

桥面铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响

王占飞¹,程浩波¹,程志彬²,张敏江¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 郑州市交通规划勘察设计院,河南 郑州 450000)

摘要 目的 研究沥青混凝土桥面铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响,提出合理的铺装层厚度与弹性模量. 方法 建立正交异性钢桥的有限元模型,并与试验结果进行对比,验证正交异性钢桥有限元模型及其边界条件的有效性;选取易产生疲劳裂缝4个典型位置的构造细节进行有限元分析,从而找到桥面铺装层厚度、弹性模量等铺装层参数对正交异性钢桥面板疲劳细节处应力幅的影响趋势;验算疲劳细节应力幅值是否小于《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中疲劳 $S-N$ 曲线中相应疲劳细节的200万次循环疲劳强度35 MPa. 结果 当铺装层厚度自60 mm增加到100 mm时,疲劳细节的等效应力幅值逐渐下降,且呈线性递减趋势;铺装层厚度为70 mm时,其弹性模量应不小于5 000 MPa为宜;当其模量自1 000 MPa增加到10 000 MPa时,不同疲劳细节的等效应力幅值呈非线性下降趋势. 当其模量增加到8 000 MPa时,疲劳细节的等效疲劳应力幅趋于稳定;铺装层材料的模量为3 000 MPa时,其铺装层厚度应不小于80 mm为宜. 结论 4种疲劳细节中,与钢桥面板接触的疲劳细节其疲劳性能受铺装层厚度、铺装层模量影响比其他疲劳细节大. 桥面铺装层能有效地降低疲劳细节的等效疲劳应力幅,改善正交异性钢桥面板的疲劳性能.

关键词 桥面铺装;正交异性钢桥面板;疲劳细节;疲劳性能;应力幅

中图分类号 TU997

文献标志码 A

Influence of Pavement on Fatigue Performance of Orthotropic Steel Deck

WANG Zhanfei¹, CHENG Haobo¹, CHENG Zhibin², ZHANG Minjiang¹

(1. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Zhengzhou Communication Planning Survey and Design Institute, Zhengzhou, China, 450000)

Abstract: To study the influence of the asphalt concrete pavement on fatigue performance of the orthotropic steel deck, the reasonable pavement parameters are proposed. The finite element model of the orthotropic steel bridge was established and the effectiveness of the model and boundary conditions was verified by comparing with the test results. The four typical fatigue details were selected. By checking whether fatigue details stress amplitude is less than stress amplitude corre-

收稿日期:2016-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51378319);住房和城乡建设部科技攻关项目(2014-K2-047)

作者简介:王占飞(1976—),男,教授,博士,主要从事钢桥及桥梁抗震方面研究.

sponding to the 2 million times of the fatigue $S-N$ curve of the steel bridge, the influence trend of the elastic modulus and thickness of pavement on fatigue details stress amplitude was determined. The result showed that increasing the thickness of pavement from 60 mm to 100 mm could reduce equivalent stress amplitude of fatigue details with a linear decreasing trend. When the thickness of pavement was 70 mm, the elastic modulus of pavement should not be less than 5 000 MPa. When the elastic modulus of pavement increased from 1 000 MPa to 10 000 MPa, the equivalent stress amplitude of fatigue details was a nonlinear decline trend. When the elastic modulus of pavement increased to 8 000 MPa, the trend of the equivalent stress amplitude would be stable. When the elastic modulus of pavement was 3 000 MPa, the thickness of pavement should not be less than 80 mm. The fatigue performance of the fatigue details, which contacted with the steel bridge deck, were influenced more than the other fatigue details. The pavement could effectively reduce the equivalent stress amplitude of fatigue details and improve the fatigue performance of the orthotropic steel deck.

Key words: deck pavement; orthotropic steel bridge deck; fatigue details; fatigue performance; stress amplitude

正交异性钢桥面板作为目前大、中跨径钢桥桥面板的一种重要结构形式,由于其具有自重轻、极限承载能力大、施工周期短等特点,受到了各国桥梁设计者的青睐^[1-4]。由于正交异性钢桥面板结构构造与受力较复杂,随着使用时间的延续,正交异性钢桥面结构出现了多种病害^[5-7]。实际工程经验表明,钢桥面铺装层损坏与焊接细节处疲劳裂纹的萌生扩展是正交异性钢桥面板结构的2个典型病害。钢桥面铺装是直接铺设在钢桥面板上,与钢桥面结构共同承重,既是桥面板的保护层也是直接对用户提供服务的功能层,对桥梁的耐久性,保证行车安全和舒适性以及经济和社会效益有着重要的作用,因而随着钢桥建设水平的发展而逐渐成为桥梁建设中研究的一个关键点^[7]。我国常用的钢桥面铺装形式比较丰富,铺装层材料从最早的氯丁橡胶沥青混合料等改性沥青混凝土逐渐过渡到沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)、浇筑式沥青混凝土和环氧沥青混凝土^[9]。其弹性模量不仅与材料有关还受到外界气温的影响,随外界温度的变化而变化,弹性模量一般在1 000~10 000 MPa。由于钢桥面板厚度通常在12~16 mm,远小于铺装层一般厚度50~100 mm,所以铺装层的相对刚度较大,因而

钢桥面板疲劳设计时,应考虑铺装层与钢桥面板的共同作用^[10-11]。目前国内学者对正交异性钢桥面板铺装层自身的力学响应进行了相关研究,并取得了一定成果^[12-13],但关于桥面铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响研究较少。因此,笔者根据正交异性钢桥试验^[14]建立有限元模型,通过有限元分析结果与试验结果对比进行有效性验证;对带有不同参数铺装层的正交异性钢桥有限元模型进行分析,从而找到桥面铺装层厚度、弹性模量等铺装层参数对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响;通过验算疲劳细节应力幅值是否小于钢桥疲劳 $S-N$ 曲线中作用200万次所对应的应力幅值要求,提出合理的铺装层参数。

1 正交异性钢桥裸板有限元模型的有效性验证

笔者采用大型通用非线性有限元软件ABAQUS进行建模分析^[15],为验证所建立的正交异性钢桥有限元模型的有效性,以参考文献[14]的试验为基础,建立了正交异性钢桥裸板有限元模型。模型具体参数如表1所示。钢材的弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3,其本构关系如图1所示。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of test specimen

U 形肋				主梁			横隔板			垂直钢板		
钢桥面板	尺寸/ mm	数量/个	间距/ mm	肋板厚/ mm	数量/片	间距/ mm	肋板厚/ mm	数量/片	间距/ mm	宽度/ mm	厚度/ mm	间距/ mm
厚度/mm												
12	320×230×6	4	620	9	2	2 830	10	3	1 375, 2 750	160	12	917

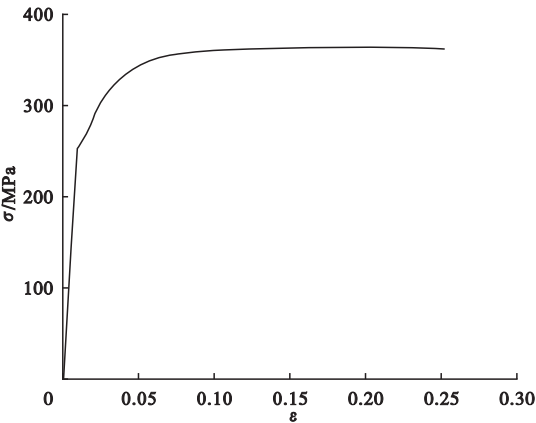


图 1 钢材的应力 - 应变关系

Fig. 1 Stress-stain relationship of steel

图 2 为加载工况及钢桥有限元模型. 正交异性钢桥裸板有限元模型各部件均采用二次减缩积分六面体实体单元 (C3D20R), 各部分钢构件采用 MEGRE 连接^[16], 主梁底部为完全固定的边界条件. 加载方式采用以肋 R3 和 R4 之间的中线为轴线的双轮移动加载形式, 荷载移动方向见图 2 (a), 横向加载位置如图 2 (b) 所示. 参考文献 [14] 的试验在加载设备和模型之间增加了橡胶垫, 其长宽高为 200 mm×200 mm×22 mm, 有限元加载时对加载面进行 45° 扩展, 其扩展形式及加载等效尺寸如图 3 所示.

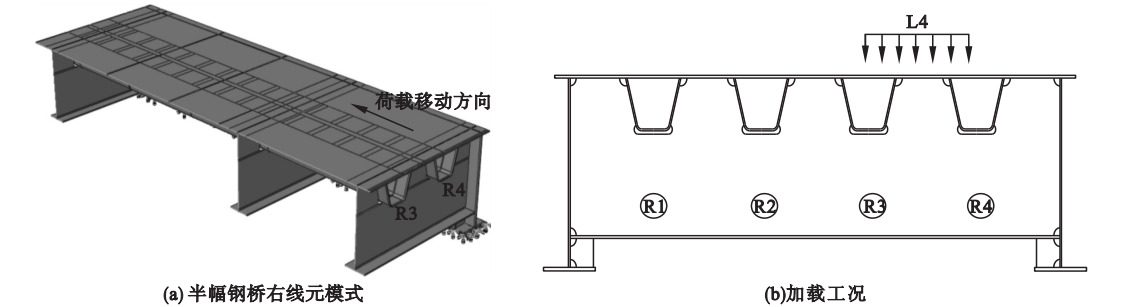


图 2 加载工况及钢桥有限元模型

Fig. 2 Loading conditions and finite-element model of steel bridge

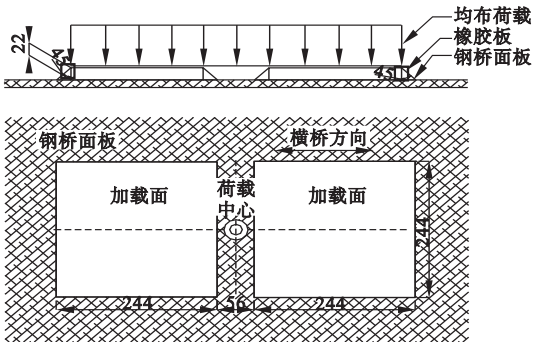


图 3 考虑扩散角等效的加载方式

Fig. 3 Equivalent loading modes considering diffusion angle

通过图 2 (b) 荷载工况下的有限元分析, 以 R3 肋为研究对象, 将其与中横隔板结合部位末端的应力影响线与文献 [14] 试验结果进行对比 (见图 4、图 5). 从图 4 与图 5 可以看出, 有限元结果无论是影响线趋势还是数值上均与文献 [14] 中的试验结果吻合较好, 从而验证了正交异性钢桥裸板有限元模型的有效性.

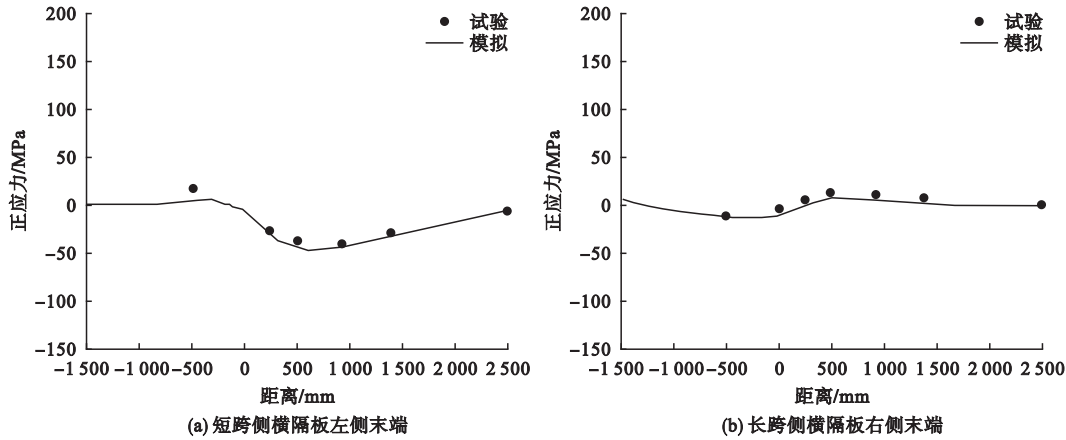


图 4 U 形肋与横隔板结合末端焊缝垂直方向的应力影响线

Fig. 4 Stress influence line in the vertical direction of joint region end's weld between U rib and transverse diaphragm

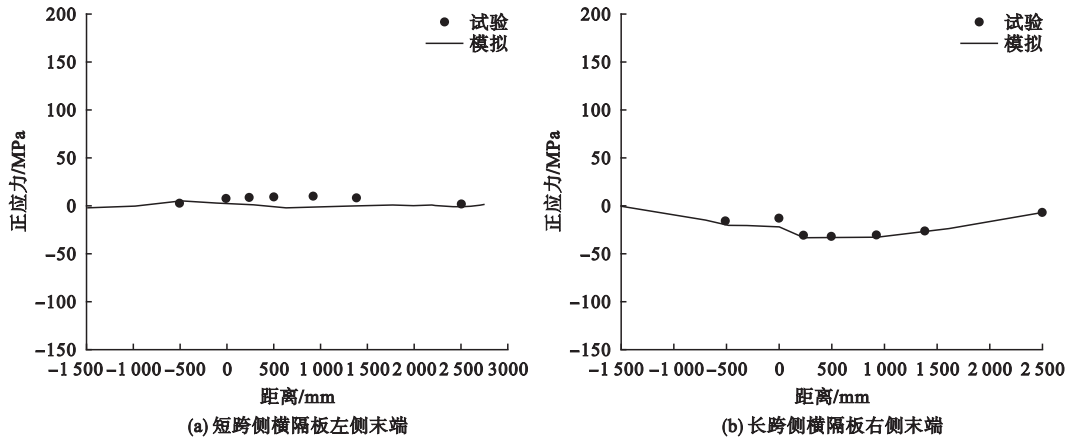


图 5 U 形肋与横隔板结合末端焊缝平行方向的应力影响线

Fig. 5 Stress influence line in the parallel direction of joint region end's weld between U rib and transverse diaphragm

2 正交异性钢桥面板疲劳易损细节的选取与加载形式

根据曾志斌^[17]对正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析,张允士等^[18]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,按照《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中规定的疲劳细节,选取易产生疲劳裂缝 4 个典型位置的构造细节为笔者有限元分析的疲劳细节(见图 6). 疲劳细节 A:横隔板处 U 形肋与钢桥面板结合部位焊缝处;疲劳细节 B:U 形肋与钢桥面板结合部位焊接缺陷处;疲劳细节 C:U

形肋嵌补段接缝处;疲劳细节 D:U 形肋与横隔板焊缝焊趾处.

实际工程中钢桥面铺装是直接铺设在钢桥面板上,因而带有铺装层的正交异性钢桥有限元模型以正交异性钢桥裸板为基础,在顶板加铺沥青混凝土铺装层. 正交异性钢桥裸板模型各部分钢构件的单元类型、边界条件不变,沥青混凝土铺装层假设为各向同性的均匀实体,采用 8 节点线性减缩积分实体单元(C3D8R)模拟^[19];沥青混凝土铺装层与桥面板之间采用摩擦连接,摩擦系数为 0.068.

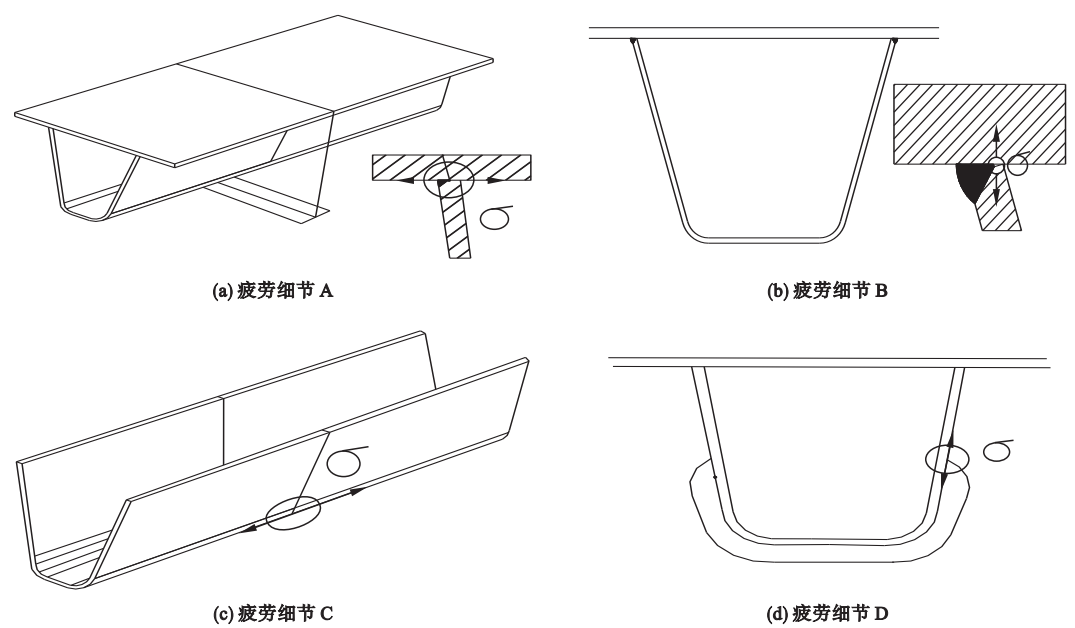


图 6 疲劳细节示意图

Fig. 6 Fatigue detail diagram

笔者以欧洲钢结构规范 (Eurocode3 Design of Steel Structures) 中疲劳荷载计算模型 3 (单车模型) 为原型, 结合我国货车超载情况较严重这一交通实情, 偏安全考虑乘以约 1.2 的系数, 即采用轴重 $2 \times 140\text{kN}$ 的车辆荷载作为验算模型疲劳性能的疲劳荷载 (见图 7)。

由于模型车前后轴距较大, 对笔者研究的内容影响较小, 因而可以忽略车轴之间的相互影响, 即只采用后轴单轮加载。模型车横向加载位置如图 8 所示, 采用移动加载, 车轮作用面为 $600\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的矩形, 其中 600 mm 为沿着加载方向, 200 mm 为横向。

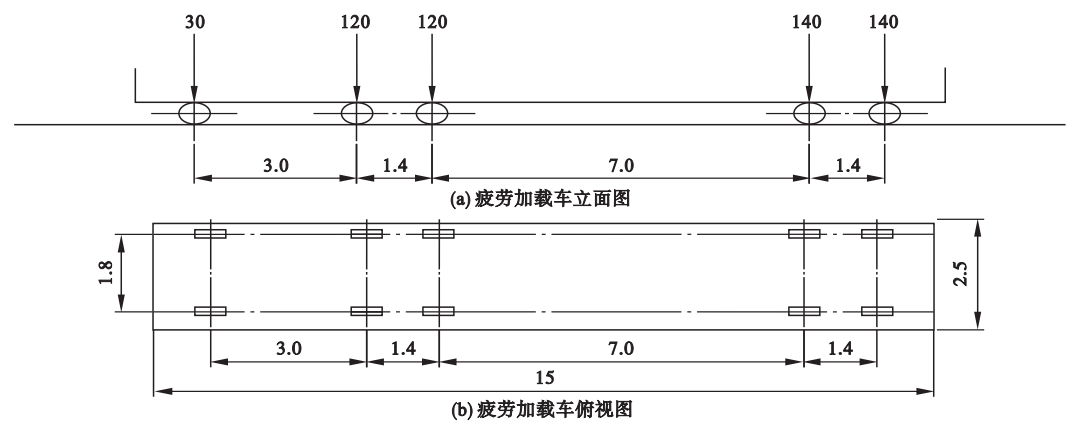


图 7 疲劳加载车辆

Fig. 7 Fatigue loading vehicle

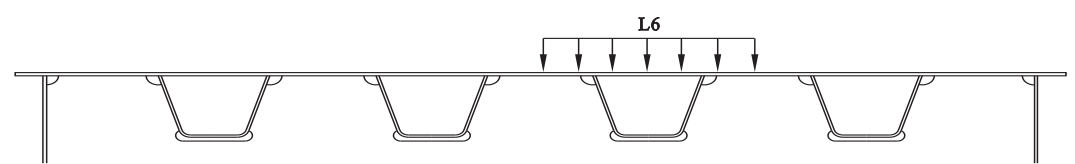


图 8 车轮加载位置

Fig. 8 Position of wheel loading

3 铺装层对桥面板疲劳细节的影响

3.1 铺装层厚度的影响

目前,国内外各类桥梁的桥面铺装通常采用沥青混凝土作为铺装材料.但是各类桥梁所利用的沥青混凝土的材料类型以及厚度各不相同^[20].基于各类桥梁的铺装层厚度不

同以及沥青路面设计规范中有关桥面铺装层厚度的规定,笔者选用 60 mm、70 mm、80 mm、90 mm 和 100 mm 厚度进行对比分析,铺装层模量取 3 000 MPa.采用图 8 疲劳车按图 9 荷载工况进行移动加载.统计分析 5 种桥面铺装层厚度的情况下得到不同疲劳细节的应力影响线(见图 9).

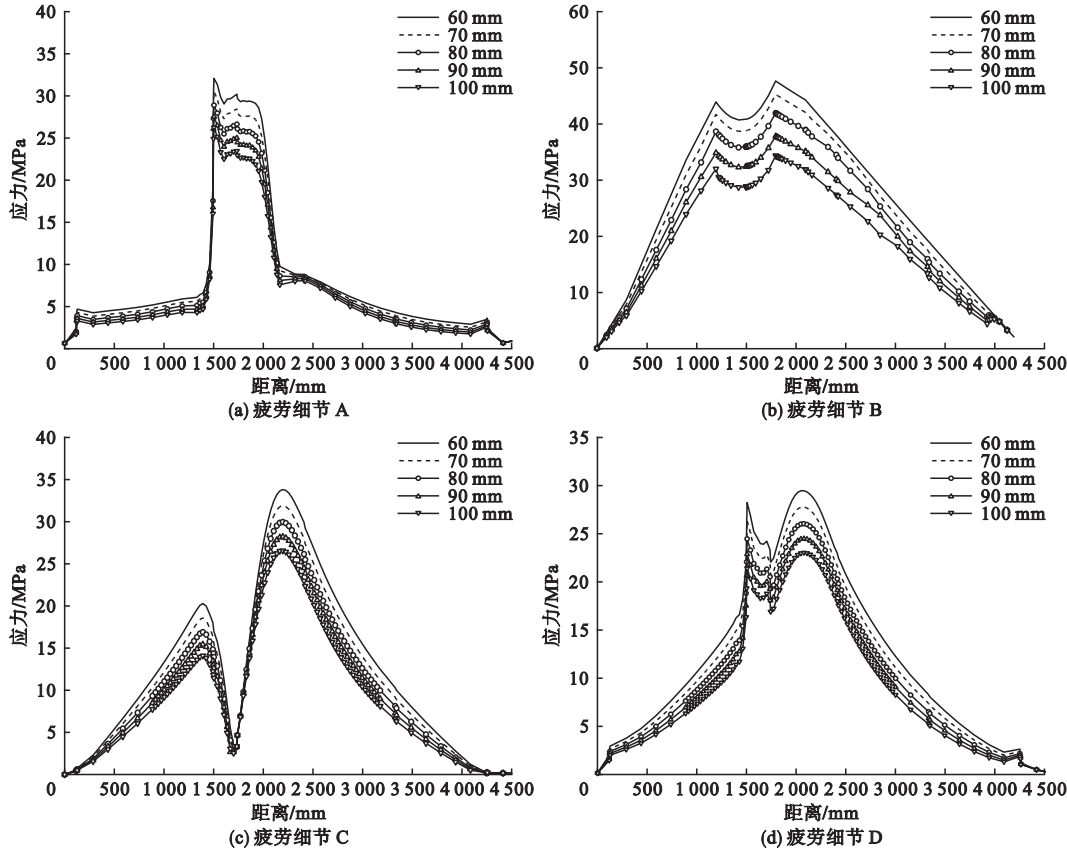


图 9 正交异性钢桥面板不同疲劳细节的应力影响线

Fig. 9 Stress influence line of fatigue details of orthotropic steel deck

通过泄水计数法计算图 9 中应力历程的疲劳应力幅和相应的循环次数,然后根据 Miner 线性累积损伤准则的变换式将变幅疲劳应力和循环次数换算成相应的等效应力幅^[21],变换式为

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

式中: $\Delta\sigma_{eq}$ 为等效应力幅; 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 $S-N$ 曲线斜率参数, $m=5$.

桥面铺装厚度与各疲劳细节的等效应力幅的关系如图 10 所示,由图 10 可知,4 种疲劳细节的等效应力幅均随着铺装层厚度增加而以线性变化趋势逐渐减小.当铺装层厚度自 60 mm 增加到 100 mm 时,疲劳细节 A 的等效应力幅值自 25.6 MPa 下降到 19.77 MPa,减少了 22.77%;疲劳细节 B 的等效应力幅值从 38.14 MPa 减少到 27.78 MPa,减

小了 27.16%;疲劳细节 C 的等效应力幅值从 17.97 MPa 减少到 13.28 MPa,减小了 26.1%;疲劳细节 D 的等效应力幅值从 24.3 MPa 减少到 18.39 MPa,减小了 24.32%。

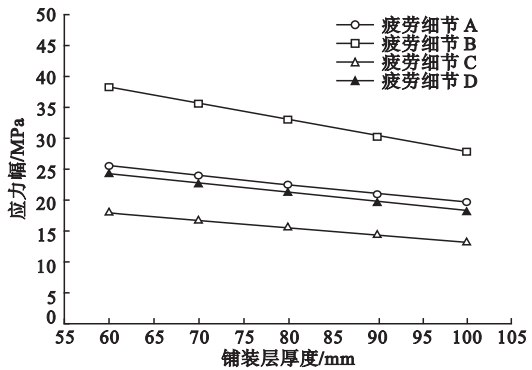


图 10 应力幅随铺装层厚度变化趋势

Fig. 10 Stress amplitude variation trend with pavement thickness

3.2 铺装层弹性模量的影响

沥青桥面铺装所用主要材料是沥青混合料,由于沥青材料属于粘弹塑性材料,其对温度的变化十分敏感,随温度的变化其路用性能不断变化.因此,根据我国常用的沥青混合料以及《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)上沥青混合料模量的变化范围,笔者选用 1 000 MPa、3 000 MPa、5 000 MPa、8 000 MPa、10 000 MPa,5 种弹性模量的沥青混凝土进行对比,桥面铺装层厚度选用 70 mm,计算不同弹性模量下得到不同疲劳细节的应力影响线(见图 11)。

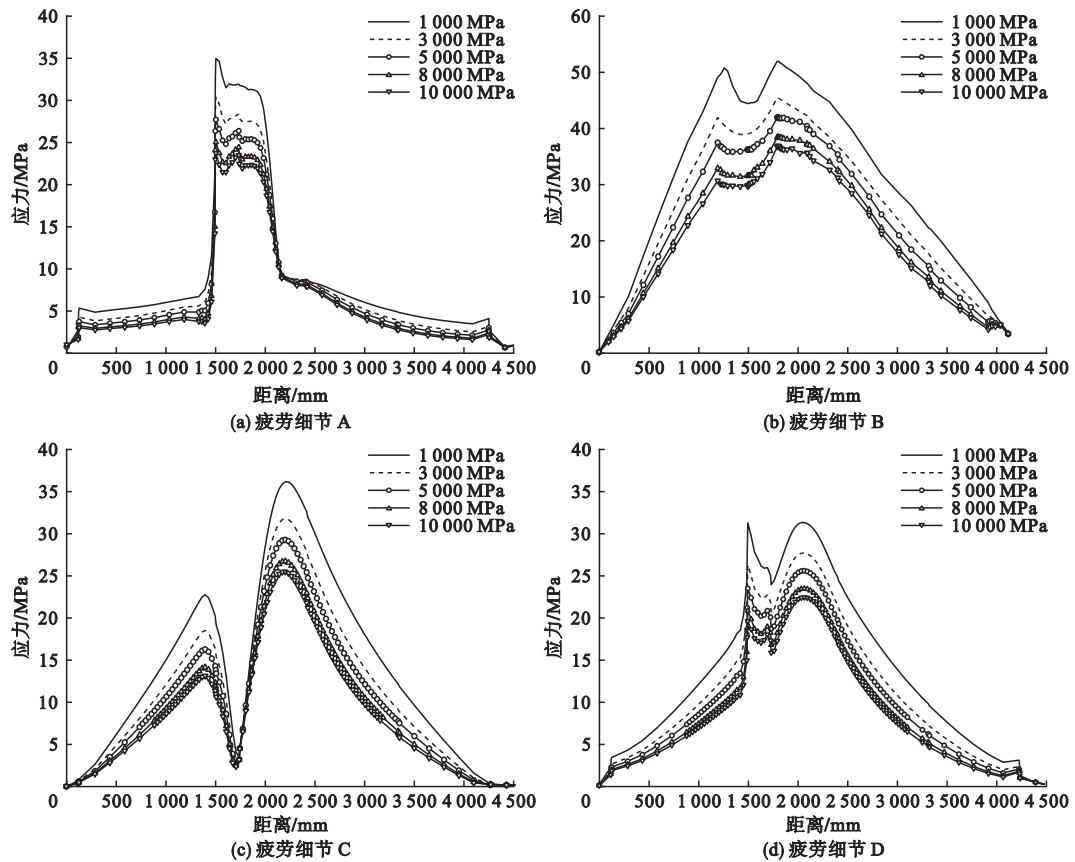


图 11 正交异性钢桥面板不同疲劳细节的应力分布

Fig. 11 Stress distribution of different fatigue details in orthotropic steel deck

按式(1)进行等效应力幅值的计算,桥面铺装材料的弹性模量与各疲劳细节的等效

应力幅的关系如图 12 所示。

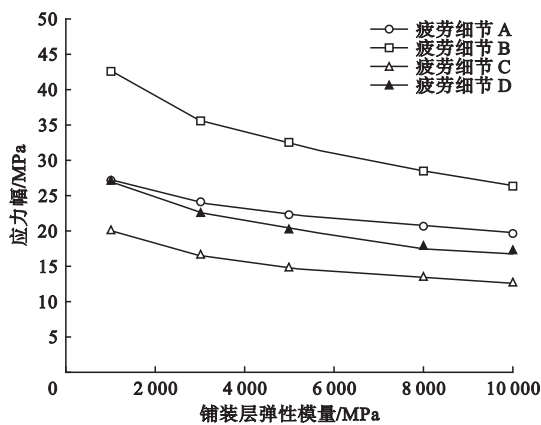


图 12 应力幅随铺装层弹性模量变化趋势图

Fig. 12 Stress amplitude variation trend with pavement elasticity modulus

由图 12 可知,随着桥面铺装层弹性模量的增加,4 种疲劳细节的等效疲劳应力幅值逐渐减小,且呈非线性变化的趋势.当桥面铺装层弹性模量增加到 6 000 MPa 时,疲劳细节 A、疲劳细节 B 以及疲劳细节 C 的等效应力幅值下降逐渐趋于平缓;当桥面铺装层弹性模量增加到 8 000 MPa 时,4 种疲劳细节等效应力幅值下降均趋于平缓.桥面铺装层弹性模量从 1 000 MPa 增加到 10 000 MPa,疲劳细节 A 的等效应力幅值自 27.12 MPa 下降至 19.84 MPa,减少了 26.84%;疲劳细节 B 的等效应力幅值从 42.43 MPa 减少到

26.41 MPa,减少了 37.76%;疲劳细节 C 的等效应力幅值从 20 MPa 减少到 12.72 MPa,减小了 36.4%;疲劳细节 D 的等效应力幅值从 27.02 MPa 减少到 16.89 MPa,减小了 37.49%.即不同沥青材料以及温度对其影响较大,对不同功能的桥梁应适当选用沥青材料,且在夏季选择铺装时应不考虑铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响.

4 桥面铺装层设计参数分析

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)规定“钢桥在正常使用状态下,允许的疲劳应力的作用次数是 200 万次”,因此,通过查得本规范的疲劳 S-N 曲线中相应疲劳细节的 200 万次循环疲劳强度为 35 MPa.

将不同铺装层厚度及弹性模量下的正交异性钢桥面板的等效应力幅汇总于表 2.由表 2 可知,当桥面铺装材料的弹性模量为 3 000 MPa、铺装层厚度小于 80 mm 时,疲劳细节 B 的等效应力幅值大于 35 MPa;当铺装层厚度为 70 mm、铺装层材料的弹性模量小于 5 000 MPa 时,疲劳细节 B 的等效应力幅值大于 35 MPa.

表 2 不同桥面铺装参数下各疲劳细节的等效应力幅

Table 2 Equivalent stress amplitude of fatigue details under bridge deck pavement parameters

铺装层厚度/mm	铺装层弹性模量/MPa	等效应力幅值/MPa			
		疲劳细节 A	疲劳细节 B	疲劳细节 C	疲劳细节 D
60	3 000	25.60	38.14	17.97	24.30
70	3 000	24.10	36.23	16.63	22.66
80	3 000	22.52	33.55	15.33	21.05
90	3 000	21.11	30.24	14.24	19.66
100	3 000	19.77	27.78	13.28	18.39
70	1 000	27.12	42.43	20.00	27.02
70	3 000	24.10	36.23	16.63	22.66
70	5 000	22.36	32.33	14.93	20.26
70	8 000	20.66	28.34	13.40	17.67
70	10 000	19.84	26.41	12.72	16.89

5 结 论

(1) 桥面铺装层能有效地降低疲劳细节的等效疲劳应力幅,改善正交异性钢桥面板的疲劳性能。

(2) 桥面铺装层厚度对疲劳细节的等效应力幅影响较大,当铺装层厚度自 60 mm 增加到 100 mm 时,疲劳细节的等效应力幅值逐渐下降,且呈线性递减趋势。

(3) 桥面铺装层模量对疲劳细节的等效应力幅也有较大影响,当其模量自 1 000 MPa 增加到 10 000 MPa 时,不同疲劳细节的等效应力幅值呈非线性下降趋势。当其模量增加到 8 000 MPa 时,疲劳细节的等效疲劳应力幅趋于稳定。

(4) 4 种疲劳细节中,与钢桥面板接触的疲劳细节其疲劳性能受铺装层厚度、铺装层模量影响比其他疲劳细节大。

(5) 通过铺装层不同参数对正交异性钢桥受力影响分析,得出铺装层材料的模量为 3 000 MPa 时,其铺装层厚度应不小于 80 mm 为宜;铺装层厚度为 70 mm 时,其弹性模量应不小于 5 000 MPa 为宜。

参考文献

- [1] TSAKOPOULOS P A, FISHER J W. Fatigue performance and design refinements of steel orthotropic deck panels based on full-scale laboratory tests[J]. Steel structures, 2005(5): 211-223.
- [2] WANG C S, FENG Y C, DUAN L. Fatigue damage evaluation and retrofit of steel orthotropic bridge decks[J]. Key engineering materials, 2009, 413/414: 741-748.
- [3] ONO S, HIRABAYASHI Y, SHIMOZATO T, et al. Fatigue properties and retrofitting of existing orthotropic steel bridge decks[J]. Doboku gakkai ronbunshuu A, 2009, 65(2): 335-347.
- [4] KONDA N, NISHIO M, ICHIMIYA M, et al. Development of fatigue test method and im-

provement of fatigue life by new functional steel plates for welding of trough rib and deck plate of orthotropic decks[J]. International journal of steel structures, 2013, 13(1): 191-197.

- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国公路交通学术 research 综述 2012[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 2-50.
(Editorial Department of China Journal of High Way and Transport. An academic research summary on China highway and transport; 2012 [J]. China journal of highway and transport, 2012, 25(3): 2-50.)
- [6] 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.)
- [7] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术 research 综述 2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
(Editorial Department of China Journal of High Way and Transport. Review on China's bridge engineering research; 2014 [J]. China journal of highway and transport, 2014, 27(5): 1-96.)
- [8] LIU R, WANG B, LIU Y. Distortion induced fatigue of deck plate at rib intersection with diaphragm in orthotropic steel deck[J]. International journal of steel structures, 2015, 15(3): 623-632.
- [9] 王甫友. 钢桥桥面铺装研究综述[J]. 河北交通科技, 2008, 5(4): 34-36.
(WANG Fuyou. A research overview on steel bridge pavement [J]. Hebei jiaotong science and technology, 2008, 5(4): 34-36.)
- [10] 刘小旭. FBR-沥青混凝土钢桥面铺装结构静力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
(LIU Xiaoxu. Innovative research on FBR-steel bridge deck asphalt concrete pavement structure[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.)

- [11] 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. Experiment study on fatigue of orthotropic bridge deck through full-scale segment models[J]. China civil engineering journal, 2015,48(4):72-83.)
- [12] 钱振东,罗剑,敬森森. 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):61-64.
(QIAN Zhendong, LUO Jian, JING Miaomiao. Mechanical analysis of asphalt concrete paving projects on steel bridge deck[J]. China journal of highway and transport, 2005, 18(2): 61-64.)
- [13] 赵朝华,韩绪,李亚. 界面材料参数和层间状态对钢桥面铺装体系受力的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(3):385-388.
(ZHAO Chaohua, HAN Xu, LI Ya. Impact of interface material parameters and layer state on the force of steel bridge deck[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2013,32(3):385-388.)
- [14] 独立行政法人土木研究所,川田工業株式会社. 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5)報告書[R]. 日本:独立行政法人土木研究所,2010.
(Incorporated Administrative Agency Public Works Research Institute, Kawada Industries Inc. Cooperative research report about fatigue durability improvement technique of the steel deck slab bridge (Part 5) [R]. Japan: Incorporated administrative agency public works research institute, 2010.)
- [15] YOKOZEKI K, MIKI C. Fatigue evaluation for longitudinal-to-transverse rib connection of orthotropic steel deck by using structural hot spot stress[J]. Welding in the world, 2016, 60(1): 83-92.
- [16] 曹金凤,石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
(CAO Jinfeng, SHI Yiping. ABAQUS FEA common questions and answers[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.)
- [17] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J]. 钢结构, 2011, 26(2): 9-15.
(ZENG Zhibin. Classification and cause analysis of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Steel construction, 2011, 26(2): 9-15.)
- [18] 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与控制[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.)
- [19] 吴冲,刘海燕,张胜利,等. 桥面铺装对钢桥面板疲劳应力幅的影响[J]. 中国工程科学, 2010, 12(7): 39-42.
(WU Chong, LIU Haiyan, ZHANG Shengli, et al. Influence of pavement on fatigue stress range of orthotropic steel deck [J]. Engineering science, 2010, 12(7): 39-42.)
- [20] 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 bridges [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.)
- [21] 贡金鑫,王海超,赵国藩. 结构疲劳累积损伤与极限承载能力可靠度[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(6): 714-718.
(GONG Jinxin, WANG Haichao, ZHAO Guofan. Ultimate bearing capacity reliability of structures subjected to accumulated fatigue damage [J]. Journal of Dalian university of technology, 2002, 42(6): 714-718.)