

基于层间接触的空心板梁及桥面铺装在双轴移动荷载下的力学响应分析

包龙生¹,樊乾玉¹,兰皓²,顾盛³

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 北京建研住工建筑工程集团有限公司,北京 100000;3. 昆山市建设工程质量检测中心,江苏 昆山 215337)

摘要 目的 研究考虑铺装层间接接触的桥面铺装及空心板梁在双轴移动荷载下的受力状态,以解决混凝土桥梁在桥面铺装设计时对铺装层之间的关系状态考虑不全面的问题.方法 采用 ABAQUS 有限元软件建立含有沥青铺装层、粘结层、混凝土调平层、空心板及铰缝的数值模型,利用子程序模拟行车移动荷载,设置库仑接触摩擦建立层间接触,考虑不同荷位、层间摩擦系数对空心板梁及桥面铺装的影响.结果 铺装层间最大水平接触力出现在梁端区域;铰缝与空心板的挠度相差 10%,应力在轮载附近处变化较大;沥青铺装与粘结层间接接触摩擦应力为 0.209 3 MPa,大于混凝土铺装与粘结层间接接触摩擦应力 0.156 MPa;连续模型与接触模型的应力最大差值达 4.5 倍.结论 不同结构层间界面薄弱,易发生剪切破坏;为防止板与铰缝间发生剪切破坏,可加强轮载附近处板与铰缝的连接;采用不同措施处理各层之间的粘结,可使经济效益最大化;将铺装层视为连续体考虑不周,层间接触假定更符合实际情况.

关键词 装配式;空心板桥;层间接触;桥面铺装;移动荷载;粘结层

中图分类号 U445.4

文献标志码 A

Analysis of Mechanical Response of Bridge Deck Pavement under Two-Axis Moving Load Based on Interlayer Contact

BAO Longsheng¹, FAN Qianyu¹, LAN Hao², GU Sheng³

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Beijing Construction and Research Residential Engineering Group Co. Ltd., Beijing, China, 100000; 3. Gu Sheng Kunshan Construct Engineering Quality Testing Center, Kunshan, China, 215337)

Abstract: In order to solve the problem that the connection state between the pavement layers is

收稿日期:2019-04-05

基金项目:国家十三五重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201804)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程结构方面研究.

not comprehensively considered in the design of the bridge deck pavement, we study the stress state of the bridge deck pavement based on interlayer contact and the hollow slab beams under the two-axis moving load. A three-dimensional finite element numerical model containing asphalt paving layer, bonding layer, concrete leveling layer, hollow slab and hinge seam is established using ABAQUS finite element software, and the moving load is simulated by sub-program, and the interlayer contact between different structures is established by setting tangential Coulomb contact friction, considering the comprehensive influence of different loads and interlayer friction coefficient on the hollow slab girder and bridge deck pavement. The maximum horizontal contact force between the paving layers appears in the end of beam; the deflection difference between the hinge and the hollow slab is 10%, and the stress changes greatly near the wheel load; The contact friction stress between the asphalt pavement and the bonding layer is 0.209 3 MPa, which is greater than that between the concrete pavement and the bonding layer, 0.156 MPa; The stress of continuous model is about 4.5 times bigger than that of the contact mode; The interface between different structural layers is weak and prone to shear failure; in order to prevent shear failure between hollow slab and hinge seam, we can strengthen the connection between hollow slab and hinge seam near the wheel load; Different measures can be used to deal with different interlayers respectively to maximize the economic benefits; It is more in line with the actual situation to regard the paving layer as a interlayer-contact structure than a continuum.

Key words: assembly type; hollow slab bridge; interlayer contact; deck pavement; moving load; bonding layer

近几年我国的道桥工程取得了飞速发展,而桥面铺装的进展却相对落后。桥面铺装铺设在空心板上与主梁共同协调变形受力,既是桥面板的保护层也是功能层,然而在目前的设计中,常常不对桥面铺装进行受力分析^[1],沿用道路的设计施工技术和以往经验,造成桥面铺装在运营的早期就出现较严重的破坏^[2-7]。虽然现行规范认为桥面铺装各结构层之间是完全连续,但各层接触较弱并不能达到完全连续的状态^[8]。目前国内学者对桥面板铺装层自身的力学响应进行了相关研究,并取得了一定成果。刘云等^[9]将有限元与室内试验相结合,对防水粘结层进行力学分析;赵岩荆等^[10]研究了铺装层内力随上下面层模量变化的规律;袁桂芳等^[11]通过实桥试验,研究了桥面铺装和梁共同抵抗车荷载的受力程度;贾宏平^[12]用 ANSYS 研究了预应力混凝土空心板桥铺装层的力学性能;万晨光等^[13]采用 ANSYS 对不同接触条件下铺装层的力学响应进行了分析。

已有研究为后续分析提供了借鉴,但对于铺装层间接接触条件对整体桥梁在移动荷载

作用下受力情况影响研究较少。基于此,笔者以公路桥梁通用标准图集中的预应力混凝土空心板桥上部结构为依托,建立了包含沥青铺装层、粘结层、混凝土铺装层、空心板梁和铰缝的三维模型,通过设置面面接触的库仑摩擦系数,模拟铺装层与粘结层间的接触状态,引入 VDLOAD 子程序模拟双轴移动载荷在桥面上移动,从而对铺装层间接接触条件下,整体桥梁在移动荷载作用的受力情况进行分析,以解决混凝土桥梁在桥面铺装设计时对铺装层间的关系状态考虑不全面问题。

1 移动载荷设置

1.1 VDLOAD 基本原理

ABAQUS/cae 中仅能让载荷大小利用幅值随着时间变化,且作用位置固定不动,但用户可利用 VDLOAD 子程序编写一组与载荷的移动位置、数值大小、移动速度与加载时间相关的函数,通过定义载荷作用面,即可模拟多个荷载作用面在相应结构上的同时移动。首先将参数值传到用户子程序,经过子程序进

行编辑定义,最后调用子程序中设计的载荷,分析结构在移动荷载作用下的力学响应。

1.2 车辆载荷

假定车辆载荷均匀分布在车轮与铺装层的接触面上,实际形状如图 1(a) 所示^[14-15]。为方便模拟计算,将等效接触面积继续简化为等宽等面积的矩形(见图 1(b))。笔者采用文献[16]中的标准设计车队双轴荷载,即轴载分别为 110 kN 的双轴车辆荷载进行结构力学分析。车间纵桥向距离为 1.2 m,车轮横桥向距离为 1.8 m(见图 2)。

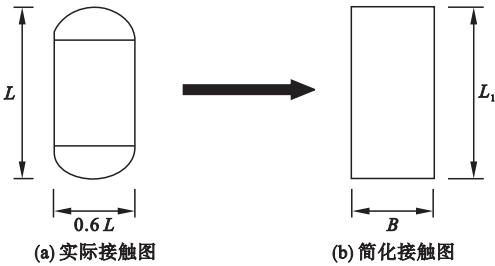


图 1 车轮接触转换图

Fig. 1 Wheel contact conversion diagram

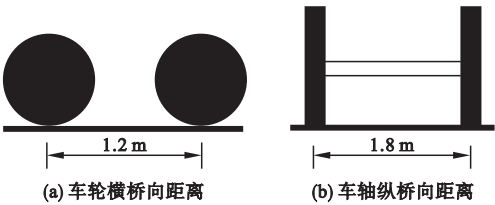
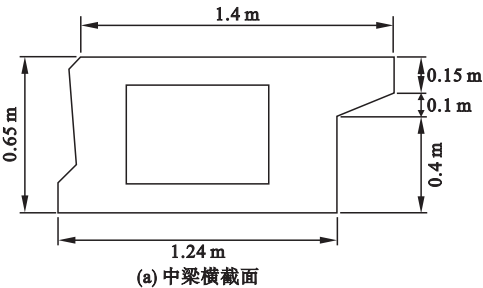


图 2 双轴车辆荷载图

Fig. 2 Biaxial vehicle load diagram

轮胎压力取 700 kPa,车轮与铺装面的接触面积 A 由式(1)求得,并推得式(2)。

$$\begin{cases} A = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L), \\ A = F/P. \end{cases} \quad (1)$$



$$\begin{cases} L = \sqrt{\frac{F/P}{0.09\pi + 0.24}}, \\ L_1 = \frac{A}{0.6L}, B = 0.6L. \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为接触面积; B 车轮横向宽; L 为实际轨迹长度; F 为单轮荷载; P 为轮胎压力; L_1 为简化轨迹长度。

结合图 2 与式(2)求得 $L_1 = L \approx 0.34$ m, $B = 0.6L \approx 0.2$ m, 所以将车轮接触面积近似为 0.34 m \times 0.2 m 矩形。

当汽车在桥梁上向前行驶时,铺装层受到车轮给他的向后的水平推力,此水平力可按式(3)确定:

$$F_1 = fP. \quad (3)$$

式中: F_1 为轮胎对路面水平力; f 为轮胎与车轮之间的摩擦系数; P 为车辆垂直荷载。

文献[17]研究表明,车辆正常行驶时, $f=0$; 车辆缓慢制动时, $f=0.2$; 当车辆正常紧急制动时, $f=0.5$; 车辆特殊情况紧急刹车时, $f=0.75$ 。文中在竖向载荷移动时取 $f=0$, 在竖向载荷静止时取 $f=0.5$ 。

2 有限元模型的建立

2.1 模型参数及尺寸

模型以公路桥梁通用标准图中的预应力混凝土空心板桥上部结构为依托^[18],选取上部结构跨中横断面进行建模。模型总共包含 9 片空心板梁及 8 铰缝。其中铰缝、空心板和混凝土调平层均采用 C50 混凝土作为材料。简化后的边跨及中跨横截面见图 3。模型各部分具体数值如表 1 所示。

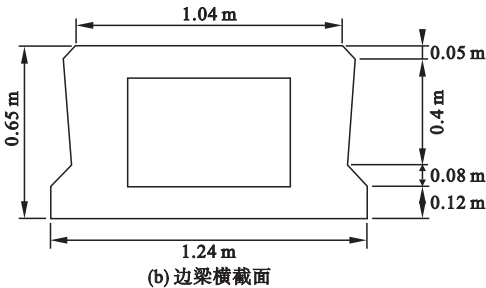


图 3 空心板中边梁横截面图

Fig. 3 Cross section of hollow slab

表1 材料参数
Table 1 Material parameters

构件名称	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
沥青铺装层	1 600	0.25	2 300
粘结层	200	0.3	300
混凝土层	3 450	0.166 7	2 700
铰缝	3 450	0.166 7	2 700
空心板	3 600	0.166 7	2 700

2.2 层间接触属性

笔者采用接触属性中的 Penalty 函数(库仑摩擦)定义铺装层间切向接触^[19],通过摩擦系数来指示两表面之间的相互接触的特性,以两个接触面在接触时结构单元不能相互渗透作为条件进行摩擦接触方程的持续运行计算,而两接触面发生相对滑动的条件是接触面间的切向应力值等于或超过其临界应力值,计算见式(4)、式(5):

$$\tau_{crit} = \mu \times P. \tag{4}$$

式中: τ_{crit} 为接触面间临界切应力; P 为接触面间的法向接触压强; μ 为接触面间的摩擦系数.

$$|F_T^A| = [(F_1^A)^2 + (F_2^A)^2]^{\frac{1}{2}} \leq \mu |F_N^A|. \tag{5}$$

式中: μ 为接触面间的摩擦系数; $|F_T^A|$ 为切向接触应力; $|F_N^A|$ 为法向接触应力.当 $|F_T^A| < |F_N^A|$ 时无滑动,当 $|F_T^A| = |F_N^A|$ 时发生切向相对滑动.

笔者采用线性软接触来定义铰缝与空心板之间的法向接触,取刚度为10的5次方;采用库仑摩擦定义空心板铰缝与空心板间的切向接触取0.1.图4为接触建立的过程图.

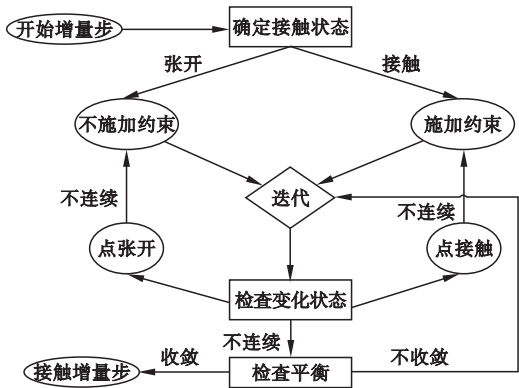


图4 接触建立流程图

Fig. 4 Contact establishment process

2.3 有限元模型建立

对结构特性和材料特性作以下假定:①空心板桥及铺装层均处于无裂缝弹性工作阶段;②铺装层与桥面板层间为连续连接,没有脱离现象;③各结构材料为均匀、连续、各向同性.

笔者使用 ABAQUS/explicit 处理器进行计算^[20].为了防止计算不收敛,模型分析步骤如下:第一个分析步进行面与面接触的施加.第二个分析步建立空心板和铰缝之间的三个面面接触,并在初始位置施加一个很小的荷载,使作用力能够平稳过渡,如图5所示.最后一个分析步建立车辆移动荷载,在作业编辑里调用 Fortran 文件,进行移动荷载的施加^[21],轨迹如图6所示.

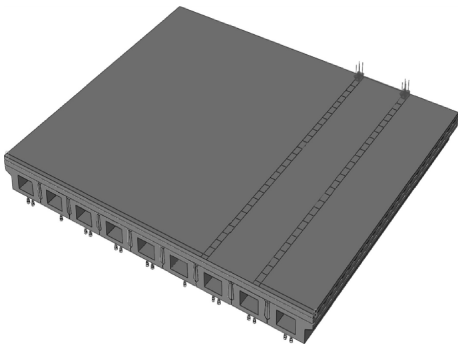


图5 过渡荷载示意图

Fig. 5 Transition load diagram

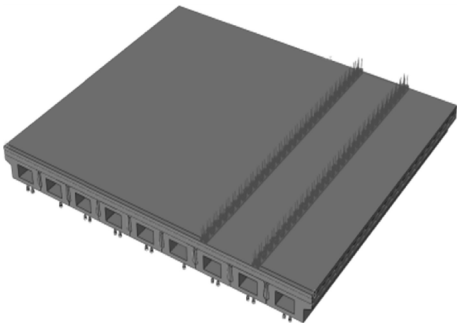


图6 移动荷载示意图

Fig. 6 Moving load diagram

3 空心板梁及桥面铺装计算结果分析

3.1 应力云图分析

图7为车速10 m/s 时上部结构在3个时

间点下的 Mises 应力云图,模拟汽车从前轮驶入桥面到后轮驶出桥面的整个过程. 图 7(a) 为汽车前轴刚进入结构区域的时间点,图 7(b) 为汽车行进到跨中的时间点,图 7(c) 为汽车前

轮行驶出此跨桥梁的时间点. 从图中可以看出,随着荷载前移,沥青铺装层、粘结石、混凝土铺装层、空心板梁和铰缝分别受到了不同程度应力,且轮载附近的结构力学响应较突出.

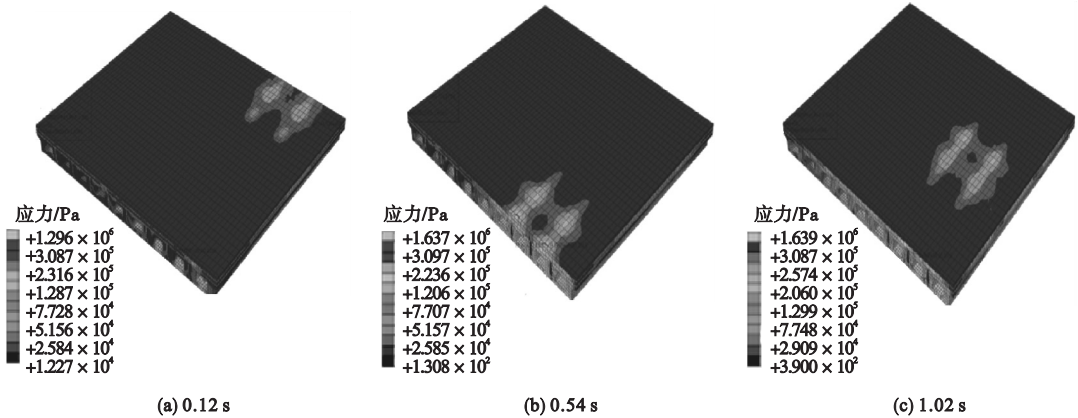


图 7 移动荷载经过桥面不同时刻下 Mises 云图

Fig. 7 Mises contour plot of moving load through the bridge deck at different time

3.2 各结构层随时间变化的力学分析

文中在铺装层间摩擦系数取 0.5、车速取 10 m/s 的条件下,观察上部结构各结构层

随时间的响应情况. 图 8 给出了各结构层竖向正应力、横向弯拉应力、纵向正应力及竖向位移的历程曲线.

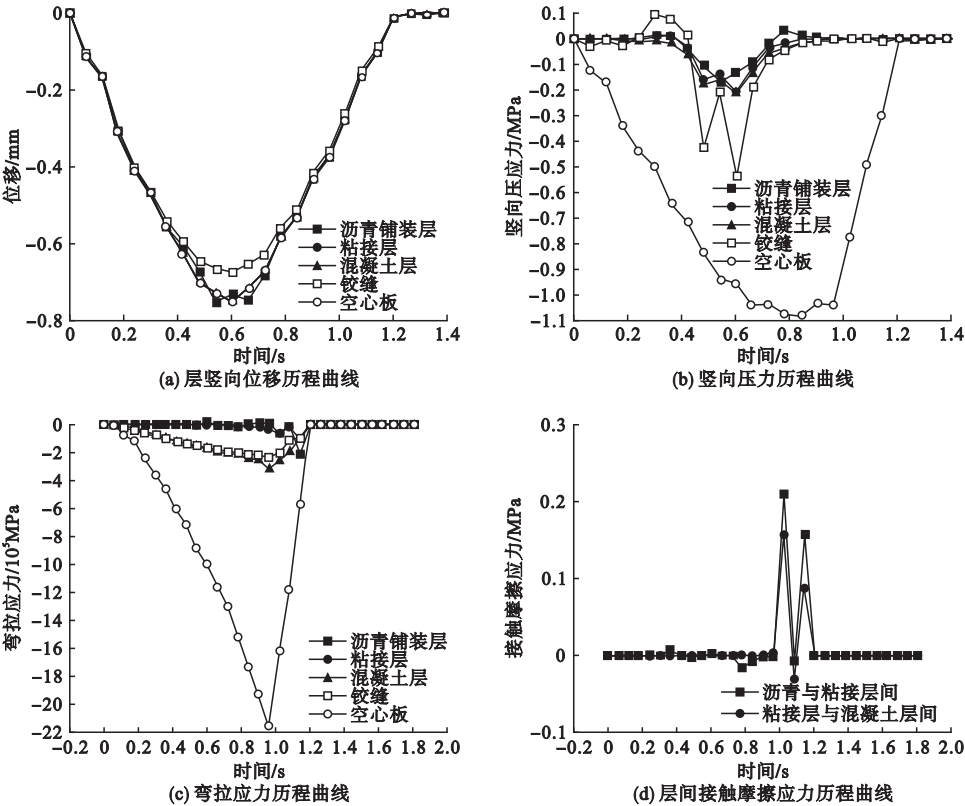


图 8 应力应变历程曲线

Fig. 8 Stress-strain history curves

从图 8(a) 看出,当车辆驶入桥面,跨中即出现竖向位移,各结构层位移变化趋势一致,逐渐增大;到达跨中时,竖向位移达到峰值,从大到小依次为沥青铺装层、粘结层、空心板梁、混凝土铺装层、铰缝;驶离跨中,垂直位移均减小到零。

从图 8(b) 看出,空心板最大压应力出现在支座附近处,从车辆驶入桥面时,竖向压应力便逐渐增大,到达板端,竖向应力上升至最大值,且远远大于其他结构层;竖向应力主要呈现压应力状态;其余结构层的竖向正应力均出现跨中位置,车辆刚驶入桥面时,应力值小范围波动,行驶至跨中时,应力值突然增大;受双轴载影响跨中结构层均出现两次峰值,且前一次峰值小于后一次。

由图 8(c) 可以看出,横向应力主要呈现受压状态,最大应力均出现在跨尾,随着车辆的驶入应力值逐渐增加,接近板端时应力达到峰值;沥青铺装层和粘结层受双轴影响出现两次峰值,后一次峰值大于前一次峰值,随着结构深度的增加,双轴影响逐渐减弱。

从图 8(d) 可以看出,最大接触应力出现在跨尾,位置车辆刚驶入桥面时,应力值小范围波动,快要驶出桥面时,应力值突然增大;受双轴载影响,铺装层间的摩擦接触应力值出现两次峰值,且前一次峰值大于后一次峰值;沥青铺装层与粘结层的层间摩擦接触应力大于混凝土铺装层与粘结层的层间摩擦接触应力,分别为 0.209 3 MPa 和 0.156 3 MPa。各结构层最大位移值如表 2 所示。

表 2 结构层最大应力值

Table 2 Maximum stresses value of structural layer

结构层	最大应力/MPa								
	S_{11}^-	S_{22}^-	S_{33}^-	S_{11}^+	S_{22}^+	S_{33}^+	S_{12}	S_{13}	S_{23}
沥青层	-0.104 7	-0.560 1	-0.757 2	0.048 2	0.038 7	0.064 7	0.096 1	0.037 4	0.096 9
粘结层	-0.105 0	-0.194 0	-0.733 9	0.053 2	0.051 5	0.029 8	0.036 3	0.037 1	0.047 3
混凝土层	-0.320 5	-0.191 7	-0.732 7	0.215 7	0.109 9	0.018 8	0.078 8	0.148 2	0.080 0
铰缝	-0.233 0	-0.585 3	-0.665 0	0.176 4	0.540 5	0.811 7	0.310 6	0.237 1	0.361 7
空心板	-2.158 0	-1.578 2	-0.735 7	1.147 0	0.785 2	1.007	1.194	0.401 0	0.640 1

注: S_{11} 、 S_{22} 、 S_{33} 分别为 1、2、3 方向上的主应力,1、2、3 方向分别对应桥梁横方向、垂直桥面方向、桥梁纵方向; S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 分别为 12、23、13 方向上的剪应力。

从表 2 可以看出,沥青铺装层中,纵向压应力最大 0.757 2 MPa,远大于拉应力和剪应力,其中 $S_{33}^- > S_{22}^- > S_{11}^- > S_{33}^+ > S_{11}^+ > S_{22}^+$, $S_{23} > S_{12} > S_{13}$;粘结层中,纵向压应力最大 0.732 7 MPa,远大于拉应力和剪应力,其中 $S_{33}^- > S_{22}^- > S_{11}^- > S_{11}^+ > S_{22}^+ > S_{33}^+$, $S_{23} > S_{13} > S_{12}$;混凝土调平层中,纵向压应力最大 0.733 9 MPa,横向拉应力最大 0.215 7 MPa,纵向剪应力最大 0.148 2 MPa,其中 $S_{33}^- > S_{11}^- > S_{22}^- > S_{11}^+ > S_{22}^+ > S_{33}^+$, $S_{23} > S_{13} > S_{12}$;空心板梁中,横向压应力最大 2.158 0 MPa,横向拉应力最大 1.147 MPa,竖向剪应力最大 1.194 MPa,其中 $S_{11}^- > S_{22}^- > S_{11}^+ > S_{33}^+ > S_{22}^+ > S_{33}^-$, $S_{12} > S_{13} > S_{23}$ 。

汽车垂直作用于路面,造成周围材料水平压应力增大,路面隆起,所以超载对铺装造成很大破坏;装配式空心板桥为横向拼接结构,横向稳定性较差,易造成调平层横向拉应力过大,引发裂缝,所以要加强空心板桥的横向连接,如在铰缝与空心板间嵌入钢筋。

3.3 完全连续与接触模型对比

现行规范对桥面铺装力学分析时,假定结构层间为完全连续状态,为比较桥面铺装结构在连续模型和接触模型两种不同接触状态下,产生的力学响应,采用完全连续模型和摩擦系数 0.5 的接触模型进行比较分析,结果见表 3。

表3 连续与接触模型的最大应力对比

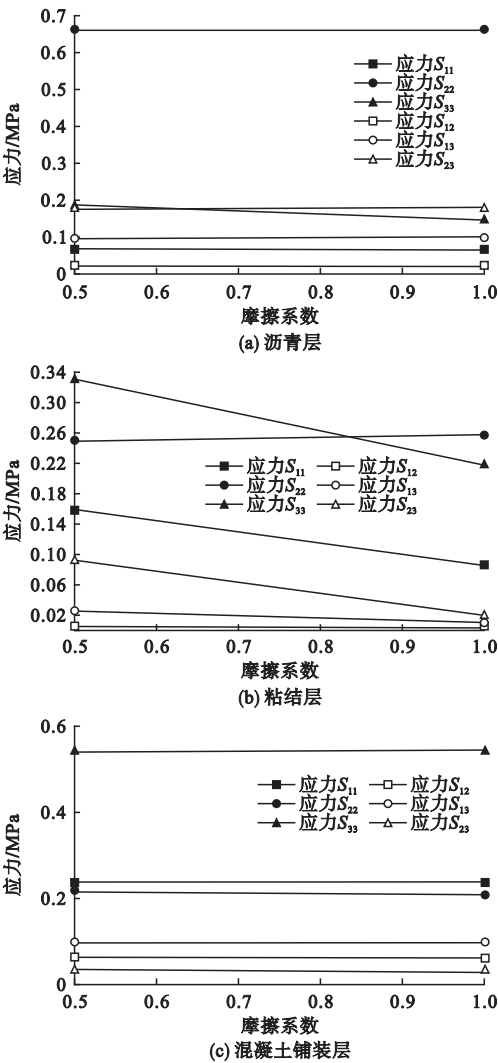
Table 3 Comparison of maximum stresses between continuous and contact models

结构层	状态	最大应力/MPa						
		S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{12}	S_{13}	S_{23}	U_2
沥青层	连续	0.213 4	0.612 1	0.239 1	0.023 62	0.027 79	0.175 5	0.635 7
	接触	0.167 2	0.704 4	0.224 6	0.021 24	0.094 84	0.187 77	0.642 6
粘结层	连续	0.115 3	0.271 1	0.118 7	0.070 98	0.003 413	0.120 36	0.622 2
	接触	0.158 5	0.248 4	0.328 2	0.010 408	0.017 762	0.051 2	0.613 2
混凝土层	连续	0.202 0	0.331 2	0.278 0	0.101 2	0.094 82	0.134 1	0.622 2
	接触	0.243 2	0.236 4	0.365 2	0.099 2	0.094 83	0.144 5	0.622 0
铰缝	连续	0.398 4	1.094	1.009	0.594 3	0.172 9	0.698 9	0.589 8
	接触	0.909 8	0.641 8	0.767 9	0.317 5	0.174 1	0.156 7	0.583 5
空心板梁	连续	1.043	1.033	0.665 2	0.711 5	0.342 7	0.730 6	0.622 6
	接触	1.014	0.999 9	0.646 8	0.694 7	0.326 8	0.693 3	0.613 0

从表3可以得出,沥青铺装层中,连续模型拉应力为接触模型的1.3倍,接触模型最大剪应力是连续模型的3.4倍;粘结层中,接触模型纵向拉应力是连续模型的2.8倍,连续模型水平剪力是接触模型的2倍;混凝土层中,连续模型竖向应力是接触模型的1.4倍,剪应力变化不大;铰缝中,接触模型水平应力是连续模型的2.3倍,连续模型竖向应力是接触模型的1.7倍,连续模型水平最大剪应力是接触模型的4.5倍;对于空心板梁的应力影响不大.据表3分析知,连续与接触模型结果有偏差,在进行桥面铺装设计时,如果假设层间完全连续,会对各项应力指标造成很大偏差.连续模型设计桥面铺装考虑不周全,会导致铺装结构在使用早期就容易出现损坏.而接触模型比较符合实际路面的工作状况,采用接触模型进行铺装层结构设计更为合理.

3.4 层间摩擦系数的影响分析

许多学者对层间结合状态做了试验和理论计算分析,笔者以文献[18]为依据,对试验结果进行转换,如文献[19]所述,采用摩擦系数来表征层间结合强度,经试算结果正确,拟定一组摩擦系数,建立模型进行对比分析,结果如图9所示.



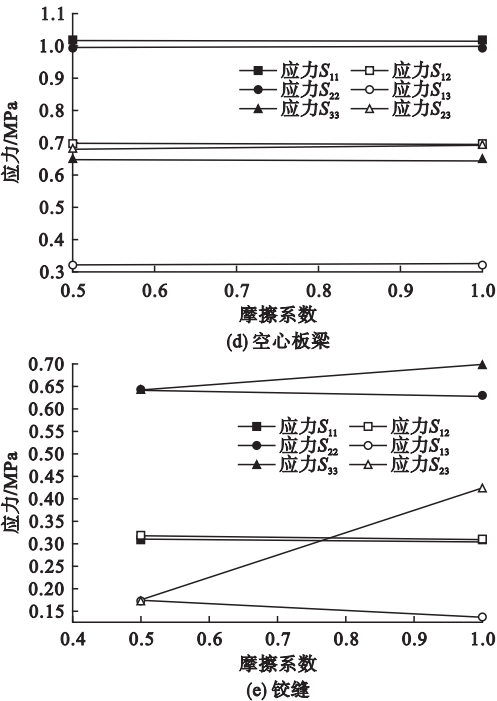


图9 层间摩擦系数对结构的影响
Fig.9 Influence of interlayer friction coefficient on structure

由图9可知,随着层间摩擦系数从0增加到1,沥青铺装层自身应力 S_{11} 减少5%、 S_{22} 减少2%、 S_{33} 减少26%、 S_{13} 减少5%、 S_{12} 减少0.3%、 S_{23} 减少1.9%;防水粘结层自身应力 S_{11} 减少46%、 S_{22} 增加3%、 S_{13} 减少33.7%、 S_{12} 减少61.6%、 S_{13} 减少59.4%、 S_{23} 减少78%;混凝土铺装层自身应力 S_{11} 增加0.88%、 S_{22} 减少3.4%、 S_{33} 增加0.4%、 S_{12} 减少0.8%、 S_{13} 减少1.3%、 S_{23} 减少19.6%;铰缝自身应力 S_{11} 减少1.3%、 S_{22} 减少2.2%、 S_{33} 减少9.4%、 S_{12} 减少2.4%、 S_{13} 减少20.6%、 S_{23} 增加140%;空心板梁自身应力 S_{11} 增加0.4%、 S_{22} 减小0.5%、 S_{33} 增加0.2%、 S_{12} 增加了0.3%、 S_{13} 减少1.4%。分析得知,摩擦系数的增加对铰缝与粘结层影响较大,其次为沥青铺装层、水泥混凝土层,对空心板梁几乎没有影响。随摩擦系数的增加,粘结层所受应力减少,铰缝的 S_{23} 应力变化明显,沥青铺装层应力均减小,层间摩擦系数的增加有助于荷载的上下传递。

4 结 论

- (1) 铰缝与空心板的挠度相差10%,结构受竖向剪力影响较大. 各结构层应力在轮载附近处变化较大,为减缓空心板与铰缝间发生剪切破坏,造成单板受力,可在轮载附近出铰缝使用钢筋加强连接.
- (2) 沥青铺装和粘结层间接触摩擦应力与混凝土铺装和粘结层间接触摩擦应相差较大,可采用不同措施分别处理层间粘结,使经济效益达到最大化.
- (3) 连续模型与接触模型应力最大相差4.5倍,接触模型相对于完全连续模型更贴近于桥面铺装的实际工作状态,所以建议采用接触模型进行桥面铺装的设计.
- (4) 层间摩擦系数对粘结层影响最大,其次为铰缝,对沥青铺装和混凝土铺装有一定的影响,对主梁的影响可忽略不计. 层间摩擦系数越大,上下传荷能力越好,可根据实际情况需要调节层间摩擦.

参考文献

[1] 贾宏平. 装配式预应力混凝土空心板桥铺装层力学性能分析[D]. 西安:长安大学,2015.
(JIA Hongping. Research on mechanical properties of bridge deck pavement of prefabricated prestress concrete hollow slab bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)

[2] 李长雨. 影响装配式空心板桥桥面铺装层受力特性参数的分析与研究[J]. 中外公路, 2016,36(5):75-79.
(LI Changyu. Analysis and research on the parameters of force characteristics affecting the pavement of assembled hollow banqiao bridge deck[J]. Chinese and foreign highways, 2016, 36(5):75-79.)

[3] 王光谱. 混凝土箱梁桥面铺装力学行为与结构优化设计[D]. 西安:长安大学,2016.
(WANG Guangpu. Mechanical behavior and structural optimization design of concrete box girder bridge deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.)

[4] 朱华. 公路桥梁常见病害原因分析及防治[J]. 科技视界, 2016(20):205-206.
(ZHU Hua. Cause analysis and prevention of common diseases of highway bridge [J]. Science & technology vision, 2016 (20): 205-206.)

- [5] 王强,郭永康,李璐杰. 水泥混凝土桥面铺装早期破损原因及防治措施[J]. 华东公路, 2017(6):15-16.
(WANG Qiang, GUO Yongkang, LI Lujie. Causes and prevention measures of early breakage of cement concrete bridge deck Pavement[J]. East road, 2017(6):15-16.)
- [6] XUE Luo, RONG Luo, ROBERT L L. Characterization of asphalt mixtures using controlled-strain repeated direct tension test [J]. Journal of materials in civil engineering, 2013, 25(2):194-207.
- [7] SANGHYUN Chun, KUKJOO Kim, JAMES Greene, et al. Evaluation of interlayer bonding condition on structural using finite element analysis and full-scale field tests [J]. Construction and building materials, 2015, 96: 307-318
- [8] LIU Xiu, ZHOU Changjun, FENG Decheng, et al. Experimental study on interlayer shear properties of ers pavement system for long-span steel bridges[J]. Construction & building materials, 2017, 143:198-209.
- [9] 刘云. 简支梁桥水泥混凝土桥面铺装受力性能试验分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2018.
(LIU Yun. Test and analysis of mechanical behavior of concrete bridge deck pavement of simply supported beam bridge [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.)
- [10] 赵岩荆,蒋玲. 水泥混凝土桥梁双层桥面铺装结构力学分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(2):351-355.
(ZHAO Yanjin, JIANG Ling. Mechanical analysis of double-layers structure utilized in cement concrete bridge deck pavement [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2014, 38(2):351-355.)
- [11] 袁桂芳. 桥面铺装与装配式空心板梁共同作用试验研究[J]. 哈尔滨:黑龙江交通科技, 2014, 37(1):89-91.
(YUAN Guifang. Experimental study on the joint action of bridge deck pavement and assembled hollow slab girder [J]. Communications science and thnology Heilongjiang, 2014, 37(1):89-91.)
- [12] 万晨光,申爱琴,薛翠真,等. 层间接触状态对桥面铺装结构力学响应的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(9):113-119.
(WAN Chenguang, SHEN Aiqin, XUE Cuizhen, et al. Effcet of interlayer contact state on mechanical response of bridge deck pavement structure [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2016, 43(9): 113-119.)
- [13] 程焰兵. 移动荷载下 CRC + AC 复合式路面结构的动力响应研究[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
(CHENG Yanbing. Study on dyna mic response of CRC + AC composite pavement under moving load[D]. Changsha:Hu'nan University, 2015.)
- [14] 黄晓明. 路面设计原理与方法[M]. 北京:人民交通出版社, 2015.
(HUANG Xiaoming. Principles and design methods of pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.)
- [15] 阮怀圣,马润平. 美国公路桥梁设计规范中关于设计汽车荷载的研究[J]. 北京:世界桥梁, 2012, 40(1):65-69.
(RUAN Huaisheng, MA Runping. Study of design truck load in AASHTO LRFD bridge design specifications [J]. World bridge, 2012, 40(1):65-69.)
- [16] 廖亚雄. 弯曲与纵坡钢桥的桥面铺装受力特性[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
(LIAO Yaxiong. Mechanical analysis of deck pavement for curved and longitudinal slope steel bridges [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.)
- [17] 交通部专家委员会. 中华人民共和国交通行业公路桥梁通用图[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.
(Expert Committee of the Ministry of Communications. General map of highway bridges in transportation industry of People's Republic of China [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.)
- [18] 张建伟. ABAQUS2016 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
(ZHANG Jianwei. ABAQUS 2016 finite element analysis from introduction to proficiency [M]. Beijing: Machine Press, 2016.)
- [19] 于洋. 基于 ABAQUS 的路面模型动力学试验与仿真分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2014.
(YU Yang. Dynamic test research and simulation method of pavement model based on ABAQUS [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.)
- [20] SUN Li, LI Chuang, LI Jun, et al. Strain transfer analysis of a clamped fiber bragg grating sensor [J]. Applied sciences, 2017, 7(2):188.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)