

# Sensitivity Analysis of Influence Factors of Shear Stress between Steel Bridge Deck Pavements

Yiheng Chen

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

**Abstract:** Taking the Xiamen Second East Passage Project as the background, a simplified steel bridge pavement model was established using the finite element ANSYS software, and 3x3 loading positions were arranged. The maximum distance between the bonding layer and the cast asphalt layer under 9 working conditions was calculated. Shear stress, the most unfavorable load position was selected; in order to improve efficiency, orthogonal tests considering 3 factors and 3 levels of temperature, overload, and driving conditions were designed, and the inter-layer shear stress and its location and numerical analysis of the results.

**Keywords:** Steel bridge deck pavement; shear stress; guss asphalt; finite element

## 钢桥面铺装层间剪应力影响因素敏感性分析

陈以恒

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400041

**摘要:** 以厦门第二东通道工程为背景, 利用有限元 ANSYS 软件建立了简化后的钢桥铺装模型, 布置了 3x3 个荷位, 计算得到 9 种工况下粘结层和浇注式沥青层间最大剪应力, 选出了最不利荷位; 为提高效率设计了考虑温度、超载、行驶状况的 3 因素 3 水平的正交试验, 得到了不同温度、不同荷载、不同行驶状况的层间剪应力和其位置, 并对结果进行了数值分析。

**关键词:** 钢桥面铺装; 剪应力; 浇注式; 有限元

### 1 引言

近年来正交异性钢箱梁桥成为了大跨径桥梁的主要桥型[1], 正交异性钢箱梁桥的优点: 跨越能力强、自重轻、具有较高的塑性韧性等。其中钢桥面铺装结构可以保护钢桥面板不受雨水、紫外线的侵蚀, 提高行车舒适度, 而如何提高钢桥面铺装结构的寿命成了一项挑战。在钢桥面铺装结构的历史中, 一开始人们不明白钢桥面铺装结构不同于普通的沥青路面结构, 因为钢桥面板具有正交特异性, 更容易遭到病害。钢桥铺装结构的常见病害有裂缝、脱层、推移、车辙等。其中脱层和推移病害是由于铺装层间剪应力过大导致的。

随着有限元技术的普及, 人们用 ANSYS、ABAQUS 等软件进行钢桥面铺装的力学分析, 比较精确地模拟了防水粘结层的受力状况。

樊叶华、黄卫[2]等依托江阴大桥钢桥面铺装的项目, 利用 ansys 计算了在 3 种荷位作用下层间横向/

纵向最大剪应力、层间横向/纵向最大剪应变; 计算了不同温度下钢桥面板和粘结层间的剪应变, 结果说明在高温条件下容易发生剪切滑移破坏; 计算了在设计轮载、超载 30%、超载 60%在不同温度下的层间剪应力, 结果随着温度升高, 层间最大剪应力减小, 超载使层间剪应力急剧增大, 增大了防水层发生一次剪坏的可能性。

陈雄飞、樊叶华等[3]将正交异性钢桥面板、铺装层、防水层作为受力整体, 用 ansys 进行分析。采用空间八节点等参单元模拟沥青混凝土铺装层、防水粘结层和正交异性钢桥面板。计算得到三种荷位作用下, 钢桥面铺装防水粘结层与钢板层间横向最大剪应力、纵向最大剪应力、横向最大剪应变与纵向最大剪应变; 探究了粘结层与钢桥面板间剪应力受到铺装层模量大小的影响的规律; 粘结层材料模量、泊松比对粘结层受力的影响。

钱振东[4]以全桥的角度来讲, 主梁受到荷载时会发生弯曲、拉伸、扭转变形, 将与桥面铺装产生相

对滑移，对粘结层产生剪切作用。用 Abaqus 建立整桥的鱼脊骨模型计算整桥内力；建立局部梁段模型，计算了日照温差作用下的粘结层耦合力学响应；计算了整体变形、超载作用下的粘结层力学响应，得到了三种因素对粘结层剪应力的贡献情况。

## 2 有限元模型的建立

以厦门第二东通道工程为背景，主梁采用整幅变截面等截面钢箱连续梁，顶板为正交异性板结构。桥面铺装采用甲基丙烯酸树脂防水粘结体系+浇注式沥青混凝土（3cm）+SMA 沥青混凝土（4cm）铺装结构。

由于防水粘结层厚度很小，以往的钢桥面铺装有限元简化模型并不单独建立防水粘结层，考虑到防水粘结层对铺装结构的影响，本章建立了有防水粘结层的钢桥面铺装模型。之前的研究[7]发现，大跨径钢桥铺装合理有限元简化模型为：纵向 3 跨（本文取了 4 跨），横向 8 个 U 肋，横隔板高度为 1.2m。

### 2.1 模型尺寸和材料参数

沥青混凝土和防水粘结层的弹性模量和泊松比取 25℃时大小。

Table 1. Model parameters  
表 1. 模型参数

位置	基本参数	单位	大小
铺装上层 SMA	厚度	mm	40
	弹性模量	Mpa	1500
	泊松比		0.3
铺装下层 GA	厚度	mm	30
	弹性模量	Mpa	2100
	泊松比		0.3
粘结层	厚度	mm	2
	弹性模量	Mpa	200
	泊松比		0.3
钢板	厚度	mm	18
	弹性模量	Mpa	21
	泊松比		0.3
U 形加劲肋	上口宽度	mm	300
	下口宽度	mm	180
	高度	mm	300
	厚度	mm	12
	间距	mm	600
横隔板	间距	m	2.5
	厚度	mm	12

### 2.2 基本假设

- 结构由是完全弹性、连续、均匀，各向同性的材料组成的；
- 正交异性钢板变形和位移忽略不计；
- 建立的层间接触均为完全连续绑定；
- 不计结构自重；
- 边界条件为限制钢桥面板和桥面铺装在横、纵方向的位移，横隔板底端完全约束。

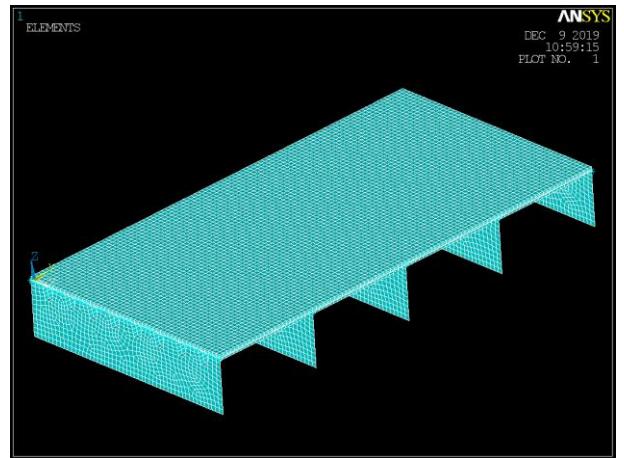


Figure 1. Schematic diagram of the finite element model

图 1. 有限元模型示意图

### 2.3 车辆荷载

计算荷载按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64-2015)的规定，单轴双轮组 140kN，双轮荷载 70kN，并假设轮胎接地面积为矩形，接地面积为 (20×25)+10+(20×25) (单位 cm)，且接地面积不随荷载大小变化，则单轮载为 0.7Mpa，计算荷载接地面积如图所示：

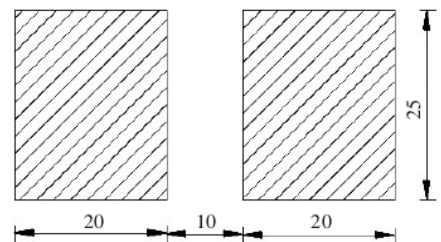


Figure 2. Schematic diagram of tire ground contact area

图 2. 轮胎接地面积示意图

### 3 不利荷位的选择

车辆在不同行驶状态下水平力系数有很大变化，计算不利荷位时，为了模拟车辆匀速行驶的状态，取水平力系数 0.01，横向荷载 0.007Mpa，竖向荷载 0.7Mpa。

横向荷位 1 中心位于两个 U 形肋中间，横向荷位 2 中心位于 U 形肋边，横向荷位 3 中心位于 U 形肋的中间。纵向荷位 1 位于跨中横隔板正上方，纵向荷位 2 位于距离跨中横隔板位置 1.25m 处，纵向荷位 3 位于距离跨中横隔板位置 0.625m 处。横向纵向各三种荷载位置，构成了 3\*3 共 9 种工况。

计算 9 种工况下的有限元模型，得到粘结层与浇注式沥青混凝土层之间的最大横、纵向剪应力，铺装层最大横、纵向剪应力，计算结果如下：

Table 2. System resulting data of standard experiment  
表 2. 标准试验系统结果数据

	粘结层与 GA 层间最大横向剪应力 (Mpa)	粘结层与 GA 层间最大纵向剪应力 (Mpa)	铺装层最大横向剪应力 (Mpa)	铺装层最大纵向剪应力 (Mpa)
1-1 位置	0.2868	0.0452	0.2960	0.0628
1-2 位置	0.2934	0.0474	0.2982	0.0620
1-3 位置	0.2944	0.0503	0.2975	0.0627
2-1 位置	0.3038	0.0454	0.3075	0.0630
2-2 位置	0.3106	0.0474	0.3106	0.0615
2-3 位置	0.3134	0.0506	0.3134	0.0622
3-1 位置	0.2898	0.0451	0.2971	0.0624
3-2 位置	0.2945	0.0474	0.2983	0.0618
3-3 位置	0.3001	0.0510	0.3001	0.0629

从表的计算结果可以得出以下结论：

- 以铺装层剪应力最不利荷位为控制指标，不利荷位在 2-3 工况下，即横向荷位中心位于 U 形肋边，纵向荷位位于横隔板间距四分之一处；
- 汽车匀速行驶时横向剪应力比纵向剪应力大很多；
- 根据计算分析表明，层底最大横向剪应力出现的位置在荷载外侧边缘附近区域，层底最大纵向剪应力出现的位置在荷载后侧边缘附近区域。

### 4 铺装结构剪应力影响因素敏感性分析

#### 4.1 正交试验设计

为了探讨温度、荷载大小、行驶状态对铺装层应力的影响，设计了正交试验。正交试验设计是利用正交表进行科学地安排与分析多因素试验的方法，它的优点是在很多试验方案中挑选出代表性强的少数试验方案，并通过这少数试验方案的试验结果的分析，推断出最优方案，同时可以进一步分析得到比试验结果更多的有关各因素的信息[5]。

本次试验极差分析法对正交试验结果进行分析，极差分析法中，级差 R 代表该因素在水平波动时试验结果变化幅度的大小，R 值大说明该因素对试验结果影响大，即 R 值大小反映影响因素的主次顺序。K 值是某一因素在某一水平所对应的试验结果平均值，K 值可判断某一因素的最优水平和整个试验方案的最优组合[6]。

Table 3. Orthogonal factors  
表 3. 正交因素

试验因素	试验因素水平		
温度水平	1	2	3
超载	0%	30%	60%
水平力系数	0.01 (匀速行驶)	0.3 (一般制动)	0.5 (紧急制动)

Table 4. Orthogonal test form  
表 4. 正交试验表格

	温度水平	超载情况	水平力系数
方案一	1	0%	0.01
方案二	1	30%	0.3
方案三	1	60%	0.5
方案四	2	0%	0.3
方案五	2	30%	0.5
方案六	2	60%	0.01
方案七	3	0%	0.5
方案八	3	30%	0.01
方案九	3	60%	0.3

#### 4.2 温度水平

由于天气的影响，钢桥桥面铺装层温度场随外界温度的变化而变化。当外界温度变化时，由于沥青混凝土热传导率较低，沥青混凝土内部的温度分布不均匀，产生较大的温度梯度，铺装层的温度随深度变化。为了接近真实情况，取八月份某一天三个不同时

刻铺装层温度:

**Table 5. Pavement temperature at different times**  
表 5. 不同时刻铺装层温度

	5:00	11:00	14:00
铺装底层温度	25℃	44.85℃	57.48℃
上下铺装层间温度	25℃	49.36℃	65.22℃
温度水平	1	2	3

根据大连理工大学关于沥青混合料模量与温度关系的研究, 给出了沥青混合料温度修正系数公式, 由此可以算出不同温度下沥青混凝土模量, 以此来模拟铺装层在不同温度下的性质:

$$K = \frac{E_{T_0}}{E_{T_1}} = e^{-0.288(T_0 - T_1)} \quad (1)$$

K: 反算模量温度修正系数;

**Table 7. Orthogonal test results**  
表 7. 正交试验结果

方案	粘结层与 GA 层间最大横向剪应力 (Mpa)	粘结层与 GA 层间最大纵向剪应力	铺装层层间最大横向剪应力	铺装层层间最大纵向剪应力	铺装层层间最大横向剪应力位置 (距离钢板底部, cm)	铺装层层间最大纵向剪应力位置 (距离钢板底部, cm)
1	0.3134	0.0506	0.3134	0.0622	2	5
2	0.4353	0.1742	0.5040	0.2787	9	9
3	0.5461	0.3303	0.7213	0.5360	9	9
4	0.2100	0.1912	0.2960	0.2324	5	9
5	0.2805	0.3583	0.4493	0.4651	9	9
6	0.2780	0.2066	0.3283	0.2066	5	5
7	0.1475	0.2278	0.3383	0.3514	9	9
8	0.1529	0.1816	0.3091	0.1816	5	5
9	0.1926	0.3879	0.4087	0.3911	9	9

得出各试验水平的数据分析见下表, 其中 Ki 值代表在该列中取第 i 个水平对应试验结果的平均值, R 代表该列的极差。极差反映该因素变化时对试验结果的影响程度, 极差值越大, 说明因素对结果影响越大。

**Table 8. Data analysis of the maximum transverse shear stress between the bonding layer and the GA layer**  
表 8. 粘结层与 GA 层间最大横向剪应力的数据分析

试验指标	计算参数	因素
------	------	----

$E^{T_0}$ 、 $E^{T_1}$ : 分别为温度  $T_0$ 、 $T_1$  对应的模量, MPa;

$T_0$ : 参考温度, °C。

**Table 6. Corresponding elastic modulus of pavement at different temperature levels**  
表 6. 不同温度水平下对应的铺装层模量

	温度水平 1	温度水平 2	温度水平 3
SMA	1500Mpa	606Mpa	450Mpa
GA	2100Mpa	653Mpa	300Mpa
粘结层	200Mpa	113Mpa	78.5Mpa

### 4.3 正交试验结果及数据分析

正交试验结果如下表:

粘结层与 GA 层间最大横向剪应力		温度 (A)	超载情况 (B)	水平系数 (C)
	均值 K1	0.4316	0.2236	0.2481
	均值 K2	0.2562	0.2896	0.2896
	均值 K3	0.1643	0.3389	0.3247
	极差 R	0.2673	0.1153	0.0766
因素主次	A B C			

• 三个因素影响粘结层与 GA 层间横向剪应力主

次顺序为:温度>超载>行驶状态。当温度为水平 1, 超载 60%, 紧急刹车时横向剪应力为最大。

- 由各因素均值  $K_i$  可以看出, 粘结层与 GA 层

间横向剪应力随着温度的升高而迅速减小, 说明粘结层与 GA 层间横向剪应力对温度最敏感; 随超载率、行驶状态 (水平应力) 的增大而增大。

**Table 9. Data analysis of the maximum longitudinal shear stress between the bonding layer and the GA layer**  
**表 9. 粘结层与 GA 层间最大纵向剪应力的数据分析**

试验指标	计算参数	因素		
		温度 (A)	超载情况 (B)	水平系数 (C)
粘结层与 GA 层间最大纵向剪应力	均值 K1	0.1850	0.1565	0.1463
	均值 K2	0.2520	0.2380	0.2511
	均值 K3	0.2658	0.3083	0.3055
	极差 R	0.0808	0.1518	0.1592
	因素主次	C B A		

- 三个因素影响粘结层与 GA 层间纵向剪应力主次顺序为: 行驶状态>超载>温度。即铺粘结层与 GA 层间纵向剪应力对行驶状态最为敏感, 其次是超载, 最后为温度。当温度为水平 3, 超载 60%, 紧急刹车时纵向剪应力为最大。

- 由各因素均值  $K_i$  可以看出, 粘结层与 GA 层间纵向剪应力随超载率、行驶状态 (水平应力) 的增大而增大, 尤其随水平应力的增大而迅速增大, 说明粘结层与 GA 层间纵向剪应力对车辆行驶状态 (水平应力) 最为敏感。

**Table 10. Data Analysis of Maximum Transverse Shear Stress of Pavement**

**表 10. 铺装层最大横向剪应力的数据分析**

试验指标	计算参数	因素		
		温度 (A)	超载情况 (B)	水平系数 (C)
铺装层间最大横向剪应力	均值 K1	0.5129	0.3159	0.3169
	均值 K2	0.3579	0.4208	0.4029
	均值 K3	0.3520	0.4861	0.5030
	极差 R	0.1609	0.1702	0.1861
	因素主次	C B A		

- 三个因素影响铺装层最大横向剪应力主次顺序为: 行驶状态>超载>温度。即铺粘结层与 GA 层间纵向剪应力对行驶状态 (水平应力) 最为敏感, 其次是超载, 最后为温度。当温度为水平 1, 超载 60%, 紧急刹车时铺装层横向剪应力为最大。

- 由各因素均值  $K_i$  可以看出, 铺装层最大横向剪应力随着温度的升高而迅速减小; 随超载率、行驶状态 (水平应力) 的增大而增大, 尤其随水平应力的增大而迅速增大, 说明铺装层最大横向剪应力对车辆行驶状态 (水平应力) 最为敏感。

**Table 11. Data Analysis of Pavement's Maximum Longitudinal Shear Stress**  
**表 11. 铺装层最大纵向剪应力的数据分析**

试验指标	计算参数	因素		
		温度 (A)	超载情况 (B)	水平系数 (C)
铺装层最大纵向剪应力	均值 K1	0.2923	0.2153	0.1501
	均值 K2	0.3014	0.3085	0.3007
	均值 K3	0.3080	0.3779	0.4508
	极差 R	0.0157	0.1626	0.3007
	因素主次	C B A		

- 三个因素影响铺装层最大纵向剪应力主次顺序为: 行驶状态>超载>温度。即铺粘结层与 GA 层间纵向剪应力对行驶状态 (水平应力) 最为敏感, 其次是超载, 最后为温度。当温度为水平 3, 超载 60%, 紧急刹车时铺装层横向剪应力为最大。

- 由各因素均值  $K_i$  可以看出, 铺装层最大纵向剪应力随超载率、行驶状态 (水平应力) 的增大而增大, 尤其随水平应力的增大而迅速增大, 说明铺装层最大横向剪应力对车辆行驶状态 (水平应力) 最为敏感。

#### 4 结论

通过有限元软件分析在不同温度、不同荷载、不同行驶状态下钢桥面铺装的应力大小及位置, 得到了以下结论:

- 其他条件不变时层间剪应力随温度升高而减小, 同时粘结层抗剪能力也急剧下降;

• 粘结层与铺装层底之间横向剪应力大小对温度变化最为敏感；影响纵向剪应力最多的是水平荷载；

• 水平荷载会使铺装层的横、纵向剪应力急剧增大，而水平荷载是由垂直荷载和行驶状况有关，因此对汽车限载限速是非常有必要的；

• 在常温、标准轴载、正常行驶状态下，铺装层最大横、纵向剪应力位于粘结层与 GA 层间，推移易发生在此部位；

• 超载和制动会使得层间最大剪应力位置向上移动，但粘结层与 GA 层间的剪应力不能忽视，这是铺装结构的薄弱位置；

• 高温时，最大横、纵向剪应力出现在上下铺装层之间；

• 制动状态无论高温或是低温，纵桥向剪应力最大值均出现在铺装层表面，即 SMA 层表面易出现推移病害。

• 铺装层剪应力控制指标应同时考虑层底横向剪应力及层底纵向剪应力，横桥向的控制指标为横向剪应力，纵桥向的控制指标为纵向剪应力，铺装层出现的剪切破坏主要是横向剪应力引起的横桥向推移、脱层和纵向剪应力引起的纵桥向推移、脱层。

• 在重型车辆荷载遇紧急刹车时，柔性偏大的沥

青混凝土铺装更易出现推移病害，模量偏大的沥青混凝土铺装抵抗推移的能力较强。

## References

- [1] Huang Wei, Zhang Xiaochun, Hu Guangwei. Research Progress in Theory and Design of Long-span Steel Deck Pavement. Journal of Southeast University: Natural Science Edition. 2002, (3), 180-1187.
- [2] 黄卫, 张晓春, 胡光伟. 大跨径钢桥面铺装理论与设计的研究进展. 东南大学学报:自然科学版. 2002, (3), 180—187.
- [3] Fan Yehua, Huang Wei, Wang Jingmin, Chen Xiongfei. Characteristics of Flexible Waterproof Adhesive Layer of Steel Deck of Jiangyin Bridge. Highway Transportation Science and Technology. 2007 (06), 33-36.
- [4] 樊叶华, 黄卫, 王敬民. 江阴大桥钢桥面柔性防水粘结层特性分析. 公路交通科技. 2007(06), 33-36.
- [5] Chen Xiongfei, Fan Yehua, Wang Feng, Sun Xiaoting. Mechanical Analysis of the Waterproof and Cohesive Layer of the Steel Deck of Jiangyin Bridge. Modern Transportation Technology. 2008, 5 (S1), 90-93.
- [6] 陈雄飞, 樊叶华, 汪峰, 孙孝婷. 江阴大桥钢桥面防水粘结层受力分析. 现代交通技术. 2008, 5(S1), 90-93.
- [7] Qian Zhendong, Liu Zheng. Mechanical Analysis of the Bonding Layer of Steel Bridge Deck under the Whole Bridge-Temperature-Heavy Load. Journal of Southeast University (Natural Science Edition). 2012, 42 (04), 729-733.
- [8] 钱振东, 刘龔. 整桥-温度-重载耦合作用下钢桥面黏结层力学分析. 东南大学学报(自然科学版). 2012, 42(04), 729-733.
- [9] Zhuang Chuqiang, He Chunxiang. Basics of Applied Statistics. Guangzhou: South China University of Technology Press. 2006, 249-255
- [10] 庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础. 广州: 华南理工大学出版. 2006, 249-255
- [11] Li Shuijin. Performance and Structural Mechanics Analysis of Bonding Layer of Epoxy Asphalt Pavement on Steel Bridge Deck. South China University of Technology. 2016.
- [12] 李水金. 钢桥面环氧沥青铺装粘结层性能与结构力学分析. 华南理工大学. 2016.
- [13] Deng Qiangmin, Ni Fujian, Gu Xingyu, Chen Rongsheng. Reasonable and simplified model for finite element analysis of long-span steel bridge deck pavement. Journal of Transportation Engineering. 2008, (02), 53-58.
- [14] 邓强民, 倪富健, 顾兴宇, 陈荣生. 大跨钢桥桥面铺装有限元分析合理简化模型. 交通运输工程学报. 2008, (02), 53-58.