

钢纤维混凝土铺装对正交异性钢桥面板 疲劳性能影响分析

张怀志¹,何志成¹,高 维²,王占飞¹,申启航³

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建七局第一建筑有限公司,
辽宁 沈阳 113001;3. 大阪市立大学工学研究科,日本 大阪 5580022)

摘 要 目的 研究钢纤维混凝土(SFRC)铺装结构在不同设计参数下对正交异性钢桥面板的抗疲劳性能影响,提出一种新型沥青-SFRC组合铺装结构,评价其对正交异形板疲劳性能的改善作用. 方法 以某移动荷载试验为例,采用SFRC代替沥青混凝土铺装,通过ABAQUS有限元软件建立SFRC铺装与沥青混凝土铺装的三维实体模型,与试验结果对比验证其有效性;选取正交异形面板5种典型易损疲劳细节,分析其在SFRC铺装不同弹性模量、厚度下的疲劳应力幅值变化趋势,提出新型沥青-SFRC组合桥面铺装,对比分析相同厚度下SFRC、沥青混凝土与新型沥青-SFRC组合铺装结构在5种疲劳细节处的疲劳应力幅值. 结果 SFRC弹性模量从29 000 MPa提高到39 000 MPa,疲劳应力幅值降低10%左右;SFRC铺装层厚度从60 mm提高到100 mm,疲劳应力幅值降低30%以上;新型沥青-SFRC组合铺装结构在5个疲劳细节节点处比相同厚度的沥青混凝土等效应力幅值分别下降了44%、44%、27%、43%、25%. 结论 SFRC铺装能够有效地提高钢桥面板的刚度,降低应力幅值;新型沥青-SFRC组合铺装结构能够有效地提高钢桥面板的抗疲劳性能,具有良好的工程应用前景.

关键词 正交异性钢桥面板;桥面铺装;疲劳细节;疲劳性能;钢纤维混凝土;应力幅
中图分类号 TU997;U443.33 文献标志码 A

Analysis on Improvement of SFRC Pavement on Fatigue Performance of Orthotropic Steel Deck

ZHANG Huaizhi¹, HE Zhicheng¹, GAO Wei², WANG Zhanfei¹, SHEN Qihang³

(1. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The First Construction Co. Ltd., China Construction 7th Engineering Division Corp. Ltd., Shenyang, China, 113001; 3. Graduate School of

收稿日期:2019-12-30

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703805-03)

作者简介:张怀志(1982—),男,副教授,博士,主要从事沥青路面结构设计与养护方面研究.

Engineering, Osaka City University, Osaka, Japan, 5580022)

Abstract: In order to study on effect of steel fiber reinforced concrete (SFRC) bridge pavement structure under different design parameters on Anti-fatigue of orthotropic steel deck plate, a new asphalt-SFRC composite pavement structure is proposed to evaluated its effect on the fatigue performance of orthotropic deck plate. A moving load test was carried out, and SFRC is used to replace the general asphalt pavement. The model of orthotropic steel bridge with SFRC pavement and asphalt pavement were established by finite element method software ABAQUS. The validity of the finite element model is verified by comparing the simulational results with the experimental results. 5 kinds of typical fatigue details of orthotropic deck plate are selected to analyze variation trend of fatigue stress amplitude under different elastic modulus and thickness of SFRC pavement. A new type of asphalt SFRC composite bridge pavement is proposed. Fatigue stress amplitudes of bridge pavement structure with SFRC, asphalt concrete and new asphalt SFRC composite pavement structure under the same pavement thickness are analyzed at 5 kinds fatigue details. The results show that: When the elastic modulus of SFRC increases from 29 000 MPa to 39 000 MPa, the fatigue stress amplitude of 5 fatigue details decreases by about 10%; when the thickness of the SFRC pavement layer increases from 60 mm to 100 mm, and the fatigue stress amplitude decreases by more than 30%; For the new type of bridge pavement structure, the equivalent stress amplitude of 5 fatigue details decreased by 44%, 44%, 27%, 43% and 25%, respectively, compared to asphalt concrete pavement model with the same pavement thickness. In summary, it can be seen that the SFRC pavement can effectively improve the rigidity and reduce the stress amplitude of the orthotropic steel bridge deck; the new SFRC-asphalt pavement structure proposed in this paper can effectively improve the fatigue resistance of orthotropic steel bridge deck and has a great prospect of engineering application.

Key words: orthotropic steel bridge deck; bridge pavement; fatigue detail; fatigue performance; steel fiber reinforced concrete; stress amplitude

正交异性钢桥面板是在桥面盖板下表面焊接相互正交的纵向加劲肋与横向加劲肋来共同承担车辆荷载的桥面结构, 由于具有材料利用率高、适用范围广、承载能力大等优点, 在世界各国得到广泛应用, 但正交异性钢桥面板最突出的问题就是易出现疲劳^[1-9]. 虽然我国钢桥起步较晚, 但发展迅速, 南京长江二桥、江阴大桥、虎门大桥等均采用正交异性钢桥面板, 铺装多采用 SMA 或浇筑式沥青混凝土, 均属于柔性结构路面, 易出现各种病害^[10]. 混凝土材料弹性模量大, 抗压强度高, 很适合作为路面使用, 但是由于抗拉强度低, 容易产生裂缝, 基于混凝土此种特点对其进行多种改性, 其中有钢纤维混凝土 (SFRC)、活性粉煤灰混凝土 (RPC)^[11]、超高性能混凝土 (UHPC)^[12-13] 以及高韧性超轻

混凝土 (STC)^[14-15], 这些材料都属于刚性桥面铺装, 在我国一些钢桥上已经得到了应用. 刚性铺装能有效提高桥面系整体结构的刚度并降低桥梁疲劳细节的应力幅. 其中, 日本名古屋高速公路公社一直采用 SFRC 作为钢桥结构铺装材料, 大规模应用于钢桥铺装是在 2003 年日本横滨海湾大桥, 施工后取得了良好的抗疲劳效果^[16]. 牟廷敏等^[17-18] 建议采用钢纤维混凝土等弹性模量大、温度影响小的材料作为桥面铺装层. 为进一步研究钢纤维混凝土铺装下正交异性钢桥面板的疲劳性能, 笔者利用有限元软件 ABAQUS, 建立无铺装正交异性钢桥面板模型, 在钢桥面板上施加横向多点静力荷载并与试验对比验证, 在此基础上研究 SFRC 铺装层在不同弹性模量、铺装厚度等不同参数条件下对正交异性

钢桥面疲劳细节等效应力幅的影响. 提出一种组合铺装结构即上层厚度 20 mm 沥青混凝土, 下层厚度 60 mm SFRC 作为钢桥面铺装, 并分析该铺装对钢桥面板疲劳性能改善作用.

1 有限元模型验证与铺装前后的内力影响线分析

1.1 有限元模型的建立

以某钢桥移动荷载试验^[18]为基础, 建立无铺装正交异性钢桥面板有限元模型. 钢桥

主要由桥面板、主梁、纵肋、竖向加劲肋以及横隔板焊接而成, 试验模型如图 1 所示. 钢桥模型竖向加劲肋间隔为 2 500 mm, 主梁间隔为 2 880 mm, 纵肋采用厚度 6 mm 以及 8 mm 两种, 各部分均采用 Q345 级钢制作, U 形肋间纵向连接采用对接焊缝. U 形肋贯穿每片横隔板, 横隔板上 U 形肋贯穿处采用梯形孔, 钢材的弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.3, 试件参数如表 1 所示. 荷载加载面积如图 2 所示.

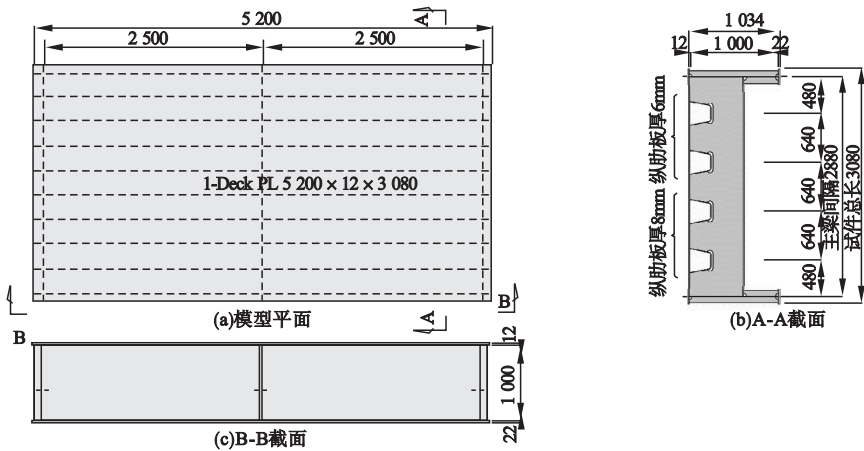


图 1 无铺装层钢桥模型

Fig. 1 Steel bridge model without pavement

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of test specimen

钢桥面板 厚度/mm	U 型肋			主梁			横隔梁			垂直加劲板		
	宽高	数量/	间距/	肋板	数量/	间距/	板厚/	数量/	间距/	宽度/	厚度/	间距/
	厚/mm	个	mm	厚/mm	片	mm	mm	片	mm	mm	mm	mm
12	320 × 240 × 6	2	640	12	2	2 880	9	3	2 500	75	12	1 250
12	320 × 240 × 8	2	640	12	2	2 880	9	3	2 500	75	12	1 250

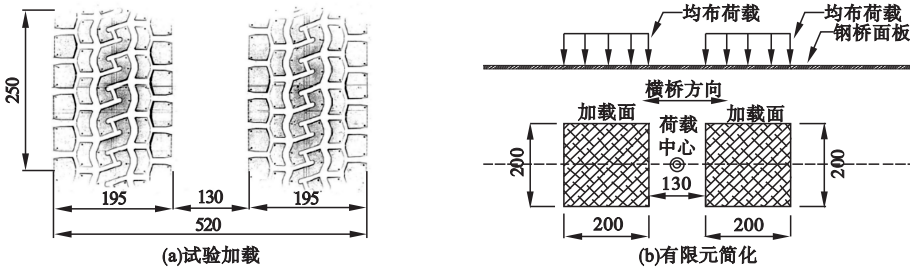


图 2 荷载加载面积

Fig. 2 Loading area

试验中加载采用双轮胎,使用液压千斤顶加载,单个轮胎加载面积为 $195\text{ mm}\times 250\text{ mm}$,单轮荷载 60 kN ,轮胎间距 130 mm .而试验中轮胎纵向方向压力分布并不均匀,在有限元模型中为了简化计算,减小了纵向方向荷载区域长度,采用了日本标准汽车轴压面积 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 进行均布加载,单轮荷载同样为 60 kN .

正交异性板钢桥面板有限元模型各部件均采用8节点线性减缩积分实体单元C3D8R,各部分钢构件采用MERGE连接.主梁底部完全固定,加载方式采用以A截面即两横隔板中心为轴线的双轮多点静力加载形式,荷载沿横桥方向移动.由于模型采用实体单元,网格划分对有限元模型结果影响非常大,本文中非关键部位采用 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 单元划分,由于荷载直接加载在桥面板薄壁结构上,为了取得更精确的数据,桥面板竖向划分为3层,纵肋厚度方向划分为2层,并在荷载加载区域与焊缝采取加密处理,划分为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 单元,并对焊缝进行扫掠划

分,划分模型为49万个结点,35万个单元(见图3).

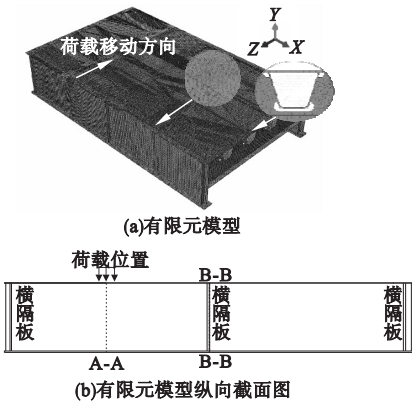


图3 有限元模型及加载位置

Fig. 3 Finite element model and loading location

1.2 有限元模型的验证

笔者对图3荷载工况下进行有限元分析.以U肋肋间中点处桥面板底面竖直位移,距U肋与面板焊缝处一定距离上下桥面板两侧横向应变为考察对象,将其中各部分的影响线与文献[16]中试验结果进行对比.图4为桥面板各细节在荷载作用下位移及应变横桥向影响线.

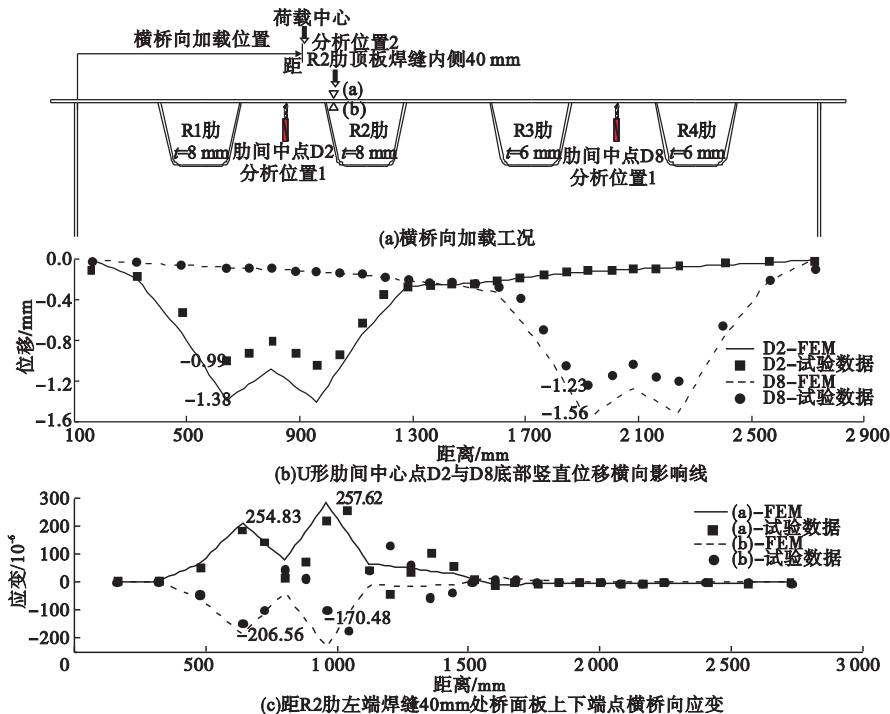


图4 桥面板各细节在荷载作用下位移及应变横桥向影响线

Fig. 4 Stress and strain horizontal influence line of the deck details under load

图4(a)为横桥向加载工况.图4中(b)为纵肋间中心点D2、D8处桥面板底面在荷载横向作用下位移的横向影响线,虚线和实线为各部分细节有限元结果,离散点为试验结果.可以看出,有限元分析结果与试验结果二者最大位移值分别为1.38 mm与0.99 mm,两者结果偏差38%.荷载中心位于厚度为6 mm的U形肋与桥面板焊接处时,同样在U形肋间中心点产生最大位移,二者最大位移值分别为1.56 mm与1.23 mm,两者结果偏差22%.图4中(c)为距R2肋与桥面板焊缝40 mm处桥面板上下点的横桥向应变在荷载作用下的横桥向应变影响线,对比有限元分析与试验结果,桥面板上下(a)、(b)点有限元与试验结果应变相差分别为2%和21%.推测位移结果差距较大的原因可能由于薄板结构实体单元竖直向网格划分不够精细所致,但位移变化规律均保持一致,且位移最大点处有限元分析与试验结果荷载位置相同.对比焊缝及焊缝附近桥面板上下端点横桥向应变数据,有限元模型应变大于试验结果,最大相差约20%,但应变变化规律保持一致,最大点荷载位置相同.

通过对正交异性钢桥U形肋与桥面板结合部位焊缝处的位移与应变分布状态分析结果与试验结果对比可知,U形肋与桥面板结合部位焊缝处位移及应变分布曲线虽然在数据上有所差异,但是整体趋势均基本一致,可以认为有限元分析结果在一定程度上是可信有效的.

2 SFRC 铺装层设计参数对钢桥面板疲劳细节应力幅的影响

为模拟真实车辆荷载作用下钢桥面板的应力响应,利用有限元模型,考虑桥面铺装的作用,在横桥向最不利加载位置沿顺桥向施加移动荷载,选取钢桥面板重要疲劳细节,同时对比分析钢纤维混凝土铺装设计参数对钢桥疲劳细节的应力变化影响.

2.1 铺装材料及特性

SFRC 铺装一般使用早强混凝土以加快施工速度,并且为了防止后期混凝土收缩发生裂缝,掺入了膨胀剂.栓钉与钢桥面板之间采用焊接,并涂布粘结剂,之后在钢桥面板上浇筑钢纤维混凝土,使钢纤维混凝土与栓钉以及钢桥面结合为整体.

钢纤维混凝土材料特性:轴心抗压强度为41 MPa,弹性模量为31 000 MPa,泊松比0.2,铺装厚度75 mm.在有限元软件中采用8节点线性减缩积分实体单元C3D8R建模.铺装材料与钢桥面板之间均采用固结,边界条件与无铺装模型相同.

2.2 疲劳细节的选取与荷载工况

根据张允士等^[19]以某实体桥梁为例对正交异性钢桥面板疲劳裂缝成因的分析与《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015),选取易产生疲劳裂缝的5个典型构造细节为有限元分析的疲劳细节.疲劳细节A:U形肋与钢桥面板结合部位横隔板截面处;疲劳细节B:U形肋与钢桥面板结合部位远离横隔板截面处;疲劳细节C:两横隔板跨中U形肋嵌补段接缝处;疲劳细节D:U形肋与横隔板焊缝处;疲劳细节E:横隔板弧形开口处.各疲劳细节位置如图5所示.

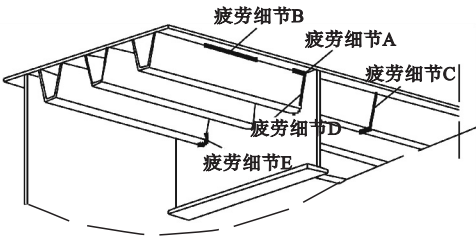


图5 正交异性钢桥面板疲劳细节示意图

Fig. 5 Fatigue details of orthotropic steel bridge deck

为研究U形肋各个疲劳细节在车辆荷载下的应力变化情况,笔者采用《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)疲劳荷载计算模型Ⅲ进行加载.疲劳模型车轴载及分布规定如图6所示.

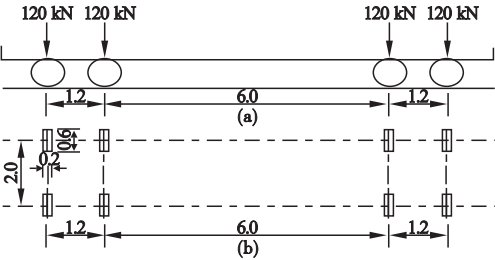


图6 疲劳车辆模型

Fig. 6 Fatigue vehicle load model

由于该疲劳车辆模型前后轴距距 6 m,且横向相邻的车轮之间间距为 2 m,考虑车辆荷载对于正交异性钢桥面板的作用范围是局部的,所以取疲劳荷载模型Ⅲ中间距 1.2 m 的两个车辆后轮荷载(单轴 120 kN)进行加载.以厚度为 8 mm 的 R2 U 形肋焊缝处为例进行分析,由有限元分析可知,当车轮荷载中心位于 U 形肋与钢桥面板焊缝正上方时,各个疲劳细节的应力达到最大值.因此在加载中轴线上采用移动荷载形式加载.单轮加载区域面积为横桥向 600 mm × 纵桥向 200 mm.加载工况如图 7 所示.

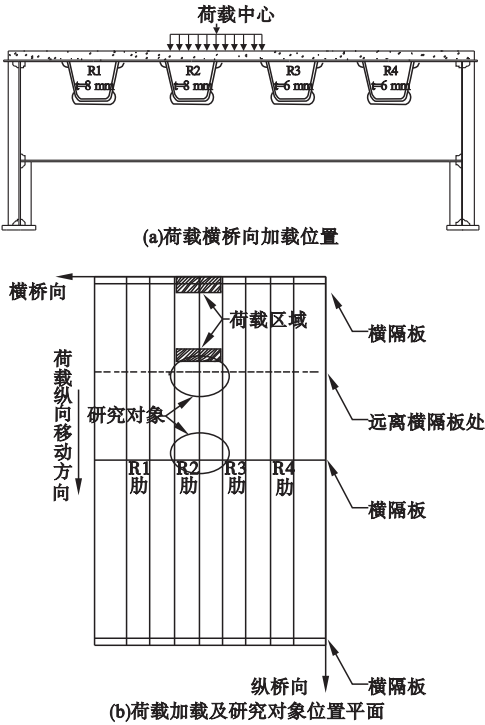


图7 加载工况

Fig. 7 Loading conditions

2.3 SFRC 铺装层模量对各细节疲劳应力幅的影响

钢纤维混凝土的弹性模量与无钢纤维填充的素混凝土的弹性模量大致相同,钢纤维主要提高混凝土的强度、延性以及抗裂性,而素混凝土的弹性模量主要与混凝土的强度、材料、配合比有关.根据混凝土材料强度的不同,混凝土的弹性模量大致从低强度混凝土 28 000 MPa 到高强混凝土 40 000 MPa 不等,笔者中以弹性模量 31 000 MPa,轴心抗压强度 41 MPa 的 SFRC 材料为基础,分别对比研究 29 000 MPa、33 000 MPa、35 000 MPa、37 000 MPa、39 000 MPa 这 5 种不同弹性模量的 SFRC 材料,铺装结构层厚度均为 75 mm.采用图 6 所示疲劳车辆模型,按照图 7 所示荷载工况下进行加载,得到在移动荷载下 SFRC 材料不同模量的 R2 U 肋疲劳细节处的应力变化曲线(见图 8).

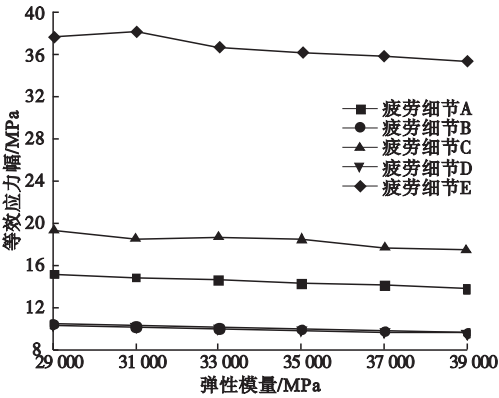


图8 疲劳细节等效应力幅值随 SFRC 模量变化曲线

Fig. 8 The equivalent stress value variation of fatigue detail under different elastic modulus

通过泄水计数法计算等效应力幅以及频率,根据 Miner 线性累积损伤准则 S-N 曲线的等效方法,等效应力幅计算式为

$$\Delta\sigma_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m p_i (\Delta\sigma_i)^m}{\sum_{i=1}^m p_i} \right)^{\frac{1}{m}} \tag{1}$$

式中: p_i 为第 i 级应力幅作用的次数; $\Delta\sigma_i$ 为

第*i*级应力幅;*m*为应力幅曲线斜率参数,取 $m=5^{[19]}$ 。

随着弹性模量的变化,疲劳细节的等效应力幅值变化趋势如图8所示。以疲劳细节A为例,弹性模量每上升2 000 MPa,等效应力幅值就减小0.3 MPa,仅占总体等效应力幅值的2%,当SFRC弹性模量从29 000 MPa增加到39 000 MPa时,等效应力幅值从14.71 MPa降低至13.34 MPa,降低了10%,其他疲劳细节同样满足该规律。可以得出在该范围内弹性模量对疲劳细节应力幅值不起决定性作用,只略微降低钢桥面板的应力幅值。铺装层在弹性模量超过8 000 MPa时钢桥面板各疲劳细节应力幅值趋于稳定,该分析结果也验证了该观点的正确性。

2.4 SFRC 铺装层厚度对各细节疲劳应力幅的影响

常规桥面铺装从60 mm到100 mm不等。SFRC铺装层厚度下各疲劳细节的疲劳应力的变化情况,同样也参照了以往研究中参数的取值^[20],设置SFRC铺装层弹性模量为31 000 MPa,分别建立了60 mm、70 mm、80 mm、90 mm、100 mm厚度的SFRC铺装层钢桥模型,并利用泄水计数法和Miner累计损伤准则来分析和计算各疲劳细节的应力变化趋势以及等效疲劳应力幅值。5个疲劳细节节点的应力变化如图9所示。

从图9可以看出,铺装层厚度对该点处应力值有较大影响,随着铺装厚度的增加,疲劳细节A处在铺装厚度为60 mm、70 mm、80 mm、90 mm、100 mm时,荷载作用下应力最大值分别为24.25 MPa、20.24 MPa、17.20 MPa、14.84 MPa、12.97 MPa。铺装厚度每增加10mm时,应力最大值分别减小4.01 MPa、3.04 MPa、2.36 MPa、1.87 MPa,随着铺装厚度的增加,该点的应力最大值趋于稳定。其余疲劳细节B、C、D、E点的应力变化趋势与A点规律一致。其次,铺装厚度条件的改变并不会带来应力变化趋势的改

变,各铺装厚度下该点的应力变化规律保持一致。

在5个疲劳细节中,细节E即横隔板弧形开口处的应力最大值最大,且随着铺装厚度的增加,该点的应力最大值下降,可见铺装层厚度的增加提高了钢桥面板以及横隔板连接处的应力。

随着SFRC铺装层厚度的变化,使用泄水计数法以及式(1)计算出各点的等效应力幅值,得出疲劳细节的等效应力幅值变化趋势(见图9)。

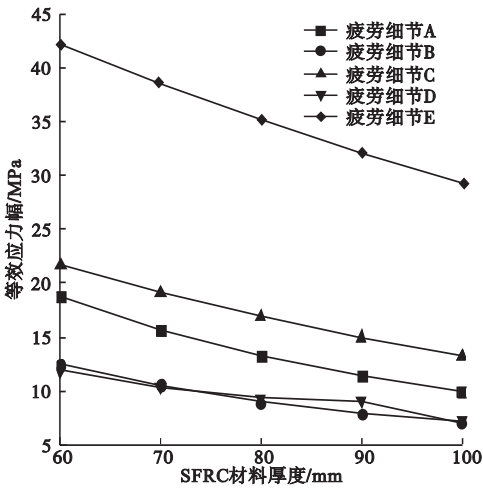


图9 各疲劳细节随铺装厚度变化等效应力幅值

Fig. 9 The equivalent stress value variation of fatigue detail under different pavement thickness

由图9可知,随着SFRC铺装厚度的增加,各疲劳细节的等效应力幅都出现了不同程度的下降,且下降幅度较大;对比60 mm铺装厚度与100 mm铺装厚度的钢桥模型,疲劳细节A、B、C、D、E在100 mm铺装厚度时的等效应力幅比60 mm铺装厚度时的等效应力幅分别减少了46%、38%、39%、42%、30%,可以看出SFRC铺装厚度对各疲劳细节最大应力值影响较大,增加SFRC铺装层厚度能够有效解决钢桥易产生疲劳细节点的应力幅值过高问题,提高钢桥的抗疲劳性能。

3 新型沥青-SFRC 组合铺装结构设计

桥面铺装单一的采用 SFRC 材料作为铺装材料时,在重载车辆荷载的作用下,桥面铺装易发生开裂及路面损坏^[1]. 为了防止这种现象的发生,笔者拟采用一种新型沥青-SFRC 组合铺装结构,上层的沥青混凝土作为磨耗层,保证下层的 SFRC 铺装不受轮胎直接作用,同时下层的 SFRC 铺装给钢桥面板提供了一定的刚度来降低桥面板的应力幅值.

笔者设计的桥面铺装结构如图 10 所示. 在钢桥面板上部设置栓钉并涂布粘结剂以保证 SFRC 铺装层与钢桥面板可靠连接,然后在已经浇筑完成的 SFRC 铺装层上涂布粘结剂,再铺装沥青混凝土磨耗层. 铺装材料的主要特性如表 2 所示.

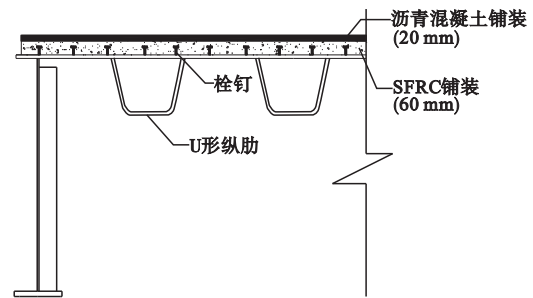


图 10 新型铺装结构示意图

Fig. 10 The new pavement structure

表 2 铺装材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of paving material

材料	弹性模量/MPa	泊松比
钢板	210 000	0.3
沥青混凝土	1 000	0.25
SFRC	31 000	0.2

铺装层结构的设计中,SFRC 铺装层厚度为 60 mm,沥青混凝土磨耗层的厚度为 20 mm,沥青混凝土采用常见的细粒式沥青混凝土,模量为 1 000 MPa,泊松比为 0.25. SFRC 材料弹性模量为 31 000 MPa,泊松比

为 0.2. 在此基础上,采用该组合铺装结构对钢桥面板的疲劳性能改善效果做进一步的分析.

为了与其他桥面铺装结构进行对比,笔者采用了相同厚度、弹性模量为 1 000 MPa 的沥青混凝土以及弹性模量为 31 000 MPa 的 SFRC 铺装做对比. 3 种钢桥模型铺装概况如表 3 所示.

表 3 3 种正交异性板钢桥模型铺装概况

Table 3 Three pavement materials of Orthotropic Steel Bridge Models

铺装材料	厚度/mm	泊松比
沥青混凝土	80	0.25
SFRC	80	0.2
20mm 沥青混凝土 +60mmSFRC	80	0.2/0.25

同样选取图 5 中 5 个疲劳细节点,对 3 个模型进行有限元非线性分析,并比较这几点的应力随铺装结构不同的变化情况. 得出各个铺装结构下的应力变化情况后,根据泄水计数法以及式(1),得出这 5 个疲劳细节处的等效应力幅值. 3 种铺装结构下疲劳细节的等效应力幅变化趋势如图 11 所示,计算结果如表 4 所示.

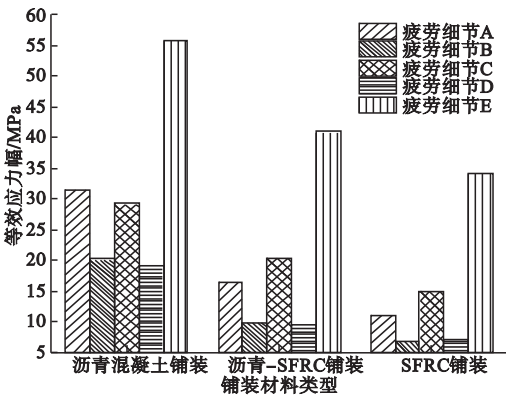


图 11 不同铺装材料结构下各点的等效应力幅

Fig. 11 The equivalent stress value of fatigue detail with different pavement material

由图 11 可知,新型沥青-SFRC 铺装结构在这 5 个疲劳细节 A、B、C、D、E 处,比相同厚度的沥青混凝土等效应力幅值分别下降了

44%、44%、27%、43%、25%。其中A、B、D点应力幅下降明显,C、E点远离横隔板截面U形肋焊缝处和横隔板开口处影响则较弱;该沥青-SFRC组合铺装结构与相同厚度的SFRC铺装5个疲劳细节的等效应力幅值分

别相差5.01 MPa、3.09 MPa、5.18 MPa、2.38 MPa、6.58 MPa,二者相差不大,且下层SFRC刚性材料为钢桥面板提供了额外的刚度来抵抗变形与车辆荷载,拥有良好的抗疲劳性能。

表4 不同铺装结构下各点的等效应力幅值

铺装结构	等效疲劳应力幅值/MPa				
	疲劳细节 A	疲劳细节 B	疲劳细节 C	疲劳细节 D	疲劳细节 E
沥青混凝土铺装	32.73	21.92	30.50	20.80	55.84
20mm 沥青混凝土+ 60mmSFRC 铺装	18.28	12.15	22.09	11.71	41.69
SFRC 铺装	13.27	9.06	16.91	9.33	35.11

4 结 论

(1)在正交异性钢桥面板的各个疲劳细节中,横隔板开口处在荷载作用下致使桥面板变形而引起的弯矩作用,会产生较大应力幅值,表明在正交异性钢桥面板中,该疲劳细节仍是比较薄弱的构造细节。

(2)SFRC 铺装弹性模量在29 000 ~ 39 000 MPa变化时,各疲劳细节在车辆移动荷载作用下,随着SFRC弹性模量从29 000 MPa增加到39 000 MPa,疲劳细节应力幅值降低10%左右,表明弹性模量对应力幅值影响较小。

(3)SFRC 铺装厚度从60 mm增加到100 mm时,疲劳细节A、B、C、D、E的等效应力幅分别减少了46%、38%、39%、42%、30%,表明SFRC铺装厚度对各疲劳细节等效应力幅值影响较大。

(4)沥青-SFRC组合铺装结构在5个疲劳细节A、B、C、D、E处,比相同厚度的沥青混凝土等效应力幅值分别下降了44%、44%、27%、43%、25%,同时该结构结合了两种铺装材料的优点,并提高了钢桥面板的抗疲劳强度,拥有良好的工程应用前景。

参考文献

[1] MURAKOSHI J, YANADORI N, ISHII H.

Research on steel fibre reinforced concrete pavement for orthotropic steel deck as a countermeasure for fatigue [J]. Stress-the international journal on the biology of stress, 2008,1:1-13.

[2] XIAO Z G, YAMADA K, YA S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks [J]. International journal of fatigue, 2008, 30(8): 1387-1397.

[3] MORI T, HARADA H. Fatigue tests and stress analyses on connections between deck plates, transverse ribs and trough ribs in steel orthotropic deck [J]. Journal of Japan society of civil engineers, ser al (structural engineering & earthquake engineering (SE/EE)), 2011, 67(1): 95-107.

[4] FISHER J W, ROY S. Fatigue damage in steel bridges and extending their life [J]. Adv. steel constr. , 2015, 11(3): 250-68.

[5] 王春生,付炳宁,张芹,等. 正交异性钢桥面板足尺疲劳试验 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 69-76.

(WANG Chunsheng, FU Bingning, ZHANG Qin, et al. Fatigue test on full-scale orthotropic steel bridge deck [J]. China journal of highway and transport, 2013, 26(2): 69-76.)

[6] 李丽娟,崔闯,卜一之,等. 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能影响效应研究 [J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 48-52.

(LI Lijuan, CUI Chuang, BU Yizhi, et al. Study of influential effects of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck plate [J]. World bridges, 2016, 44(5): 48-52.)

[7] 张清华,卜一之,李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30.

(ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China journal of highway and

- transport, 2017, 30(3): 14-30.)
- [8] 张清华, 崔闯, 卜一之, 等. 正交异性钢桥面板足尺节段疲劳模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 72-83.
(ZHANG Qinghua, CUI Chuang, BU Yizhi, et al. Experimental study on fatigue features of orthotropic bridge deck through full-scale segment models [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(4): 72-83.)
- [9] 张清华, 李俊, 郭亚文, 等. 正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 71-81.
(ZHANG Qinghua, LI Jun, GUO Yawen, et al. Fatigue failure modes and resistance evaluation of orthotropic steel bridge deck structural system [J]. China civil engineering journal, 2019, 52(1): 71-81.)
- [10] 黄卫, 钱振东, 张磊. 钢桥面铺装局部修复方案试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 87-90.
(HUANG Wei, QIAN Zhendong, ZHANG Lei. An experimental study on partly patching scheme of steel bridge deck paving [J]. China civil engineering journal, 2006, 39(8): 87-90.)
- [11] 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): 40-45.
(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): 40-45.)
- [12] 邓鸣, 张建仁, 王蕊, 等. UHPC 铺装加固斜拉桥正交异性钢桥面板 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 67-74.
(DENG Ming, ZHANG Jianren, WANG Rui, et al. Reinforcement of orthotropic steel bridge deck for cable-stayed bridge based on UHPC paving system [J]. Journal of Chang' an university (natural science edition), 2018, 38(1): 67-74.)
- [13] 邵旭东, 方恒, 李文光. 钢-超薄 UHPC 组合桥面板界面抗剪性能研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 44-51.
(SHAO Xudong, FANG Heng, LI Wenguang. Research on the interfacial shear resistant performance of the composite deck system composed of orthotropic deck and ultra-thin UHPC layer [J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2016, 43(5): 44-51.)
- [14] 詹健, 邵旭东, 曲宛桐, 等. 钢-STC 轻型组合桥面结构多参数分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(5): 73-81.
(ZHAN Jian, SHAO Xudong, QU Wantong, et al. Multi-parametric analysis on Steel-STC lightweight composite bridge deck [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2018, 35(5): 73-81.)
- [15] 李嘉, 冯啸天, 邵旭东, 等. STC 钢桥面铺装新体系的力学计算与实桥试验对比分析 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 39-44.
(LI Jia, FENG Xiaotian, SHAO Xudong, et al. Comparison of mechanical calculation and actual test for new STC steel bridge paving system [J]. China journal of highway and transport, 2014, 27(3): 39-44.)
- [16] 横河ブリッジ株式会社. 鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究(その2) 報告書: SFRC 舗装した鋼床版実大供試体の静的載荷および移動輪荷重試験 [R]. 日本: 独立行政法人土木研究所, 2010.
(Yokogawa Bridge Inc. Cooperative research report about fatigue durability improvement technique of the steel deck slab bridge (part 2): test of static load and moving wheel load test of SFRC with steel deck slab under loading condition [R]. Japan: Incorporated Administrative Agency Public Works Research Institute, 2010.)
- [17] 牟廷敏, 丁庆军, 周孝军, 等. 钢纤维混凝土桥面铺装疲劳性能试验研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(5): 988-991.
(MOU Tingmin, DING Qingjun, ZHOU Xiaojun, et al. Fatigue performance of steel fiber reinforced concrete bridge deck pavement [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2012, 36(5): 988-991.)
- [18] 徐欣, 方海, 徐超, 等. CFRP 增强钢纤维混凝土钢桥面铺装力学性能试验与数值模拟 [J]. 公路工程, 2015, 40(6): 44-50.
(XU Xin, FANG Hai, XU Chao, et al. Experimental research and finite element analysis on steel bridge deck in CFRP reinforced SFRC pavements [J]. Highway engineering, 2015, 40(6): 44-50.)
- [19] 张允士, 李法雄, 熊锋, 等. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制 [J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 75-80.
(ZHANG Yunshi, LI Faxiong, XIONG Feng, et al. Cause analysis and control measures of fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 30(8): 75-80.)
- [20] 王占飞, 程浩波, 程志彬, 等. 桥面铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 257-266.
(WANG Zhanfei, CHENG Haobo, CHENG Zhibin, et al. Influence of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(2): 257-266.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)