

文章编号: 1002-0268 (2009) 12-0044-06

匝道钢桥面沥青铺装简化设计方法

赵锋军, 李宇峙

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 选用叠层连续梁作为计算基本模型, 将沥青铺装表面的最大弯拉应变以及钢面板与沥青铺装界面最不利剪应力作为设计控制指标, 以实体工程的结构参数作为计算模型参数, 采用有限元计算方法, 分别计算分析了大纵坡、超高横坡条件造成铺装表面产生的水平力及其对铺装结构内部应力应变的影响。根据计算结果提出修正基本模型计算结果的方法与具体修正系数的计算。在此基础上提出匝道钢桥面沥青铺装简化设计方法。最后, 以实体工程为例, 将该设计方法用于工程实践。实践证明, 以叠层连续梁为基本模型, 考虑纵、横坡度修正后进行匝道钢桥面沥青铺装设计是可行的。

关键词: 桥梁工程; 设计方法; 有限元; 钢桥面; 沥青铺装; 大纵坡度; 小半径; 匝道钢桥

中图分类号: U443.33

文献标识码: A

Simplified Design Method of Asphalt Pavement for Ramp Steel Bridge

ZHAO Fengjun, LI Yuzhi

(School of Communications and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: Based on the model of continuous laminated beam, the max flexure tensile strain in the top of pavement and the max inum shear stress on the interface between steel deck and asphalt pavement was determined as the design controlling indexes. Taken the structure parameters of a real ramp steel bridge as the calculation parameters, the horizontal force in pavement surfacing caused by steep longitudinal gradient and super elevation transverse gradient and its effect on stress and strain in interior structure were computed by FEM. Based on the results of computation, the method to modify computation result of basic model and the computation of corrective coefficient were presented. As a result, the simplified design method of asphalt pavement for ramp steel bridges was presented. At last, the computation method was used in practical engineering. The practice shows that the method based on model of continuous laminated beam and corrective coefficient for longitudinal and transverse gradients is practicable.

Key words: bridge engineering; design method; FEM; steel deck; asphalt pavement; steep longitudinal gradient; small radius; ramp steel bridge

0 前言

高速公路立交系统以及城市道路立交系统中存在大量匝道桥, 这些中小跨径桥梁具有大纵坡、小半径

的特点。钢箱梁匝道桥的传统铺装形式采用钢纤维混凝土, 为了行车舒适, 常常加铺沥青混凝土层。传统的铺装结构具有恒载大、维修困难等缺点, 沥青铺装层容易产生滑移、车辙等病害。钢桥面具有变形大,

收稿日期: 2009-01-23

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20070536001); 湖南省教育厅科研资助项目 (07C100); 道路结构与材料交通重点实验室 (长沙) 开放基金资助项目 (kfj080204)

作者简介: 赵锋军 (1977—), 男, 陕西蓝田人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为钢桥面铺装. (zfj-007@tom.com)

钢板热容量小, 温度变动范围大, 钢板需考虑防水、防锈等特性, 桥面铺装直接承受交通荷载的反复作用, 容易产生脱层破坏。钢桥面铺装体系更容易受环境温度的影响, 在车辆荷载作用下, 钢箱梁局部还将产生负弯矩, 出现倒置的受力模式, 使铺装层局部表面承受较大的拉应变, 最终导致铺装体系的疲劳开裂^[1]。对于城市立交系统, 通行车辆载重小、车速慢, 这些病害表现还不明显^[2]。而对于越来越多的高速公路立交系统、城市快速干道立交系统, 车辆载重大、车速高、交通量大^[3], 匝道钢桥面铺装产生的病害越来越严重。本文分析该工程难题的关键技术, 从复杂条件下的匝道钢桥沥青铺装设计控制指标入手, 探讨简化的设计计算方法, 并通过实体工程检验其效果。

1 研究的目的与意义

大跨径钢桥面沥青铺装是一个国际性工程难题, 也是国内外研究的热点, 而对于中小桥梁, 特别是匝道钢桥的沥青铺装问题却没有得到充分的重视, 传统的匝道钢桥铺装方式为 8~10 cm 的防水混凝土或钢纤维混凝土+(4~7) cm 的单层或双层沥青混凝土面层, 较大跨径钢桥 5~7 cm 的沥青铺装厚度, 匝道钢桥的铺装显得十分厚重。加之匝道钢桥大多数处于城市立交系统, 荷载小、车速慢, 铺装早期损坏并不明显。但随着高速公路立交系统与城市主干道立交系统中匝道钢桥的越来越多涌现, 超载、重载交通与大纵坡、小半径复杂条件, 以及钢桥轻便的使用特性与铺装结构的厚重特点, 都使匝道钢桥沥青铺装的关键技术研究成为急待解决的工程难题。现有的钢桥面沥青铺装材料具有多样性^[4], 从上万美金的环氧沥青到几千人民币的重交沥青在钢桥中均有使用的先例, 如何选材进行铺装成为首先需要解决的问题。例如, 南京长江二桥采用美国进口的环氧沥青粘结层与环氧沥青结合料分别制作铺装结构防水粘结层与环氧沥青混凝土铺装层, 所需集料也只能采用美国工程师指定的江苏镇江产玄武岩碎石, 相关施工设备需要进口或改造, 造价是传统铺装结构的 3~5 倍^[5], 而这种材料与结构是否适于匝道钢桥呢? 复杂条件下的钢桥面沥青铺装工程的关键是钢桥面沥青铺装的设计理论与设计方法^[6-7]。现有的方法多基于有限元, 如大跨径钢桥面铺装结构精英蚂蚁寻优策略^[8], 钢桥面沥青混合料铺装车辙有限元分析^[9]等。本文以文献[10]所提的叠层连续梁模型为基础, 探讨匝道钢桥面沥青铺装的设计控制指标体系与实用设计方法。

2 基本计算模型

2.1 计算模型分析

目前, 国内外对钢桥面沥青铺装的计算分析普遍采用有限元数值计算方法, 大量的有限元计算结果表明^[1,7], 钢桥面沥青铺装的受力特性与一般沥青路面有很大不同, 现行公路沥青路面设计规范中采用的弯沉与层底弯拉应力两项设计控制指标均不能有效控制钢桥面沥青铺装的设计, 铺装表面最大弯拉应变与沥青层与钢板界面的最大剪应力是控制铺装设计的关键指标。同时, 有限元计算也表明, 由于钢面板的轻薄, 钢桥铺装受力具有明显的局部承载特征, 增强刚面板整体刚度的纵、横向加劲肋对局部钢板的支撑作用非常明显, 受力特征接近与叠层连续梁^[10]。

因此将采用纵、横向加劲肋的正交异性钢桥面板与沥青铺装结构的叠层结构简化为简单的叠层连续梁结构。实际的空间复杂结构难以进行数学求解, 只能借助于有限元等数值计算方法进行建模求解, 其缺点是必须针对具体结构尺寸建模, 实际结构的微小变化都会导致必须重新建模, 计算精度与建模采用的软件、建模人的思路、计算机硬件的限制等有关, 通用性差。简化为叠层连续梁模型后, 在铺装表面弯拉应变与铺装界面剪应力两个设计控制指标方面, 由于忽略了纵向的约束使计算结果偏于安全, 但受力特征没有改变, 更重要的是, 数学上的求解非常简单, 得到的计算公式具有通用性。对于匝道钢桥, 主要是针对大跨径钢桥面沥青铺装的这些计算分析, 由于钢桥面板的正交异性特征没有发生变化, 这些计算分析的结论仍可以采用, 但必须考虑复杂条件, 如大纵坡、小半径所带来的较大超高横坡等对计算的影响, 采用有针对性的修正系数是一种直观且简单的修正方法。

2.2 简化计算模型的确定

针对钢桥面铺装受力的主要特征是横向弯拉应变疲劳的特点, 而肋间距(U形肋的开口宽度也可认为是一种肋间距)与桥面板厚度是影响铺装受力状态的关键参数, 文献[10-11]提出将铺装受力模型简化为两跨连续叠层梁模型。

图1为采用南京长江二桥正交异性钢桥面沥青铺装计算参数^[12], 采用ANSYS有限元分析软件, 计算得到的沥青铺装弯拉应变分布图。采用图2模型计算得到的最大弯拉应变为466 $\mu\epsilon$, 文献[12]采用SuperSAP有限元计算软件计算得到的为456 $\mu\epsilon$, 本文图2中的计算结果为433 $\mu\epsilon$, 计算精度满足工程需要。

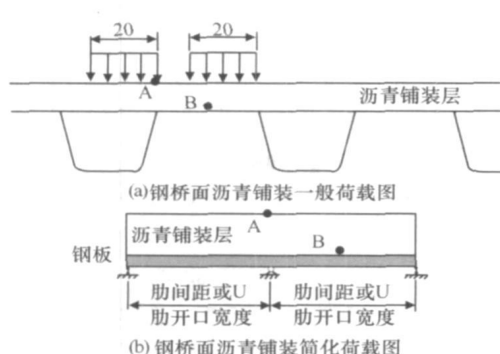


图1 钢桥面沥青铺装荷载布置及计算点

图示(单位: cm)

Fig 1 Loading arrangement and calculating points on asphalt pavement of steel bridge (unit: cm)

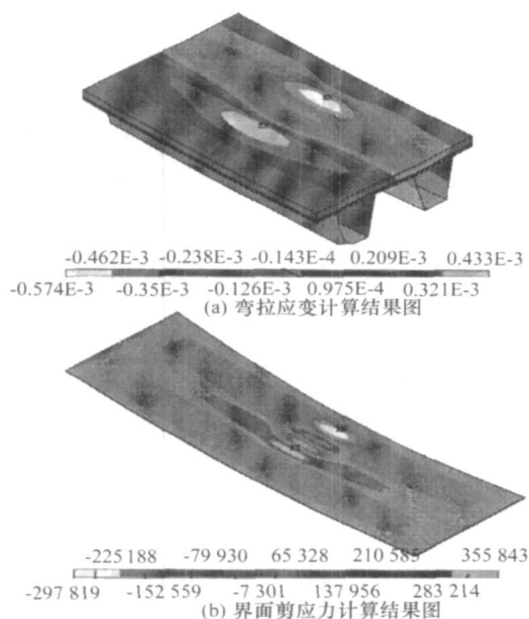


图2 钢桥面沥青铺装应变-应力计算结果图

Fig 2 Computation result of stress/strain in asphalt pavement on steel bridge deck

3 大纵坡条件下的计算修正

对于实际匝道钢桥面沥青铺装,考虑大纵坡条件的计算属于复杂的空间力学问题,即使采用有限元数值计算仍非常繁琐,并且需要根据纵坡的大小调整计算模型。前述分析已经将实际结构简化为叠层连续梁模型,但由于忽略了纵向的约束,直接在简化模型上施加水平荷载是不合理的,解决途径就是根据有限元计算结果,分析纵坡对两个铺装设计控制指标的影响规律,并且将纵坡的影响进一步的简化为纵向水平荷载的变化,从而达到根据纵坡值推算设计控制指标增幅的目的,这一增幅即为纵坡条件对铺装设计控制指

标的修正系数。

基本模型计算得到的是考虑冲击的竖向荷载作用下的铺装表面弯拉应变与界面剪应力,对于匝道钢桥一般具有大纵坡的线形特点,如本文实体工程匝道的纵坡达4%,需要考虑纵坡的影响。大纵坡条件下,车辆需要更大的动力保持车速,对于铺装表面的水平作用力加大。以《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)中规定的标准车为例^[13],车辆总重55 t,对于实体工程,克服纵坡需要 $55 \times 4\%$ 的动力,假定12 t的双轴为动力轮,则每轮需要提供 $55 \times 4\% \div 4$,即0.55 t的水平力,平均每轮增加水平力0.05 MPa,考虑1.3的冲击系数,实际计算采用0.06 MPa。一般认为,沥青路面在汽车正常行使状态的摩擦系数为0.3左右,正常刹车状态的摩擦系数为0.5,在紧急刹车的极限状态可以达到0.8,本文建议铺装表面疲劳验算时考虑0.3,强度验算时考虑0.8。综合坡度影响,对于实体工程计算采用 $0.7 \times 0.3 + 0.05 = 0.26 \text{ MPa}$ 。

图3与图4为仅考虑纵向水平力的计算结果,图3说明纵向水平力造成轮载前部受压,后部受拉,产生的纵向拉应变为66,但若考虑竖向荷载作用,铺装表面将产生纵桥向压应变,纵向水平力造成的铺装表面纵向拉应变将减小^[14]。图4则说明,纵向水平力导致横向拉应变12,且位于荷载中部,U肋顶部铺装表面的横向弯拉应变增加3%,铺装表面弯拉疲劳设计中可以偏安全的直接按照 $(1+i)$ 修正基本模型的计算结果。

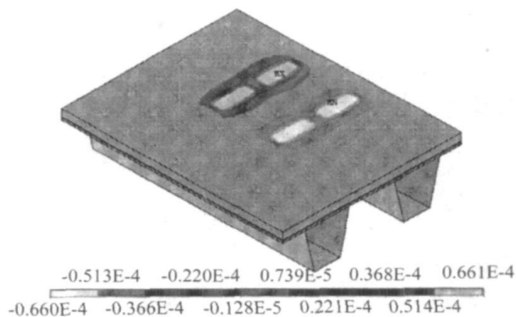


图3 纵坡4%铺装表面纵向拉应变计算结果

Fig 3 Computation result of longitudinal tensile strain in pavement (longitudinal gradient $i=4\%$)

图5的计算结果表明,4%纵坡度的存在产生了0.017 MPa的横向剪应力,与图2对比,界面横向剪应力增加5%,是纵坡值的1.25倍,铺装界面剪切疲劳设计中可以按照 $(1+1.25 \times i)$ 修正基本模型的计算结果,或者偏安全的采用 $(1+1.5 \times i)$ 修正基本模型的计算结果。图5表明,4%纵坡度的存在产生

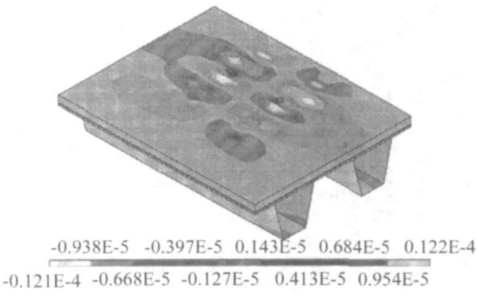


图 4 纵坡 4% 铺装表面横向拉应变计算结果
Fig 4 Computation result of transverse tensile strain
in pavement (longitudinal gradient $i=4\%$)

了 0.064 MPa 的纵向剪应力, 仅占竖向荷载作用下界面横向剪应力 0.355 843 MPa 的 18%, 而竖向荷载作用下界面纵向剪应力只有横向剪应力的 $1/3 \sim 1/2$ ^[15], 因此仍以界面横向剪应力为设计控制指标。

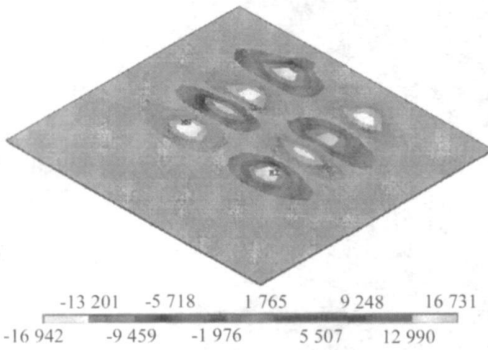


图 5 纵坡 4% 界面横向剪应力计算结果图
Fig 5 Computation result of transverse shear stress on
pavement interface (longitudinal gradient $i=4\%$)

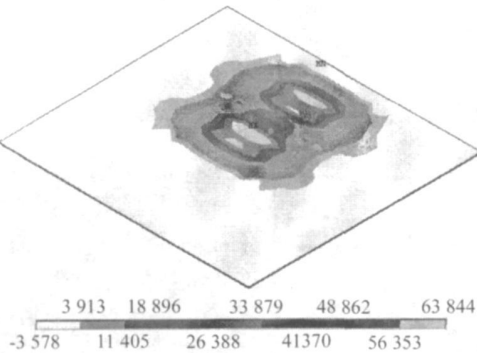


图 6 纵坡 4% 界面纵向剪应力计算结果图
Fig 6 Computation result of longitudinal shear stress on
pavement interface (longitudinal gradient $i=4\%$)

最终将纵坡对匝道钢桥面沥青铺装设计控制指标的影响简化为 2 个修正系数, i_z 为纵坡度; 铺装表面弯拉应变纵坡修正系数: $k_{\varepsilon zi}=1+i_z$; 铺装界面剪应力纵坡修正系数: $k_{\tau zi}=1+1.25i_z$ 。

4 小半径条件下的计算修正

与纵坡条件下修正系数的得到相类似, 将小半径条件简化为对超高横坡的影响, 超高横坡转化为铺装表面横向水平荷载, 然后利用有限元计算结果, 得到横坡变化与设计控制指标变化的关系, 最终得到不同平曲线半径匝道钢桥沥青铺装设计控制指标计算的修正系数。

匝道钢桥具有小半径的特点, 因此铺装横断面存在较大的超高横坡, 如本文实体工程匝道的曲线半径 60 m, 超高横坡达 6%, 对于低速行驶的载重汽车, 铺装表面产生较大的横向水平力。更重要的是, 横向水平力造成的铺装表面拉应变与竖向荷载作用下的弯拉应变具有叠加作用, 因此有必要对小半径大超高横坡条件下的铺装表面拉应变进行计算分析。

图 7 为仅考虑横向水平力的计算结果, 横向水平力造成轮载外侧受拉, 内侧受压, 产生的横向拉应变为 65, 且位于 U 肋顶部铺装表面, 是图 2 中竖向荷载下弯拉应变的 15%, 因此对于大的超高横坡应该考虑设计弯拉应变的横坡修正。建议超高横坡每增加 1%, 弯拉应变增加 $15\% \div 6 = 2.5\%$ 。同时考虑计算采用静载, 实际车辆具有一定的速度, 产生一定离心力, 且一般路拱横坡为 2%, 因此计算时从实际超高值中减去 2%。如本文实体工程计算中考虑的横坡修正系数 $= 1 + (6\% - 2\%) \div 1\% \times 2.5\% = 1.1$ 。

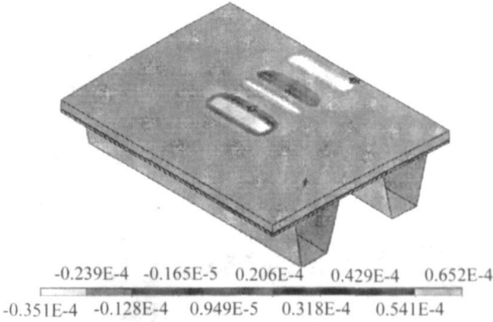


图 7 横坡 6% 铺装表面横向拉应变计算结果
Fig 7 Computation result of transverse tensile strain in
pavement surface (transverse gradient $i=4\%$)

对比图 8 和图 2 的计算结果, 考虑到计算模型的横坡方向具有可反向性, 6% 横坡的存在仅造成铺装界面横向剪应力增加了 16%, 建议超高横坡每增加 1%, 弯拉应变增加 $16\% \div 6 = 2.7\%$, 偏安全取 3%。计算时从实际超高值中减去一般路拱横坡 2%, 因此。如本文实体工程计算中考虑的横坡修正系数 $= 1 + (6\% - 2\%) \div 1\% \times 3\% = 1.12$ 。

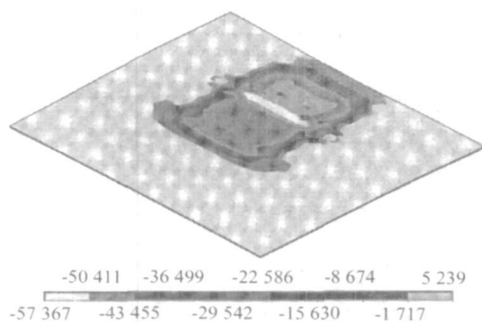


图8 横坡6%铺装表面横向剪应力计算结果

Fig 8 Computation result of transverse shear stress on pavement surface (transverse gradient $i=4\%$)

最终将纵坡对匝道钢桥面沥青铺装设计控制指标的影响简化为2个修正系数, i_h 为横坡度: 铺装表面弯拉应变横坡修正系数: $k_{eh} = 1 + (i_h - 2\%) \div 1\% \times 2.5\%$; 铺装界面剪应力横坡修正系数: $k_{zh} = 1 + (i_h - 2\%) \div 1\% \times 3\%$ 。

5 实体工程应用

5.1 实体工程简介

本文实体工程为广东某立交匝道钢结构桥钢桥面沥青铺装工程, 跨径 $35+43+35=113$ m, 桥梁位于半径为60 m的平面曲线上, 超高横坡6%, 纵坡4%, 桥头部分处于凹形竖曲线底部。所在地区气候属亚热带季风气候, 年平均气温 21.8°C , 冬季最冷月份为1月, 平均气温为 13°C , 极端最低气温在 0°C 以下。夏季最热月份为7月, 平均气温为 28.8°C , 极端最高气温 38.7°C 。年均降水量约1638.5 mm, 最大降水量可达2000 mm。雨季的开始日期在3月下旬, 结束期在9月底, 长达半年。雨季的降雨量占年降雨量的81%, 年蒸发量1400~1600 mm, 潮湿系数大于1。年内暴雨较集中在5~9月份, 平均每月约有一次暴雨发生。平均风速为1~2 m/s。冬夏的风向变化明显, 从春季至初秋盛行偏南风, 秋季至冬末盛行偏北和偏东风。项目建设地的大气pH值为4.37, 酸雨下降几率为83%, 故必须严格控制防水粘结层与防水抗滑层的原材料质量与施工质量。

5.2 设计计算

采用文献[10]中公式计算得到:

$$M = \int_a^{a+b} \frac{qx(L-x)(2L-x)}{2L^2} dx = 784.4 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$I = \frac{h^3}{12} + \frac{H^3}{12n} + \frac{1}{4} \cdot \frac{hH^2 \left(1 + \frac{h}{H}\right)^2}{1+n \frac{h}{H}} = 9.391 \times 10^{-7} \text{ m}^4,$$

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} = 0.003977,$$

$$\epsilon = \frac{H + \frac{h}{2}}{R} = 306 \times 10^{-6},$$

式中, a 为单轴双轮组的轮隙长度的一半, 一般取5 cm; b 为单轴双轮组的单论宽度, 一般取20 cm; H 为铺装厚度; h 为桥面板厚度; L 为肋间距; E 为钢材的设计弹性模量; I 为钢面板单位宽度的抗弯惯量; n 为钢材与沥青混合料的模量比。考虑4%纵坡、6%横坡, 铺装表面设计弯拉应变为:

$$\epsilon_0 = k_{\epsilon zi} k_{eh} \epsilon = 350 \mu\epsilon.$$

采用表1的参数, 利用ANSYS有限元计算得到铺装表面弯拉应变见图9(a), 发现简化方法计算结果较有限元计算结果大1.45%, 精度满足工程需要。

表1 设计计算参数表

Tab. 1 Computation parameters for design

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
U形肋宽度	300 mm	横隔板间距	3 m	钢板模量	210 GPa
U形肋厚度	8 mm	横隔板高度	0.5 m	钢板厚度	14 mm
U形肋间距	250 mm	铺装厚度	7 cm	防水粘结层泊松比	0.35
U形肋高度	280 mm	防水粘结层厚度	0.6 mm	钢板泊松比	0.2
U形肋底宽	170 mm	铺装层模量	1000 MPa	铺装层泊松比	0.35
横隔板厚度	100 mm	防水粘结层模量	1000 MPa		

采用文献[11]中公式计算得到:

$$a = \frac{nh_s^2 - h_a^2}{2(nh_s + h_a)} = 6.023 \text{ mm},$$

$$\tau_{xz} = \frac{qlh_s}{4I} (2a - h_s) = -0.273 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xz} = k_{\tau z} k_{\tau hi} \epsilon = 321 \mu\epsilon.$$

采用表1的参数, 利用ANSYS有限元计算得到铺装界面横向剪应力见图9(b), 发现简化方法计算结果较有限元计算结果小5%, 精度满足工程需要。

利用本文计算结果所设计的钢桥面沥青铺装已经无损使用近4年, 设计计算数据可靠, 方法简便。

6 结论

(1) 匝道钢桥面沥青铺装的受力状态较为复杂, 需要具体建模计算, 设计计算难度大。

(2) 采用叠层连续梁模型能够基本准确的描述匝道钢桥面沥青铺装的受力状态。

(3) 采用修正系数的办法能够大大简化铺装的设计计算工作, 且精度能够满足工程需要。

(4) 针对实体工程的设计计算表明, 采用简化的设计计算方法是可靠适用的。

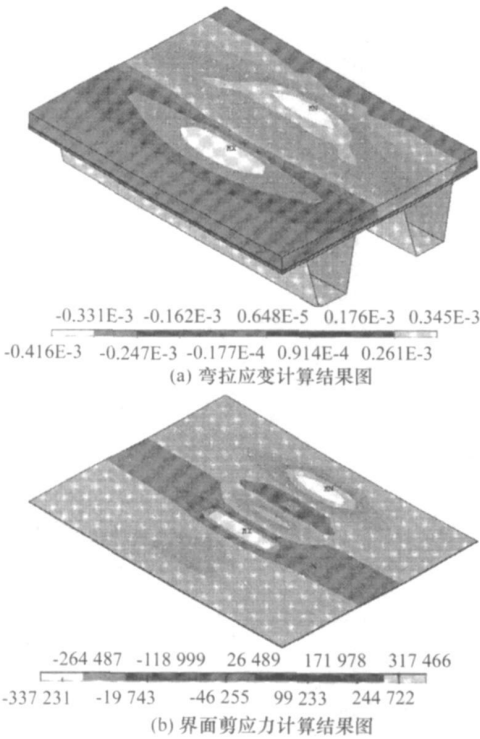


图 9 实桥沥青铺装应变/应力计算结果图

Fig 9 Computation result of stress/ strain in asphalt pavement on practical steel bridge deck

参考文献:

References:

[1] 赵锋军. 正交异性钢桥面沥青铺装体系受力与疲劳特性研究 [D] . 长沙: 长沙理工大学, 2003.
ZHAO Fengjun. The Study on Characters of Bearing and Fatigue of Asphalt Pavement on Orthotropic Steel Bridge Deck [D] . Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2003.

[2] 陈恺, 张宁, 黄卫. 城市快速路高架拥堵改善对策分析 [J] . 交通运输工程与信息学报, 2008, 6 (4): 51—56
CHEN Kai, ZHANG Ning, HUANG Wei. Countermeasures for Relieving Traffic Congestion on Urban Elevated Expressway [J] . Journal of Transportation Engineering and Information, 2008, 6 (4): 51—56

[3] 嵇春宝, 蒋琨, 柴干. 高速公路网的匝道协调控制及仿真研究 [J] . 系统仿真学报, 2009, 21 (4): 1206—1209.
JI Chunbao, JIANG Min, CHAI Gan. Coordinated Ramp Metering and Simulation Study on Freeway Network [J] . Journal of System Simulation, 2009, 21 (4): 1206—1209.

[4] 郝增恒, 张肖宁, 盛兴跃, 等. 高弹改性沥青在钢桥面铺装中的应用研究 [J] . 公路交通科技, 2009, 26

(4): 22—28
HAO Zengheng, ZHANG Xiaoning, SHENG Xingyue, et al. Application of Modified Asphalt with High Elasticity in Steel Deck Pavement [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (4): 22—28

[5] 曹海波, 钱振东, 李智. 环氧沥青混凝土在大跨径悬索钢桥面铺装中的应用 [J] . 现代交通技术, 2009, 6 (1): 11—14.
CAO Haibo, QIAN Zhendong, LI Zhi. Application of Epoxy Asphalt Concrete in Pavement of Long-span Suspension Bridge Steel Deck [J] . Modern Transportation Technology, 2009, 6 (1): 11—14

[6] 黄卫, 刘振清. 大跨径钢桥面铺装设计理论与方法 [J] . 土木工程学报, 2005, 38 (1): 51—59.
HUANG Wei, LIU Zhenqing. Research on the Theory and Method of Long-span Steel Bridges Deck Surfacing Design [J] . China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (1): 51—59

[7] 刘振清. 大跨径钢桥面铺装设计关键技术研究 [D] . 南京: 东南大学, 2004.
LIU Zhenqing. Research on Key Technology of Long-span Steel Bridges Deck Surfacing Design [D] . Nanjing: Southeast University, 2004.

[8] 徐勋倩. 大跨径钢桥面铺装结构精英蚂蚁寻优策略 [J] . 公路交通科技, 2009, 26 (1): 1—5.
XU Xunqian. Super Excellent Ant Colony Optimization Strategy for Long-span Steel Bridges Deck Pavement Design [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (1): 1—5.

[9] 杨军, 丛菱, 朱浩然, 等. 钢桥面沥青混合料铺装车辙有限元分析 [J] . 工程力学, 2009, 26 (5): 110—115.
YANG Jun, CONG Ling, ZHU Haoran, et al. Analysis on Rutting Potential of Asphalt Pavement on the Steel Deck by Finite Element Method [J] . Engineering Mechanics, 2009, 26 (5): 110—115

[10] 赵锋军, 易伟建, 李宇峙. 桥面沥青铺装设计新方法 [J] . 土木工程学报, 2006, 39 (10): 74—79.
ZHAO Fengjun, YI Weijian, LI Yuzhi. A New Method for Bridge Asphalt Pavement Design [J] . China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (10): 74—79.

[11] 赵锋军, 李宇峙, 易伟建. 桥面沥青铺装层间应力分析简化模型 [J] . 土木工程学报, 2007, 40 (6): 100—104
ZHAO Fengjun, LI Yuzhi, YI Weijian. A Simplified Model for Interlaminar Stress Analysis of Bridge Asphalt Pavement [J] . China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (6): 100—104.

[12] 钱振东, 黄卫, 茅荃, 等. 南京长江第二大桥钢桥面铺装层受力分析研究 [J] . 公路交通科技, 2001, 18 (6): 43—46

估计加固所需的预应力值。

参考文献:

References:

[1] 赵启林, 王景全. 碳纤维加固的反拱预应力技术及其提高钢结构承载能力的分析 [J] . 钢结构, 2002, 3 (17): 51—53.
ZHAO Qilin, WANG Jingquan. Analysis of the “Reverse-arch Prestressed Technique” and the Improved Bearing Capacity for Steel Structure Strengthened by Carbon-fiber [J] . Steel Structure, 2002, 3 (17): 51—53.

[2] 邓军, 黄培彦. 预应力 CFRP 板加固钢梁的承载力及预应力损失分析 [J] . 铁道建筑, 2007 (10): 4—7.
DENG Jun, HUANG Peigan. The Load-carrying Capacity of Steel Beam Strengthened by Prestressed CFRP Plates and Prestressing Loss of CFRP Plates [J] . Railway Engineering, 2007 (10): 4—7.

[3] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N. Innovative Prestressing with FRP Sheets. Mechanics of Short-term Behavior [J] . Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117 (7): 1653—1672.

[4] BASSETTI A. Application of Prestressed CFRP on Reinforcement of Fatigue Damage Steel Bridge [D] . Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, EPFL, 2001.

[5] BASSETTI A, LIECHTI P, NUSSBAUMER A. Fatigue Resis-

tance and Repairs of Bridge Riveted Members [J] . Fatigue Design and Reliability, 1999 (23): 207—218.

[6] COLOMBI P, BASSETTI A, NUSSBAUMER A. Analysis of Cracked Steel Members Reinforced by Pre-stress Composite Patch [J] . Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, 2003, 26: 59—66.

[7] COLOMBI P. Plasticity Induced Fatigue Crack Growth Retardation Model for Steel Elements Reinforced by Composite Patch [J] . Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2005, 43: 63—67.

[8] COLOMBI P, BASSETTI A, NUSSBAUMER B A. Delamination Effects on Cracked Steel Members Reinforced by Prestressed Composite Patch [J] . Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2003, 39 (1): 61—71.

[9] SURESH S. Fatigue of Materials [M] . London: Cambridge University Press, 1991.

[10] ELBER W. Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension [J] . Engineering Fracture Mechanics, 1970 (2): 37—45.

[11] SCHIJVE J. Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art [J] . International Journal of Fatigue, 2003, 25 (8): 679—702.

[12] TÖSTEN B, HANSEN C S, SCHMIDT J W. Strengthening of Old Metallic Structures in Fatigue with Prestressed and Non-prestressed CFRP Laminates [J] . Construction and Building Materials, 2009, 23 (4): 1—13.

(上接第 49 页)

QIAN Zhendong, HUANG Wei, MAO Quan, et al. Mechanical Analysis of Nanjing Second Yangtze River Bridge Deck Pavement [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18 (6): 43—46.

[13] 中华人民共和国交通部. JTG B01-2003 公路工程技术标准 [S] . 北京: 人民交通出版社, 2003.
P. R. China Ministry of Communications. JTG B01-2003 Technical Standard of Highway Engineering [S] . Beijing: China Communications Press, 2003.

[14] 谭万忠. 曲线梁桥平面变形特性和支承布置的研究 [D] . 北京: 铁道科学院研究院, 2005.
TAN Wanzhong. Study on Plane Deformation in Curved Girder Bridge and Positioning of Its Bearing System [D] . Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2005.

[15] 李雪莲. 正交异性钢桥面复合铺装结构研究 [D] . 长沙: 长沙理工大学, 2008.
LI Xuelian. The Study on Characters of Bearing and Fatigue of the Asphalt Pavement on Orthotropic Steel Bridge Deck [D] . Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.