

钢桥面聚氨酯改性环氧树脂黏结层的受力特性

张朋¹, 刘本立¹, 单景松², 赵海舰¹, 宋成法², 陈子璇¹

1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590

摘要:为分析钢箱梁铺装层与钢桥面黏结层间的受力特性,采用有限元软件 ANSYS 建立钢箱梁整桥模型,采用聚氨酯改性环氧树脂作为钢桥面铺装结构的黏结层,模拟计算分析车辆荷载工况、钢桥跨径、铺装层厚度、黏结层厚度、温度变化、水平荷载等不同因素对黏结层界面受力的影响。结果表明:正常行驶条件下,黏结层界面横向剪应力显著大于纵向剪应力,车辆荷载作用于钢箱梁间且距横隔梁纵向距离越大时黏结层界面剪应力越不利,荷载作用于钢箱梁边缘且靠近横隔梁时界面法向拉应力最不利;钢桥跨径对黏结层受力影响较小;随黏结层厚度增大,黏结层界面剪应力减小,法向拉应力增大;随铺装层厚度增大,黏结层界面剪应力和界面法向拉应力减小;随温度升高,黏结层界面应力显著减小;随摩擦因数增大,黏结层界面剪应力增大,法向拉应力变化不大。

关键词:钢箱梁;桥面铺装;聚氨酯改性环氧树脂;黏结层界面受力;应力

中图分类号:U448.36

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0077-07

引用格式:张朋,刘本立,单景松,等.钢桥面聚氨酯改性环氧树脂黏结层的受力特性[J].山东交通学院学报,2024,32(3):77-83.

ZHANG Peng, LIU Benli, SHAN Jingsong, et al. Stress characteristics of the polyurethane-modified epoxy resin bonding layer on the steel bridge deck[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 77-83.

0 引言

铺装层与钢桥面板间通过黏结层牢固粘结成一体,共同承担交通荷载引起的变形与应力,黏结层的力学性能对铺装层的使用性能有较大影响^[1-3]。分析钢桥面铺装结构的受力特性,可得到钢桥面铺装体系的受力规律及其在不同因素下的最不利受力位置^[4-6]。王刚等^[7]研究发现,桥面铺装最不利荷载位置是纵向两横隔板中心处,横向单轮荷载中心为加劲肋开口中心的铺装层表面处。冯蕾等^[8]模拟得到极限温度应力出现在铺装层表面处,降温幅度对铺装层内温度应力的影响十分明显。苗禄伟等^[9]研究发现,面层最大拉应力随铺装上层厚度的增大而不断增大。

以黏结层为主要研究对象,诸多学者发现界面应力的变化规律:杨中才等^[10]进行模拟分析,结果表明在超载刹车状态和超载时,双层铺装玛蹄脂碎石混合物料(stone mastic asphalt, SMA)结构层间剪应力均不大于0.4 MPa;刘云等^[11]发现,立转式开启桥开启状态下,铺装层与钢板间的层间剪应力增幅明显大于通车运营条件下的层间应力;钱振东等^[12]分析发现,在整桥-温度-重载多场耦合作用下,车辆荷载作用对黏结层的层间横向剪应力的贡献率为80.1%,对黏结层层间纵向剪应力的贡献率为89.3%;Wang等^[13]发现,层间不完全黏结区的位置和面积对SMA层顶部和浇筑式沥青混合料层底部的拉伸应变有显著影响,拉伸应变随脱离面积的增大而增大。

收稿日期:2023-04-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME004)

第一作者简介:张朋(1980—),男,山东梁山人,高级工程师,主要研究方向为道路材料与施工管理,E-mail:21818187@qq.com。

以新材料优化铺装结构为研究对象, Ma 等^[14]采用某种高延展性工程水泥基复合材料作为桥面铺装材料, 桥面结构的界面黏结程度可满足钢桥面在准静荷载作用下的要求; Niu 等^[15]模拟计算聚酯型聚氨酯混凝土在单层钢桥铺装结构中的最大抗拉强度为 0.51 MPa, 最大抗压强度为 3.52 MPa, 远小于试验极限强度; Liu 等^[16]发现环氧黏结片层与钢间的剪切强度较大, 适合做钢桥防水黏结层材料; Liu 等^[17]以高含量聚氨酯黏结剂聚合物作为钢桥路面的防护层, 通过试验测试发现高性能聚合物混合物 (high-performance polymer mixture, HPPM) 抗压强度较高, 抗裂性较强, 变形适应性优异。国内外对钢桥面铺装结构的受力特性已有较多研究, 但考虑钢桥特点针对黏结层受力特性的研究较少。

本文研究钢桥面聚氨酯改性环氧树脂黏结层的受力特性, 探究在不同荷载工况、黏结层厚度、铺装层厚度、大气温度及水平荷载下的钢桥结构黏结层层间受力特性, 以期同类工程提供理论指导和数据支撑。

1 钢桥有限元模型

1.1 钢桥参数及单元类型

钢梁-混凝土梁组合箱梁桥跨径为 30~70 m, 宽 34 m, 横隔梁间距为 5 m, 主梁横向中心间距为 5.74 m, 顶板厚 38 mm, 腹板、底板、横隔板分别长 16、24、12 mm, U 型箱梁上开口 3.2 m, 底板宽 2.4 m。采用有限元软件 ANSYS 建模, 钢桥结构采用壳体单元 Shell181, 弹性模量为 210.0 GPa。沥青铺装层及防水黏结层采用实体单元 Solid185, 沥青铺装层静态弹性模量为 1.2 GPa, 主梁两端为简支约束, 钢桥面及铺装层有限元模型如图 1 所示。

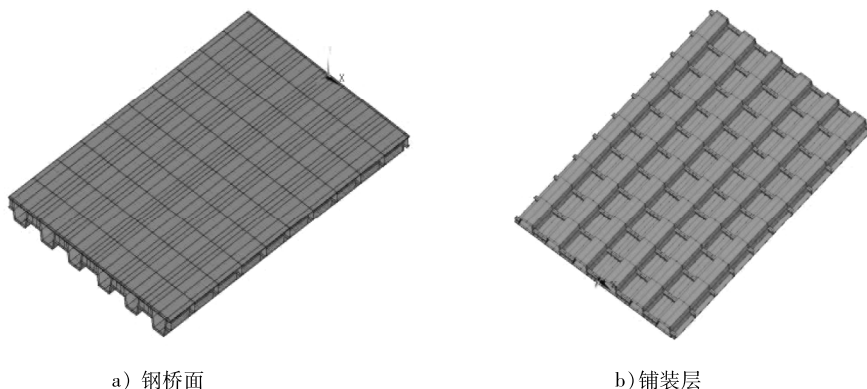


图 1 钢桥面及铺装层有限元模型

1.2 车辆荷载及工况

采用简化的双轮标准荷载, 取单侧轮胎接地区域为长 0.6 m、宽 0.2 m 的矩形, 双轮间距为 1.2 m。为确定黏结层受力最不利位置, 沿横向设置 3 个车辆加载位置, 纵向设置 4 个车辆加载位置, 组成 12 种工况, 如图 2 所示, 纵向作用位置分别为中间横隔梁及距中间横隔梁 0.5、1.5、2.5 m 处。以 ×-× 表示荷载位置, 横向位置编号在前, 纵向位置编号在后, 例如 1-2 表示横向位置为 1, 纵向位置为 2。

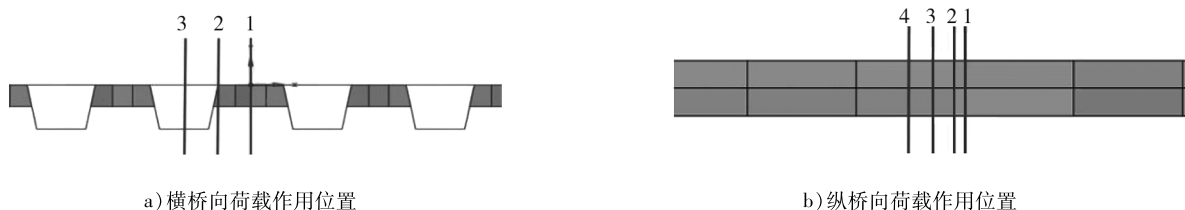


图 2 车辆荷载作用位置

1.3 聚氨酯改性环氧树脂黏结层

采用层铺法形成边长为 5 cm 的聚氨酯改性环氧树脂混凝土立方体试件, 交替撒布树脂与撒布碎石。

主要步骤为:取边长为5 cm的立方体模具,在模具中撒布第1层聚氨酯改性环氧树脂,面密度为 2.1 kg/m^2 ,待树脂流平后,撒布第1层玄武岩碎石,厚 $3\sim 5\text{ mm}$,面密度为 6.0 kg/m^2 ;固化完成后撒布第2层聚氨酯改性环氧树脂,面密度为 2.7 kg/m^2 ,树脂流平后,撒布第2层玄武岩碎石,面密度为 6.0 kg/m^2 。重复以上步骤,直至达到预设铺设厚度。

采用疲劳试验机MTS压缩聚氨酯改性环氧树脂混凝土立方体试件,得到试件的应力-应变拟合曲线,如图3所示,拟合曲线各参数如表1所示。线性拟合应力-应变曲线线性弹性阶段,聚氨酯改性环氧树脂弹性模量约为7 GPa。设置聚氨酯改性环氧树脂黏结层的弹性模量为7 GPa进行有限元分析。

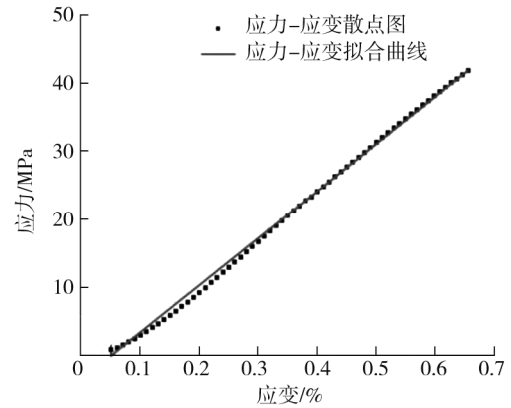


图3 试件抗压强度试验的应力-应变拟合曲线

表1 应力-应变拟合曲线各参数

拟合曲线函数	截距	斜率	残差平方和	皮尔逊相关系数 r	拟合系数 R^2	调整后 R^2
$y=a+bx$	$-3.550\ 94\pm\ 0.031\ 73$	$6\ 941.621\ 1\pm\ 8.339\ 9$	1 751.539 98	0.998 1	0.996 2	0.996 2

2 黏结层受力特性分析

2.1 荷载工况

在12种荷载工况下,对界面层进行受力模拟分析,得到黏结层-铺装层、黏结层-钢板界面间的横向剪应力、纵向剪应力和法向拉应力的变化趋势,如图4所示。

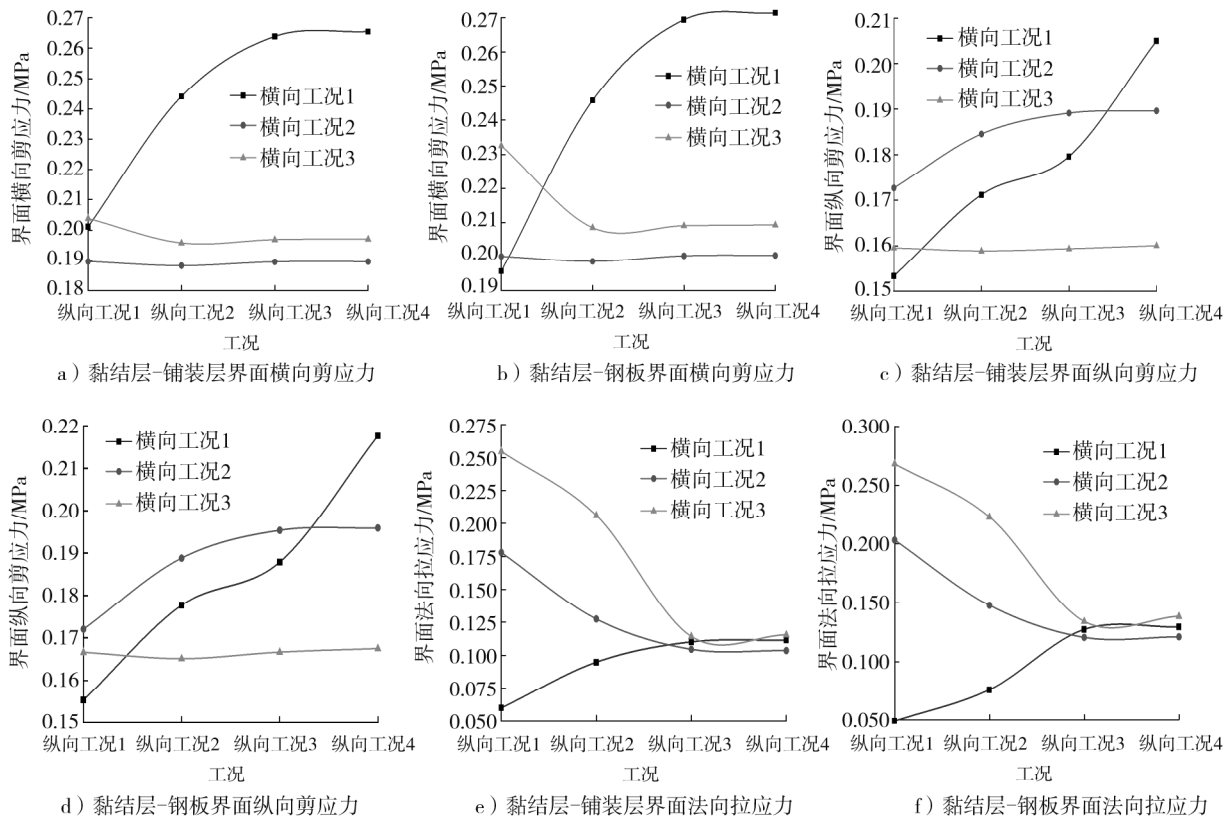


图4 不同荷载工况下不同界面应力的变化趋势

由图 4a)~d)可知:黏结层-铺装层、黏结层-钢板界面的横向剪应力与纵向剪应力在横向工况 1 随纵向位置的变化而显著增大,距横隔梁的距离越远,界面横向、纵向剪应力越大,且横向剪应力明显大于纵向剪应力,因此,不重点分析纵向剪应力。如车轮荷载位于工况 1-4 时,黏结层-铺装层界面横向剪应力为 0.265 MPa,黏结层-钢板界面横向剪应力为 0.271 MPa,此工况为界面横向剪应力最不利工况。由图 4e)、f)可知:界面最大法向拉应力出现在工况 3-1 处,后续计算分析以 1-4 作为横向剪应力的最不利位置,3-1 作为法向拉应力的最不利位置。

2.2 钢桥跨径

钢梁-混凝土梁组合梁跨径分别为 30、40、50、60、70 m,分析跨径对黏结层受力的影响,结果如表 2 所示。

表 2 钢桥跨径对黏结层界面应力的影响

跨径/m	界面最大横向剪应力/kPa		界面最大法向拉应力/kPa	
	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面
30	265.05	271.51	259.57	268.19
40	265.01	271.00	257.02	266.00
50	265.48	271.38	254.47	261.90
60	265.99	272.02	251.16	259.61
70	265.86	272.24	248.30	256.80

由表 2 可知:黏结层-铺装层、黏结层-钢板界面的应力随跨径增大而变化的幅度较小,说明跨径对铺装黏结层的受力影响较小,可忽略不计。原因是车辆荷载作用下钢箱梁和横隔梁分别起到横向支点和纵向支点作用,钢桥的力学响应主要发生在轴载相近的钢箱梁和横隔梁间隔内,距车辆荷载作用位置越远,力学响应越小。钢桥跨径为 30~70 m 时最大横向剪应力、法向拉应力的变化范围未超过 20 kPa,影响较小。同一工况下,钢桥的受力特性与跨径关系较小。下文均选用跨径为 50 m 的钢桥计算分析各参数对黏结层应力的影响。

2.3 铺装结构

2.3.1 黏结层厚度

研究不同黏结层厚度对黏结层受力特性的影响,设沥青铺装层厚 40 mm,黏结层厚度分别为 10、15、20、25 mm 时模拟分析界面应力,结果如表 3 所示。

表 3 黏结层厚度对黏结层界面应力的影响

黏结层厚度/ mm	界面最大横向剪应力/kPa		界面最大法向拉应力/kPa	
	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面
10	265.42	271.35	254.69	267.98
15	235.23	244.27	288.55	297.70
20	183.92	203.50	301.64	309.95
25	168.95	184.42	308.08	319.71

由表 3 可知:界面最大横向剪应力随黏结层厚度的增大而减小,如黏结层厚度为 20 mm 时,黏结层-铺装层界面最大横向剪应力比黏结层厚度为 10 mm 时减小 30.7%;界面法向拉应力随黏结层厚度的增大而明显增大。增大黏结层厚度可有效减小界面横向剪应力,但界面法向拉应力增大。原因是聚氨酯改性环氧黏结层的弹性模量较大,黏结层厚度增大时其整体刚度增大,荷载作用下铺装结构与钢桥面间水平相对位移减小,剪应力减小,由翘曲作用形成界面拉应力,最大界面拉应力位于箱梁梁肋附近,黏结层

越厚,翘曲作用越明显,界面拉应力随黏结层厚度的增大而增大^[18-19]。

2.3.2 铺装层厚度

设黏结层厚度为 10 mm,分析沥青铺装层厚度分别为 40、60、80、100 mm 时,铺装层厚度对黏结层受力特性的影响,结果如表 4 所示。

表 4 铺装层厚度对黏结层界面应力的影响

黏结层厚度/ mm	界面最大横向剪应力/kPa		界面最大法向拉应力/kPa	
	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面
40	265.18	271.11	252.10	267.96
60	244.49	253.49	180.30	200.66
80	216.82	221.13	132.81	149.62
100	198.18	207.60	110.48	120.40

由表 4 可知:黏结层-铺装层和黏结层-钢板界面的最大横向剪应力、法向拉应力均随铺装层厚度的增大而减小,说明适当增大铺装层厚度可有效减小黏结层界面的应力。沥青铺装层厚度变化对界面拉应力的影响规律与黏结层厚度对界面拉应力的影响规律相反,以黏结层-铺装层界面应力为例,铺装层厚度由 40 mm 增至 100 mm 时,界面最大法向拉应力由 252.10 kPa 降至 110.48 kPa,减小 56.18%,原因是铺装层弹性模量比黏结层和钢桥小,刚度较小,铺装层增厚限制黏结薄层的翘曲作用^[20-21]。

2.4 温度变化

为模拟摄氏温度变化对黏结层受力特性的影响,将聚氨酯改性环氧树脂黏结层弹性模量 E_s 与沥青层弹性模量进行组合,取摄氏温度 t 分别为 0、20、40、80 °C,沥青混凝土静态弹性模量随温度变化的拟合公式为:

$$\{E_s\} = 3\,194.5 \exp(-0.039\{t\}), \quad (1)$$

式中: $\{E_s\}$ 为以 MPa 为单位的 E_s 的数值, $\{t\}$ 为以 °C 为单位的 t 的数值。

聚氨酯改性环氧树脂薄层的静态弹性模量 E_j 随摄氏温度变化的拟合公式为:

$$\{E_j\} = -0.000\,5\{t\}^2 - 0.032\{t\} + 7.54, \quad (2)$$

式中: $\{E_j\}$ 为以 MPa 为单位的 E_j 的数值。

根据式(1)(2)得到不同温度下铺装层与黏结层的弹性模量,模拟中设置材料不同弹性模量对应代替实现不同温度下的受力情况,弹性模量随摄氏温度的升高而减小。模量组合对黏结层界面应力的影响如表 5 所示。

表 5 模量组合对黏结层界面应力的影响

弹性模量组合	弹性模量/MPa		界面最大横向剪应力/kPa		界面最大法向拉应力/kPa	
	铺装层	黏结层	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面
1	3 195	7 540	561.38	604.64	471.76	509.91
2	1 464	6 700	289.15	319.55	278.24	321.80
3	671	5 460	266.74	295.58	155.61	201.95
4	141	1 780	128.97	140.27	71.13	102.41

由表 5 可知:随摄氏温度升高,黏结层-铺装层、黏结层-钢板界面最大横向剪应力、界面最大法向拉应力均显著减小。原因是摄氏温度升高时黏结层与铺装层的弹性模量均明显减小,铺装结构层模量变化对整个钢桥的受力变形影响较小,黏结层和铺装层的界面横向剪应力、法向拉应力与铺装结构层弹性模量成正比^[22-23]。

2.5 水平荷载

为研究车辆制动对黏结层受力的影响,考虑路表水平力的作用,以摩擦因数表示水平力的大小。设置摩擦因数为 0(正常行驶)、0.20(一般情况刹车)、0.50(紧急刹车)及 0.75(特殊路段紧急刹车)4 种情况,分析水平荷载对黏结层界面应力的影响,如表 6 所示。

表 6 摩擦因数对黏结层界面应力的影响

摩擦因数	界面最大纵向剪应力/kPa		界面最大法向拉应力/kPa	
	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面	黏结层-铺装层界面	黏结层-钢板界面
0	215.47	203.62	252.96	268.47
0.20	298.31	277.79	254.04	267.82
0.50	418.24	393.37	253.18	269.33
0.75	526.11	490.87	253.19	269.66

由表 6 可知:随摩擦因数的增大,黏结层-钢板界面、黏结层-铺装层界面最大纵向剪应力均线性增大。摩擦因数为 0.75 时,黏结层-钢板界面最大纵向剪应力比摩擦因数为 0 时增大 141%,黏结层-铺装层界面最大纵向剪应力比摩擦因数为 0 时增大 141%;黏结层-铺装层、黏结层-钢板界面法向拉应力在摩擦因数变化时基本无变化。

3 结论

- 1)对聚氨酯环氧树脂碎石材料作为钢桥面黏结层的受力特性进行仿真分析,考虑车辆荷载位置、钢桥跨径、铺装结构厚度等因素,正常行驶条件下,车辆荷载横桥向作用于钢箱梁间位置且纵向位于横隔梁中间位置时黏结层-铺装层、黏结层-钢桥界面剪应力最不利,横向剪应力明显大于纵向剪应力。荷载作用于钢箱梁上方且靠近横隔梁时,为黏结层-铺装层与黏结层-钢桥面的界面法向拉应力最不利位置。
- 2)钢箱梁跨径大于 30 m 时,跨径变化对黏结层界面应力的影响较小。黏结层厚度增大时界面最大剪应力减小,法向拉应力明显增大。随沥青铺装层厚度增大,黏结层界面剪应力和法向拉应力均显著减小。
- 3)随大气温度升高,聚氨酯改性环氧树脂黏结层和沥青铺装层的弹性模量均大幅减小,黏结层-铺装层、黏结层-钢板界面应力也显著减小。车辆水平荷载对黏结层层间纵向剪应力的影响较大,对层间法向拉应力的影响较小,随水平荷载增大,黏结层的层间纵向剪应力线性增大。

参考文献:

[1] 陶雅乐,易虹宇,艾长发,等. 支座偏心对小半径弯桥桥面铺装层受力特征的影响分析[J]. 市政技术,2022,40(2): 29-35.

[2] 刘林林,纵瑾瑜,李银山,等. 基于病害控制的钢桥面力学响应分析[J]. 现代交通技术,2021,18(2):42-45.

[3] 吴淑印. 钢桥面高延性水泥基材料铺装结构界面特性研究[D]. 南京:东南大学,2019.

[4] 容洪流. 港珠澳大桥 MA 类浇注式沥青钢桥面铺装加速加载试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.

[5] 李梦琪. 基于车桥耦合振动效应的钢桥面沥青铺装层轴载换算方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

[6] HUC H, QIAN J. Shear stress analysis of long-span steel bridge deck asphalt pavement using FEM[J]. Advanced Materials Research, 2011,304:12-17.

[7] 王刚,林树锋,陈翠婷,等. 大跨径钢桥面沥青铺装层有限元分析[J]. 森林工程,2018,34(2):81-88.

[8] 冯蕾,王岚,杜伟. 桥面铺装层温度应力有限元分析[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版),2014,33(3):227-234.

[9] 苗禄伟,李信. 桥面铺装层力学响应的有限元分析[J]. 厦门理工学院学报,2019,27(3):84-90.

[10] 杨中才,王根宝,陈继红. 基于有限元分析的双层桥面铺装方案研究[J]. 交通科学与工程,2019,35(4):52-56.

- [11] 刘云,钱振东. 立转式开启桥钢桥面铺装结构的应力状态分析[J]. 公路交通科技,2014,31(1):55-60.
- [12] 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[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(4):729-733.
- [13] WANG X T, ZHANG C H, SUN R J. Response analysis of orthotropic steel deck pavement based on interlayer contact bonding condition[J]. Scientific Reports,2021,11:23692.
- [14] MA H, ZHANG Z G, DING B, et al. Investigation on the adhesive characteristics of engineered cementitious composites (ECC) to steel bridge deck[J]. Construction and Building Materials,2018,191:679-691.
- [15] NIU S L, WANG J Y, WANG Z C, et al. Overall feasibility assessment of polyester polyurethane concrete used as steel bridge deck pavement[J]. Frontiers in Materials,2022,9:1071316.
- [16] LIU X, ZHOU C J, CAO Q, et al. Experimental study on properties of epoxy binder and epoxy bonding chips layer for steel bridge deck pavement[J]. Road Materials and Pavement Design,2022,23(10/11/12):2451-2465.
- [17] LIU G, QIAN Z D, XUE Y C. Comprehensive feasibility evaluation of a high-performance mixture used as the protective course of steel bridge deck pavement[J]. Construction and Building Materials,2022,322:126419.
- [18] DING Q J, LEI Y X, ZHANG G Z, et al. Interlaminar bonding performance of uhpc/sma based on diagonal shear test [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science). 2023,38(1):97-108.
- [19] XIA H Y, LU C J, YANG H T, et al. Preparation and performance of durable waterproof adhesive layer for steel bridge deck based on self-stratification effect[J]. Construction and Building Materials,2023,366:130133.
- [20] ZHANG J S, WANG R, ZHAO R K, et al. Graphene oxide-modified epoxy asphalt bond coats with enhanced bonding properties[J]. Materials, 2022,15(19):6846.
- [21] 杜加伟,郭康,华新,等. 钢桥面铺装超高性能混凝土施工技术研究[J]. 江苏建材,2023(1):49-51.
- [22] 杨波,何兆益,刘攀,等. 基于聚合物合金材料钢桥面铺装结构性能研究[J]. 中外公路,2023,43(1):88-92.
- [23] 李嘉,陈卫,王万鹏,等. TPO-薄层 UHP C 轻型组合桥面层间温度应力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018,45(11):86-93.

Stress characteristics of the polyurethane-modified epoxy resin bonding layer on the steel bridge deck

ZHANG Peng¹, LIU Benli¹, SHAN Jingsong², ZHAO Haijian¹,
SONG Chengfa², CHEN Zixuan¹

1. Shandong Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: To analyze the force characteristics between the steel box girder pavement layer and the steel bridge deck bonding layer, a steel box girder bridge model is established using the finite element software ANSYS. Polyurethane-modified epoxy resin is used as the bonding layer for the steel bridge deck pavement structure. Various vehicle load conditions, steel bridge spans, pavement layer thicknesses, bonding layer thicknesses, temperature variations, and horizontal loads are simulated and analyzed to study the force effects on the bonding layer. The results indicate that under normal driving conditions, the transverse shear stress at the bonding layer interface is significantly greater than the longitudinal shear stress. The most unfavorable condition for the shear stress at the bonding layer interface is when the vehicle load acts between steel box girders and longitudinally away from the transverse diaphragm. When the load acts on the edge of the steel box girder and near the transverse diaphragm, the normal tensile stress between layers is most unfavorable. The span has little influence on the force of the bonding layer. As the thickness of the bonding layer increases, the shear stress at the interface

(下转第90页)