

基于抗剪性能的混凝土桥沥青铺装设计方法

刘黎萍¹, 胡晓¹, 孙立军¹, 曹德洪²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 浙江省浙北高速公路管理有限公司, 浙江 杭州 313000)

摘要: 采用三维有限元方法, 对不同混凝土桥型桥面铺装在实际荷载作用下的受力状态进行系统的力学分析, 确定不同桥型的临界荷位。从抗剪角度提出进行铺装结构设计时可采用的力学控制指标、桥面铺装层混合料抗剪参数标准以及桥面铺装设计流程, 并给出桥面铺装结构组合设计原则或建议。基于此, 从铺装层结构设计和材料设计角度提出了七种桥面铺装层结构或材料组合方案, 并在申嘉湖高速公路四个混凝土桥梁上铺筑试验段。从目前观测结果看, 所有方案均表现出良好的性能。

关键词: 混凝土桥梁; 沥青铺装层; 结构设计; 临界荷位; 抗剪强度标准

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Design Approach of Shear Properties-based Asphalt Pavement Structure of Concrete Bridges

LIU Liping¹, HU Xiao¹, SUN Lijun¹, CAO Dehong²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zhejiang Province North of Highway Management Co. Ltd., Hangzhou 313000, China)

Abstract: Stress states of deck pavements of several types of concrete bridges under the action of observed load were analyzed systematically with three-dimensional finite element method. Critical load positions of different types of bridges were identified. Then, the design control indexes for paving structure design, shear strength standards for mixture at deck pavement layers and flow chart for deck pavement design were proposed by taking shear properties into consideration, and design principle or recommendation on deck pavement structure combination were provided. Seven options for deck pavement structure or materials combination were proposed from the prospects of structural design and material design, and test sections were conducted on four concrete bridges of Shanghai—Jiading—Huzhou Expressway. Current observation results show that all options perform well.

Key words: concrete bridge; asphalt pavement layer; structural design; critical load position; shear strength standard

据不完全统计, 高速公路上桥面铺装层的病害损坏要比普通路面严重得多。这是由于桥面沥青混凝土铺装位于桥面板上, 其受力、变形及使用环境远较普通路面复杂, 因而对其强度、柔韧性、高温稳定性及耐久性等均有较高要求。目前, 我国现行沥青路面设计规范中, 对沥青铺装结构组合的设计仅从所用材料、厚度及施工方法等方面作了指导性的说明, 没有具体的设计理论与方法。实际工程中, 一般都是简单地取沥青路面结构的上两层作为铺装结构层, 在其强度、变形或耐久性等不能满足桥面铺装结构受力要求时即导致桥面铺装层的损坏。随着交通量和重型车辆的增加, 这种损坏现象变得更加突出, 尤其在高温多雨地区, 车辙损坏较为严重。以上这些都大大影响了桥面的使用性能和服务寿命。因此, 针对混凝土桥梁沥青铺装层结构受力特点, 有必要开展基于抗剪特性的混凝土桥梁沥青铺装结构设计方法研究。本文主要采用三维有限元方法对 T 型梁桥、小箱梁桥和箱型梁桥桥面铺装在实际荷载作用下的受力状态进行分析, 确定不同桥型的临界荷位, 提出进行铺装结构设计时拟采用的力学控制指标、桥面铺装层混合料抗剪参数标准以及桥面铺装设计流程, 并给出桥面铺装结构组合设计原则或建议, 为混凝土桥梁沥青桥面铺装层设计提供参考。

1 基于抗剪性能的混凝土桥梁沥青铺装结构设计指标的确定

1.1 桥面铺装力学分析模型及参数^[1-2]

不同桥梁形式的桥面铺装在实际行车荷载、梁体变形和环境因素的复合作用下各有特点, 本文主要运

收稿日期: 2011-11-28

基金项目: 浙江省交通厅科技项目(2007H01)

第一作者: 刘黎萍(1968—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为沥青路面结构与材料。E-mail: llp@tongji.edu.cn

通讯作者: 孙立军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与交通工程。E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

用三维有限元软件对 T 型梁桥、小箱梁桥和箱型梁桥三种桥型在不同情况下的应力应变状态进行分析. 分析时建立的有限元模型如图 1 所示, 图 2 为实际桥梁的简化模型. 有限元分析采用八结点等参单元, 假设: 沥青铺装层与混凝土桥面板均为均匀、连续、各向同性材料, 其工作处于弹性阶段, 按线弹性理论进行分析; 忽略桥面防水黏结层的厚度. 对于 T 型梁, 边界条件假设为: 两片梁的四个支点全部施加竖向约束, 再在其中一对处于对角线上的支点施加横向约束, 然后在其中之一施加行车方向的约束; 各结构层之间完全连续. 对于小箱梁, 边界条件假设为: 支座端梁体底端面所有节点全部施加竖向约束和垂直于行车方向约束; 跨中横断面和位于桥梁中心线的纵断面分别施加对称约束. 对于箱型梁, 边界条件假设为: 横隔板下方腹板外侧所有节点全部施加竖向约束和垂直于行车方向约束; 跨中横断面和位于桥梁中心线的纵断面分别施加对称约束; 各结构层之间完全连续. 划分网格时把荷载作用处及其附近做适当处理, 以满足非均布荷载施加的要求; 对箱梁各个拐角处网格进行加密, 避免出现畸形单元, 以求比较精确的计算结果. 由于梁体变形会对沥青层内应力分布产生影响, 建模时也考虑了梁体及铺装层自重的影响.

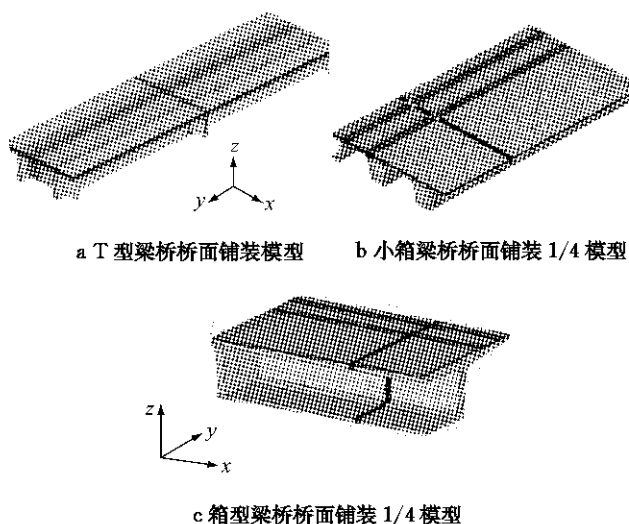


图 1 桥面铺装有限元模型

Fig.1 Definite element model of deck pavement

分析时采用的实测荷载分布如图 3 所示^[3], 每个小分块的接地压力均不同, 具体数据略. 各种工况荷载的实测接地压力可参阅文献[3]. 这里主要选择标准荷载 (600 kPa/25.0 kN) 及超载超压荷载 (1 050 kPa/62.5 kN) 用于计算桥面铺装临界荷位.

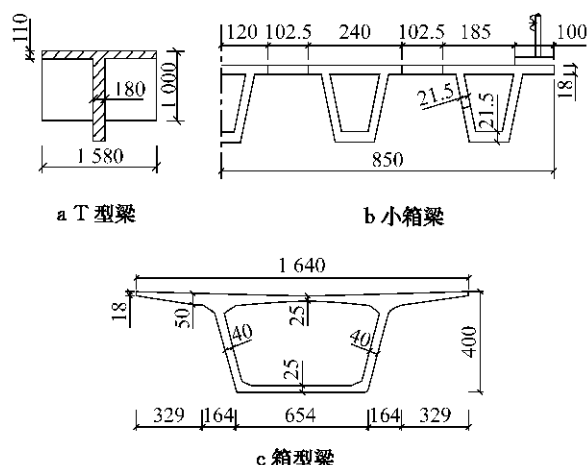


图 2 实际桥梁简化模型示意图 (单位: cm)

Fig.2 Schematic diagram for simplified model of actual bridge (unit: cm)

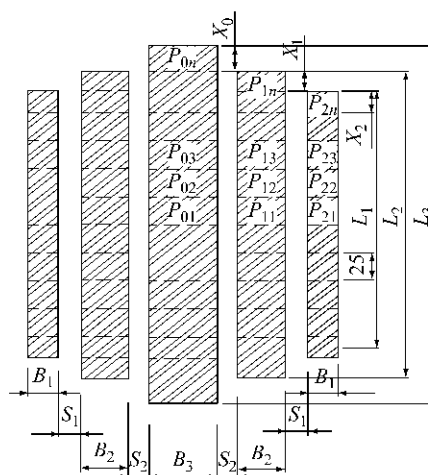


图 3 计算用的 11.00 走向花纹轮胎接地面简化图

Fig.3 Simplified diagram for ground contacting surface of tyres with strike pattern 11.00

沥青铺装层结构采用常用的双层铺装体系, 各结构层之间完全连续. 上面层厚 4 cm, 下面层厚 6 cm. 沥青铺装层下设置 6 cm 混凝土调平层. 材料参数如表 1.

表 1 铺装层结构及材料参数

Tab.1 Structure and material parameters for pavement layers

铺装层结构	厚度/cm	模量/MPa	泊松比
上铺装层	4	1 400	0.35
下铺装层	6	1 200	0.35
桥面系		36 000	0.18

1.2 不同混凝土桥型临界荷位的确定

根据以上力学模型及结构参数, 分析了不同荷载作用位置时, 桥面铺装层内的应力应变响应, 考虑的力学指标主要有: 沥青层与混凝土调平层之间层间最大剪应力、沥青层内最大剪应力、沥青上面层和

下面层的最大拉应变以及最大拉应力。对于 T 型梁桥,在横桥向分别考虑两种工况:工况 1,轮载对称分布于 T 型梁接缝处;工况 2,轮载作用于一侧 T 型梁的翼板边缘,见图 4。对于每种横向工况,沿桥纵向在支座附近横隔板上方(荷位 a)、1/4 跨(荷位 b)、1/3 跨(荷位 c)及跨中(荷位 d)布置四种荷载位置,见图 5。

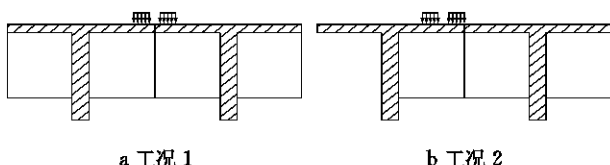


图 4 T 型梁桥荷位布置横断面

Fig. 4 Cross section for load position layout of T beam bridges

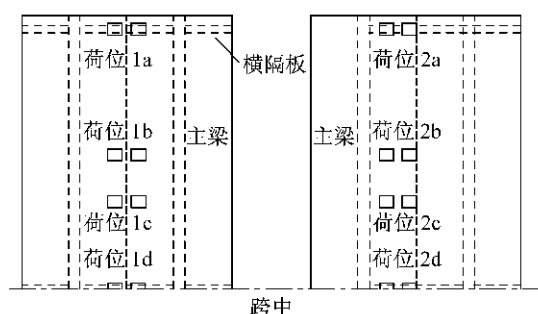


图 5 T 型梁桥荷位布置平面图

Fig. 5 Plan for load position layout of T beam bridges

分析结果表明,当荷载位于支座端或跨中横隔板上方时,桥面铺装层拉应力、拉应变和最大剪应力较其他荷位大,而层间剪应力较其他荷位小;结合两种横向工况对比分析,认为位于横隔板上方接缝一侧的荷位为控制拉应力、拉应变和最大剪应力的临界荷位,而 1/3 跨上方对称布置于接缝处的荷位为控制层间剪应力的临界荷位。

对于小箱梁桥,选取一个单箱为研究对象,横向布置了六个荷位,分别在内侧和外侧车道的左、中、右侧;在纵向上,分别在跨中、1/3 跨、1/4 跨和支座端横隔板上方布置四个荷位,见图 6。

对纵向荷位的分析表明,当荷载作用于荷位 b、c 和 d 时,铺装层应力、应变变化较小,其应力响应几乎是相同的;当荷载位于横隔板上方时,桥面铺装受力状态完全不同,拉应力、拉应变和最大剪应力较其他荷位要大,而层间剪应力稍有减小。对横向荷位的影响分析表明,随着荷载位置由内而外的横向变化,铺装层的应力响应并没有表现出明显的规律。这主要是由于小箱梁桥横向刚度差异较小,荷位变化引起的桥面挠度变化较小,铺装层内的应力状态没有明显差异,因此也就没有明确的最不利荷位。

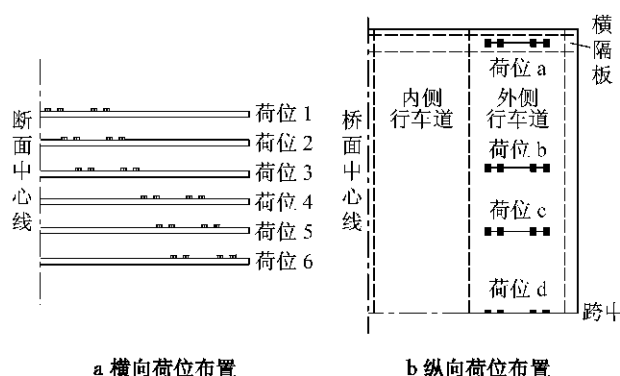


图 6 小箱梁桥荷位布置平面图

Fig. 6 Plan for load position layout of small box girder bridges

对于箱型梁桥,荷位布置采取与小箱梁桥相同的形式,见图 7。分析表明,荷位的纵向变化对铺装层应力状态的影响与小箱梁桥相同,而横向荷位变化的影响与小箱梁桥完全不同,见图 8。

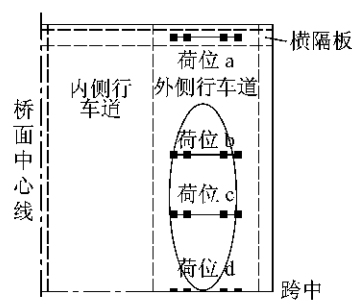


图 7 箱型梁桥纵向荷位布置

Fig. 7 Longitudinal load position layout of box girder bridges

由图 8 可以看出,荷载位于内侧车道时,应力状态变化不明显,而当荷载向外侧荷位移动时,剪应力迅速增大,其他应力指标也表现出了相同的规律。这主要是由于荷载移动到外侧车道时,由于翼板挠度的影响,导致了桥面铺装层内的附加应力。荷载作用于横隔板上方最外侧荷位时,翼板挠度最大,铺装层的应力响应最为不利。所以,荷位 L_{6a} 为箱型梁桥的临界荷位。

1.3 基于抗剪性能的铺装层设计指标及桥面铺装结构组合的建议

针对最不利荷载位置,分析了铺装层结构参数(不同铺装层厚度和模量)、荷载(考虑水平力作用及四种工况:600 kPa/25.0 kN, 1 050 kPa/19.0 kN, 1 050 kPa/25.0 kN 和 1 050 kPa/62.5 kN)、环境(主要是高温的影响)、层间接触条件(连续和光滑两种)、桥梁跨径(T 型梁桥考虑 12 m, 18 m 和 24 m 三个跨径,箱型梁桥考虑 20 m, 30 m 和 40 m

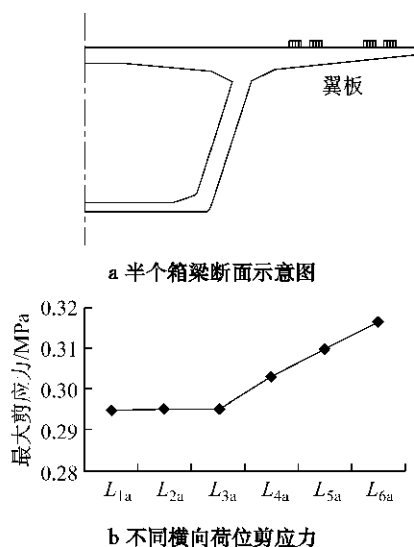


图8 箱型梁桥横向最不利荷位示意图

Fig.8 Schematic diagram for transverse worst load position of box girder bridges

三个跨径)等因素的影响.限于篇幅,分析过程和主要数据略,这里仅给出主要结论:① 增加沥青层厚度虽然能减小沥青层与桥面之间的层间剪应力,但是铺装表面拉应力、沥青层内拉应变和最大剪应力随铺装层厚度的增大而增大.所以,如果能有效地处理沥青层与桥面之间的黏结性能,满足最小摊铺厚度的薄层铺装有其独特的优势.② 当两层模量接近时,铺装层的应力分布较为有利,选取模量较为接近的沥青混合料双层铺装或高质量的单层摊铺体系较为合理.③ 与普通路面结构相比,桥面铺装层内的最大剪应力受荷载形式的影响更为突出,超载超压对桥面铺装更为不利.④ 高温时,下铺装层最大剪应力普遍比常温时高,应充分重视下铺装层混合料的抗剪强度.⑤ 若层间失去黏结处于滑动状态将导致铺装层内发生更为不利的应力、应变重分布,所以应特别重视层间黏结.⑥ 桥梁跨径的影响主要体现在荷载引起的桥梁挠度的差异上,T型梁桥受跨径的影响较大,而箱梁桥较小.这些结论也可作为桥面铺装结构组合设计原则,供桥面铺装设计时参考.同时,通过力学分析认为,基于抗剪性能的桥面铺装结构在设计时可采纳铺装层内的最大剪应力和铺装层与调平层之间的层间最大剪应力作为力学控制指标.

2 桥面铺装层剪切设计标准的建立

有了设计指标,还需要建立设计标准,才能达到控制铺装层损坏的目的.已有研究表明,车辙除了和

荷载作用次数、温度、车速有关外,还和铺装结构剪应力和混合料抗剪强度有关^[4-5].因此,可以通过建立车辙与这些关键因素的关系方程来提出铺装结构设计时需满足的抗剪参数要求.

课题组对浙江杭宁高速、杭金衢高速桥面铺装的损坏状况、交通状况和原设计等情况进行了调研,利用现场车辙调查数据、交通量数据、混合料抗剪强度等数据,借助于同济大学先前建立的室内车辙预估模型^[4-5],通过修正得到了适合于浙江地区的桥面铺装层车辙预估模型

$$D_R = 0.2846(1 + L_p) \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n 10^{-5.881} T_i^{0.512} \left(\frac{0.58N}{V} \right)^{0.743} \left(\frac{\tau_i}{S_r} \right)^{0.472} \quad (1)$$

式中: D_R 为桥面铺装层总变形即车辙深度,mm; L_p 为隆起系数; T_i 为铺装层路面各亚层车辙等效温度, $^{\circ}\text{C}$; τ_i 为铺装层在行车荷载作用下各亚层产生的最大剪应力,MPa; S_r 为铺装层各亚层材料抗剪强度,MPa,用单轴贯入试验测试^[6]; N 为标准轴载累计作用次数; V 为行车速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.其中,剪应力与抗剪强度的比值可以定义为抗剪强度结构系数,那么,根据车辙允许深度(根据我国的情况可取10 mm,15 mm两个标准)按式(1)就可得到要求的抗剪强度结构系数.对于申嘉湖高速公路桥面铺装,两种允许车辙深度对应的桥面铺装结构的抗剪强度结构系数分别为3.13和2.67,进而通过分析,可得到申嘉湖高速公路桥面铺装层混合料抗剪强度控制标准,见表2.

表2 桥面铺装层沥青混合料抗剪强度标准(60 $^{\circ}\text{C}$)Tab.2 Shear strength standard for asphalt mixture on deck pavement layers (60 $^{\circ}\text{C}$)

允许车辙深度/mm	上铺装层抗剪强度/MPa	下铺装层抗剪强度/MPa
10	1.17	0.84
15	1.00	0.72

桥面铺装设计时,要求结构层在车轮垂直荷载和水平荷载共同作用下,结构层内的最大剪应力 τ_{\max} 不超过结构的允许剪应力 τ_R ,即满足下式:

$$\tau_{\max} \leq \tau_R = \frac{S_r}{k} \quad (2)$$

式中: k 为抗剪强度结构系数.由此可见,剪应力的允许值和混合料的抗剪强度有关,这也充分体现了铺装结构设计材料与材料设计相统一的设计理念.

另一方面,对于层间剪应力

$$\tau_{\text{lay}} \leq \frac{\tau_u}{k_v} \quad (3)$$

式中: τ_{lays} 为铺装层与调平层之间的理论层间剪应力,MPa; τ_u 为桥面铺装层间极限剪切强度,MPa,可通过直剪试验得到; k_v 为铺装层间结构强度系数,可参考《城市道路设计规范》(CJJ 37—90)^[7]中柔性路面设计的方法确定。

式(2)和(3)及表2即为本文提出的抗剪参数标准。

3 基于抗剪要求的混凝土桥面沥青铺装设计流程

综合上述研究成果,本文给出的基于抗剪要求的桥面铺装设计流程(含结构设计与材料设计)如图9所示。

实际应用时,首先根据工程所在地的路面结构、桥梁形式、交通、环境和筑路材料等情况,初拟桥面铺装结构组合及材料设计,确定其厚度和模量等基本参数;通过三维有限元方法,计算得到不考虑水平力时沥青层内的最大剪应力和层间剪应力;根据桥梁的线形和设计车速,计算出水平力影响系数,由此可得到考虑水平力系数时的最大剪应力和层间剪应力理论值 τ_e 和 τ_{lays} 。同时,参考《城市道路设计规范》^[7](CJJ 37—90)中柔性路面设计的方法,确定沥青混凝土层间结构强度系数 k_v 。根据初拟的桥面黏结防水层材料进行剪切试验,测定桥面铺装层间极限剪切强度 τ_u ,由 $\tau_r = \tau_u / k_v$ 确定层间剪应力允许值 τ_r 。将铺装层剪应力允许值 τ_r 和层间剪应力允许值 τ_r 与最大剪应力和层间剪应力理论值 τ_e 和 τ_{lays} 分别进行比较。如满足要求,则输出设计结果;如

不满足要求,则改变铺装层结构或材料设计,直至力学验算通过为止。

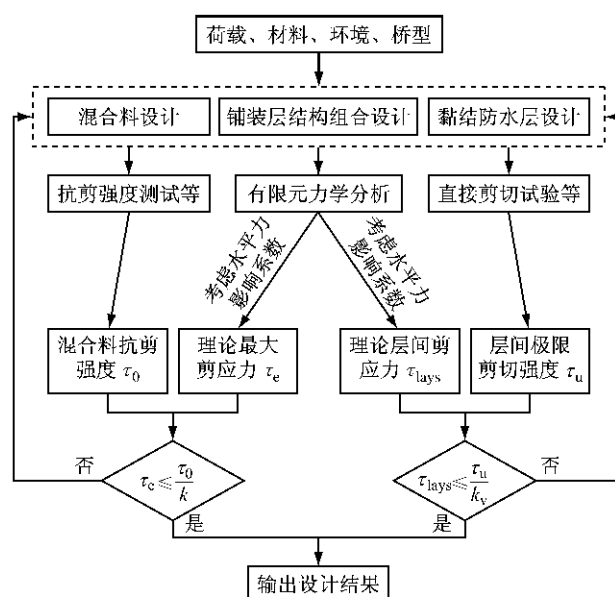


图9 桥面铺装设计流程

Fig.9 Flow chart for deck pavement design

4 桥面铺装试验路工程及效果评估

根据前述桥面铺装有限元力学分析结果并参考国内外混凝土桥面铺装的经验,从铺装层结构设计和材料设计角度提出了七种桥面铺装层结构组合方案用于申嘉湖高速公路四个混凝土桥梁的沥青铺装试验段工程(左右幅方案不同)。限于篇幅,这里仅给出铺装层结构方案,见表3。相关的力学分析、铺装层材料设计过程略^[8]。

表3 试验路桥面铺装层方案

Tab.3 Options for deck pavement layer on test sections

桥名及桩号	铺装层	左幅	右幅
芦墟塘大桥 (K14+110~K14+730)	上铺装层 下铺装层	4 cm BAC-13C(25%湖 沥青+SBS改性沥青) 6 cm SUP20	4 cm BAC-13C(0.30%聚酯 纤维+SBS改性沥青) 6 cm SUP20
乌镇南高架桥 (K56+349~K57+729)	上铺装层 下铺装层	5 cm SMA13 5 cm SMA13	4 cm SMA13 3 cm SMA10
练市高架桥(K64+423~K64+893), (K64+893~K65+343)	上铺装层 下铺装层	4 cm SUP13 6 cm SUP20	4 cm SMA13 6 cm SUP20
104国道跨线桥 (K99+241~K99+901)	上铺装层 下铺装层	4 cm SMA13 6 cm SMA20	4 cm BAC-13C(0.25%聚酯 纤维+SBS改性沥青) 6 cm SUP20

注:1. 练市高架桥仅在左幅铺了两个方案,该桩号范围内的方案在右幅栏;2. 104国道跨线桥左幅为上坡段,右幅为下坡段,该段与芦墟塘大桥上铺装层加聚酯纤维方案相同;3. 原主线桥梁铺装方案为4 cm AC-13C(SBS改性沥青)+6 cm SUP20(SBS改性沥青);4. 除有说明外,铺装层均采用SBS改性沥青。

试验段完工后,对平整度、压实度、构造深度(仅上层)、摩擦系数(仅上层)和渗水系数等进行了检

测,各项指标均满足规范要求。另外,对室内成型和现场取芯的混合料抗剪强度采用单轴贯入法进行了

测试.表4提供了芦墟塘大桥上铺装层混合料抗剪强度的测试结果(平行试件五个),表5为芦墟塘大

桥上铺装层混合料抗剪强度变异性分析,其他桥梁的测试结果略.

表4 芦墟塘大桥上铺装层混合料抗剪强度测试结果

Tab.4 Shear strength test result of mixture on upper pavement layer of Luxutang Bridge

混合料类型	室内成型		现场取芯		抗剪强度标准
	空隙率/%	抗剪强度/MPa	空隙率/%	抗剪强度/MPa	
AC-13C(0.30%聚酯纤维+SBS改性沥青)	4.08	1.39	4.20	1.02	$\geq 1.17(D_R=10\text{ mm})$
AC-13C(25%湖沥青+75%SBS改性沥青)	4.02	1.60	4.20	1.34	$\geq 1.00(D_R=15\text{ mm})$

表5 芦墟塘大桥上铺装层混合料抗剪强度变异系数分析

Tab.5 Shear strength variability of mixture on upper pavement layer of Luxutang Bridge

混合料类型	室内成型		现场取芯		%
	空隙率变异系数	抗剪强度变异系数	空隙率变异系数	抗剪强度变异系数	
AC-13C(0.30%聚酯纤维+SBS改性沥青)	1.40	4.50	8.50	11.40	
AC-13C(25%湖沥青+75%SBS改性沥青)	1.20	3.75	7.90	12.60	

由表4可见,加湖沥青的AC-13C混合料抗剪强度高于加聚酯纤维的抗剪强度,且室内成型试件和现场取芯试件表现出了相同的规律.由表中数据可见,空隙率对抗剪强度的影响还是相当显著的.

申嘉湖高速公路于2007年11月竣工.课题组曾对通车一年后的桥面铺装状况进行了实地调查,总体状况很好,没有可见损坏.目前已通车四年,总体状况仍然很好.当然,作为耐久性桥面铺装,其长期性能还有待进一步观测.

5 结语

本文对基于抗剪性能的混凝土桥梁沥青桥面铺装结构设计方法进行了研究.首先采用三维有限元方法对不同混凝土桥型桥面铺装在实际荷载作用下的受力状态进行系统的力学分析,确定不同桥型的临界荷位;在此基础上,系统分析不同桥型结构在不同荷载、温度、铺装结构参数等条件下的受力状况,提出进行铺装结构抗剪设计时可采用的力学控制指标,并给出桥面铺装结构组合设计原则或建议.接着,利用申嘉湖高速公路桥面铺装现场车辙调查数据修正了先前同济大学建立的室内车辙预估模型,提出了桥面铺装抗剪参数标准以及桥面铺装设计流程,形成了以抗剪参数为主要设计指标的混凝土桥面铺装结构组合设计方法.最后,从铺装层结构设计和材料设计角度提出了七种桥面铺装层结构组合方案,并在申嘉湖高速公路四个混凝土桥梁上铺筑了试验段.初步观测结果表明,所有方案均表现了良好的性能.但作为耐久性桥面铺装,其长期性能还有待进一步观测.

参考文献:

- [1] 胡晓,曹德洪,崔晨,等. T型混凝土梁桥面铺装的有限元分析[J]. 公路, 2010(9): 41.
HU Xiao, CAO Dehong, CUI Chen. Definite element analysis on deck pavement with T-type concrete beam [J]. Highway, 2010(9): 41.
- [2] 李雪平,胡晓,曹德洪,等. 混凝土箱型梁桥桥面铺装最不利荷位分析[J]. 公路, 2010(9): 36.
LI Xueping, HU Xiao, CAO Dehong, et al. Analysis on worst load position in deck pavement of concrete bridges with box girders [J]. Highway, 2010(9): 36.
- [3] 胡小弟,孙立军. 重型货车轮胎接地压力分布实测[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(11): 1443.
HU Xiaodi, SUN Lijun. Measuring tyre contact pressure distribution of heavy trucks [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(11): 1443.
- [4] 苏凯,王春晖,周刚,等. 基于加速加载试验的沥青路面车辙预估研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 493.
SU Kai, WANG Chunhui, ZHOU Gang, et al. Research on accelerated loading test based asphalt pavement rut prediction [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 493.
- [5] 苏凯. 沥青路面车辙产生机理及预估方法研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2007.
SU Kai. Research on formation mechanism and prediction method of asphalt pavement ruts [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2007.
- [6] 毕玉峰,孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(8): 1036.
BI Yufeng, SUN Lijun. Research on test method of asphalt mixture's shearing properties [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(8): 1036.
- [7] 中华人民共和国建设部. 城市道路设计规范(CJJ 37—90) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
The Ministry of Construction of P R China. CJJ 37—90 Code for design of urban roads [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991.
- [8] 刘黎萍,彭一川,邵静. 混凝土桥面铺装黏结防水层材料关键性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 48.
LIU Liping, PENG Yichuan, SHAO Jing. Research on key properties of bonding and water-proofing material in concrete deck pavement [J]. Journal of Building Material, 2010, 13(1): 48.