

旧水泥路面沥青加铺改造中弯沉指标研究

单景松^{1,2}, 郭忠印¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 山东科技大学 土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 使用有限元方法建立旧水泥混凝土路面模型, 采用弹簧单元模拟水泥路面接缝处荷载传递性能, 分析了接缝两侧水泥混凝土板的弯沉差和平均弯沉随弹簧单元弹性系数的变化规律. 在此基础上, 建立水泥路面沥青加铺层模型. 计算发现, 沥青加铺层底部在原水泥路面接缝处存在剪应力集中现象, 进而分析了旧水泥路面接缝处沥青加铺层底部的剪应力随弯沉差的变化规律. 根据莫尔-库仑强度理论, 以沥青加铺层底部的剪应力不大于其容许剪切强度为判断标准, 提出旧水泥混凝土路面的弯沉差指标. 此指标在旧水泥路面沥青加铺改造时可作为评价接缝传荷能力的参考依据.

关键词: 接缝水泥混凝土路面; 沥青加铺层; 弯沉指标; 接缝弯沉; 弹簧单元; 沥青层层底剪应力

中图分类号: U 416.2

文献标识码: A

Deflection Criterion at the Joint of Existing JPCP Pavement Overlayed with HMA

SHAN Jingsong^{1,2}, GUO Zhongyin¹

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: When hot mixture asphalt(HMA) is used to remedy functional or structural deficiencies of existing joint plain concrete pavement (JPCP), reflection cracking is a major distress mode in HMA overlay. The basic mechanism of reflection cracking is the propagation of cracks through the overlay due to deflection difference at the joints vicinity of the existing pavements. The model of JPCP was created by three finite element method and the relationship between joint deflection difference and effects such as base modulus, elastic coefficient of spring elements was discussed. Based on the model of JPCP, the finite element model of asphalt overlay was created then and shear stress concentration phenomenon was founded at the bottom of HMA where was just above the joint

of JPCP. So, the rule of the shear stress at the bottom of HMA with deflection difference was studied. According to Coulomb strength theory and shear fatigue equation of asphalt concrete, the criterion of deflection difference of existing JPCP was put forward by the method that allowable shear stress was less than ultimate strength. The criterion can provide reference for evaluating the transfer ability of JPCP when the asphalt concrete over JPCP is adopted.

Key words: joint plain concrete pavement; asphalt overlay; deflection criterion; deflection at the joints; spring element; shear stress at the bottom of asphalt overlay

对旧水泥混凝土路面改造时, 沥青加铺结构可明显改善其舒适性, 同时具有对原路面结构利用充分、造价低廉、影响交通较小等优点, 所以获得了广泛的应用. 但是, 沥青加铺结构使用过程中在原水泥路面接缝处很容易产生反射裂缝, 严重影响加铺层的使用寿命, 因此, 设计沥青加铺层时对反射裂缝的控制是一项重要的指标. 相关研究^[1-4]表明, 荷载的反复作用是反射裂缝出现的重要诱因. 在荷载作用过程中, 原水泥路面接缝处两侧板边弯沉差过大导致沥青层底面应力过大而开裂, 而后裂缝向加铺层表面扩展形成路表裂缝. 针对沥青加铺层的这种破坏模式, 设计时应将重点放在对原水泥路面弯沉差和平均弯沉的控制上. 美国 AASHTO—2002 设计方法^[5]对原路面已有裂缝随时间变化扩展到加铺层表面的比率(百分率)给出了经验公式

$$C_R = 100 / (1 + e^{p+qt}) \quad (1)$$

式中: C_R 为反射裂缝百分率; t 为时间, 年; p, q 均为拟和参数, 如表 1 所示, 表中 h_{ac} 为加铺层厚度.

根据此经验公式模型, 可计算出不同加铺层厚度、不同传荷能力下的反射裂缝随时间出现的百分

收稿日期: 2009-12-14

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11z235)

第一作者: 单景松(1978—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为路面结构计算与设计. E-mail: cyhsjs@163.com

通讯作者: 郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为道路安全工程. E-mail: zhongyin@tongji.edu.cn

率,如表 2. 由表可知,相同加铺厚度下,原路面接缝的传荷能力对反射裂缝出现的速度有很大影响.

美国沥青协会(AI)设计沥青加铺层时,主要以控制原水泥路面接缝或裂缝处板边平均弯沉和弯沉差为设计要求. 其标准为(W_l, W_u 分别为加载侧与非加载侧弯沉)

弯沉差 $(W_l - W_u) \leq 0.05 \text{ mm}$

平均弯沉 $(W_l + W_u)/2 \leq 0.36 \text{ mm}$

表 1 反射裂缝模型参数
Tab.1 Reflection cracking model parameters

原路类型	传荷能力	p	q
柔性路面		$3.5 + 0.75 h_{ac}$	$-0.688\ 584 - 3.373\ 02 (h_{ac})^{-0.915\ 469}$
刚性路面	良好	$3.5 + 0.75 (h_{ac} - 1)$	$-0.688\ 584 - 3.373\ 02 (h_{ac} - 1)^{-0.915\ 469}$
刚性路面	较差	$3.5 + 0.75 (h_{ac} - 3)$	$-0.688\ 584 - 3.373\ 02 (h_{ac} - 3)^{-0.915\ 469}$

注:由于引用自美国标准,故 h_{ac} 的单位为英寸. 1 英寸为 2.54 cm.

表 2 反射裂缝百分率对比
Tab.2 Comparison of reflection cracking %

$h_{ac} = 101.6 \text{ mm}$			$h_{ac} = 203.2 \text{ mm}$		
使用年数	传荷能力良好	传荷能力较差	使用年数	传荷能力良好	传荷能力较差
1	45.30	2.13	1	0.06	0.31
2	97.90	12.90	2	0.20	1.30
3	99.90	50.40	3	0.60	5.30
4	100.00	87.40	4	2.30	19.70
5	100.00	97.90	5	7.80	51.40
6	100.00	99.60	6	22.90	82.00
7	100.00	99.90	7	51.10	95.10
8	100.00	99.90	8	78.60	98.80
9	100.00	100.00	9	92.80	99.70
10	100.00	100.00	10	97.80	99.90

AI 设计方法中的标准轴载为 80 kN,而我国采用的车辆标准轴载为 100 kN^[6]. 所以,我国规范建议加铺沥青层前原水泥路面弯沉差不大于 0.06 mm,平均弯沉不大于 0.45 mm. 若不满足此要求,应将原板打裂或打碎后再补强处理. 美国以往规范^[7-8]中,对旧水泥路面改造中的接缝弯沉也有一定要求.

可见,各国在旧水泥路面沥青加铺改造设计时,已经对原有路面接缝处的弯沉差和平均弯沉情况足够重视. 但以往提出的弯沉指标或公式多为经验性的,难以适应路面结构变化的各种情况. 笔者采用理论方法探讨接缝处弯沉受接缝传荷能力、地基支撑情况的影响,并根据加铺层的受力提出相应的弯沉指标.

1 有限元计算模型

1.1 接缝水泥混凝土路面模型

混凝土板间横缝宽度只有 0.3~0.8 cm,相对于板和地基的尺寸较小,在横缝位置划分的地基有限元单元网格各边长度过于悬殊,易导致计算结果不准确. 但若过于强调单元尺寸协调,在横缝位置划分的单元尺寸会过小过密,对三维模型会加大计算工作量,致使计算速度太慢,难以完成考虑多种变化因素

的计算. 另外,大多数文献建立混凝土路面模型时,混凝土板跟基础之间通常采用两种处理方式,一种直接考虑为完全连续,另一种考虑为水平向滑动、竖向完全连续. 这两种方式都不利于混凝土板接缝处局部位移的计算,因为车辆荷载作用下,接缝处非加载板与地基可能脱开,特别是传荷能力较弱时,加载板弯沉较大,而非加载板弯沉较小,板与地基更易脱开. 为了克服以前建模分析的不足,现借助 ANSYS 平台,对板与基础采用面一面接触模型分析计算.

在 ANSYS 中,面一面接触单元^[9]可以使用拉格朗日算法和罚函数方法,两种方法都需要指定法向和切向的接触刚度. 法向接触刚度控制着接触材料的渗入值,过大的接触刚度可能会引起总刚矩阵的病态,造成收敛困难,所以应选取足够大的接触刚度以保证接触渗透小到可以接受,但又应该让接触刚度小到不会引起总刚矩阵的病态,保证收敛性. 通过试算,取接触因子 f_{kn} 为 1. 切向刚度以水平向不产生相互滑移为假定条件,设置摩擦为粗糙形式.

图 1 中,车轮荷载接地形状为双矩形,尺寸为 22 cm×16 cm,水泥混凝土板抗压回弹模量取 28 GPa,路基顶面当量回弹模量为变量,用符号 E_t 表示.

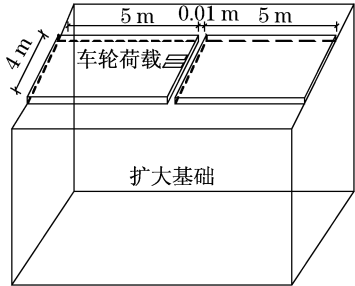


图 1 接缝水泥混凝土路面示意图
Fig.1 Sketch of JPCP

1.2 接缝传荷模型

在混凝土板横缝处设置多个竖向弹簧,通过控制弹簧的弹性系数来模拟接缝传荷能力. 如图 2,3

所示,沿板宽度为 b 的区域上分布着一列共 n 个节点,每个节点都分布着如图3所示的弹簧单元.下面推导弹簧弹性系数 k_s 的取值范围,为便于推导,假设板间接缝宽度为零.

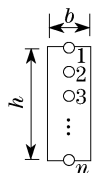


图2 接缝横断面节点
Fig.2 Node at the transverse joint

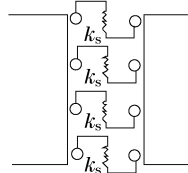


图3 接缝两侧剪切弹簧
Fig.3 Shear spring at the transverse joint section

若板间剪应力为 τ , 则有关系式

$$\tau b h = n k_s \Delta \quad (2)$$

$$\Delta = \gamma h \quad (3)$$

式中: k_s 为弹簧弹性系数; Δ 为接缝处两侧板对应节点竖向位移差; γ 为板间剪切应变; h 为板厚.

将式(3)代入式(2), 得

$$\tau b h = n k_s \gamma h \quad (4)$$

移项得

$$k_s = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \frac{b}{n} = G \frac{b}{n} = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \frac{b}{n} \quad (5)$$

因此, 当 k_s 达到式(5)中数值时, 可认为接缝处材料跟两侧混凝土材料相同, 荷载作用下接缝两侧无竖向位移差. 将混凝土材料参数代入式(5), k_s 接近 $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. 因此, 计算时 k_s 取值区间为 $0 \sim 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

1.3 旧水泥路面接缝处弯沉分析

通过设定不同的接缝弹簧单元弹性系数 k_s , 计算水泥路面. 接缝处变形如图4a, b所示. 可以看出, 当 k_s 较小, 接缝两侧弯沉差别较大, 说明此时接缝传荷能力较差; k_s 较大时, 两侧弯沉差较小, 传荷能力较强. 下面根据图5, 6的计算结果, 对接缝处弯沉和 k_s 关系详细讨论.

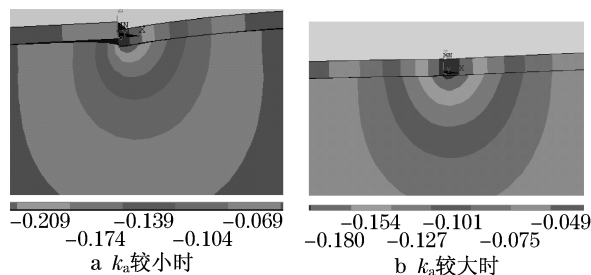


图4 不同 k_s 时的接缝处弯沉(单位:mm)

Fig.4 Joint deflection with poor load transfer(unit:mm)

1.3.1 弯沉变化规律

从图5a, b加载侧和非加载侧弯沉半对数曲线可以看出, $\lg k_s$ 从零变化到4的过程中, 接缝两侧弯沉值变化较小; 随着 $\lg k_s$ 的继续增大, 加载侧弯沉快速减小, 非加载侧弯沉快速增大; 当 $\lg k_s$ 增大至7.5直到其最大取值8.0段, 接缝两侧弯沉趋于稳定. 这种变化规律说明: 水泥混凝土路面修筑完成以后, 在开始使用阶段, 虽然板间抗剪性能不断下降, 但是在接缝弯沉值上的反应却不大; 随抗剪性能的继续下降, 接缝处弯沉步入快速变化阶段, 反映出的现象为接缝处弯沉差的快速增加; 当抗剪性能降到一定程度以后, 尽管接缝处材料还具有一定咬合能力, 但通过弯沉检测得到的传荷能力已相当低, 接近于无传荷水平.

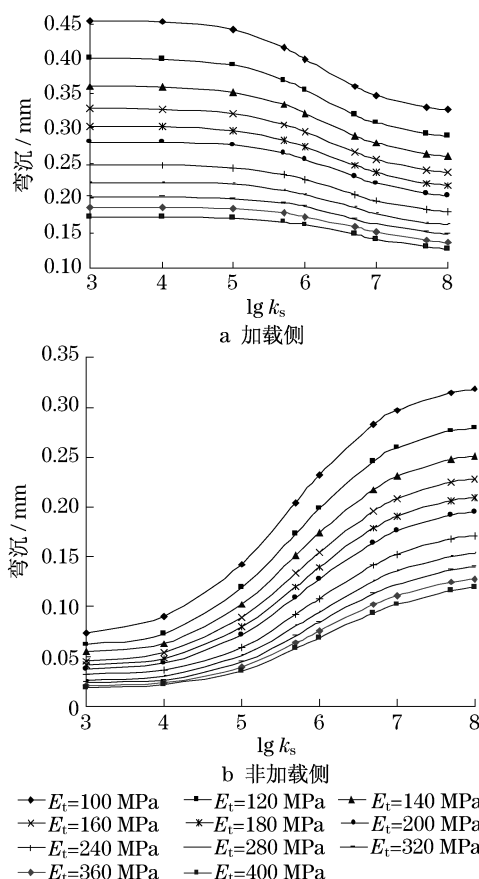


图5 弯沉随 $\lg k_s$ 变化规律

Fig.5 Law of deflection with $\lg k_s$

1.3.2 脱空识别方法

计算结果是依据完整且基层无脱空路面板模型而得到的, 但实际检测中脱空情形经常存在. 因本计算结果没有考虑脱空情况, 所以无法判断脱空的具体尺寸. 但是, 利用本计算结果可以初步判断是否存在

在脱空,以利于采取有效措施进行处置.脱空判断可依据下步骤进行:

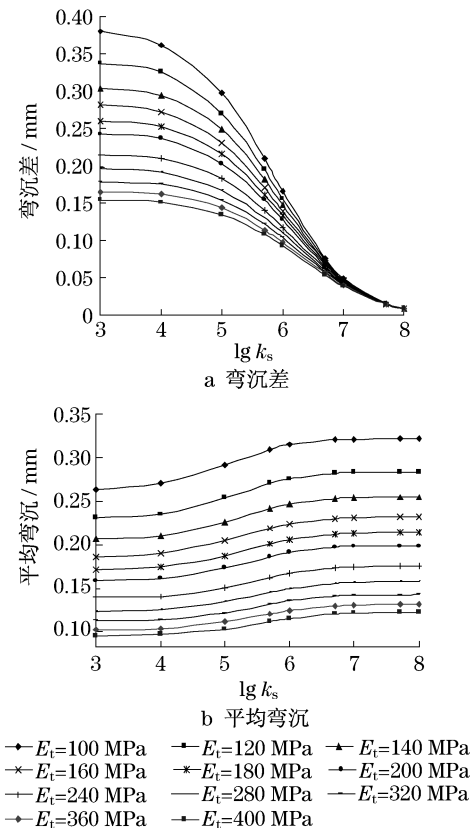


图6 接缝处弯沉随 $\lg k_s$ 变化规律

Fig.6 Law of Joint deflection with $\lg k_s$

步骤一,实测板边弯沉值.

步骤二,参照《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002),采用落锤式弯沉仪,量测板中荷载下的弯沉曲线,按式(6)计算基层顶面当量回弹模量

$$E_t = 100e^{3.6+24.03w_0^{-0.057}-15.63I_s^{0.222}} \quad (6)$$

$$I_s = (w_0 + w_{300} + w_{600} + w_{900})/w_0$$

式中: E_t 为基层顶面当量回弹模量标准值,MPa; I_s 为路面结构荷载扩散系数; $w_0, w_{300}, w_{600}, w_{900}$ 分别为荷载中心、距荷载中心 300, 600, 900 mm 处弯沉值.

步骤三,根据步骤二中得到的 E_t ,在图 5a 中找到此值对应的加载侧弯沉曲线.以步骤一实测加载侧弯沉值与图 5a 中对应曲线相比较.可分下面两种情况判断脱空是否存在:①若实测值大于曲线所有值,则存在;②若实测值在曲线上某一位置,找到此位置对应的弹簧弹性系数值,以此系数代入图 5b,在步骤一得到的 E_t 曲线上查得对应非加载侧弯沉值.若查得的非加载侧弯沉值与实测的比较接近,则认为不存在脱空;反之则存在脱空.

2 旧水泥混凝土路面弯沉指标分析

2.1 接缝处沥青加铺层底面剪应力变化规律

在建立的接缝水泥混凝土路面模型基础上,直接将不同厚度的沥青混凝土材料加铺其上(图 7),以分析接缝传荷性能对沥青加铺层受力的影响,并假设沥青加铺层与旧水泥路面之间的层间特性为完全连续状态.通过试算,接缝传荷性能的变化对沥青加铺层剪应力影响最大,当传荷性能较差时,接缝处剪应力明显增大,如图 8 所示.因此,重点分析旧水泥路面不同传荷性能下,沥青加铺层层底竖向剪应力的变化规律.

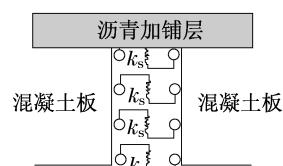


图7 沥青加铺层示意图
Fig.7 Sketch of asphalt overlay

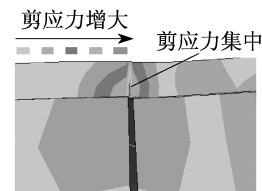


图8 接缝处沥青加铺层底面剪应力
Fig.8 Shear stress of asphalt overlay

将接缝处沥青加铺层层底剪应力的计算结果汇于图 9 中.从中可知,在不同加铺层厚度情况下,随弯沉差变化,加铺层底面接缝处剪应力有基本相同的变化规律.即弯沉差较小时,随弯沉差增大,面层剪应力迅速增加;当弯沉差增加到一定程度以后,剪应力呈现缓慢增加趋势.这种变化规律说明,加铺沥青层时,若原水泥路面接缝处传荷情况非常好,沥青加铺层反射裂缝开裂寿命主要依赖原水泥路面接缝处传荷能力衰减的速率;若弯沉差处于较高水平,那么沥青加铺层的剪应力从开始加铺就处于持续较高的水平,反射裂缝出现的速率就会比较快,此时加铺层的开裂寿命主要依赖于加铺层的厚度.但通过增加加铺层的厚度来延缓剪切型反射裂缝的出现是不经济的.因此,加铺沥青层之前严格控制原水泥路面接缝处弯沉差是延缓反射裂缝出现的最有效措施.

2.2 基于剪切开裂的旧水泥路面接缝弯沉指标

(1) 莫尔-库仑强度理论

沥青加铺层材料属颗粒材料,对其验算抗剪强度时,可采用莫尔-库仑强度理论^[4],即使路面结构不发生剪切破坏,应限制其结构内的剪应力 τ_a 不超过结构层材料的抗剪强度.即

$$\tau_{\alpha} \leq \tau \quad (7)$$

式中,抗剪强度 τ 由库仑理论得

$$\tau = c + \sigma_{\alpha} \tan \varphi \quad (8)$$

式中: σ_{α} 为结构层可能破坏面上的正应力; c 和 φ 分别为材料的粘聚力和内摩擦角. 沥青混凝土中, c, φ 值可参考文献[10]中三轴实验结果.

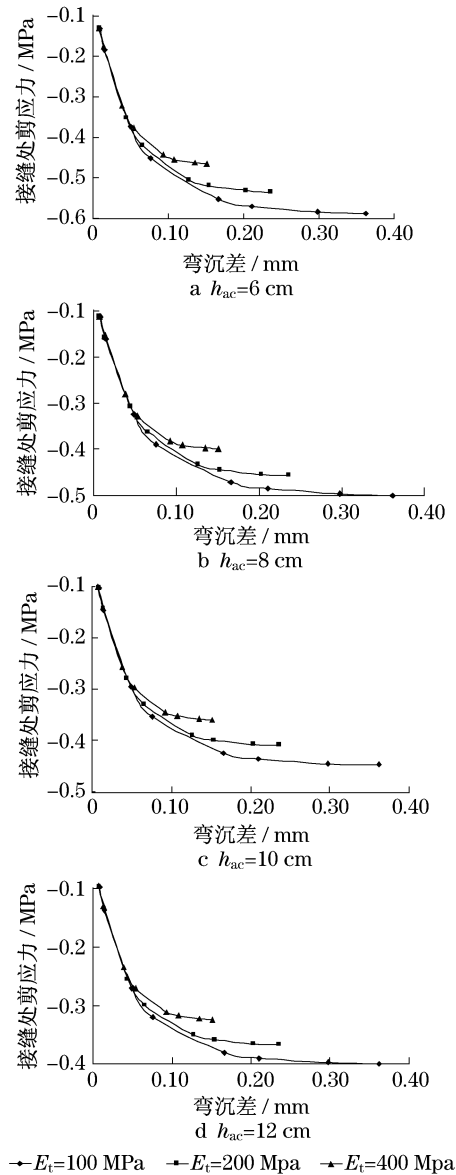


图 9 不同 h_{ac} 时弯沉差与剪应力的关系

Fig. 9 Shear stress with h_{ac} and deflection difference

(2) 弯沉差指标确定方法

根据文献[11-14]中剪切疲劳试验所得数据,线性拟合得到剪切疲劳方程,如式(9)所示

$$\lg N_f = -7.5167 \tau_s / \tau_j + 8.8332 \quad (9)$$

式中, τ_s 和 τ_j 分别表示剪应力水平和极限剪应力.

若以式(10)表示极限剪切强度和容许剪切强度

τ_r 之间的关系,则式中系数 K 可根据剪切疲劳方程式得到,如式(11).

$$\tau_r = \tau_j / K \quad (10)$$

$$K = 1.17514 - 0.1331 \lg N_f \quad (11)$$

由前述有限元计算结果知,在原水泥混凝土路面接缝处的沥青层底部,竖向剪应力集中. 根据这一特点,假设沥青层底面剪切型开裂面沿竖直方向,此开裂面上的剪切强度除了与加铺层材料的 c, φ 值相关外,还与垂直于开裂面即水平方向的正应力有关. 以加铺层厚度 10 cm 为例,从有限元计算结果中提取相关数据,根据库仑强度理论,计算加铺层底面的极限剪切强度,列于表 3 中. 另外,根据剪切疲劳方程,可以计算出不同疲劳次数(N)对应的容许剪切强度 τ_r ,一并列表 3.

表 3 沥青加铺层底极限剪切强度和容许剪切强度 ($h_{ac} = 10$ cm)

Tab. 3 Ultimate shear strength and allowable shear strength at the bottom of asphalt overlay ($h_{ac} = 10$ cm)

E_t /MPa	弯沉差/mm	层底水平正应力/MPa	抗剪强度/MPa	τ_r /MPa	
				$N = 10\ 000$	$N = 50\ 000$
100	0.362	-0.182	-0.332	-0.214	-0.183
	0.298	-0.182	-0.332	-0.214	-0.183
	0.210	-0.177	-0.329	-0.211	-0.181
	0.166	-0.172	-0.325	-0.209	-0.179
	0.076	-0.139	-0.301	-0.193	-0.165
	0.049	-0.112	-0.281	-0.181	-0.155
	0.015	-0.041	-0.230	-0.148	-0.126
	0.008	-0.020	-0.215	-0.138	-0.118
200	0.236	-0.210	-0.353	-0.227	-0.194
	0.203	-0.210	-0.353	-0.227	-0.194
	0.154	-0.206	-0.350	-0.225	-0.192
	0.127	-0.202	-0.347	-0.223	-0.191
	0.065	-0.173	-0.326	-0.210	-0.179
	0.044	-0.150	-0.309	-0.199	-0.170
	0.014	-0.085	-0.262	-0.168	-0.144
	0.008	-0.065	-0.247	-0.159	-0.136
400	0.151	-0.214	-0.356	-0.229	-0.196
	0.135	-0.214	-0.356	-0.229	-0.196
	0.108	-0.212	-0.354	-0.227	-0.195
	0.092	-0.208	-0.351	-0.226	-0.193
	0.054	-0.186	-0.335	-0.215	-0.184
	0.038	-0.167	-0.321	-0.206	-0.177
	0.013	-0.111	-0.281	-0.180	-0.154
	0.008	-0.093	-0.267	-0.172	-0.147

将表 3 中极限剪切强度、 $N = 1$ 万时的容许剪切强度同时汇于 $h_{ac} = 10$ cm 的沥青加铺层层底剪应力图中(图 10). 图中,容许剪切强度曲线与计算层底剪应力曲线的相交点所对应的弯沉差即为达到此容许剪切强度曲线疲劳寿命的弯沉差. 可依据此方法判断其他不同加铺层厚度、不同疲劳寿命的弯沉差标准. 具体结果列于表 4 中.

从表 4 知,加铺层厚度对弯沉差指标影响不大.

说明加铺层底部开始出现剪切型开裂的疲劳寿命基本上不受加铺层厚度的影响,弯沉差指标可依据板底基础的当量回弹模量和所需的疲劳开裂次数在表 4 中线性插值得得.

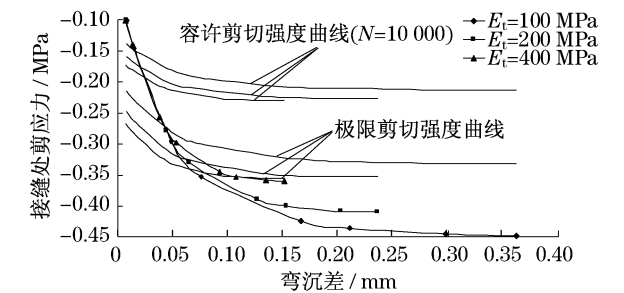


图 10 计算层底剪应力与容许剪应力强度曲线
Fig.10 Curve of calculated shear stress and allowable shear stress strength

表 4 弯沉差标准

Tab.4 Criterion of deflection difference mm				
E_t /MPa	$h_{ac}=6\text{ cm}$		$h_{ac}=10\text{ cm}$	
	$N=10\ 000$	$N=50\ 000$	$N=10\ 000$	$N=50\ 000$
100	0.017	0.012	0.016	0.010
200	0.021	0.015	0.020	0.015
400	0.025	0.017	0.025	0.018

3 结语

本研究表明,加铺层底部开始出现剪切型开裂的疲劳寿命基本上不受加铺层厚度的影响;而已有研究表明,加铺层厚度对剪切裂缝的疲劳扩展阶段寿命影响较大,较厚的加铺层厚度可延缓剪切裂缝扩展到路表面的时间.本文弯沉差标准提出的主要依据为加铺层底面开裂寿命,并未考虑剪切裂缝扩展阶段寿命.加铺层扩展阶段的疲劳寿命与原水泥路面弯沉差之间的关系需要进一步研究,通过底面开裂寿命和裂缝扩展寿命两阶段寿命之和来提出旧水泥路面的弯沉差标准将更加全面.

参考文献:

[1] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院,2003
ZHOU Zhigang. A research on the fatigue damage cracking in asphalt pavement under traffic load [D]. Changsha: Central South University. School of Engineering & Architecture,2003.
[2] 杨斌. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2005.
YANG Bin. Research on structure of asphalt overlay on old

concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University. School of Highway,2005.
[3] 周富杰,孙立军. 反射裂缝的足尺疲劳试验研究及其力学分析[J]. 土木工程学报,2001,34(3):45.
ZHOU Fujie, SUN Lijun. Laboratory study on the reflective cracking in asphalt overlays [J]. China Civil Engineering Journal,2001,34(3):45.
[4] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
DENG Xuejun. The subbase and pavement construction[M]. Beijing:China Communications Press,2005.
[5] NCHRP. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, project 1 - 37A [S]. Washington D C: Transportation Research Board of National Research Council,2004.
[6] 中华人民共和国交通部. JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D50—2006 Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. Beijing:China Communications Press,2006.
[7] AASHTO. Guide for design of pavement structures [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials,1993.
[8] National Asphalt Pavement Association. Guidelines for use of HMA overlays to rehabilitate PCC pavements [S]. Lanham: NAPA,1994.
[9] 张朝晖. ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
ZHANG Chaohui. Structural application and example of ANSYS 11.0[M]. Beijing:China Machine Press,2008.
[10] 朱浩然,杨军,陈志伟. 沥青混合料抗剪性能的三轴剪切试验[J]. 交通运输工程学报,2009,9(3):19.
ZHU Haoran, YANG Jun, CHEN Zhiwei. Triaxial shear test on anti-shear properties of asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(3):19.
[11] 何桥敏. 沥青混合料剪切疲劳性能试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学交通运输工程学院,2009.
HE Qiaomin. The research on fatigue experiment for shear properties of asphalt concrete [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology. School of Traffic and Transportation Engineering,2009.
[12] 郭芳. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层荷载剪切试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学交通运输工程学院,2007.
GUO Fang. The Experiment Research on load shear performance of asphalt overlay on existing concrete pavement [D]. Changsha: School of Traffic and Transportation Engineering. Changsha University of Science and Technology,2007.
[13] 彭勇,孙立军. 沥青混合料抗剪强度的影响因素[J]. 东南大学学报,2007,37(2):330.
PENG Yong, SUN Lijun. Influence factors of shear resistance of asphalt mixture[J]. Journal of Southeast University, 2007, 37 (2):330.
[14] 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,2005(8):1036.
BI Yufeng, SUN Lijun. Research on test method of asphalt mixture's shearing properties [J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2005(8):1036.