

钢桥面复合铺装结构的大比例模型试验

张久鹏^{1,2}, 刘少文^{1,3}, 刘永健²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;

3. 山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 在钢桥面板与沥青铺装层之间设置轻质混凝土层, 组成了一种新型钢桥面复合铺装体系。为研究这种新型铺装体系的力学特性, 制备了大比例模型试件, 实测了不同车位下钢桥面及铺装结构的力学响应。结果表明: 钢桥面板最大横向拉应力为 90 MPa, 而设置加劲肋后最大拉应力降为 43 MPa, 即设置加劲肋有利于改善钢桥面板的受力。浇筑轻质混凝土铺装层后, 钢桥面板顶板和加劲肋底板的应力峰值、位移都降低, 最大应力降幅达 48%, 最大位移降幅达 18%, 而且钢桥面板中的应力分布也更加均匀。作为铺装结构, 轻质混凝土铺装层也与桥面板共同参与结构受力, 使得桥面铺装体系的结构刚度得到提高。

关键词: 钢桥面铺装; 轻质混凝土铺装层; 大比例模型; 力学响应

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

Large-scale Model Test on Mechanics Characteristics of Composite Pavement of Steel Bridge Deck

ZHANG Jiupeng^{1,2}, LIU Shaowen^{1,3}, LIU Yongjian²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region of the Ministry of Transport, Taiyuan 030006, China;

3. Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A light-weight concrete layer is placed between steel deck slab and asphalt layer to compose a new steel bridge deck pavement system. In order to research the mechanics characteristics of the new deck pavement system, a large-scale model is prepared, and the mechanics response of steel deck slab and deck pavement are measured under different vehicle load positions. Results show that the biggest transverse tensile stress of steel deck slab is 90 MPa, but it decreases to 43 MPa after being set the ribbed stiffener, that is to say the ribbed stiffener is useful to improve the load

capacity of the steel deck slab. After paving the light-weight concrete layer, the maximal stress and displacement of top steel deck slab and bottom ribbed stiffener also decrease. The maximal stress decreasing amplitude is 48%, and the maximal displacement decreasing amplitude is 18%. Meanwhile, the stress distribution of steel deck slab is more uniform. As a pavement layer, the light-weight concrete layer jointly participates the load bearing together with the steel deck slab, and the stiffness of the bridge deck pavement system improves.

Key words: steel deck pavement; light-weight concrete layer; large-scale model; mechanics response

桥面铺装体系是钢桥的重要组成部分, 其质量好坏直接影响到行车的安全性、舒适性、耐久性及经济效益。由于钢桥面铺装使用条件严酷, 对铺装材料的要求极高, 使得钢桥面铺装技术成为一项世界性难题。对此, 国内外研究人员开展了大量的研究, 已经形成了刚性铺装和柔性铺装两大体系^[1]。有研究人员采用钢桥面刚性铺装方法, 将高性能钢筋混凝土^[2]、纤维混凝土^[3]等作为钢桥面铺装层, 以期改善桥面系的受力状态。Rasmus 等人采用非线性断裂力学理论, 研究了钢桥面水泥铺装体系的力学性能^[4], 表明钢桥面处于高应力幅状态, 而水泥混凝土抗拉强度的不足, 容易开裂。国内在钢桥面柔性铺装方面, 取得了令人瞩目的成绩。黄卫系统研究了大跨径钢桥面柔性铺装设计理论, 将环氧沥青混凝土成功用于我国 10 余座大型钢箱梁桥桥面铺装^[5-6]。钱振东等分析了正交异性钢桥面沥青混凝土铺装方案受力特性^[7-9]。郝增恒以舟山西堠门大桥为项目依托, 对比分析钢桥面铺装 3 种复合铺装结构的路用性

收稿日期: 2012-11-24

基金项目: 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金(KLTLR-Y11-7); 霍英东教育基金会青年教师基金(131075); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110205120002); 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2012JC002)

第一作者: 张久鹏(1983—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路面结构和材料。E-mail: zhjiupeng@163.com

能^[10]. 潘友强和郭忠印针对大纵坡、小半径特殊情况下钢桥面铺装的施工特点和使用要求,提出了有针对性的树脂沥青组合体系钢桥面铺装解决方案^[11]. 但是,目前国内外钢桥面沥青铺装结构的病害仍然较多,甚至通车不久即出现桥面铺装层失效或脱层、横向推移和拥包等严重病害,其主要原因在于钢桥面板的柔度较大,钢板与沥青铺装层的刚度相差巨大,以及层间黏结强度不足. 对此,邵旭东^[12]、曹玉贵^[13]等提出了一种正交异性钢板-轻质混凝土组合结构,并与其他钢桥面沥青混凝土铺装结构的力学性能进行对比分析. 本文在钢板-轻质混凝土组合结构的基础上,再加铺沥青层,形成一种“钢板+轻质混凝土+沥青面层”的新型桥面铺装体系. 轻质混凝土层既可以通过钢混组合作用提高桥面板体系的刚度,又可为钢板和沥青面层的刚度变化提供过渡,而较之钢板,轻质混凝土与沥青有着更好的黏结能力,能够改善运营阶段钢桥面板和沥青混凝土面层的受力状态,减少桥面铺装病害,延长桥面铺装的使用寿命. 但是,这种新型铺装体系的相关技术并不成熟. 因此,本文通过大比例模型试验研究这种新型铺装体系的主要力学性能,分析铺装结构的合理性,为其推广应用提供理论支持.

1 大比例模型试验

1.1 铺装结构与大比例模型试件

根据东莞常虎高速新联互通工程主线 2 号桥面铺装结构,制作了大比例模型. 主线 2 号桥左幅桥采用两跨钢箱梁结构,跨径组合为(30.63+30.71) m,桥宽 13.85 m. 桥面板为采用倒 T 形加劲肋的正交

异性钢桥面板(厚 16 mm). 桥面铺装下面层采用由轻质混凝土、剪力连接件和钢筋网组成的混凝土铺装层,上面层采用 SMA(stone mastic asphalt)-13 沥青混合料,上、下面层之间设置改性沥青防水黏结层,铺装体系如图 1 所示.

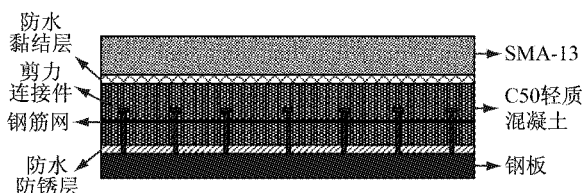


图 1 钢桥面铺装结构

Fig.1 Composite pavement of steel bridge deck

异性钢桥面板是“钢板+轻质混凝土+沥青面层”铺装结构的关键组成,因此采用页岩陶粒轻集料、P. O 52.5 水泥、粉煤灰、钢纤维、高效减水剂及水性丙烯酸树脂等原材料,进行了 C50 混凝土组成设计. 经设计,各原材料用量如表 1 所示,轻质混凝土技术性能如表 2 所示.

表 1 C50 轻质混凝土的材料组成

Tab.1 Materials composition of C50 concrete

材料名称	水泥	砂	轻骨料	水	外加剂	粉煤灰	钢纤维	聚合物
材料用量	500	715	429	130	7	50	47	5.5

表 2 C50 轻质混凝土的技术性能

Tab.2 Technical properties of C50 concrete

技术性能	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 抗压强度 标准值/MPa	28 d 抗折 强度/MPa
试验结果	1 884	56.8	6.5

参照实桥结构,在现场制作了大比例模型试件,过程如图 2 所示. 试件长 10 m,宽 3.3 m,横隔板间

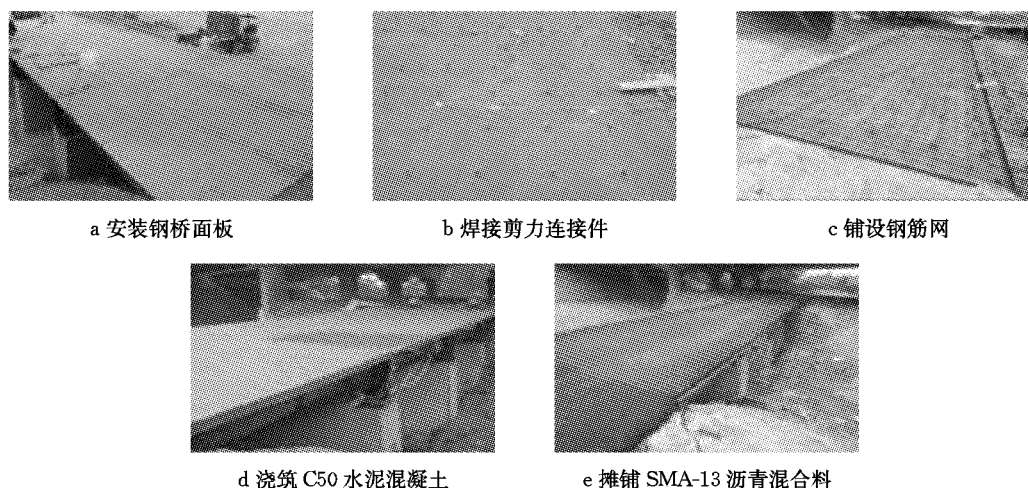


图 2 大比例模型试件的制作

Fig.2 Processing of large-scale model

距 2.5 m, T 形加劲肋高 250 mm, 间距 330 mm, 剪力连接件间距为 30 cm×20 cm, 钢筋网尺寸为 10 cm×15 cm, 轻质混凝土铺装层厚 50 mm, 沥青混凝土铺装层厚 40 mm, 改性沥青防水黏结层厚 5 mm. 模型试件的横隔板、加劲肋的结构形式和细部尺寸, 加劲肋与横隔板的连接形式和连接构造均与实桥相同.

1.2 加载方案与测点布置

采用双轴汽车的后轴(重 16 t), 在模型的跨中断面加载, 分别在钢桥面板顶板顶面、轻质混凝土铺装层顶面进行加载测试. 考虑到钢桥面体系的受力特点, 横桥向布置了 I, II 两种行车荷位, 如图 3 所示. 车位 I 下, 测试车一侧轮迹仅覆盖 1 个加劲肋; 车位 II 下, 测试车一侧轮迹覆盖 2 个加劲肋.

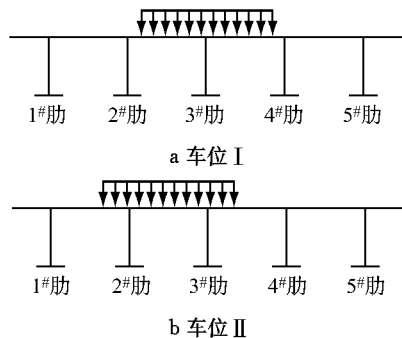


图 3 横桥向加载荷位

Fig.3 Load position along transverse direction of a bridge

大比例模型试件共有四跨, 选择其中一跨布置应变测点. 钢桥面板加劲肋底板的底面上布置有 13 个纵向应变测点(编号为 1-), 钢桥面板顶板底面上布置有 5 个纵向应变测点和 8 个横向应变测点(编号为 2-), 钢桥面板顶板顶面布置有 13 个纵向应变测点和 8 个横向应变测点(编号 3-). C50 轻质混凝土顶面应变测点的布置与钢桥面板顶板顶面相同, 编号为 4-. 测点布置如图 4 所示. 此外, 分别在中间两跨 3 个加劲肋的底面布设位移测点.

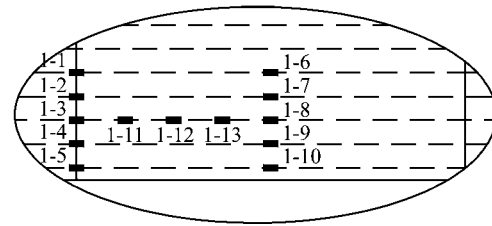
2 测试结果与数据分析

2.1 钢桥面板受力分析

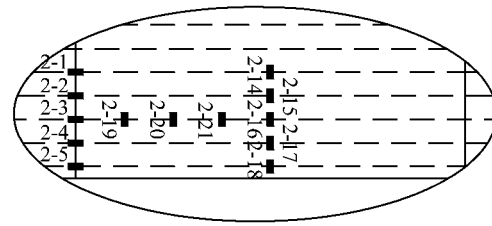
2.1.1 盖板体系应力分析

盖板即为桥面钢板, 在焊接加劲肋之前进行了测试. 其中, 3# 加劲肋处钢桥面板顶面和底面的横向应力分布如图 5. 结果表明, 桥面钢板横向受拉, 且由车轮中心线向外递减; 车位 I 下的应力值要高于车位 II, 即对盖板体系而言, 车位 I 更为不利; 盖板最

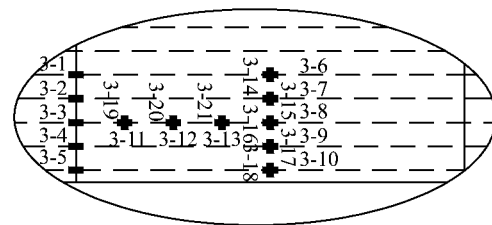
大横向拉应力为 90 MPa.



a 加劲肋底板底面应变测点



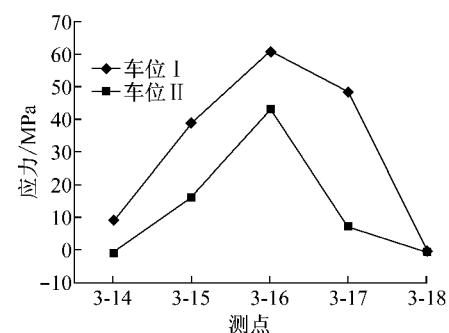
b 顶板底面应变测点



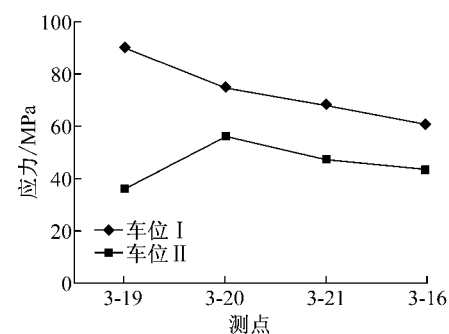
c 顶板顶面应变测点

图 4 测点布置

Fig.4 Distribution of monitoring points



a 顶面受力



b 底面受力

图 5 桥面钢板应力分布

Fig.5 Stress distribution of steel plates

2.1.2 桥面板体系应力分析

桥面板由盖板和加劲肋组成,在 3[#] 加劲肋处钢桥面顶板顶面和加劲肋底面的纵向应力分布如图 6 所示. 结果表明:桥面钢板顶面多处纵向受压,最大压应力为 21 MPa;加劲肋底面纵向受拉,最大拉应力为 43 MPa;桥面板体系的应力水平明显优于盖板体系的应力水平,即设置加劲肋有利于钢桥面的受力.

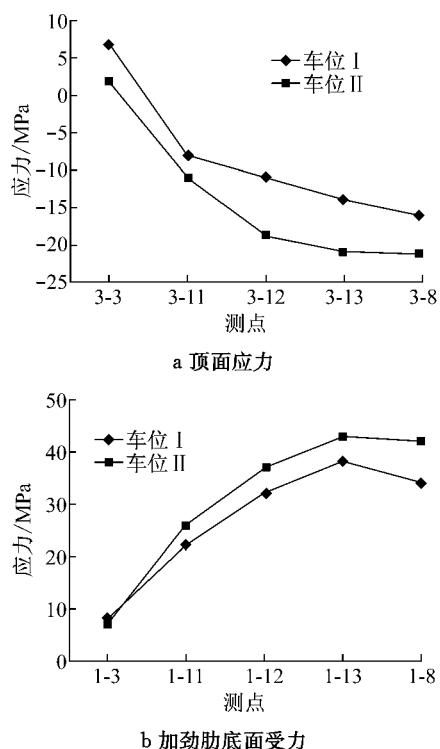


图 6 桥面板应力分布

Fig.6 Stress distribution of bridge decks

2.2 水泥混凝土铺装层受力分析

2.2.1 纵向应力

不同车位下,轻质混凝土铺装层表面跨中断面处纵向应力测点 4-6, 4-7, 4-8, 4-9, 4-10 的应力实测值, 3[#] 加劲肋轴线纵向应力测点 4-3, 4-11, 4-12, 4-13, 4-8 的应力实测值如图 7 所示. 结果表明, 车位 I 较车位 II 更不利; 4-8 测点出现纵向压应力极值, 分别为 -1.9, -2.4 MPa; 而 4-3 测点表现为纵向受拉, 应力值分别为 0.5, 0.4 MPa. 轻质混凝土铺装层表面纵向应力实测值的分布规律与钢桥面板顶板纵向应力的分布规律有较大差别, 加铺轻质混凝土铺装层后纵向应力分布更均匀.

2.2.2 横向应力

不同车位下,轻质混凝土铺装层表面跨中断面处横向应力测点 4-14, 4-15, 4-16, 4-17, 4-18 的应力实测值, 3[#] 加劲肋轴线横向应力测点 4-19, 4-20, 4-

21, 4-16 的应力实测值如图 8 所示.

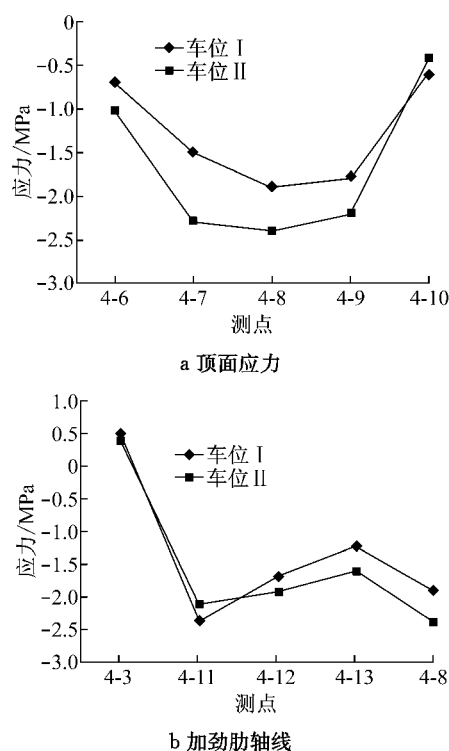


图 7 轻质混凝土铺装层纵向应力分布

Fig.7 Longitudinal stress distribution of lightweight concrete layers

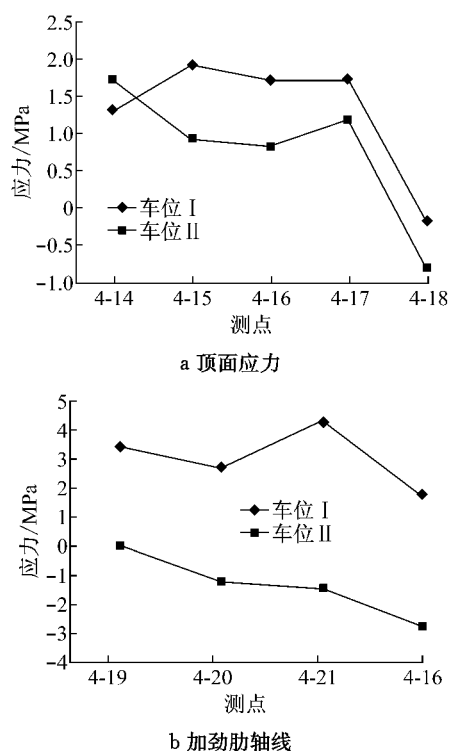


图 8 轻质混凝土铺装层横向应力分布

Fig.8 Transverse stress distribution of lightweight concrete layers

结果表明,车位 I 较车位 II 更不利;车位 I 下,加劲肋轴线测点处出现了较大的横向压应力,其中 4-21 测点处应力最值为 4.3 MPa,原因可能是行车荷位 II 下轻质混凝土铺装层在横桥向主要发生整体弯曲变形,其受力模式不是支承在加劲肋上的连续梁.而最大横向压应力出现在车位 II 下,测点 4-16 处,应力最值为-2.7 MPa.

2.3 钢混组合作用分析

2.3.1 应力分布

对比分析铺装轻质混凝土层以后,钢桥面板顶面的应力分布,如图 9 所示.

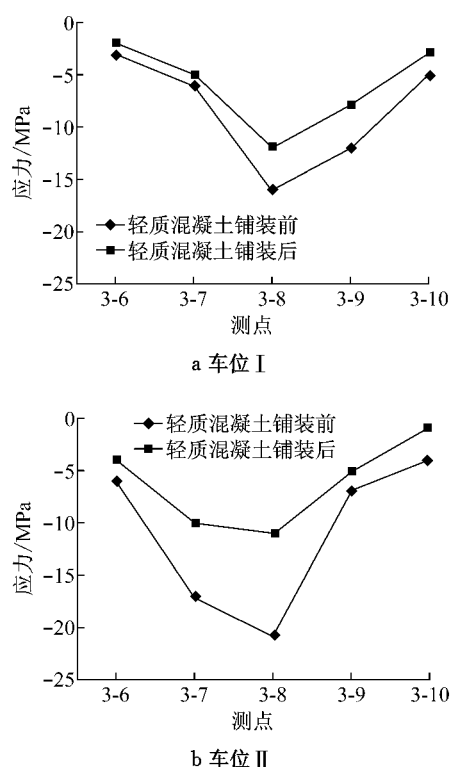


图 9 钢桥面板顶面的应力

Fig.9 Stress distribution at the surface of steel bridge decks

由图可知,浇筑轻质混凝土铺装层后,由于铺装层的应力扩散作用,钢桥面板顶板的应力峰值都有所下降.车位 I 下,测点应力最值由-16 MPa 下降为-12 MPa,下降比例为 33.3%;车位 II 下,测点应力最值由-21 MPa 下降到-11 MPa,下降比例为 48%.同时,钢桥面板中的应力分布也更加均匀.

2.3.2 刚度分析

本文研究在中间两跨 3 个加劲肋的底面布设位移测点.在加铺轻质混凝土铺装前后,观测测点在 2 种车位下的位移变化.不同车位下,位移测点实测值如图 10 所示.

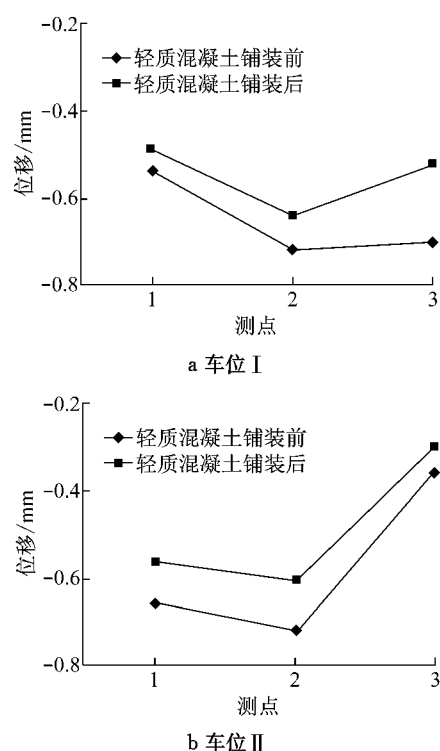


图 10 加劲肋底位移

Fig.10 Displacement at the bottom of stiffening ribs

由图可知,浇筑轻质混凝土铺装层后,车位 I 下,钢桥面板的最大位移由 0.7 mm 下降到 0.64 mm,下降比例为 8.5%;车位 II 下,钢桥面板的最大位移由 0.72 mm 下降到 0.61 mm,下降比例为 18%.综合应力和刚度两个方面的分析结果说明,轻质混凝土铺装层与钢桥面板组合并参与结构整体受力,其直接表现为钢桥面板中应力峰值的下降和结构刚度的提高.

3 结论

在钢桥面板与沥青铺装层之间设置轻质混凝土层,可通过钢混组合作用提高铺装体系的刚度,同时为变形连续性和变形随从性提供刚度台阶,改善运营阶段钢桥面板和沥青混凝土面层的受力状态,减少桥面铺装病害,延长桥面铺装的使用寿命.对此,本文通过大比例模型试验研究这种新型铺装体系的主要力学性能,主要结论如下:

(1) 总体而言,行车荷位 I 下的应力值要高于行车荷位 II,即行车荷位 I 更为不利;盖板横向受拉,且由车轮中心线向外递减,最大横向拉应力为 90 MPa;桥面板体系中,桥面钢板顶面多处纵向受压,最大压应力为 21 MPa,而加劲肋底面纵向受拉,最大拉应力为 43 MPa;轻质混凝土铺装层最大纵向压

应力为 -2.4 MPa ,最大纵向拉应力值为 0.5 MPa ,而最大横向拉应力为 4.3 MPa ,最大横向压应力为 -2.7 MPa .

(2)设置加劲肋有利于钢桥面的受力,因此盖板体系的应力水平明显优于桥面板体系的应力水平,表现在盖板最大横向拉应力为 90 MPa ,而设置加劲肋后最大拉应力降为 43 MPa .

(3)浇筑轻质混凝土铺装层后,由于铺装层的应力扩散作用,钢桥面板顶板和加劲肋底板的应力峰值都有所下降;车位Ⅰ下,测点应力最值由 -16 MPa 下降为 -12 MPa ,下降比例为 33.3% ;车位Ⅱ下,测点应力最值由 -21 MPa 下降到 -11 MPa ,下降比例为 48% .同时,钢桥面板中的应力分布也更加均匀.

(4)浇筑轻质混凝土铺装层后,车位Ⅰ下,钢桥面板的最大位移由 0.7 mm 下降到 0.64 mm ,下降比例为 8.5% ;车位Ⅱ下,钢桥面板的最大位移由 0.72 mm 下降到 0.61 mm ,下降比例为 18% .表明轻质混凝土铺装层与桥面板共同参与结构受力,这使得桥面铺装体系的结构刚度得到提高.

参考文献:

- [1] 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 and Building Press, 2006.
- [2] Rasmus W, John F O. Analysis of an orthotropic deck stiffened with a cement-based overlay [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 350.
- [3] Buitelaar P, Braam R. Reinforced high performance concrete overlay system for rehabilitation and strengthening of orthotropic steel bridge decks [C]//Proceedings of the 1st Orthotropic Bridge Conference. Sacramento: [s. n.], 2004: 384-401.
- [4] Murakoshi J, Yanadori N, Ishii H. Research on steel fiber reinforced concrete pavement on orthotropic steel deck [C]//Proceedings of the 2nd International Orthotropic Bridge Conference. Sacramento: [s. n.], 2008: 359-371.
- [5] 黄卫, 刘振清. 大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 51.
- HUANG Wei, LIU Zhenqing. Research on theory and method of long-span steel bridges deck surfacing design [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 51.
- [6] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 65.
HUANG Wei. Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 65.
- [7] 钱振东, 罗剑. 正交异性钢桥面板铺装层受力分析[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 10.
QIAN Zhendong, LUO Jian. Pavement stress analysis of orthotropic steel deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 10.
- [8] 钱振东, 罗剑, 敬森森, 等. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 61.
QIAN Zhendong, LUO Jian, and JING Miaomiao, et al. Mechanical analysis of asphalt concrete paving projects on steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 61.
- [9] 钱振东, 李智, 陈春红. 钢桥面环氧沥青混凝土铺装层Ⅰ型裂缝的断裂判据[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 33.
QIAN Zhendong, LI Zhi, and CHEN Chunhong. Fracture criterion for mode I crack of epoxy asphalt concrete paving course of steel deck bridge pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 33.
- [10] 郝增恒. 大跨径钢桥面铺装典型结构路用性能评价与研究[J]. 公路, 2012(6): 104.
HAO Zengheng. Evaluation and research on road performance of long span steel deck pavement structures [J]. Highway, 2012(6): 104.
- [11] 潘友强, 郭忠印. 大纵坡小半径钢桥面沥青铺装设计研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9): 1333.
PAN Youqiang, GUO Zhongyin. Design research on steel deck asphalt pavement of bridge with high longitudinal slope and small turning radius [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(9): 1333.
- [12] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬, 等. 正交异性钢板-薄层RPC组合桥面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40.
SHAO Xudong, CAO Junhui, YI Dutao, et al. Research on basic performance of composite bridge deck system with orthotropic steel deck and thin RPC layer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 40.
- [13] 曹玉贵. 高强轻质混凝土钢桥面铺装结构层的参数分析[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2009.
CAO Yugui. Analysis the structural parameters of high strength light weight concrete steel bridge deck pavement [D]. Wuhan: School of Civil Engineering and Architecture of Wuhan University of Technology, 2009.