

文章编号:1671-8879(2014)02-0038-07

基层层间接触状态对沥青路面力学响应影响

李彦伟^{1,4}, 穆柯^{2,3}, 石鑫⁴, 王选仓³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710068; 3. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 4. 石家庄市交通运输局, 河北石家庄 050051)

摘要:为了研究沥青路面基层层间结合状态对其使用性能的影响,分析了不同层间粘结状况下路面力学响应状况,建立了基于脱层失效理论的基层层间有限元模型,采用子结构分析方法系统研究了精铣刨、胶粉改性沥青、SBS 改性沥青、基质沥青等不同层间处治措施对路用性能的影响,并通过室内层间直剪试验对预估模型进行了验证。研究表明:与传统定义层间摩擦因数的方法相比,脱层失效理论的层间接触模型更能有效反映不同层间材料、不同粘结层厚度对路面力学性能的影响,并能分析随轮载加重而造成的层间材料刚度损失;在面层厚度较薄、水平力系数较大、超载严重的路段采用精铣刨等处治措施,能有效改善层间受力状况,提高道路寿命。

关键词:道路工程;基层层间;脱层失效;子结构;有限元

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Impact of base-surface contact conditions on mechanical response of asphalt pavement

LI Yan-wei^{1,4}, MU Ke^{2,3}, SHI Xin⁴, WANG Xuan-cang³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. The First Highway Survey and Design Institute Co Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. Bureau of Transportation in Shijiazhuang, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract: In order to study the impact of the base-surface contact conditions on pavement performance, the mechanical response of pavement under different bonding conditions between base and surface layer was analyzed. A numerical model based on delamination failure theory was established. Substructure analysis was used to study the bonding state influence on pavement with fine milling, rubber, SBS and conventional asphalt. Direct shear test was used to verify the prediction model. The results show that compared with traditional methods, delamination failure theory can reflect mechanical properties of interlayer with different materials and thicknesses; loss of stiffness in interlayer material can be considered with the increasing wheel load; fine milling and other measures can improve the interlayer stress state under following condition, thin pavement, large horizontal load coefficient and heavy traffic. 2 tabs, 17 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; base-surface layer; delamination failure; substructure; finite element method(FEM)

收稿日期:2013-02-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2012CB026100);中交集团科技研发项目(2011-ZJKJ-16)

作者简介:李彦伟(1969-),男,河北石家庄人,石家庄市交通运输局教授级高级工程师,同济大学工学博士研究生,E-mail:tongjiyanwei@163.com.

0 引言

基层层间结合状态(沥青面层与半刚性基层接触状态)的优劣是影响路面使用性能的重要因素。半刚性材料由于其强度高、板体性好、荷载传递能力强等特点在中国道路基层中有着广泛的应用,但由于路面、基层材料的差异性,造成二者在层间结合部位容易产生薄弱环节,这种薄弱层的存在进一步加剧车辙、拥包等路面病害的发展。虽然《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)中规定半刚性基层路面的基层层间应进行透层处治,以保证其粘结性能。但目前透层材料种类繁多,处治工艺也不尽相同,对于各处治措施对路面性能的影响,规范中又无完善的评价方法,这就造成了透层处治措施选择上的盲目性。

目前国内外对基层层间结合状态大都考虑为连续接触,部分学者通过定义不同摩擦因数来反映层间结合状态的差异,但这种方法并不能动态反映累积损伤带来的层间刚度损失^[1-3];还有部分学者通过室内试验获得了不同层间处治材料的力学指标,该方法虽然能直接反映各处治措施下的层间粘结强度,但粘结强度改变对路用性能的影响,则不能通过该方法直观反映^[4-5]。为此,本文在前人试验及数值研究的基础上,建立了基于脱层失效理论的层间力学分析模型,采用子结构分析的方法,系统分析了基质沥青、SBS改性沥青、胶粉改性沥青、精铣刨处治工艺下路面力学响应状况,并通过室内层间直剪试验对预估模型进行验证,为沥青路面基层层间处治措施的选择提供依据。

1 理论基础

1.1 传统层间接触模型

传统数值分析过程中,为了描述基层与面层间的相互作用,往往在层间引入摩擦接触单元,设定刚度较大的面为主面,相应接触面为从面,如图1所示。

在外界荷载作用下,从面上的点C、D相对主面产生滑动。接触单元本构关系一般采用弹性、弹塑性模型,接触面上剪应力及法向应力关系如式(1)、式(2)所示。

$$\sigma_{12} = K_{12} M_a \quad M_a < M_{\max} \quad (1)$$

$$\sigma_{12} = \mu \sigma_{11} \quad M_a > M_{\max} \quad (2)$$

式中: σ_{12} 为剪应力; σ_{11} 为法向应力; M_a 为接触面相

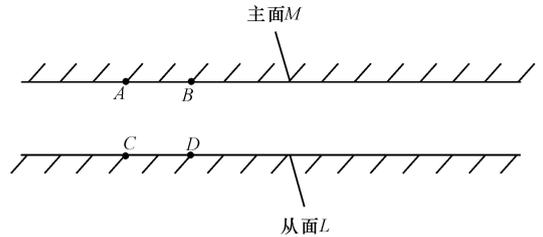


图1 传统层间接触模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of traditional interlayer contact model
对位移; M_{\max} 为最大弹性位移; K_{12} 为层间接触面剪切刚度; μ 为层间摩擦因数。

传统的层间接触模型具有简单、直观,计算易于收敛等优点,在路面应力数值仿真中得到广泛应用,但由于该模型对层间应力传递关系仅作简单的线性处理,不能反映粘结材料、厚度等因素对传力性能的影响;同时,对于层间材料因轮载增大而产生的强度损伤,不能进行合理描述。因此,无论是预估精度,还是模型准确性方面,该方法的应用均受到较大制约。

1.2 脱层失效理论

本文采用基于脱层失效理论的层间接触模型来描述基层间接触状态,其中界面层的厚度为 h ,以 x 、 y 、 z 分别表示接触界面长、宽、厚3个方向的空间坐标,则界面刚度可表示为

$$k_1 = \frac{G_{13}}{h}, \quad k_2 = \frac{G_{23}}{h}, \quad E_3 = \frac{E}{h} \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 x 、 y 、 z 方向的界面刚度; E_3 为 x_3 方向弹性模量; G_{13} 为 x_1 - x_2 面内沿 x_1 方向的剪切模量; G_{23} 为 x_y - x_z 面内沿 x_y 方向的剪切模量。

当界面开始产生微裂痕或缺陷损伤时,界面的实际刚度会随着损伤的增加而下降。损伤发生过程中界面刚度具体表达形式为

$$\begin{cases} \sigma_{33} = E_3(1-\omega)\langle \epsilon_{33} \rangle - E_3\langle -\epsilon_{33} \rangle \\ \sigma_{13} = G_{13}(1-\omega)\epsilon_{13} \\ \sigma_{23} = G_{23}(1-\omega)\epsilon_{23} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_{1n} 、 σ_{2n} 、 σ_{3n} ($n=1,2,3$)分别为界面单元 x 、 y 、 z 这3个方向的应力分量; ϵ_{1n} 、 ϵ_{2n} 、 ϵ_{3n} 分别为 x 、 y 、 z 这3个方向的应变分量; $\langle \rangle$ 为MacAuley算子^[6],且假定变量 $A \geq 0$ 时, $\langle A \rangle \geq A$,当 $A < 0$ 时, $\langle A \rangle = 0$; ω 为微缺陷区域的面积。

当界面单元发生穿透时,即 $\epsilon_{33} < 0$, ϵ_{33} 产生附加应力,用以约束条件穿透而产生的惩罚作用力。

在发生破坏前,刚度是一个常量;当发生破坏之后,等效刚度则是随着变形而变化的量。内聚力模

型中应力和应变服从双线性关系^[7-9]。损伤变量

$\epsilon_{i\max}$ 、 ω 满足如下关系

$$\omega = \begin{cases} 0 & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{i0} \\ c_1 \left(1 - \frac{\epsilon_{i0}}{\epsilon_i}\right) & \epsilon_{i0} \leq \epsilon \leq \epsilon_{im} \\ 1 & \epsilon_i > \epsilon_{im} \end{cases} \quad (5)$$

各常数值分别为

$$c_1 = \frac{\epsilon_{im}}{(\epsilon_{im} - \epsilon_{i0})}, \quad \epsilon_{i0} = \frac{\epsilon_{im}}{k_i}, \quad \epsilon_{im} = \frac{2G_{i0}}{\epsilon_{im}} \quad (6)$$

式中: $i=33$ 时为法线方向, $i=13$ 时为剪切方向; G_{i0} 为界面初始损伤剪应力; ϵ_{i0} 为界面产生损伤时的应变; ϵ_{im} 为界面开始脱层时的应变; $\epsilon_{i\max}$ 为加载或卸载过程中的最大应变。

与之相对应初始损伤应力及失效位移为

$$\sigma_{i0} = k_i \epsilon_{i0}, \quad m = L_d \epsilon_{i\max} \quad (7)$$

式中: σ_{i0} 为初始损伤应力; m 为失效位移; L_d 为单元尺寸。

与传统的摩擦理论相比,层间脱层失效模型具有以下优势:①采用界面刚度描述层间材料特性,考虑了层间材料模量、厚度等因素的影响;②能动态反映粘结界面的强度损失,真实描述基层层间受力状态。

2 基于脱层失效理论的基层层间数值

2.1 子结构模型

为了研究层间结合状态对路面性能的影响,本文根据图 2 所示路面结构进行建模及荷载施加,其中模型尺寸为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,为了能在不增加计算量的情况下对加载部位进行更精确的分析,采用子结构分析的方法提取轮载附近 2 m 内的区域进行子结构建模。

所谓子结构模型是指在整体模型分析的基础上,将重点研究部分单独取出,通过施加全局模型中计算所得的边界条件,实现对模型重点部位的细化分析,如图 3 所示。

图 3 为建立子结构模型示意图,图中子结构的底面及四边,施加由全局模型计算所得的边界条件,该方法可以重新对轮载周边的网格进行更详细的重剖分,更有利于精确求解。

2.2 计算模型参数取值

为了评价脱层失效理论在基层层间结合状态对路面力学响应的应用状况,建立了考虑基于子结构分析的有限元计算模型,对基质沥青、SBS 改性沥

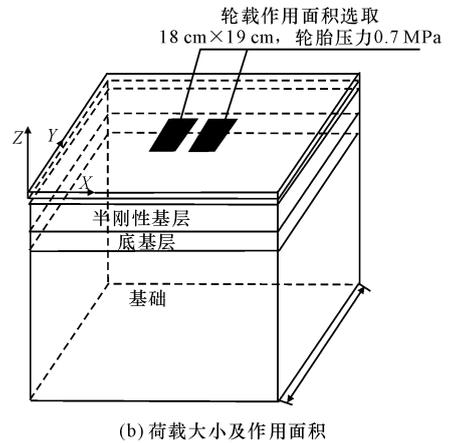
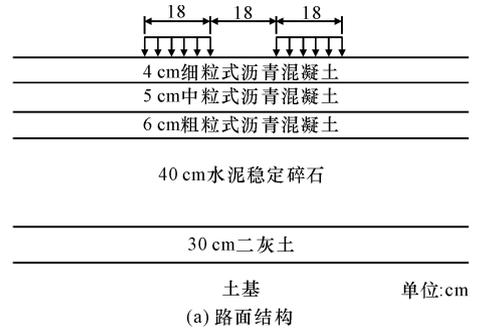


图 2 路面结构及荷载分布示意图

Fig. 2 Pavement structure and load distribution diagram

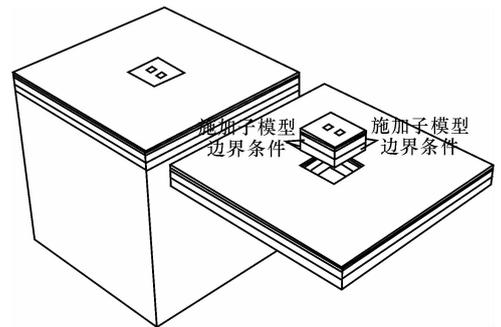


图 3 子结构分析示意图

Fig. 3 Sub-structure analysis diagram

青、胶粉改性沥青、精铣刨等工况下的基层层间结合状态进行分析。

目前,关于沥青混合料损伤失效的研究较少,参数取值困难,本文在参考文献^[10-13]的基础上,确定材料损伤参数,见表 1、下页表 2。

表 1 界面材料损伤模型参数

Tab. 1 Damage parameters of interfaces

项 目	基质沥青	SBS 改 性沥青	胶粉改 性沥青	精铣刨
层间刚度/(MPa·mm)	4.900	6.000	6.100	6.500
损伤应力/MPa	0.039	0.045	0.048	0.055
失效位移/mm	2.000	2.000	2.500	2.500

表2 基层材料力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of base materials

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
AC-13	1 200	0.25
AC-16	1 150	0.25
ATB-25	1 050	0.25
水泥稳定碎石	1 000	0.20
二灰土	700	0.30
路基	45	0.35

3 计算结果

3.1 不同措施、厚度和水平力系数的力学响应影响

通过对精铣刨、胶粉改性沥青、SBS改性沥青、基质沥青处治下的基层层间应力分布状况计算,得到粘结层内主应力分布规律,如图4所示。

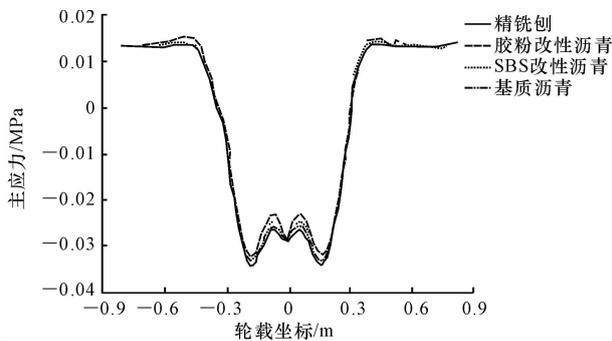


图4 不同处治工艺下粘结层主应力分布曲线

Fig. 4 Principal stress distribution curves under different treatments

由图4可知:行车荷载作用下,基层层间车轮正下方处于受压状态,车轮外侧则处于受拉状态;精铣刨、胶粉改性沥青、SBS改性沥青、基质沥青处治下层间压应力呈增大趋势,拉应力不断减小,其中最大压应力增幅分别为3.2%、6.3%、9.6%;最大拉应力衰减幅度分别为4.6%、7.2%、9.8%;由于沥青混合料为典型的受拉破坏材料,压应力的变化对层间寿命的影响远小于拉应力,因此从应力分布的角度分析可以认为,层间处治措施的效果对比排序为精铣刨、胶粉改性沥青、SBS改性沥青、基质沥青。

通过对不同路面厚度及水平力系数工况下的力学响应计算,得到结构层内剪应力及面层底主应力分布规律,如图5、图6所示。

由图5、图6可知:当沥青面层厚度以5 cm为梯度,从10 cm增加到25 cm时,基层层间最大拉应力值依次为0.019、0.015、0.012和0.007 MPa,分别降低21.1%、36.8%、63.2%;当水平力系数以0.1为梯

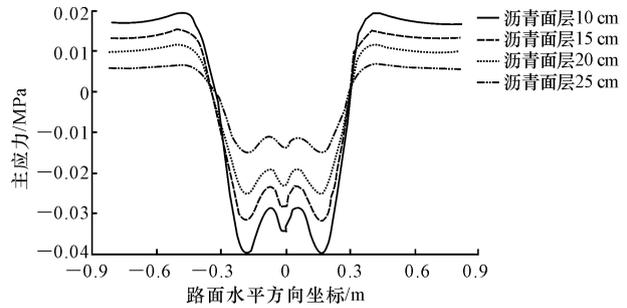


图5 不同沥青面层厚度下层间主应力分布曲线

Fig. 5 Principal stress distribution curves under different asphalt pavement thicknesses

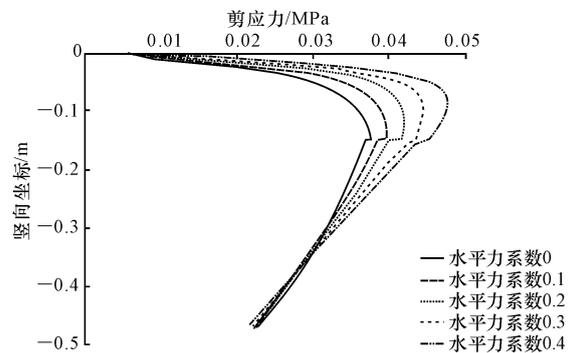


图6 不同水平力系数下粘结层剪应力分布曲线

Fig. 6 Principal stress distribution curves under different horizontal load coefficients

度,从0增大到0.4时,路面结构层内最大剪应力值依次为0.038、0.040、0.042、0.045和0.048 MPa,分别增加了5.26%、10.52%、18.4%、26.3%,同时最大剪应力出现位置从面层下15 cm抬升至9 cm处。

由计算结果可知:沥青面层厚度越薄,水平力系数越大的路段(长大纵坡及平面交叉口),其基层层间受力状态越差;采取精铣刨、胶粉改性沥青等层间粘结状态较强的措施进行处治,能收到较好处治效果;当面层厚度足够大,或水平力系数较小的情况下,一般的基层层间处治措施,也能满足其路用性能。

3.2 层间损伤分析

正常轴载作用下(轮胎接地压力0.7 MPa)4种材料基本都未达到初始损伤应力,损伤因子值均为1,因此不再分析,取超载50%、100%、150%(轮胎接地压力1.05、1.40和1.75 MPa)工况下粘结层损伤状况进行计算,损伤因子为0表示完全脱层破坏,损伤因子为1表示未达到初始损伤应力,如下页图7~图9所示。

由图7~图9可知:随着超载不断增加,基层层间损伤不断加剧,超载150%情况下基质沥青处治

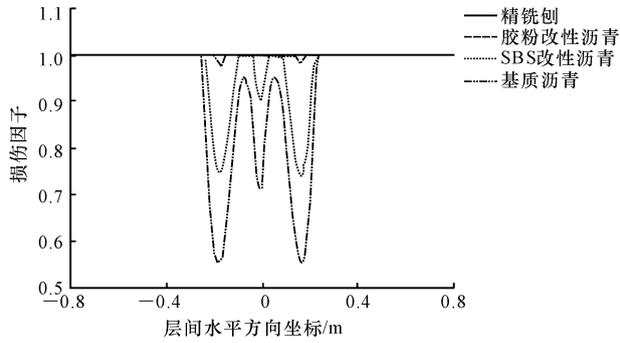


图 7 超载 50% 工况下层间损伤因子状况

Fig. 7 Damage factor status under 50% overload

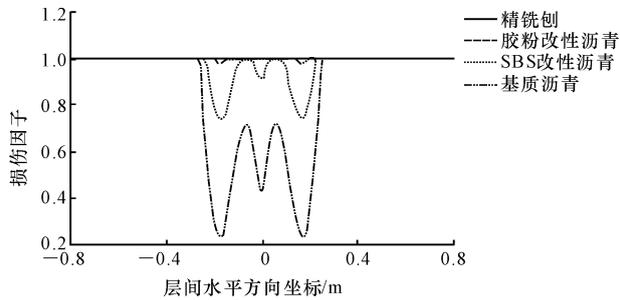


图 8 超载 100% 工况下层间损伤因子状况

Fig. 8 Damage factor status under 100% overload

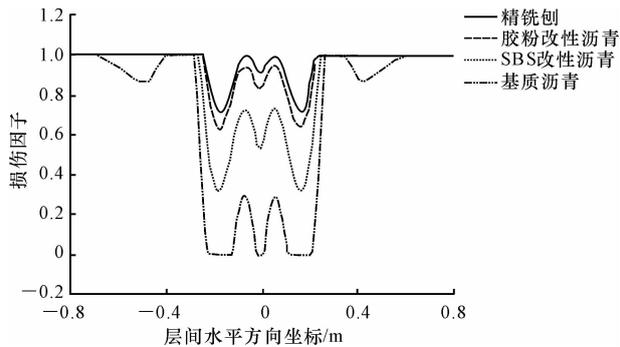


图 9 超载 150% 工况下层间损伤因子状况

Fig. 9 Damage factor status under 150% overload

的基层层间,在轮载正下方已出现严重脱层;4 种处治措施对比可知,精铣刨处治效果最佳,在超载 50% 及 100% 工况下,层间基本未出现损伤,超载 150% 工况下轮载正下方及轮隙中心处才开始出现损伤破坏,胶粉改性沥青层间粘结性能次之,其后为 SBS 改性沥青,基质沥青最差。

4 室内试验

为研究不同处治措施下层间强度发展规律,并验证所建模型的合理性,室内制作了 4 块双层基层间接触试件,其中 3 块试板分别撒布胶粉改性沥青、SBS 改性沥青、基质沥青等透层材料;第 4 块试板刻深度为 2~5 mm 刻槽以模拟精铣刨处治,如图

10 所示,刻槽部位细部结构如图 11 所示。

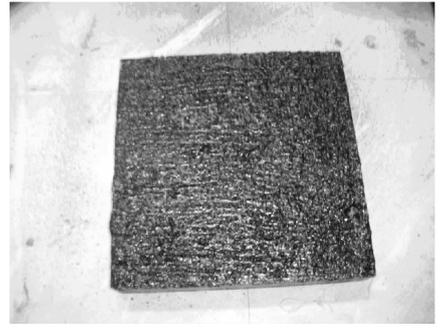


图 10 透层油处治基层

Fig. 10 Base course treated with priming oil

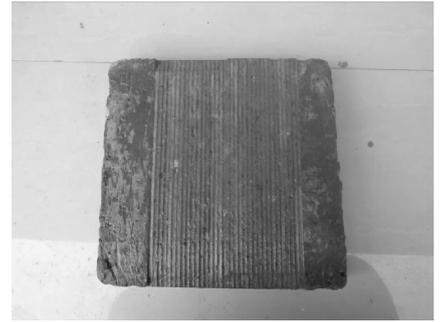


图 11 精铣刨处治基层

Fig. 11 Base course treated with fine milling

试板经上述处治后,覆盖 8 cm 混合料面层并进行振捣压实,如图 12 所示;最后经钻芯取样,得到基层层间结合试件,如下页图 13 所示。



图 12 放置混合料并击实

Fig. 12 Paving asphalt and compacting

采用下页图 14 所示的直剪试验系统,直剪仪以 1 cm/min 的速率对试件进行直剪试验。建立直剪试验有限元模型,如下页图 15 所示。直剪试验结果如下页图 16 所示。采用本文提供的 20 °C 材料参数进行仿真分析,得出各处治措施下的层间粘结强度预估曲线,如下页图 17 所示。

由图 16 与图 17 对比可知:基层层间剪切试验预估值与试验值基本吻合,最大误差为 8.2%,强度



图 13 钻芯取样后的试件

Fig. 13 Test piece after coring



图 14 直剪试验系统

Fig. 14 Shear test system

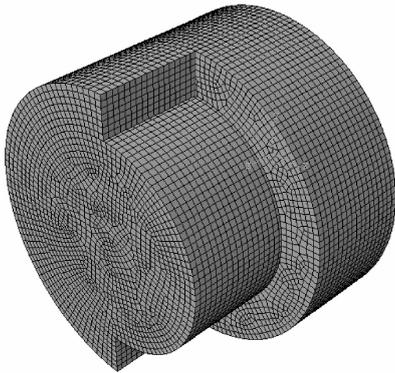


图 15 直剪试验仿真

Fig. 15 Shear test system simulating

峰值出现时间误差为 10.5%，说明本文采用的计算模型及材料本构关系能较好地反映基层间真实粘结状况，且能动态地反映基层间从接触到破坏的整个过程，能很好地满足工程要求。

5 结语

(1) 采用脱层失效层间接触模型与传统摩擦接触模型相比，能同时考虑层间材料模量、厚度、损伤等因素对道路结构内力学分布的影响，能动态反映粘结界面的强度损失，更能真实描述沥青面层与半

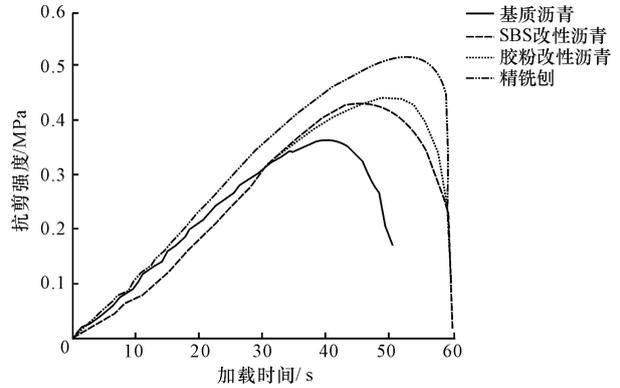


图 16 不同处治措施下基层间强度试验曲线

Fig. 16 Layer strength curve under different treatments

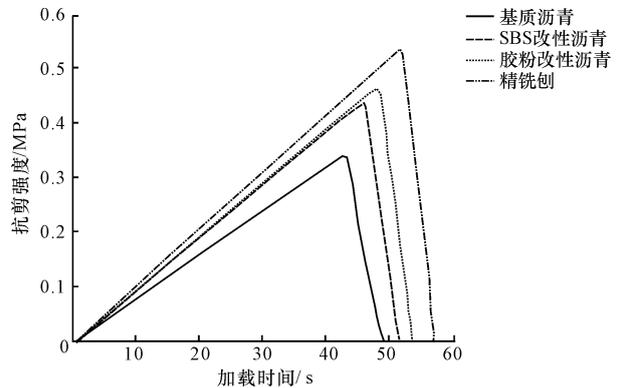


图 17 基层间不同处治措施下强度预估曲线

Fig. 17 Layer strength prediction curves under different treatments

刚性基层间的受力状态。

(2) 通过对精铣刨、胶粉改性沥青、SBS 改性沥青、基质沥青处治下的基层间应力分布状况计算，认为对路面厚度较薄、水平力系数较大的路段，采取精铣刨、胶粉改性沥青等层间粘结状态较强的措施进行处治，能收到较好的处治效果；当面层厚度足够大，或水平力系数较小的情况下，一般的基层间处治措施，也能满足其路用性能。

(3) 与传统层间摩擦接触模型相比，脱层失效理论具有预估精度高、能动态反映损伤对路面受力影响等诸多优势，但同时应看到，沥青混合料作为一种高度不均匀的离散体，其损伤参数取值困难，且由于目前混合料损伤失效方面研究较少，相关试验缺乏统一标准，这些都导致该方法在路面数值分析的应用中受到一定阻碍。但相信随着混合料损伤相关试验标准的不断完善及试验数据的不断累积，该方法一定能在路面层间结构数值分析中得到更为广泛的应用。

参考文献:

References:

- [1] 关昌余,王哲人,郭大智.路面结构层间结合状态的研究[J].中国公路学报,1989,2(1):70-80.
GUAN Chang-yu, WANG Zhe-ren, GUO Da-zhi. A study of contact conditions of interfaces in pavement layers [J]. China Journal of Highway and Transport, 1989, 2(1): 70-80. (in Chinese)
- [2] 黄宝涛,廖公云,张静芳.半刚性基层沥青路面层间接触临界状态值的计算方法[J].东南大学学报:自然科学版,2007,37(4):666-670.
HUANG Bao-tao, LIAO Gong-yun, ZHANG Jing-fang. Analytical method of interlayer contact fettle in semi-rigid-base bituminous pavement [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(4): 666-670. (in Chinese)
- [3] 郭乃胜,李秀飞,赵颖华,等.周期荷载作用下沥青路面层间性能及永久变形分析[J].大连海事大学学报,2010,36(2):100-104.
GUO Nai-sheng, LI Xiu-fei, ZHAO Ying-hua, et al. Analysis of interface behaviors and permanent deformation of asphalt pavement under periodic load [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, 36(2): 100-104. (in Chinese)
- [4] 汪水银.半刚性基层与沥青面层粘结性能影响因素[J].交通运输工程学报,2010,10(2):13-19.
WANG Shui-yin. Influence factors of bond performance between asphalt surface layer and semi-rigid base [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2): 13-19. (in Chinese)
- [5] 郭红兵,陈拴发.沥青路面热-荷载耦合应力数值分析[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):15-19.
GUO Hong-bing, CHEN Shuan-fa. Numerical analysis of temperature load coupling stress for asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 15-19. (in Chinese)
- [6] Osman N Y, McManus K J, Tran H D, et al. The prediction of damage condition in regards to damage factor influence of light structures on expansive soils in Victoria [J]. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 2007, 14(2), 331-343.
- [7] Chandra N, Li H, Shet C, et al. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(10): 2827-2855.
- [8] Anyfantis K N, Tsouvalis N G. A novel traction-separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(1): 213-226.
- [9] Park K, Paulino G H, Roesler J R. A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2009, 57(6): 891-908.
- [10] 李晓军,张肖宁.沥青混合料破损动态识别研究进展[J].长安大学学报:自然科学版,2003,23(6):11-14.
LI Xiao-jun, ZHANG Xiao-ning. Advances on dynamic discrimination of asphalt mixture damage [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(6): 11-14. (in Chinese)
- [11] Davis G. Impact damage prediction in carbon composite structures [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995(16): 149-170.
- [12] 李彦伟,穆柯,石鑫,等.沥青路面基层层间结合状态数值分析[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2012,45(5):461-467.
LI Yan-wei, MU Ke, SHI Xin, et al. Numerical analysis on cohesion between base and surface courses of asphalt pavement [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2012, 45(5): 461-467. (in Chinese)
- [13] 郑健龙,田小草,应荣华.沥青混合料热粘弹性本构模型的实验研究[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2004,1(1):1-7.
ZHENG Jian-long, TIAN Xiao-ge, YING Rong-hua. A laboratory research on the thermo-viscoelastic constitutive model of bituminous mixtures [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2004, 1(1): 1-7. (in Chinese)

