

水泥混凝土桥面铺装与一般路面结构力学机理对比分析

张仲勇 金晓东

(浙江交投高速公路建设管理有限公司 杭州 310020)

[摘要] 在结构特性上,桥面铺装结构远比一般的路面结构复杂。桥面板与沥青铺装层间的模量相差悬殊,桥面混凝土结构挠度大,桥面沥青铺装层在车辆荷载作用下的受力状况与一般路面不同;从桥面的温度差异来看,桥面环境比路面环境也更为严苛;因此,桥面铺装层在重载和制动力的双重作用下,沥青铺装层与桥面之间承受较大剪应力和剪应变。本文将总结以往桥面铺装结构力学分析研究成果,提出桥面铺装结构力学指标,为浙江省山区高速公路桥面沥青铺装结构设计提供理论依据。

[关键词] 成果集成;有限元模型;重载;力学指标

1 水泥混凝土桥面力学分析研究成果集成及存在问题

1.1 主要研究成果集成

1.1.1 桥面铺装结构设计指标

相关研究成果中,《长大桥沥青混凝土桥面铺装结构》提出以最不利荷位处的层内横向最大拉应力作为主要设计指标,来控制铺装层开裂破坏;以层间横向最大剪应力作为铺装粘结层设计的主要指标,来控制铺装层脱落等破坏形式;以层内最大剪切应力作为铺装层的主要设计指标,来控制铺装层波浪、拥包等破坏形式。《五河口大桥桥面沥青混凝土铺装》提出刹车过程引起的水平荷载对横向拉应力、竖向剪应力等影响不大,但对铺装层内,尤其是面层表面区域的水平剪应力影响相当大,所以提高面层及其层间接触面的抗剪强度,可减少或防止推移、拥包等病害的出现。

1.1.2 力学指标的量化

《水泥混凝土桥面防水粘结体系的试验研究》提出标准轴载刹车时防水粘结层剪切应力为0.3MPa~0.4MPa,超载刹车同时作用时,剪切应力可达0.5MPa~0.6MPa;铺装体系层间竖向拉应力较小,各种工况条件下,拉应力都不

大于0.05MPa。《水泥混凝土桥梁双层式 SMA 桥面铺装体系的研究》提出了桥面防水层的20℃剪切强度按0.4MPa、粘结强度按0.2MPa进行室内材料选择;《水泥混凝土桥梁沥青混凝土桥面铺装通病防治技术研究》认为超载的影响更大,超载50%时刹车,剪应力已经达到0.5MPa。

1.1.3 温度场对桥面铺装力学影响

从桥面温度场研究上,《五河口大桥桥面沥青混凝土铺装》提出与下部水泥混凝土箱体及桥面板相比,桥面沥青混凝土层的温度日变化比较大,尤其是沥青混凝土的表面温度,1月日变化达13℃(由-8℃到5℃左右),7月达30℃(由28℃到58℃左右);《水泥混凝土桥梁沥青混凝土桥面铺装通病防治技术研究》提出无论在夏季还是冬季,桥面铺装内部的温度梯度引起的铺装层底部剪应力均会达到0.10MPa左右,在车辆荷载综合作用下,防水粘结层易于出现剪切破坏,因此抗剪强度是防水粘结层选择的重要指标。

1.1.4 桥梁结构对桥面铺装力学影响

《长大桥沥青混凝土桥面铺装结构》研究中,几种常见桥型的有限元计算模型如图1.1~

收稿日期:2021-07-01

作者简介:张仲勇(1969-),男,正高级工程师,主要从事高速公路建设、养护管理工作。

图 1.4 所示。

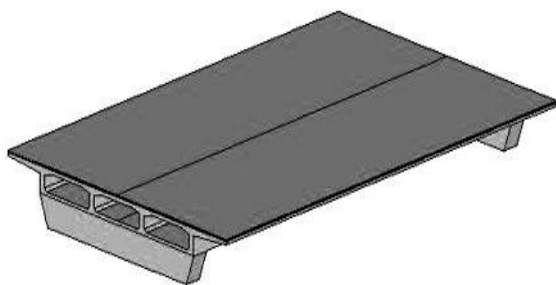


图 1.1 连续箱梁型桥面系

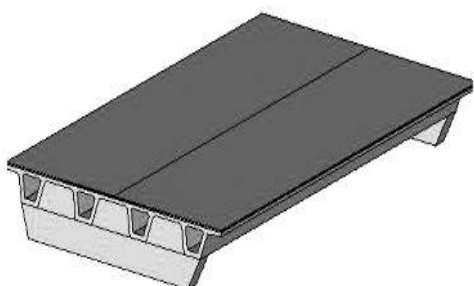


图 1.2 连续箱梁型桥面系

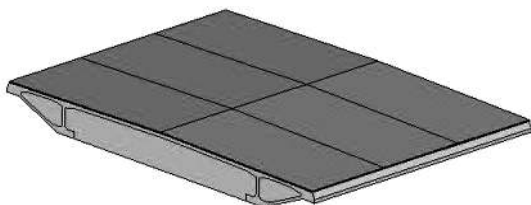


图 1.3 双边三角箱型桥面系

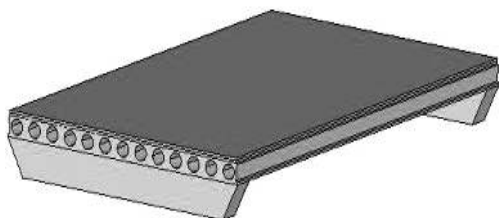


图 1.4 空心板梁型桥面系

利用软件 ABAQUS 分别计算分析铺装上、下层内的最大拉应力 $\sigma_{x\max}$ 、桥面铺装体系层间的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 。通过力学计算，各种桥型桥面铺装层的表面最大拉应力和最大剪应力的计算结果如表 1.1 所示。

表 1.1 各种桥型桥面铺装层表面最大拉应力
和最大剪应力的计算结果

桥 型	两横隔板（梁） 间距（m）	铺装层表面 最大拉应力 （MPa）	铺装层内 最大剪应力 （MPa）
图 1.1	25	0.124	0.417
图 1.2	30	0.140	0.425
图 1.3	7.5	0.149	0.448
图 1.4	16	0.117	0.403
	20	0.118	0.401

从计算结果可见，各桥型的剪切应力相差不大，拉应力稍有差别。由图 1.1-图 1.4 桥型的计算可以看出，单跨跨径（20m 和 16m）对铺装层受力没有产生明显的影响，说明铺装层受力具有明显的局部效应。

1.2 目前研究存在问题

虽然以往相关研究在力学机理方面作了很多理论分析，但存在以下问题：

（1）没有将桥面的力学状态与相同荷载条件下的路面系统作综合比较，没有从两者的力学条件区别出发提出桥面铺装体系的设计要求。

（2）设计指标中有较多谈到了界面应力是桥面铺装中应重点关注的指标，并且也通过力学计算得到了建议指标，但对高温条件界面应力的指标提及较少，或者没有从实际出发，所提出的指标高于防水粘结层所能承受的抗剪强度。

（3）重载是我国交通的普遍特点，重载条件对桥面铺装的使用环境影响较大，但是以往研究没有较系统的体现重载条件下的设计指标。

2 桥面铺装与沥青路面力学状态差异的分析

2.1 桥面铺装力学模型

按照水泥混凝土桥的实际设计尺寸建立完整的有限元模型，建立桥面铺装体系基本的简化模型。桥面共三层：水泥桥面，6cm 桥面铺装下层和 4cm 桥面铺装上层。其中水泥桥面厚度视桥面结构的形式而定，本模型为 15cm。桥面模型的长度为 15m，宽度为 7.5m（双车道）。水泥混凝土的模量为 30GPa，泊松比 0.2。铺装上层和下层沥青混凝土的模量为 500-2000MPa，

泊松比 0.3, 并做如下假设: 1) 各部分为均匀、连续、各向同性的纯弹性材料; 2) 不计自重和阻尼; 3) 完全连续。

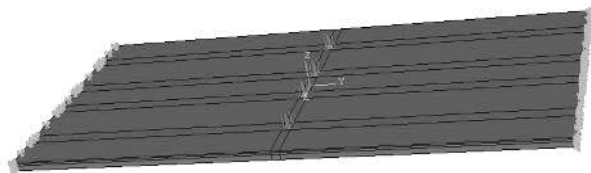


图 2.1 计算模型图

荷载的情况分为 2 种工况, 分别是常载 (正常荷载), 超载 (超载率为 50%)。在力学分析上, 首先将路面的模量分成若干状态, 以模拟桥面面层受到温度影响而产生的刚度变化, 分别为高温状态 500MPa、1000MPa, 低温状态 1500MPa、2000MPa。

2.2 沥青路面体系力学模型

为了对比分析桥面与路面沥青混合料铺装层的力学差异, 采用静力学分析方法, 选择了路面的计算指标, 与桥面进行对比。为反映半空间地基的特性, 地基采用扩大尺寸, 采用单圆荷载作用下的多层连续体系作为有限元分析的基本力学模型。

路面研究模型由 4cm 上面层+6cm 中面层+8cm 下面层沥青混合料+水稳基层和地基组成。沥青混合料的模量设置与桥面相同, 模型基本假设和荷载工况设置与桥面模型相同。

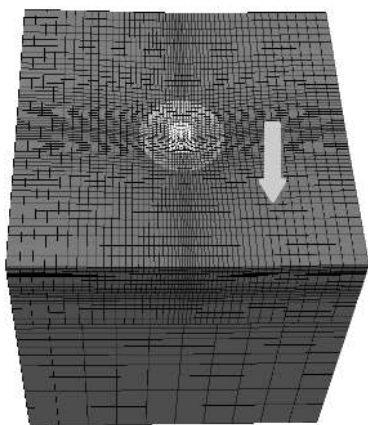


图 2.2 路面模型图

2.3 力学结构差异分析

本部分将从以下几个力学指标来研究桥面

铺装与路面在受力方面的差异。力学指标包括:

(1) 横向拉应变: 反映桥面铺装在水轮作用下追随桥面结构过程中变形的情况。

表 2.1 桥面铺装表面横向拉应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)

铺装上层 (MPa)	铺装下层 (MPa)	常载
500	500	105
1000	1000	76
1500	1500	74
2000	2000	71

表 2.2 路面表面横向拉应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)

上面层 (MPa)	中面层 (MPa)	常载
500	500	300
1000	1000	145
1500	1500	95
2000	2000	70

从数值比较上看桥面的横向拉应变与路面相比较小, 说明和钢桥面铺装不同, 水泥桥面刚度比较大, 水泥混凝土桥面的横向拉应变水平与路面是相当的, 不需要专门研究。

(2) 竖向压应力应变: 反映桥面铺装在水轮作用下所承受的压力和由于压力所产生的应变。以下将桥面两层与路面的中上面层作比较。

表 2.3 桥面铺装沥青混合料竖向压应力应变

铺装 上层 (MPa)	铺装 下层 (MPa)	铺装 上层 竖向 压应力 (MPa)	铺装 下层 竖向 压应力 (MPa)	铺装 上层 竖向 压应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	铺装 下层 竖向 压应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
500	500	0.7619	0.7527	607	677
1000	1000	0.7601	0.7495	501	371
1500	1500	0.7585	0.7467	458	338
2000	2000	0.7570	0.7441	421	310

表 2.4 路面沥青混合料竖向压应力应变

铺装 上层 (MPa)	铺装 下层 (MPa)	路面 上面层 竖向 压应力 (MPa)	路面 中面层 竖向 压应力 (MPa)	路面 上面层 竖向 压应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	路面 中面层 竖向 压应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
500	500	0.7718	0.3542	1239	499
1000	1000	0.7820	0.3518	623	242
1500	1500	0.7877	0.3501	446	170
2000	2000	0.7937	0.3471	313	116

桥面铺装下层和路面系统的中面层在高速公路中使用相同的混合料,属于相同的层位,但是由于路面系统有超过桥面系统近一倍厚度的沥青混合料,沥青混合料所承受的力学特征和状态是有很区别的。表现在数值的结果上,桥面竖向压应力基本是路面所承受的两倍,桥面竖向压应变基本是路面的 $2/3$,而且桥面铺装下层所承受的压应力基本和上面层所承受应力是相同的。

(3) 剪应力: 车辆荷载作用下,剪应力对于两种水泥和沥青介质的界面会产生较大的影响,以下比较了沥青面层与水泥混凝土界面和路面中沥青面层与水稳基层的界面中剪应力的差异:

表 2.5 桥面铺装界面的剪应力 (MPa)

铺装上层模量 (MPa)	铺装下层模量 (MPa)	常载
500	500	0.191
1000	1000	0.200
1500	1500	0.207
2000	2000	0.215

表 2.6 沥青路面与水稳界面的剪应力 (MPa)

上面层模量 (MPa)	中面层模量 (MPa)	常载
500	500	0.072
1000	1000	0.076
1500	1500	0.080
2000	2000	0.082

从剪应力的对比可见,由于桥面铺装要薄,桥面界面之间的剪应力要远大于路面系统的界面,因此剪应力指标是桥面铺装的重要力学指标。

3 重载作用下桥面铺装的力学分析

3.1 层间界面的应力

表 3.1 层间横向剪应力 (MPa)

模量 (MPa)	常载	超载
高温	500	0.164
	1000	0.172
低温	1500	0.180
	2000	0.186

表 3.2 层间纵向剪应力 (MPa)

模量 (MPa)	常载	超载
高温	500	0.191
	1000	0.200
低温	1500	0.207
	2000	0.215

按照正常车速,当荷载经过时,无论是横向拉应力还是剪应力都比相应的静载状态下的应力值要小。根据以上计算,取动力折减系数为 15%。

表 3.3 动力折减后层间纵向剪应力 (MPa)

模量 (MPa)	常载	超载
高温	500	0.16
	1000	0.17
低温	1500	0.17
	2000	0.18

层间的纵向剪应力随着沥青混凝土铺装层模量的变化不是很显著,相差 5% 以内。从四种工况的比较上看,超载下的剪应力比常载大 45%~50%,最大剪应力发生在荷载作用面的前端,制动力作用方向的前端剪应力比较大。从数值上可见,在重载作用下界面处所承受的最大剪应力已经接近普通桥面防水层所能承受的最大剪应力,因此界面剪应力指标应该作为重要的标准。

3.2 层间拉应力

表 3.4 层间竖向拉应力 (MPa)

模量 (MPa)	常载	超载
高温	500	0.015
	1000	0.012
低温	1500	0.013
	2000	0.015

层间竖向拉应力随着沥青混凝土铺装层模量的变化不是很显著,相差 5% 以内。从四种工况的比较上看,超载下的竖向拉应力比常载大 50%,但是,从数值上看,层间竖向拉应力远小于粘结层的抗拉强度,普通防水材料的抗拉强度在高温 40℃,最低也可以达到 0.7~0.8MPa。所以,分析结果可以看出,层间竖向拉应力的

数值远小于防水粘结材料的拉应力极限值,不必考虑拉应力造成的层间脱离,剪切造成的破坏仍然是主要破坏。

4 温度变化对桥面铺装的影响分析

为了分析桥面铺装层在高温季节和低温季节层内温度应力的实际状况,根据浙江省内某大型桥梁2月和7月桥面铺装温度场的检测数据,分别建立有限元模型对桥面铺装的温度应力状况进行了分析。

4.1 有限元模型的建立

桥面共四层,5cm 沥青混凝土铺装上层,5.5cm 沥青混凝土铺装下层,桥面和沥青层之间的粘结层和水泥桥面。其中水泥桥面厚度视桥面结构的形式而定,本模型中取为10cm。桥面模型的长度为15m,宽度为7.5m(双车道)。模型单元划分结果如图4.1所示:



图4.1 桥面铺装温度应力计算模型

4.2 材料属性

在有限元计算中,为了模拟不同季节铺装层混合料由于环境温度变化出现的刚度差异,课题中选择了几种模量值进行刚度的模拟。计算中所采用的铺装层材料参数如下表所示。

表4.1 有限元计算参数

结构层	模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	热胀系数
铺装上层	500~3000	0.3	2000	2.5×10^{-5}
铺装下层	500~3000	0.3	2000	2.5×10^{-5}
找平层	30000	0.2	2200	1.0×10^{-6}

4.3 计算结果与分析

对于桥面铺装层而言,由于铺装层材料与桥面水泥混凝土板的性质差异,当铺装层出现温度变化时,铺装层与桥面板会出现变形差异,而又由于两者间的粘结对变形的限制而引发温度应力。

对于铺装层材料而言,铺装上下面层混合料的抗拉强度要远高于抗剪强度,所以对于温

度应力只考虑抗剪强度,而且由于桥面纵向尺寸的影响,一般铺装层横向剪应力只相当于纵向剪应力的1/10,所以只考虑纵向剪应力随模量的变化。

(1) 2月份温度应力状况

分析过程中取6时的温度为初始温度,终止温度为14时的铺装温度。在一天的最大温差下,计算出桥面铺装的温度应力,计算上、下铺装面层模量分别在1800MPa、2000MPa、2500MPa、3000MPa时的应力,铺装上面层和下面层底面的剪应力值如表4.2所示。

表4.2 2月份桥面铺装层温度应力状况

模量 (MPa)	1800	2000	2500	3000
上面层底面 (MPa)	0.033	0.036	0.043	0.049
下面层底面 (MPa)	0.072	0.077	0.090	0.102

根据表4.2中的数据:随着模量的增加,纵向剪应力随之增大,而且下面层底面的剪应力明显比上面层大。

(2) 7月份温度应力状况

分析过程中取上午4时的温度为初始温度,终止温度为14时的铺装温度。计算上、下铺装面层模量分别在500MPa、800MPa、1000MPa、1200MPa时的应力,铺装上面层和下面层底面的剪应力值如表4.3所示。

表4.3 7月份桥面铺装层温度应力状况

模量 (MPa)	500	800	1000	1200
上面层底面 (MPa)	0.029	0.044	0.053	0.062
下面层底面 (MPa)	0.065	0.098	0.117	0.136

7月,桥面结构在温度应力下的变形状况如图4.2所示:

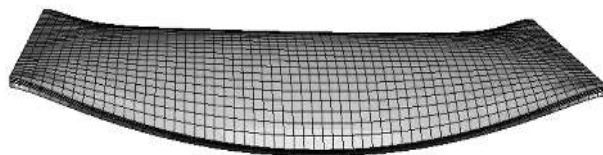


图4.2 桥面结构的变形状况

由表 4.2 和 4.3 中的数据可见, 桥面铺装结构在低温季节和高温季节的日温度变化下, 均会出现约 0.10MPa 的温度剪应力, 对于当前常用的防水粘结层材料而言, 此温度应力值已超过同温度下防水粘结层抗剪强度的 20%, 即使不经受车辆荷载, 防水粘结层也会在温度应力的重复作用下出现疲劳破坏, 所以在进行防水粘结层的设计和选择时应对其抗剪强度予以足够重视。

5 结语

本文通过有限元模型的建立, 分析了各种影响因素下桥面铺装层的力学状况, 得到如下结论:

(1) 通过桥面与路面力学状态对比分析可知, 桥面力学状态与路面有较大差别, 计算可知桥面竖向压应力是路面所承受的两倍, 桥面铺装下层所承受的压应力基本和铺装上层相似, 因此桥面铺装的铺装下层和铺装上层应该采用路用性能较为接近的沥青混合料。

(2) 桥面铺装结构在低温季节和高温季节的日温度变化下, 出现的因温度产生的剪应力约为同温度下防水粘结层抗剪强度的 20%。

(3) 通过桥面的力学状态分析, 验证了层

间竖向拉应力的数值远小于防水粘结材料的抗拉强度; 但是更为重要的是, 在重载条件下界面处所承受的最大剪应力已经接近普通桥面防水层抗剪强度, 因此应把界面剪应力指标作为重要的设计标准。建议层间剪应力强度指标重载常温为 0.5MPa, 重载高温为 0.3MPa。

(4) 在界面剪应力指标的基础上, 考虑到试验检测的便利性, 将界面剪应力指标转化为可用附着力拉拔试验检测的沥青界面的粘结强度指标, 沥青界面粘结强度指标重载常温为 1.0MPa, 重载高温为 0.7MPa。

参考文献

- [1] 何锋. 沥青混凝土桥面铺装早期破坏研究 [D]. 同济大学硕士学位论文, 2006.
- [2] 杨功增, 刘胜松, 庄伟. 桥面铺装层内应力应变分布及结构厚度的讨论 [J]. 山东交通科技. 2011, (05).
- [3] 马宝君. 山区高速公路沥青混凝土桥面铺装质量的控制技术研究 [D]. 长安大学硕士学位论文, 2020.
- [4] 雷建国. 水泥混凝土桥面铺装结构防水层设计在港珠澳大桥中的应用 [J]. 工程建设与设计. 2020, (15).
- [5] 王朝辉, 郭瑾, 陈宝, 王新岐. 桥面铺装结构的应用现状与发展 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34 (12).
- [6] 温靖赞. 混凝土桥面铺装试验研究与破坏分析 [D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2003.