

混凝土桥面沥青铺装粘结层抗剪设计方法

贾晓阳^{1,2}, 李立寒¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 田纳西大学 土木与环境工程系, 诺克斯维尔 37996)

摘要: 介绍一种新的混凝土桥面沥青铺装粘结层抗剪设计方法. 采用有限元法分析混凝土桥面铺装粘结层水平剪应力与法向正应力的分布关系. 基于该关系图提出层间剪应力临界边界, 分别从铺装结构参数、荷载方面分析影响层间剪应力临界边界的因素, 给出了临界边界方程形式, 并检验其合理性. 提出荷载作用下满足层间不发生剪切破坏的基本条件为: 层间剪切强度包络线与临界边界相离. 最后给出了应用算例.

关键词: 混凝土桥面; 沥青铺装; 层间剪切; 设计标准

中图分类号: U 443.33

文献标志码: A

A Design Guide to Shear Resistance of Bonding Layer in Concrete Bridge Deck Asphalt Pavement

JIA Xiaoyang^{1,2}, LI Lihan¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Tennessee, Knoxville 37996, USA)

Abstract: A new approach to evaluate shear resistance of bonding layer in concrete bridge deck asphalt pavement was proposed. The distributions for shear stress and normal stress in the interface between asphalt pavement and bridge slab under vertical and horizontal load were analyzed by finite element method. Based on the scattergram of shear stress and normal stress, the conception of shear stress critical boundary was proposed. Parameters of pavement and load were considered to analyze its effects on critical boundary. Also, equation formation of critical boundary was tested by χ^2 -test. The basic condition to guarantee the performance of shear resistance for bonding layer was that there was no intersection of shear stress critical boundary and shear intensity envelope line, which was the design standard for bonding layer in concrete bridge deck asphalt pavement. Finally, a case study was presented.

Key words: concrete bridge deck; asphalt pavement; interlayer shear; design standard

层间推移与拥包是混凝土桥面沥青铺装常见病害之一, 其主要原因是由于铺装层与桥面板层间粘结力差, 在水平方向上产生相对位移以致剪切破坏^[1]. 一般采用层间剪应力作为设计指标, 以层间剪应力最大值小于层间抗剪强度容许值作为评价铺装层间是否满足抗剪要求的标准^[2]. 通过斜剪试验^[3]或直剪试验^[4]可以得到铺装层间抗剪强度, 在考虑层间剪切强度结构系数^[5]后得到层间抗剪强度容许值. 根据莫尔强度理论, 界面滑移主要由剪应力引起, 但又和正应力有关^[6]. Uzan 等^[7]的试验结果表明, 层间抗剪强度与层间法向正应力近似成正相关. 因此, 粘结层界面上不同位置的法向正应力不同, 其相应的抗剪强度也应不同. 在建立层间剪切设计标准时需要考虑层间抗剪强度的这一特点.

本文采用有限元法, 根据荷载作用下桥面铺装层间水平剪应力与法向正应力的分布特点, 提出层间剪应力临界边界概念, 分析其影响因素, 提出其基本形式并检验了其合理性. 由此提出层间抗剪设计基本原则、标准, 并建立了用于铺装粘结层抗剪设计的基本步骤, 最后结合工程实例给出了该设计方法的应用, 为混凝土桥面铺装粘结层设计提供参考.

1 模型建立、计算路径和取值方式

选取简支空心板桥面铺装模型. 跨径 20 m, 桥面净宽 7.0 m+2×0.75 m. 依据桥梁设计荷载城-A 级中最大轴重 200 kN 作为分析荷载. 假设轮载接地面积为正方形, 单轮接地面积一定, 则可将矩形荷载转化为双轮中心 35 cm, 25 cm×25 cm 双正方形荷载, 轮载接地压强为 0.8 MPa. 有限元模型如图 1 所

收稿日期: 2012-03-30

第一作者: 贾晓阳(1982—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为道路工程. E-mail: jxy1982@163.com

通讯作者: 李立寒(1957—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为道路工程材料. E-mail: lhli@tongji.edu.cn

示.其边界条件为:桥面端部三个垂直方向固定,沿桥面中心线对称约束,桥面铺装与桥面板层间完全连续^[8].

根据计算,横桥向层间最大水平剪应力出现于双轮迹内、外侧边缘,纵桥向层间最大水平剪应力出现于轮迹前、后侧边缘.由此在层间最大水平剪应力出现的位置选择4条路径(图2),分别计算沿各路径桥面铺装层间法向正应力 σ 和层间纵桥向水平剪应力 τ_v 、横桥向水平剪应力 τ_h ,提取 τ_v 、 σ 和 τ_h 、 σ 并绘制成图(图3).为了便于分析,所有法向正应力值取

正.

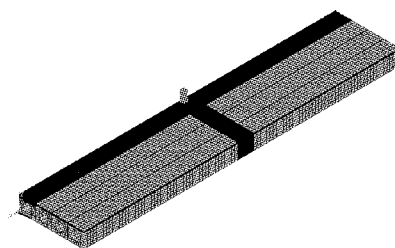


图1 桥面铺装有限元模型

Fig.1 Finite element model for bridge deck pavement

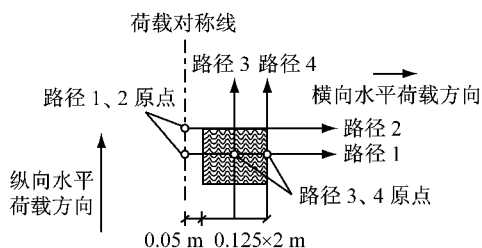


图2 计算路径

Fig.2 Calculation paths

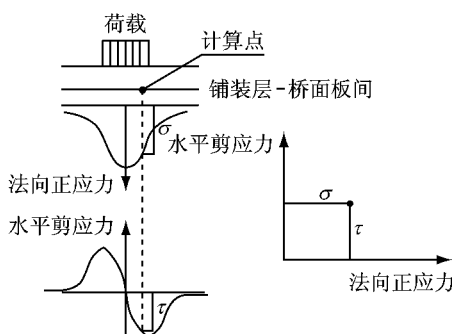


图3 τ - σ 图取值方法

Fig.3 Determination of τ - σ scatterplot

2 桥面铺装层间水平剪应力—法向正应力分布

2.1 层间水平剪应力—法向正应力分布特征

路径1、2分别记录了 τ_h 、 σ 沿位置的变化情况(图4a和4b).在荷载作用区域边缘 τ_h 取到最大,而在荷载作用区域的中心位置的 σ 为最大,此时的 τ_h 为零,在双轮迹中心位置的 τ_h 为零而此处的 σ 约为最大值的1/4.路径3、4分别记录了 τ_v 、 σ 沿位置的变化情况(见图4c和4d).在荷载作用区域边缘 τ_v 为最大,在荷载作用区域的中心处的 σ 最大,此处的 τ_v 为零.

综合4条路径,可知层间水平剪应力 τ 与 σ 分布的基本特征:①轮迹作用区域中心位置(如,路径1~2, $x=0.175$;路径3~4, $x=0$)的 σ 最大, τ 为0;②在轮迹边缘位置(如,路径1~3, $x=0.3$;路径4~6, $x=0.125$) τ 最大,此时的 σ 约为层间界面上最大法向正应力的一半.

2.2 层间剪应力最大边界

将同一位置的 τ 与 σ 提取,按图3所示的方式得到沿不同路径的 τ - σ 图.图5为沿路径1、2的 τ_h 与 σ 关系,图6为沿路径3、4的 τ_v 与 σ 关系.由图5—6

可见,沿不同路径的 τ - σ 图边界呈现规则的椭圆形式,并关于法向正应力轴对称.其中,当 σ 达到最大值时, τ 为0;当 τ 达到最大值时, σ 约为界面最大法向正应力的一半.

这里根据 τ - σ 图提出层间剪应力最大边界的概念.将层间界面所有点相应的层间水平剪应力与法向正应力提取,在 τ - σ 图上形成散点图,这个散点图的最外侧边界即为层间剪应力最大边界.经分析发现,当计算路径由轮迹作用区域中心位置向轮迹作用区域边缘位置平行偏移过程中(即横桥向由路径1向路径2平行偏移,纵桥向由路径3向路径4平行偏移),层间剪应力与法向正应力均逐渐减小,在 τ - σ 图上所围区域面积也减小.因此确定路径1与路径3分别为横、纵向层间剪应力最大边界.

3 层间剪应力临界边界形式的确定

3.1 层间剪应力临界边界

层间剪应力最大边界表明:铺装粘结层界面任意一点的层间水平剪应力与法向正应力点均处于该界限定的区域以内(如图7中“散点区域”),而不会超出该区域.因此若层间剪应力最大边界不超出层间剪切强度包络线,则粘结层界面上所有层间水

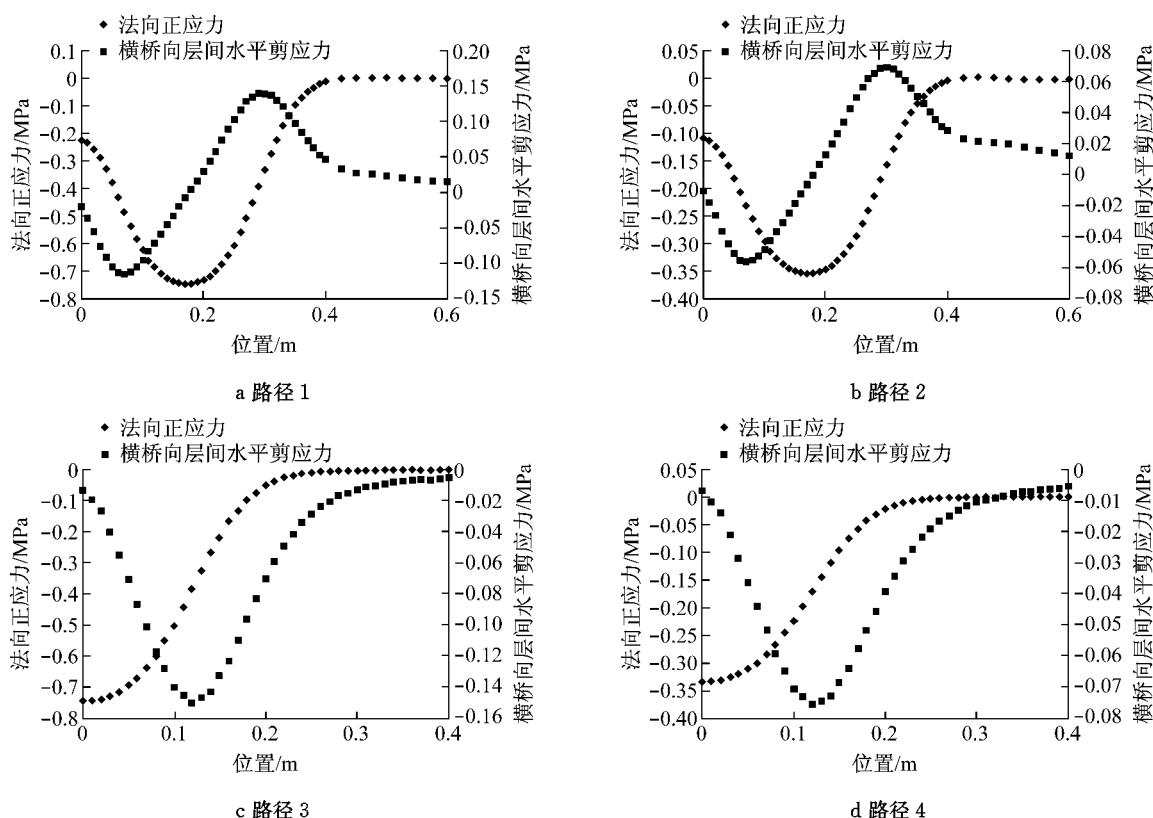
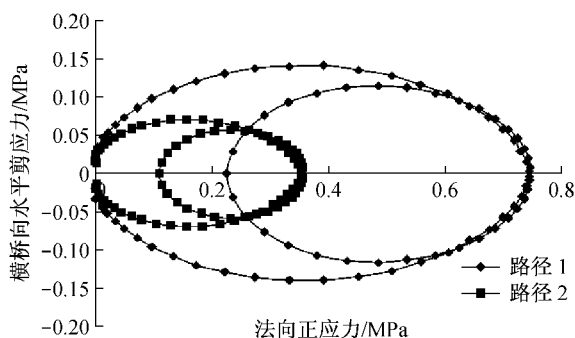
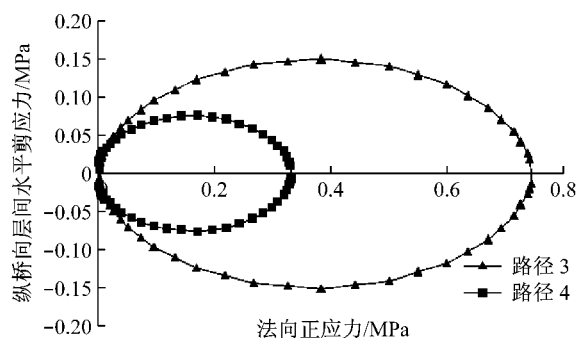


图 4 不同路径位置关于法向正应力、层间剪应力的关系

Fig. 4 Relationship of normal stress and shear stress to position along different paths

图 5 路径 1,2 的 τ - σ 图Fig. 5 Sketch of shear stress τ and normal stress σ for Path 1 and 2图 6 路径 3,4 的 τ - σ 图Fig. 6 Sketch of shear stress τ and normal stress σ for Path 3 and 4

平剪应力与法向正应力点均不超出层间剪切强度包络线。通过分析层间剪应力最大边界发现,层间水平剪应力随着法向正应力的增加而增加,当 $\sigma > \sigma_k$ (σ_k 为层间水平剪应力最大值 τ_{\max} 对应的法向正应力) 时,层间水平剪应力将随法向正应力的增加而减小。根据层间剪切强度包络线,层间剪切强度随层间法向正应力的增加而单调增加。因此在进行铺装粘结层剪切设计时只需关注层间剪应力最大边界为 $0 < \sigma < \sigma_k$ 的部分,这部分称之为层间剪应力临界边界。

3.2 层间剪应力临界边界影响因素

保持铺装模量 E 不变,改变铺装层厚度 h (图

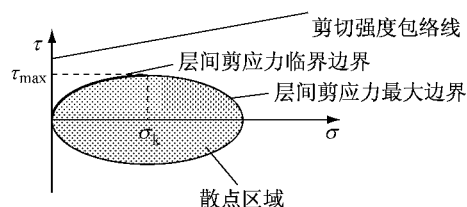


图 7 层间剪应力最大边界与层间剪应力临界边界关系

Fig. 7 Shear stress maximum boundary and shear stress critical boundary

8). 可以发现,随着厚度的增加,层间剪应力临界边界线位降低,同时层间水平剪应力最大值与相应点

的法向正应力值也减小,说明铺装厚度的增加有利于降低层间剪应力水平。

保持铺装厚度 h 不变,改变铺装层模量 E (图9)。可以发现,随着模量的增加,层间剪应力临界边界线位提高,铺装层间水平剪应力最大值增加,但层间水平剪应力最大处的法向正应力值却有所减小。这是由于铺装层模量的增加将加强铺装层对竖向荷载的应力扩散作用,使层间界面的法向正应力有所减小。

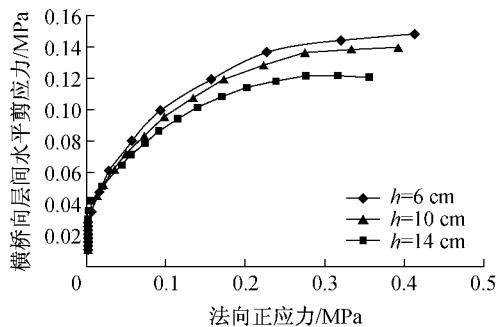


图8 不同厚度临界边界 ($E=2\,000\text{ MPa}$)

Fig.8 Critical boundary of shear stress at different pavement depths ($E=2\,000\text{ MPa}$)

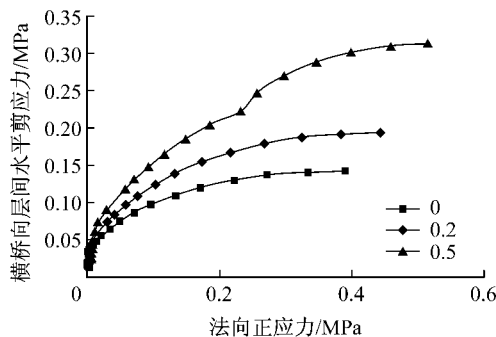


图10 不同横向力系数临界边界

Fig.10 Critical boundary of shear stress with different transverse friction coefficients

3.3 层间剪应力临界边界形式的确定

通过分析不同铺装厚度、模量以及不同荷载条件下的层间剪应力临界边界形式发现,各种不同情况下的层间剪应力临界边界形式基本一致。根据临界边界的形式,拟采用式(1)作为基本形式。

$$\tau = a \sqrt{\frac{2\sigma}{b} - \frac{\sigma^2}{b^2}} \quad (1)$$

式中: τ 为层间水平剪应力; σ 为法向正应力; a 、 b 为曲线参数。

经比较分析,当 $a=\tau_{\max}$; $b=\sigma_k$ 时与最大边界的形式较吻合。采用 χ^2 拟合优度检验^[9] 临界边界方程(1)是否能够代表最大边界。结果见表1,表中, α 为

考虑三种不同荷载模式,分别描述正线(竖向荷载)、匝道(竖向+纵向水平荷载)、弯道(竖向+横向水平荷载)处的铺装层间受力状态,其中纵、横向力系数为 0.2、0.5。计算了层间剪应力临界边界形式(图10—11)。可以看出,随着纵、横向力系数的增加,层间剪应力临界边界的线位所有提高,表现为纵、横向层间水平剪应力最大值及其相对应的法向正应力值均所有提高,但不同荷载情况的层间剪应力临界边界基本形状不变。

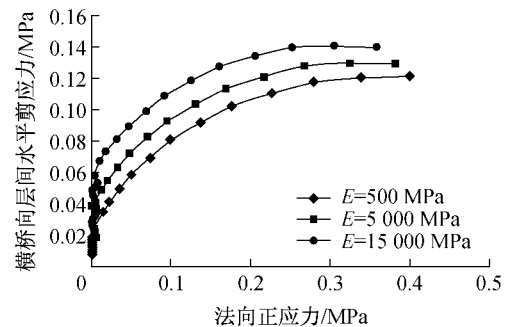


图9 不同模量临界边界 ($h=8\text{ cm}$)

Fig.9 Critical boundary of shear stress of different pavement modulus ($h=8\text{ cm}$)

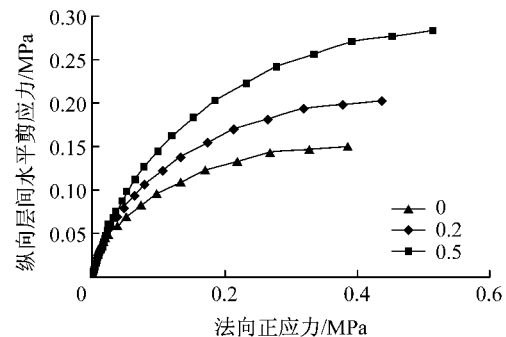


图11 不同纵向水平力系数临界边界

Fig.11 Critical boundary of shear stress with different longitudinal friction coefficients

表1 χ^2 拟合优度检验结果 ($\alpha=0.05$)

Tab.1 Results for χ^2 - test ($\alpha=0.05$)

水平力系数	厚度/cm	模量/MPa	$\Sigma (\tau_{\text{实际}} - \tau_{\text{拟合}})^2 / \tau_{\text{拟合}}$	χ^2 值	结论
0	8	500	0.051	30.114	接受
0	8	5 000	0.272	30.114	接受
0	8	15 000	0.427	30.114	接受
0	6	2 000	0.140	30.114	接受
0	10	2 000	0.382	30.114	接受
0	14	2 000	0.139	30.114	接受
0	8	2 000	1.209	23.685	接受
0.2	8	2 000	0.939	27.587	接受
0.5	8	2 000	0.789	27.587	接受
0	8	2 000	0.042	38.885	接受
0.2	8	2 000	0.119	38.885	接受
0.5	8	2 000	0.238	38.885	接受

显著性水平. 可见, 所有情况下, $\Sigma (\tau_{\text{实际}} - \tau_{\text{拟合}})^2 / \tau_{\text{拟合}}$ 的值均小于 χ^2 值, 说明临界边界方程式(1)的形式是可接受的.

4 桥面铺装层间抗剪评价标准

桥面铺装层间剪切设计以层间某点 i 所受剪应力 τ_i 小于该点容许剪应力 $[\tau_i]$ 为设计标准. 设层间某点 i 所受法向正应力为 σ_i , 则通过层间剪切强度包络线^[7]可以得到该点的剪切强度 τ_{si} 为

$$\tau_{si} = \sigma_i \tan \varphi + c \quad (2)$$

式中: φ 为层间内摩阻角, $^\circ$; c 为层间粘聚力, MPa.

由式(1)和式(2)得到层间某点 i 的剪切强度与剪应力之间的比值 d_i 为

$$d_i = \frac{\tau_{si}}{\tau_i} = \frac{\sigma_i \tan \varphi + c}{\tau_{\max} \sqrt{\frac{2\sigma_i - \sigma_k^2}{\sigma_k^2}}} \quad (3)$$

剪切强度 τ_{si} 与容许剪应力 $[\tau_i]$ 存在一个安全余量, 即铺装结构层间抗剪强度系数 K_s . K_s 是一个体现层间剪切疲劳特性的参数, 其确定依赖于经过野外试验的标定后的层间剪切疲劳方程^[5]. 不同层间 i 点的 d_i 是不同的, 在设计时需要找出一个最小的 $d_{i,\min}$, 使其能够大于铺装结构层间抗剪强度系数 K_s . 一旦 $d_{i,\min} > K_s$, 则可以保证层间其他点均能够满足. 确定了 $d_{i,\min}$ 就可以计算相应法向正应力 σ_i 、层间水平剪应力 τ_i 与剪切强度 τ_{si} . 层间剪切设计概念见图 12.

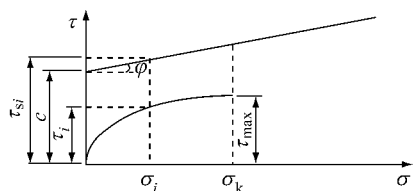


图 12 层间剪切设计概念

Fig. 12 Conception of design for shear resistance of interlayers

当 $0 < \sigma_i < \sigma_k$. 求式(3)的最小值, 将其求关于 σ_i 的一阶偏导数, 并令为零, 得到相应的法向正应力 σ_i 为

$$\sigma_i = \frac{c \sigma_k}{\sigma_k \tan \varphi + c} \quad (4)$$

由 σ_k 、 $\tan \varphi$ 、 c 三参数确定 σ_i 值, 代入式(1)—(3)就可以确定相应的 τ_i 、 τ_{si} 与 $d_{i,\min}$.

5 应用

5.1 工程背景

某工程空心板混凝土桥梁结构设计标准荷载为城-A 级荷载. 桥面铺装结构形式为: 双层式, 上面层为 4 cm SMA -13, 下面层为 4 cm SMA -10. 拟采用的三种层间粘结材料分别为: 丁苯橡胶 (SBR) 改性乳化沥青粘层油 (编号 1); 桥面防水用热融型 SBS 改性沥青 (编号 2); 混凝土桥面用环氧沥青防水粘结材料 (编号 3). 采用本文提出方法评价这些粘结材料的适用性. 有限元计算时的结构模型见图 1, 计算时铺装材料模量采用动态模量^[10]. 分别为: 5 697 MPa (SMA -13) 和 5 013 MPa (SMA -10).

5.2 铺装层间材料抗剪性能评价

采用本文分析荷载参数, 分别计算在竖向荷载、竖向和纵向水平荷载共同作用时的铺装层间最大水平剪应力与相应点的法向正应力, 其中纵向水平力系数为 0.5. 计算结果为: 仅考虑竖向荷载时, $\tau_{\max} = 0.147$ MPa, $\sigma_k = 0.398$ MPa; 考虑水平力系数后, $\tau_{\max} = 0.307$ MPa, $\sigma_k = 0.535$ MPa.

测定了三种材料层间剪切强度包络线, 其粘聚力 c 与内摩阻角 φ , 并采用本文方法对不同材料的层间抗剪性能评价见表 2. 可见, 所有层间处置方案的 $d_{i,\min}$ 均大于 1, 其中 3 号方案的最大, 而 1 号最低. 考虑了纵向水平荷载后的层间抗剪性能评价结果见表 3. 可知, 法向正应力 σ_i 增加, 层间的剪应力 τ_i 也增加, 由于 σ_i 增加使 i 点的剪切强度 τ_{si} 也有所提高, 但 $d_{i,\min}$ 有所下降, 表明了施加水平荷载后将导致层间剪切破坏风险增大. 其中 1 号材料的 $d_{i,\min}$ 接近 1 说明层间 i 点计算剪应力 τ_i 与层间抗剪强度 τ_{si} 接近. 铺装层间抗剪性能不满足要求. 参考有关研究的层间剪切疲劳方程^[5], 反推不同材料能够承受的累计标准轴载作用次数 N_e , 见表 2.

表 2 不同铺装材料层间剪切性能评价 (仅竖向荷载)

Tab. 2 Evaluation of shear resistance for different interlayer materials (only vertical loads)

编号	c / MPa	$\tan \varphi$	σ_i / MPa	τ_i / MPa	τ_{si} / MPa	$d_{i,\min}$	N_e / 次
1	0.195	0.375	0.225	0.132	0.280	2.11	3.3×10^6
2	0.328	0.322	0.286	0.141	0.420	2.98	1.7×10^7
3	0.920	0.324	0.349	0.146	1.033	7.09	$> 2.5 \times 10^7$

考虑紧急制动情况, 不同材料层间剪切性能评

价见表 3. 可见, 考虑了紧急制动水平荷载后 1、2 号

材料的累计标准轴次大大降低。从计算结果看,3号制动的区域,如匝道、跨线桥、长大纵坡等。材料累计标准轴次仍然较高,因此适用于频繁起动、

表3 不同铺装材料层间剪切性能评价(纵向水平系数0.5)

Tab.3 Evaluation of shear resistance for different interlayer materials (longitudinal horizontal coefficient 0.5)

编号	c/MPa	$\tan \varphi$	σ_i/MPa	τ_i/MPa	τ_{si}/MPa	$d_{i,\min}$	$N_e/\text{次}$
1	0.195	0.375	0.264	0.264	0.294	1.11	1.6×10^5
2	0.328	0.322	0.351	0.288	0.441	1.53	7.2×10^5
3	0.920	0.324	0.450	0.303	1.066	3.52	$>2.5 \times 10^7$

6 结论

(1) 采用有限元法,分析了荷载作用下,混凝土桥面铺装层间水平剪应力与法向正应力分布特点,并提出层间剪应力最大边界概念。

(2) 基于层间剪应力最大边界提出了用于桥面铺装粘结层抗剪评价的层间剪应力临界边界,分析了铺装结构参数、荷载对临界边界形式的影响,提出了临界边界基本式,并验证了其合理性。

(3) 提出混凝土桥面铺装粘结层抗剪评价标准为:层间剪应力临界边界与层间材料剪切强度包络线相离,并给出了相应标准计算过程。

(4) 给出算例说明本文提出方法的应用。

参考文献:

- [1] 张占军,胡长顺,王秉纲.水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构设计方法研究[J].中国公路学报.2001,14(1):56.
ZHANG Zhanjun, HU Chuangshun, WANG Binggang. Research on the design method of asphalt concrete pavement for concrete bridge deck structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 56.
- [2] 胡晓.混凝土桥梁沥青混凝土桥面铺装力学分析研究[D].上海:同济大学交通运输工程学院.2007.
HU Xiao. Mechanic analysis research on the asphalt pavement of the concrete bridge decks [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2007.
- [3] 周孔.城市高架桥防水粘结层设计参数研究[D].上海:同济大学交通运输工程学院.2010.
ZHOU Kong. Research on design parameters of waterproof-adhesive layer for urban viaducts [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2010.
- [4] 张占军.混凝土桥桥面防水系统性能及设计方法研究[D].西安:长安大学公路学院.2004.
ZHANG Zhanjun. Research on performance and design method of waterproofing system on concrete bridge decks [D]. Xi'an: School of Highway of Chang'an University, 2004.
- [5] 刘丽.沥青路面层间处治技术研究[D].西安:长安大学公路学院.2008.
LIU Li. Study on technology performance of asphalt pavement layer interfaces [D]. Xi'an: School of Highway of Chang'an University, 2008.
- [6] 宋子康,蔡文安.材料力学[M].上海:同济大学出版社.2003.
SONG Zikang, CAI Wenan. Mechanic of materials [M]. Shanghai: Tongji University Press. 2003.
- [7] Uzan J, Livneh M, Eshed Y. Investigation of adhesion properties between asphaltic concrete layers [C]//Proceeding Association of Asphalt Paving Technologists, Technical Session. Lake Buena Vista: University of Minnesota, 1978: 495-521.
- [8] 贾晓阳.混凝土桥面沥青铺装层结构设计指标研究[D].上海:同济大学交通运输工程学院.2012.
JIA Xiaoyang. Research on structure design indexs of concrete bridge deck asphalt pavement [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2012.
- [9] 同济大学概率统计教研组.概率统计[M].3版.上海:同济大学出版社.2004.
Teaching and Research Group of Probability Statistics of Tongji University. Probability statistics [M]. 3rd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [10] 姚祖康,刘伯莹.沥青路面新设计指标和参数体系研究[J].公路交通科技.2008,25(9):1.
YAO Zukang, LIU Boying. Research on new design index and parameter system of asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2008, 25(9): 1.