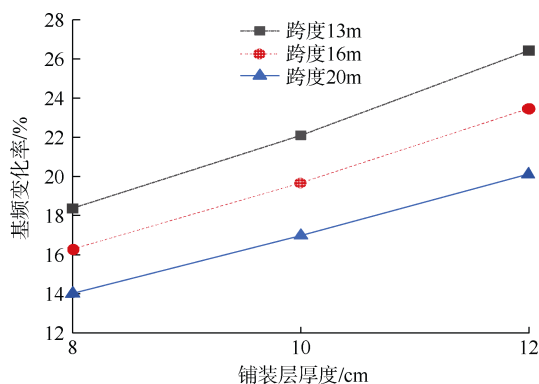


图 12 不同铺装层厚度模型 1、3 竖向基频变化率

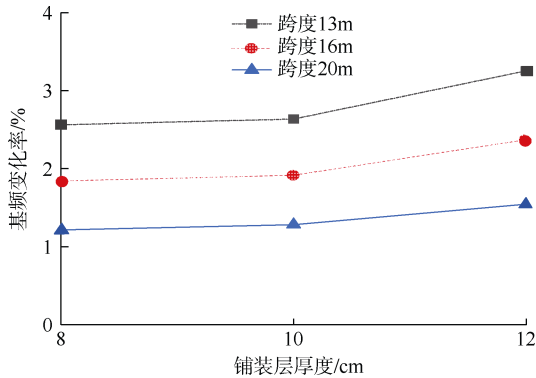


图 13 不同铺装层厚度模型 2、3 竖向基频变化率

从表 3 及图 12、图 13 的计算结果可得到以下结论。

(1) 对于标准跨径为 13~20m 的 30 度斜交空心板桥, $\Delta f_{1,3}$ 在 14%~27%, 表明桥面铺装对其竖向基频影响显著。当桥面铺装从 8cm 变化至 12cm 时, 13m、16m、20m 斜交桥的 $\Delta f_{1,3}$ 变化幅度分别为: 18%~27%、16%~24%、14%~21%, 说明随着桥面铺装层厚度的增加, $\Delta f_{1,3}$ 增加明显, 尤其对于小跨度空心板桥而言。

(2) 对于斜交角为 30 度的斜交桥来说, 当桥面铺装层厚度由 8cm 变为 10cm 时, $\Delta f_{2,3}$ 增加不明显; 但当其由 10cm 变为 12cm 时, $\Delta f_{2,3}$ 增加明显。说明桥面铺装层越厚, 桥面铺装对空心板桥的整体横向刚度贡献影响也增大。建议对铺装层厚度较大的小跨径空心板桥, 宜采用模型 3 进行竖向基频分析。

5 结论

为了探讨混凝土桥面铺装对空心板桥竖向基频的影响规律, 本文提出了 3 种有限元动力计算模型。通过对 3 种标准跨径 (13m、16m、20m), 3 种混凝土桥面铺装层厚度 (8cm、10cm、12cm), 以及 0~30 度 (以 5 度为间隔) 7 种斜交角度, 相互组合共建 117 个简支空心板桥有限元动力计算模型。经过大量的比较分析得出以下结论。

(1) 对于标准跨径为 13~20m 的正交或斜交空心板桥, 桥面铺装对桥梁的竖向基频影响显著,

基频变化率在 14%~29%。因此建议在空心板桥自振频率评定时, 应考虑混凝土铺装层对主梁的刚度贡献, 否则会导致偏不安全的评价结果。

(2) 对于正交空心板桥而言, 全桥整体的竖向一阶振型与单板的竖向一阶振型相同, 因此可用单板的竖向振动特性表征全桥特性。若考虑混凝土桥面铺装层刚度的影响时, 可仅将铺装层厚度按照等效刚度计入主梁的顶板中, 然后用单板模型代替全桥模型进行动力分析。

(3) 与正交空心板桥相比, 随着斜交角度的增大, 斜交空心板桥有效跨径减小, 结构纵向刚度增大, 3 种模型所计算的结构竖向基频均逐渐增大, 表明对于斜交空心板桥不能采用单梁模型按其斜交跨径进行动力特性分析, 必须采用梁格法建立全桥有限元模型进行计算。

(4) 在建立的 117 个有限元模型中, $\Delta f_{1,3}$ 在 14%~29%, $\Delta f_{2,3}$ 在 0~4%, 表明混凝土桥面铺装层刚度对中、小跨径预应力混凝土简支空心板桥基频的影响不可忽略, 且桥面铺装对空心板桥竖向弯曲刚度的影响是主要的。

(5) 跨度越小、混凝土桥面铺装层厚度越大, $\Delta f_{1,3}$ 、 $\Delta f_{2,3}$ 越大, 表明桥面铺装层厚度对板厚较小的小跨径空心板桥影响更为显著。对斜交桥来说: 虽然 $\Delta f_{2,3} < 4\%$, 但随着斜交角度、铺装层厚度的增大, $\Delta f_{2,3}$ 呈增大趋势。

参考文献

- [1] JTG D60—2015. 公路桥涵设计通用规范[s].
- [2] 石雄伟, 雷丹, 袁卓亚, 等. 桥面铺装对中小跨径 PC 梁桥校验系数影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 792-804.
- [3] 魏志刚, 刘寒冰, 时成林, 等. 考虑桥面铺装作用的简支梁桥横向分布系数计算[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(01): 105-112.
- [4] 康省桢, 王复明. 基于单板承载的钢纤维混凝土铺装结构工作性能试验分析[J]. 桥梁建设, 2010(6): 13-16.
- [5] JTG/T J21-01—2015. 公路桥梁荷载试验规程[s].
- [6] JTG/T J21—2011. 公路桥梁承载能力评定技术规程[s].

- [7] 徐 松, 朱利明, 邢世玲. 桥面铺装对中小跨径自振频率的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(22): 280-286.
- [8] 赵庆云, 王 磊, 李 明. 铺装层对空心板桥静动载特性的影响分析[J]. 公路, 2013, 58(11): 83-86.
- [9] 葛俊颖. 桥梁工程软件 midas civil 使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [10] Anil K. Chopra. 结构动力学理论及其在地震工程中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [11] R. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 邹正浩. 简支斜梁桥冲击系数计算方法研究[D]. 长安大学, 2013.
- [13] 夏樟华, 宗周红. 三跨斜交 T 梁动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 147-150, 177.

Effect of Bridge Deck Pavement Stiffness on Vertical Fundamental Frequency of Simply Supported Hollow Slab Bridges

Liu Congcong¹, Zhang Yongliang¹, Zhu Shangqing², Wang Zhenxin¹, Xu Jin¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Beijing Municipal Engineering Administration Department, Beijing 100097, China)

Abstract: The influence of concrete deck pavement on the vertical fundamental frequency of simply supported hollow slab bridges mainly includes the quality and stiffness contributions of the pavement, and this stiffness is divided into longitudinal and transverse stiffness components. The traditional analysis model only considered the quality contribution of the pavement, but the stiffness and vertical fundamental frequency of the structure increased with the same mass. In order to investigate the effects of pavement stiffness on the vertical fundamental frequencies of simply supported hollow slab bridges, three finite element dynamic calculation models were proposed. Through a large number of statistical analyses, the influence of different pavement thicknesses on the vertical fundamental frequencies of simply supported hollow slab bridges with different calculated spans were systematically studied. The results demonstrate that the pavement stiffness has a significant effect on the vertical fundamental frequency of a simply supported hollow slab bridge. The variation rate of the fundamental frequency is between 14% and 29%. It is suggested that the contribution of pavement stiffness should be taken into account when evaluating the fundamental frequency of the hollow slab bridge; otherwise, the mechanical performance of the structure will be overestimated. The influence law and degree of pavement stiffness on the vertical fundamental frequency of the orthogonal and skew hollow slab bridges are different. When building the dynamic calculation model, an orthogonal hollow slab bridge can help establish either the single slab model or the grillage model, and the skew hollow slab bridge should help establish the grillage model.

Key Words: simply supported hollow slab; dynamic calculation model; bridge deck pavement stiffness; vertical fundamental frequency; grillage model