

实桥加载下钢桥面沥青铺装层应变动态响应

武金婷¹, 叶 奋^{1,2}, 吴怀睿¹, 贾晓阳³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
3. 田纳西大学 土木与环境学院, 诺克斯维尔 37996)

摘要: 为获取钢桥面沥青铺装结构的实际力学响应情况, 对上海市昌吉东路大桥进行梁式桥实桥加载试验, 分析了沥青铺装层(沥青玛蹄脂与环氧沥青混合料)不同层位在匀速、刹车动载作用下的纵横向应变, 研究表明, 路表处应变最大, 为最易破坏部位; 同一测点应变在匀速及刹车时具有相同的响应状态; 纵向动态应变具有压拉交替及波动特性, 横向动态应变仅具有波动性; 动态应变随深度、车速增大及轴重减小而呈减小趋势; 同一层位横向应变大于纵向应变, 且前者幅值较后者对影响因素更为敏感; 动态应变及其幅值对轴重、车速的敏感程度均自上而下减小; 动载瞬间应变与静载应变间差异视层位不同而异. 结果可为后续钢桥面铺装结构设计及材料选择提供参考.

关键词: 钢桥面; 沥青铺装层; 实桥加载; 应变; 动态响应
中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A

dynamic strain alternated in tension-compression cycles and fluctuated, while transverse strain merely fluctuated. With the increase of the depth and the speed, the dynamic strains decreased according to the decrease of the axle loads. The transverse strain was greater than the longitudinal value, and the amplitude of the former was more sensitive to the influence factors than that of the latter. Sensitivities of dynamic strains and their amplitude to axle load and vehicle speed decreased from top to bottom. The differences between dynamic and static strains existed different rules in three layers. The results can be applied to the structure design or material selection of asphalt pavement on steel bridge.

Key words: steel deck bridge; asphalt pavement; field loading test; strain; dynamic response

Strain Dynamic Response of Asphalt Pavement on Steel Deck Bridge with Field Loading Test

WU Jinting¹, YE Fen^{1,2}, WU Huairui¹, JIA Xiaoyang³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Tennessee, Knoxville 37996, USA)

Abstract: In order to obtain the actual mechanical response of asphalt pavement of steel deck bridge, a field loading test was carried out on Changji East Road Bridge in Shanghai, a steel bridge of the pavement with stone mastic asphalt and epoxy asphalt as the upper and the lower layers respectively. Test results show that the maximum strain appears at surface, where the pavement is the easiest to be damaged. The dynamic response of longitudinal and transverse strains under two loading conditions (uniform velocity and brake) was analyzed in different layers, and the response trends at the same measurement point had little discrepancy. Longitudinal

合理可靠的钢桥面沥青铺装不仅能提高行车舒适性和安全性, 而且作为桥面板的有效防护体系, 可保证桥梁结构耐久性. 但由于正交异性钢桥面沥青铺装层局部刚度小、挠度及变形大、传热快等原因, 纯力学的方法很难真实了解其实际力学响应情况, 而现场试验或工程经验便成为联系理论与实践的桥梁.

国外钢桥面铺装试验桥研究起步较早. Hameau 等^[1]曾采用两跨连续复合梁模型测量得到铺装层和钢板内的应变情况. 英国 1963 年在重交通干道上建造了与 Severn 桥相类似的试验段, 通过 10 年的观测与研究, TRRL (Transport and Road Research Laboratory) 认为符合 BS1447:1962 规范的浇注式沥青混合料更适用于英国环境. 1976 年, 日本铺设了长浦地钢床板试验桥, 研究认为“下层浇注式、上层改性密级配沥青混合料”的铺装结构最好. 瑞典为选择适合于滨海高桥的防水与铺装体系, 于 1993 年在 BD1337 号桥上开展了 8 种铺装结构的试铺工作, 开

收稿日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51168044)

第一作者: 武金婷(1982—), 女, 博士生, 主要研究方向为铺面工程. E-mail: wujinting0215@163.com

通讯作者: 叶 奋(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为铺面工程. E-mail: yefen@tongji.edu.cn

展了为期 4 年的观测与调查工作^[2]. 国内自虎门大桥开始重视对钢箱梁桥面铺装的研究, 相关单位先后在室内修筑正交异性钢桥面铺装环道或直道模型, 通过加速加载试验对比了不同铺装结构的性能, 主要涉及文献[3-10]的相关研究工作. 润扬长江公路大桥钢桥面铺装课题组采用应变片对试验桥铺装层进行了现场测试^[2,11].

以上国内外钢桥沥青铺装试验方面的相关研究虽然取得了一定的成果, 但仍存在不足: 室内试验不能准确再现钢桥在实际交通及自然环境下的真实变形、受力等状况; 室外研究受技术手段所限, 大多停留在铺装表面观测, 而未进行过铺装层内部监测, 即没有进行过钢桥面铺装体系的完整性研究. 所以, 目前尚需进一步对实桥沥青铺装层进行系统加载试验及长期监测.

依托上海昌吉东路大桥建设项目, 随其施工过程在不同铺装层位中埋设了应变及温度传感器, 可实现实时及长期测试数据采集. 通过现场实桥加载

试验, 对沥青铺装层在静动荷载作用下的应变状况进行了系统分析, 以便为钢桥面沥青铺装的结构设计提供实测数据.

1 试验概况

昌吉东路大桥 2010 年竣工, 主桥采用两跨连续下承式钢桁架拱全焊接组合钢结构, 跨径组合为 66 m+135 m, 主桥桥宽为 33 m, 双向四车道. 桥面板为正交异性, 顶板厚 16 mm; 横隔板间距 3.375 m, 厚 10 mm; U 形加劲肋间距 600 mm, 高 280 mm, 厚 8 mm. 桥面横向坡度 2%.

1.1 沥青铺装层

钢桥面行车道铺装上面层为 4 cm 沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13(stone mastic asphalt), 下面层为 4 cm 环氧沥青混合料 EA-10(epoxy asphalt), 防水黏结层采用环氧沥青, 防腐层采用环氧富锌漆. 表 1~4 为试验结果, 表明所用材料均满足要求.

表 1 铺装层沥青混合料马歇尔试验结果

Tab.1 Marshall test results of asphalt mixtures

混合料	油石比/%	密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/0.1 mm	粗集料间隙率/%	粗集料松装间隙率/%	结合料损失质量分数/%
SMA-13	6.2	2.406	3.8	17.3	77.3	11.37	4.2	38.7	44.0	0.02
EA-10	6.7	2.425	2.8	17.1	83.9	70.71	4.3			

表 2 铺装层沥青混合料性能试验结果

Tab.2 Performance test results of asphalt mixtures

混合料	残留稳定度/%	冻融劈裂抗拉强度比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
SMA-13	89.6	88.3	15 242
EA-10	91.7	81.1	>9 000(基本无变形)

表 3 防水黏结层剪切试验结果

Tab.3 Shear test results of waterproof bonding layer

试验温度/℃	防锈漆类型	剪切强度/MPa	破坏位置
20	环氧富锌漆	3.92	黏结层与钢板间
60	环氧富锌漆	2.06	铺装层与黏结层间

表 4 防水黏结层拉拔试验结果

Tab.4 Pullout test results of waterproof bonding layer

铺装类型	20℃黏结强度/MPa	破坏界面
钢板-环氧沥青混合料-黏结层-钢板	5.26	铺装层与黏结层
钢板-黏结层-钢板	5.46	黏结层与钢板

1.2 传感器

选用光纤光栅应变传感器进行应变测试, 采集频率 100 Hz; 选用特制封装 Pt100 温度传感器进行温度采集及应变温度补偿, 采集频率 1 次·min⁻¹. 应变 ϵ 由式(1)确定:

$$\epsilon = \frac{(\Delta\lambda - \alpha_T \Delta T)}{\alpha_\epsilon} \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为传感器光纤光栅中心波长变化量, pm; α_T 为随结构标定的温度补偿系数, pm·°C⁻¹; ΔT 为相对于初始波长对应的初始温度的变化, °C; α_ϵ 为传感器应变灵敏度系数, pm·μ ϵ ⁻¹.

传感器布置于外侧行车道, 在 EA 层底、SMA 层底及铺装层表面上下层位对应安装埋设应变、温度传感器, 并考虑轮迹横向分布及轮隙中心距等因素, 布设方案详见图 1. 在相邻 2 个横隔板的中心直线上测试横向应变, 传感器分别对应于第 2 个、第 5 个 U 形肋底部中心; 在横隔板直线上测试纵向应变, 传感器纵向对应于横向应变传感器. 在距横纵向应变传感器外侧 0.25 m 处分别布设 1 个温度传感器. 加载试验过程中, 气温为 20~24 °C, EA 层底温度为 19~21 °C, SMA 层底温度为 20~24 °C, 铺装层表面温度为 22~27 °C.

1.3 加载车辆

采用东风中型货车作为加载试验车辆, 车箱中满载袋装黄砂, 其参数见表 5. 试验中后轴轮隙中心

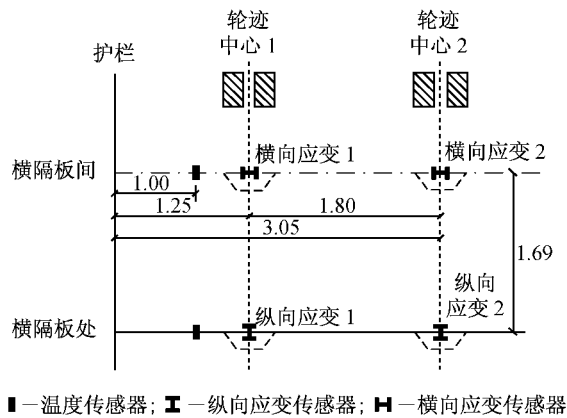


图1 铺装结构中传感器布设示意(单位:m)

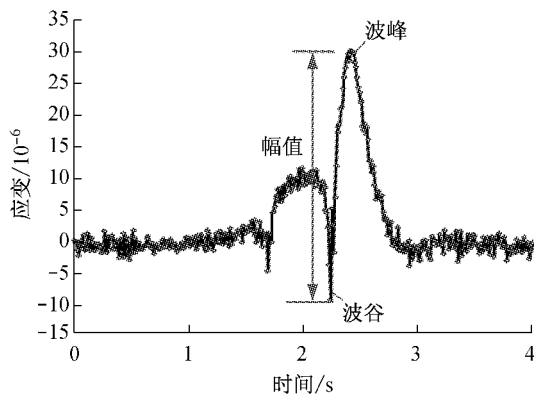
Fig.1 Laid schematic diagram of sensors in the pavement structure(unit: m)

表5 加载车辆参数

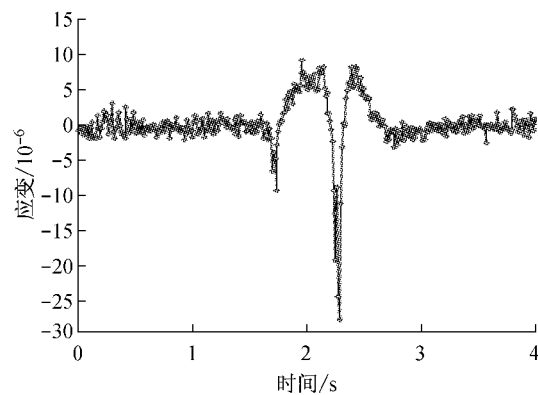
Tab.5 Loading vehicle parameters

加载轴	轴重/kg		单轮接触地面尺寸/cm		压强/MPa	距离/m	
	左轮	右轮	长	宽		前后轴距	轮隙中心距
前轴	760	900	22	12	0.32	4.00	1.80
后轴	5 060	5 080	22	16	0.73		

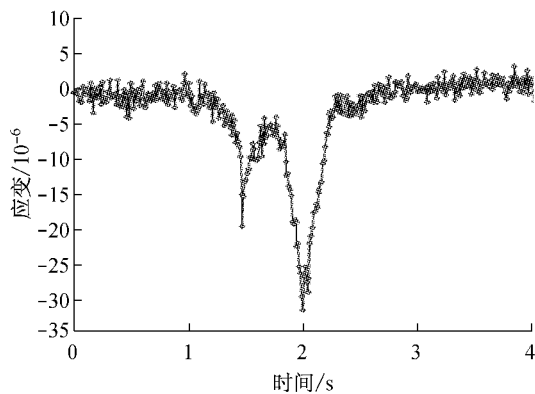
与传感器纵向布置线重合(如图1所示).



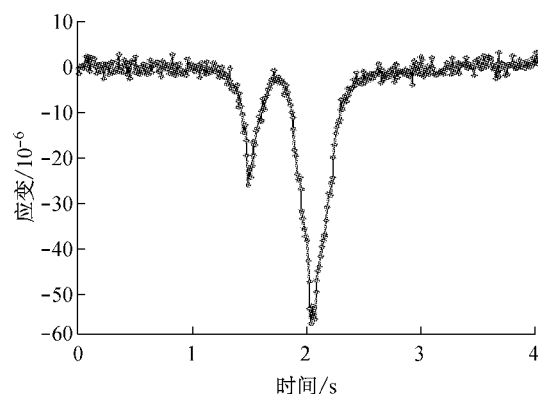
a SMA 层底纵向应变 1



b SMA 层底纵向应变 2



c SMA 层底横向应变 1



d SMA 层底横向应变 2

图2 匀速动载时 SMA 层底应变动态响应曲线

Fig.2 Real-time strain curves of SMA layer at a uniform velocity

1.4 加载试验

通过预定加载条件对钢桥面施加静态、动态荷载进行沥青铺装层在不同行车荷载条件下的力学响应分析. 于2010年7月、2011年5月进行了2次实桥加载试验, 加载试验项目主要有: ①匀速试验. 加载车辆以行驶速率 $20 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速通过测点. ②刹车试验. 加载车辆在行驶速率 $20 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下进行刹车, 通过事先确定的刹车距离使应变测点位于刹车范围内. ③静载试验. 加载车辆在预定测点熄火静止 5 min.

2 试验结果分析

2.1 SMA 层底应变

由所测的试验数据绘图分析可知, 同一测点在行车荷载以不同速率匀速通过时的应变曲线变化趋势相同. 因此, 图2、图3分别仅以 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速、刹车条件下测试结果为例给出了 SMA 层底各测点应变的动态响应曲线.

综合分析图2及图3可知, ①对于同一测点, 匀

速行车荷载作用下应变动态响应曲线与刹车时形态相同,具有显著突变和波动特性. ②不同动载(匀速、刹车)速率下的应变时程曲线趋势相同,但变化幅值及响应时间存在差异. ③SMA 层底应变在不同轴重(前轴、后轴)作用瞬间具有一致的变化趋势,但动态应变响应随轴重增加而变大. ④SMA 层底的纵向、横向应变动态响应曲线具有不同特性. 横隔板对应

的纵向应变实时曲线表现为压-拉交替突变及波动特性. 在车载作用瞬间,测点表现为受压;车载离开后,横向拉应变的迅速增大引起与其协同变化的纵向拉应变增大,随后纵向受拉状态逐步恢复. 而 2 个横隔板中间对应的横向应变实时曲线仅表现为波动特性. 在车载作用瞬间,测点表现为受压;车载离开后,测点压应变逐步恢复.

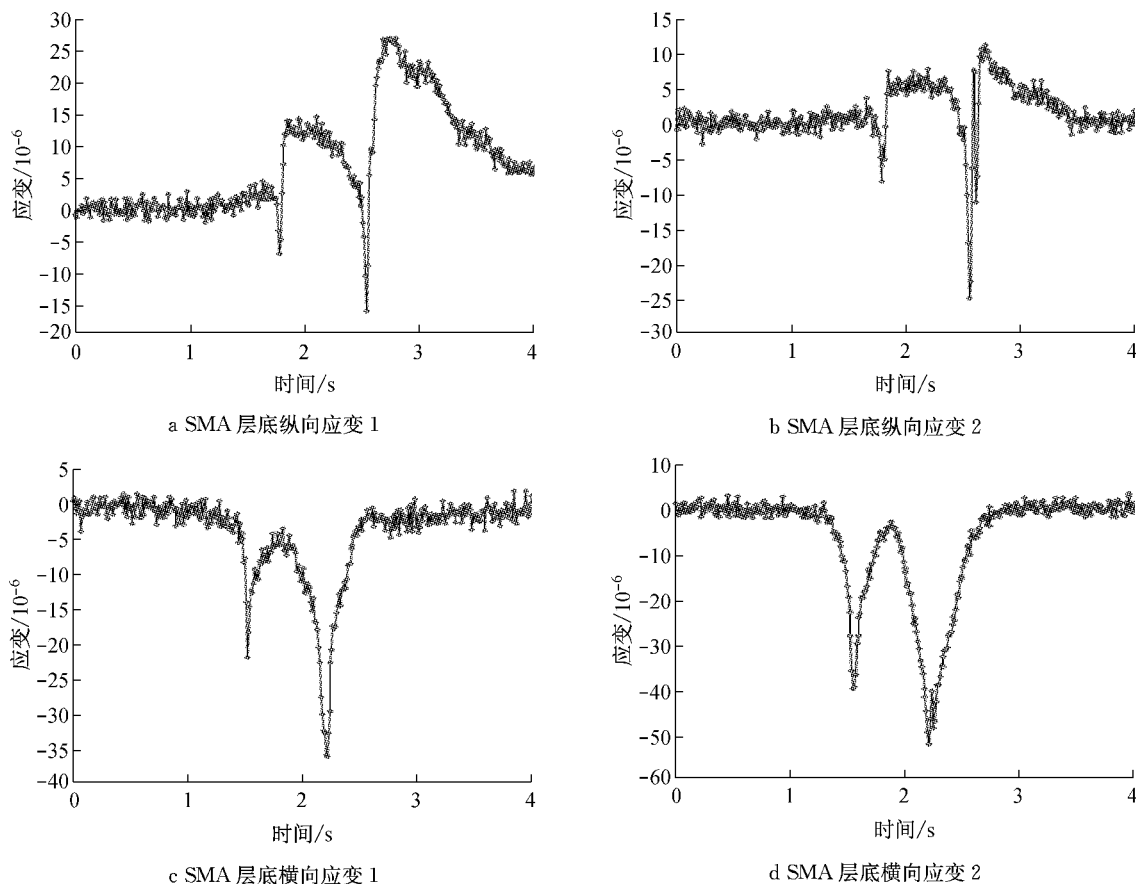


图 3 刹车动载时 SMA 层底应变动态响应曲线

Fig. 3 Real-time strain curves of SMA layer under brake condition

综合分析表 6 及图 4 可知, ①刹车作用下的 SMA 层底纵向、横向应变动态响应峰谷值及幅值大于匀速动载作用下相应值. ②刹车作用下横向应变对轴重的敏感性(即应变值随轴重变化而产生的增减程度)小于匀速状态下,且横向应变幅值所受轴重影响较纵向应变更为显著. 对于横向应变,匀速时后轴作用下的应变幅值为前轴下的 2.8 倍,刹车时为 1.3 倍;对于纵向应变,其值分别为 2.0 倍、1.7 倍. ③SMA 层底纵横向应变在相对较大的轴重(即后轴)下随车速变化显著. ④对应于第 2 个 U 形肋(应变 1)的纵横向应变波谷值小于第 5 个 U 形肋(应变 2)对应值,即远离纵梁约束的铺装上层底受到车载的瞬间压应变程度更大.

由表 7 可知,动载作用下 SMA 层底应变小于静载条件下相应值,且横向应变比纵向应变受动载影响更大. 具体表现为:前轴作用时 SMA 层底纵向、横向动态应变分别约为静载应变的 55%, 35%.

2.2 EA 层底应变

由于施工扰动问题,EA 层底只有 1 个横向应变传感器埋设成活,其布设于钢板环氧沥青混合料层底,未焊接于桥面板上. 相比之下,上面层底及表面层光纤光栅应变传感器在埋设及加载中均表现成活且性能稳定,但下面层与钢板的百倍模量差异降低了应变传感器的成活率,在后续相关研究中需加强铺装下层与钢板间传感器的安装工作.

同 SMA 层底,EA 层底应变在不同行车荷载速

表6 不同动载条件下 SMA 层底动态应变

Tab.6 Dynamic strains of SMA layer under different loading conditions

工况序号	加载条件			纵向应变/ 10^{-6}						横向应变/ 10^{-6}	
	加载轴	动载方式	动载速率/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	应变 1			应变 2			应变 1	应变 2
				波峰	波谷	幅值	波峰	波谷	幅值	波谷	波谷
1	前轴	匀速	20	14.55	-3.55	18.10	9.75	-8.18	17.93	-15.45	-25.21
2	前轴	匀速	40	11.74	-4.63	16.37	9.17	-9.34	18.51	-19.50	-25.95
3	前轴	匀速	60	12.64	-3.22	15.86	9.75	-10.25	20.00	-18.76	-22.23
4	前轴	刹车	40	14.71	-6.78	21.49	7.93	-8.02	15.95	-21.74	-39.26
5	前轴	刹车	60	19.34	-11.65	30.99	12.40	-19.67	32.07	-31.90	-45.21
6	后轴	匀速	20	30.91	-6.20	37.11	7.44	-17.02	24.46	-45.21	-99.67
7	后轴	匀速	40	30.25	-9.01	39.26	8.26	-27.69	35.95	-31.32	-56.53
8	后轴	匀速	60	33.55	-6.61	40.16	8.68	-18.84	27.52	-42.81	-83.80
9	后轴	刹车	40	27.02	-15.79	42.81	11.32	-24.46	35.78	-35.79	-51.65
10	后轴	刹车	60	28.26	-15.21	43.47	12.48	-28.60	41.08	-41.07	-69.67

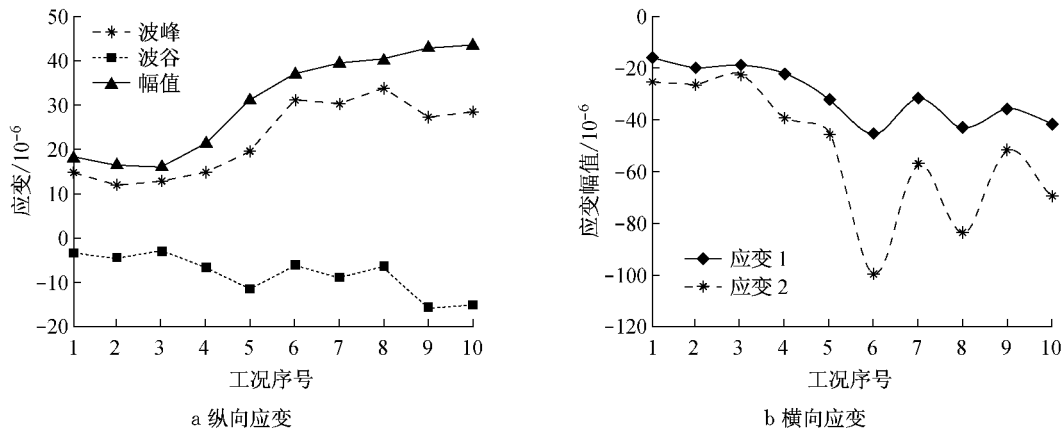


图4 SMA 层底应变动态响应峰值、谷值、幅值间关系

Fig.4 Relationship among peak, trough and amplitude of dynamic strain of SMA layer

表7 SMA 层底静载与动载应变对比

Tab.7 Contrast of static and dynamic strains of SMA layer

应变	前轴			后轴		
	静载应变/ 10^{-6}	动载应变/ 10^{-6}	动载与静载 应变比/%	静载应变/ 10^{-6}	动载应变/ 10^{-6}	动载与静载 应变比/%
纵向应变 1	18.26	14.59	79.90	45.45	30.00	66.01
纵向应变 2	19.92	9.80	49.20	40.99	9.64	23.52
横向应变 1	-70.08	-21.47	30.64	-84.79	-39.24	46.28
横向应变 2	-104.96	-31.57	30.08	-179.47	-72.26	40.26

率下的动态响应曲线趋势相同。图5为在 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速行车荷载条件下的 EA 层底横向应变实时曲线,动态应变结果见表8(工况序号对应的加载条件与表6中相同),动载与静载应变结果比较见表9。

由图5可知,EA 层底横向应变动态响应曲线趋势大致与 SMA 层底同,但对行车荷载离开后的反应存在差异:在车载作用瞬间,测点表现为受压;车载离开后,测点压应变恢复并表现为较小程度的受拉。

由表8可知,①EA 层底横向应变几乎不受车速影响;后轴作用下的 EA 层底横向应变幅值为前轴作用下的4倍。②EA 层底横向应变小于 SMA 层底,前者约为后者的 $1/5 \sim 1/3$,且在刹车情况下的差

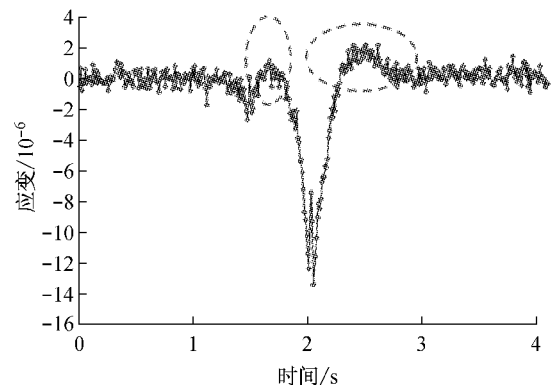


图5 EA 层底横向应变动态响应曲线

Fig.5 Real-time transverse strain curve of EA layer

异小于匀速条件下相应值. 由表 9 可知,EA 层底横向动静载应变均为压应变,且动态荷载作用下受压程度较大.

表 8 不同动载条件下 EA 层底横向动态应变

Tab.8 Dynamic transverse strains of EA layer under different loading conditions

工况序号	应变/ 10^{-6}		
	波峰	波谷	幅值
1	1.25	-2.55	3.80
2	1.15	-2.15	3.30
3	0.50	-2.95	3.45
4	0.45	-3.60	4.05
5	0.70	-6.60	7.30
6	2.60	-12.90	15.50
7	2.05	-13.40	15.45
8	2.25	-13.75	16.00
9	2.30	-15.20	17.50
10	2.20	-13.00	15.20

表 9 EA 层底静载与动载应变对比

Tab.9 Contrast of static and dynamic strains of EA layer

加载轴	加载类别	横变应变/ 10^{-6}
前轴	静载	-1.95
	动载	-2.55
后轴	静载	-4.05
	动载	-13.65

2.3 铺装层表面应变

加载试验中,考虑车轮沿其行进方向会对应变传感器产生挫伤破坏,将表面纵向应变传感器布置于距离轮迹带中心外侧 0.5 m 处,由于其已处于荷载作用范围以外(相关文献研究中距离 $d>0.16$ m),动载条件下表面纵向应变几乎不受荷载影响,与静态应变结果相符. 在 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 匀速荷载条件下,铺装层表面应变随动载工况发展的变化曲线见图 6,动态应变结果见表 10.

由图 6 及表 10 可知,①铺装层表面横向应变动态响应曲线具有波动性和突变性,且车速越大,横向

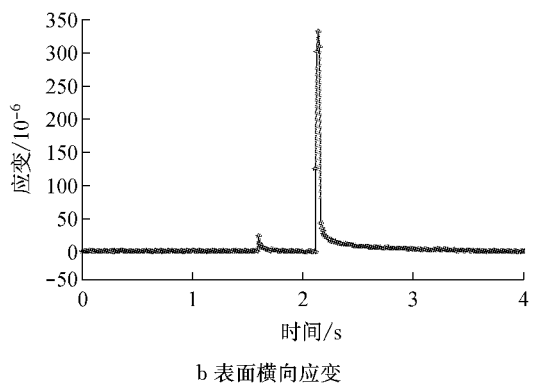
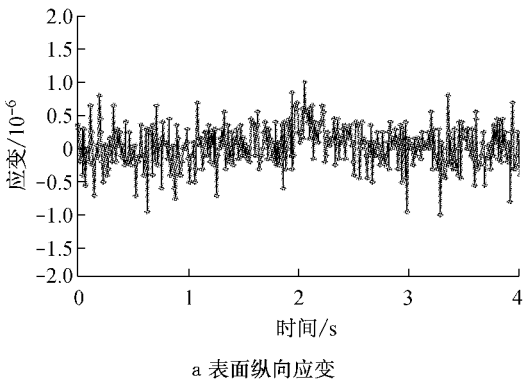


图 6 铺装层表面应变动态响应曲线
Fig.6 Real-time strain curves of surface at a uniform velocity

表 10 不同动载条件下铺装层表面动态应变

Tab.10 Dynamic strains of surface under different loading conditions

工况序号	纵向应变/ 10^{-6}			横向应变/ 10^{-6}
	波峰	波谷	幅值	
1	—	—	—	306.85
2	—	—	—	23.10
3	—	—	—	188.60
6	1.00	-0.80	1.80	355.30
7	1.00	-1.00	2.00	332.20
8	1.50	-1.00	2.50	207.35

应变越小. ②铺装层表面应变对行车荷载的反应时间(自测点动态应变开始产生至恢复为零所需时间)远远小于其他层位(SMA,EA 层底),仅约为 0.1 s.

由表 11 可知,与 SMA,EA 层底动静载应变对比关系不同,铺装层表面静载应变小于动载应变,且在不同轴重作用下表现不同. 在前轴作用下,静载及动载时的表面横向应变相差不大;在后轴作用下,动载下的表面横向应变较大,这是因为静载试验时测点传感器位于双轮轮隙中,而动载试验时车轮可能正好压在测点传感器上.

表 11 铺装层表面静态与动态应变对比

Tab.11 Contrast of static and dynamic strains of surface

加载轴	加载类别	纵向应变/ 10^{-6}	横向应变/ 10^{-6}
前轴	静载	—	160.60
	动载	—	172.85
后轴	静载	9.05	111.05
	动载	2.50	304.95

2.4 各层位应变特征分析

分析轮迹带范围内加劲肋及横隔板上方的铺装层应变,对于钢桥面铺装材料选型、铺装结构组合设计与优化及其疲劳开裂设计指标制定等都具有重要

意义。

通过分析不同层位的应变特征可知, SMA 层底应变的动态响应属于小应变水平,这主要是由于试验环境温度属于常温状态,加之车辆荷载的动态效应,铺装层表现为较高的劲度模量,从而使得上面层底应变水平较低。但 SMA 层底在某些工况下也会出现应变水平较高的情况(如 2 个横隔板间的横向应变),且动载下其拉压应变交替特性易造成铺装层的疲劳破坏;钢桥面铺装层间力学分析也表明,双层式铺装结构的层间出现的拉应变(力)水平十分可观,因此在桥面铺装结构设计中对于双层式铺装结构的层间受力状态应予以关注。

EA 层底应变水平普遍小于 SMA 层底。这是由于 EA 层与钢板之间的环氧沥青黏结层为热固性材料,其具有良好的温度稳定性和极高的黏聚力,使黏结的上、下两部分充分结合,整体受力,提高荷载扩散能力,从而减小了层底应变水平。

铺装层表面拉应变是钢桥面铺装结构设计指标之一,以疲劳开裂作为设计标准时,控制铺装层表面的最大拉应变(力)不超过沥青混合料相应的容许值。笔者对上海市内近 20 座中小跨径钢桥面的沥青铺装进行现场调查,发现钢桥面铺装主要破坏表现

为沿桥面纵向产生疲劳开裂,并伴随有一定的斜向裂缝,且裂缝的横向分布间距具有规律性。因此对于正交异性板钢桥面铺装设计,铺装表面拉应变仍是必须关注的设计指标。

相关分析表明,在标准荷载作用下,大跨径钢桥面沥青铺装层的表面拉应变水平为 $400 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ [2,12],远高于路面。从本文实测结果可知,梁式钢桥由于其结构稳定性良好,铺装表面应变为 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$,低于大跨径钢桥,病害程度低于后者。因此,对于面积小、总造价低的较小跨径钢桥面,现有大型钢桥面铺装设计、选材原则并不完全适用,本文测试结果可作为后续较小跨径钢桥面铺装设计及选材的参考。

3 动态应变幅值与车速

由应变动态响应曲线中 2 个相邻应变波峰(或波谷)间的时间差,即前轴、后轴作用于测点的时间间隔,以及加载车辆的前后纵向轴距,按照前后轴距与时间差的比值计算得到加载车速。图 7 为不同层位动态应变幅值与相应计算加载车速的关系。

由图 7 可知:①横向应变幅值比纵向应变幅值

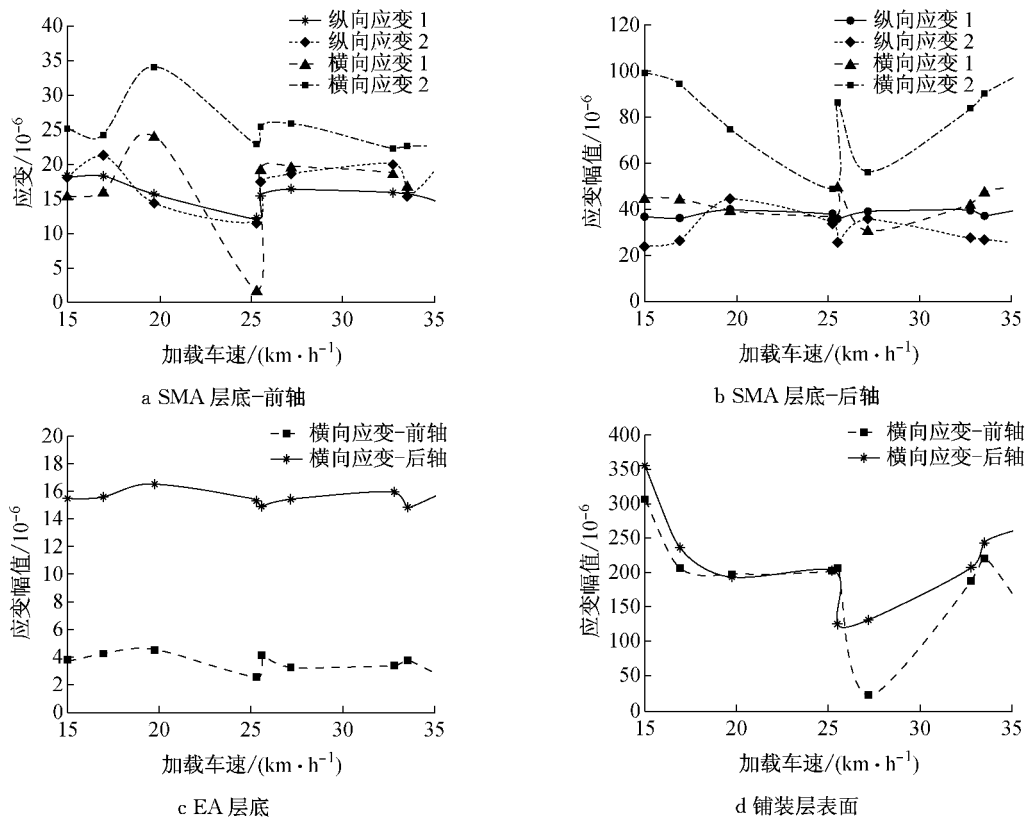


图 7 动态应变幅值与加载车速关系

Fig.7 Relationship between dynamic strain amplitude and loading velocity

对车速更为敏感。②铺装层动态应变幅值自上而下对轴重的敏感程度逐渐减小,但同一层位动态应变幅值在不同轴重作用下随车速的变化趋势相同。③由于铺装层表面动态应变幅值最大,所以路表为最容易发生破坏层位。因此,宜以表面动态应变幅值作为车速对桥面铺装影响程度的首要考虑因素,其他层位相应值作为参考。铺装层表面横向动态应变与加载车速的回归关系式为

$$\epsilon_t = 1.50V^2 - 77.95V + 1\,160.7 \quad R^2 = 0.85 \quad (2)$$

式中: ϵ_t 为铺装层表面横向动态应变, 10^{-6} ; V 为加载车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; R^2 为相关系数。试验中,当 $V = 26 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,表面横向动态应变最小; SMA 层底在 $25.49 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 动载下取得最小值后趋于稳定; EA 层底受车速影响较小。所以,可认为行车荷载为 $26 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时桥面铺装整体动态应变较为稳定。

4 结论

(1) 对于同一测点,匀速和刹车作用下的动态应变具有相同的时程响应状态,但刹车条件下的动态应变值较大,结果可作为后续室内试验中考虑线形、坡度、速率等因素后放大系数的参考。SMA 及 EA 层底的动态应变在一定程度上反映层间的应变状态,可作为室内铺装材料疲劳试验、沥青黏结体系试验中应变水平的参考。不同层位动态应变低于大跨径钢桥,可作为后续较小跨径钢桥面铺装设计及选材的参考。

(2) 在动载作用下,横向应变大于纵向应变且两者动态响应特性不同。横隔板上方对应的纵向应变实时曲线表现为“压-拉”交替突变及波动特性。横隔板中间对应的横向应变实时曲线表现仅为波动特性,基本无拉压交替。

(3) 动态应变随不同因素的影响表现为:动态横向应变自表面向下而减小,铺装表面动态应变远远大于上、下面层底部应变,而对车载作用的反应时间逐渐延长;动态应变随轴重增加、车速降低而增大,且自下而上横向应变幅值比纵向应变幅值对轴重、车速更为敏感;动载瞬间应变与静载应变间差异视层位不同而异。

参考文献:

[1] Hameau W, Esslinger M. Die Stahlfahrbahn berechnung und

konstruktion [J]. Maschinen Fabrik-Augsburg-Nuernberg Forschung Sheft, 1957(7):305.

[2] 吴胜东.润扬长江公路大桥建设:钢桥面铺装[M].北京:人民交通出版社,2006.

WU Shengdong. The collection of Runyang Yangtze River Bridge construction [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.

[3] 方萍,伍波.钢桥面板及铺装的静载试验和有限元分析[J].华东公路,2000(4):38.

FANG Ping, WU Bo. Static loading test and finite element analysis of steel bridge deck and pavement [J]. East China Highway, 2000(4):38.

[4] 伍波,方萍.钢桥面铺装的有限元分析和环道模型设计[J].公路,2001(1):24.

WU Bo, FANG Ping. Finite element analysis and circular model design of steel deck pavement [J]. Highway, 2001(1):24.

[5] 童乐为,沈祖炎.正交异性钢桥面板疲劳验算[J].土木工程学报,2000,33(3):16.

TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3):16.

[6] 黄成造.钢箱梁桥面铺装力学行为与结构优化研究[D].西安:长安大学,2010.

HUANG Chengzao. Study on the mechanical behavior and structure optimization of steel box Girder deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

[7] 沈桂平,曹雪琴.正交各向异性钢桥面板铺装的疲劳承载力试验研究[J].上海铁道大学学报,1996(3):100.

SHEN Guiping, CAO Xueqin. Experimental study on pavement fatigue of orthotropic steel deck plate [J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 1996(3):100.

[8] 杨三强.钢桥面铺装加速加载实验研究[D].西安:长安大学,2010.

YANG Sanqiang. The accelerated testing study on the steel bridge deck Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

[9] 李国民,李宇峙.钢桥桥面沥青铺装层应变变化规律研究[J].公路交通科技,2000,17(6):1.

LI Chuangmin, LI Yuzhi. Study on variation of strain in the surfacing of asphalt mixture on the steel bridge deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(6):1.

[10] 邵腊庚,张起森,李宇峙,等.直道钢桥面沥青铺装层动应变测试与分析[J].公路,2001(1):63.

SHAO Lageng, ZHANG Qisen, LI Yuzhi, et al. Dynamic strain test and analysis of steel deck asphalt pavement layer on straight track test model [J]. Highway, 2001(1):63.

[11] 胡光伟.大跨径钢桥面铺装体系力学分析与优化设计[D].南京:东南大学,2005.

HU Guangwei. Mechanical analysis and structural optimum design for deck paving of long-span steel bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.

[12] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

HUANG Wei. Theory and method of deck paving design for long-span bridge [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.