

文章编号:1671-8879(2007)06-0001-05

贫混凝土基层沥青路面荷载应力有限元分析

陈拴发¹, 彭 翀^{1,2}, 王松根³, 马庆雷³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 海南省交通厅, 海南 海口 570204; 3. 山东省公路局, 山东 济南 250002)

摘 要:为了研究贫混凝土沥青路面受力在不同路面结构和材料参数下的状况,通过三维有限元数值分析方法,分析了面层厚度、面层模量、应力吸收层厚度、应力吸收层模量和裂缝宽度对贫混凝土基层沥青面层层底应力的影响。路面结构计算与分析表明:在贫混凝土基层-沥青面层复合式路面结构中,适当增加沥青面层厚度对防治反射裂缝十分有效,而通过提高沥青面层强度的方法来减少反射裂缝效果不明显;一定厚度和模量的应力吸收层能有效降低沥青面层底面应力水平;贫混凝土基层裂缝宽度对沥青面层底面受力具有较大的影响。

关键词:道路工程;贫混凝土基层;沥青路面;反射裂缝;应力;三维有限元

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Finite element analysis of stress caused by load on lean concrete-asphalt overlays composite pavement

CHEN Shuan-fa¹, PENG Chong^{1,2}, WANG Song-gen³, MA Qing-lei³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Communications, Hainan Province Government, Haikou 570204, Hainan, China; 3. Shandong Province Administration of Highway, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: In order to study the stress state of lean concrete-asphalt overlays composite pavement under different road structure and material parameter, a 3D finite element method was used to analyze the effects of the thickness of asphalt overlays, the modulus of asphalt overlays, the thickness of stress absorbing layers, the modulus of stress absorbing layers and the width of lean concrete crack to the bottom stress of asphalt overlays. Calculation and analysis of the pavement construction indicate that: it is effective to avoid reflective cracking in lean concrete-asphalt overlays composite pavement by increasing thickness other than intensity of asphalt overlays; it is also effective to lower the stress lever of the bottom surface of asphalt overlays by set the stress absorbing layers which has stated thickness and modulus; the cracking width of lean concrete base has great effect on the bottom stress of asphalt overlays. 6 tabs, 6 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; lean concrete base course; asphalt pavement; reflective cracking; stress; 3D finite element

收稿日期:2006-06-20

基金项目:山东省交通科技项目(200418Y02)

作者简介:陈拴发(1963-),男,陕西长武人,教授,博士,E-mail:chensf@chd.edu.cn。

0 引 言

研究表明,贫混凝土基层的收缩性大于半刚性基层^[1-2],将其作为基层结构一直受到反射裂缝的困扰,这就制约了贫混凝土基层-沥青面层复合式路面结构的推广应用。自 20 世纪 70 年代以来,国内外道路工程界对于反射裂缝的研究一直很活跃:日本将沥青表面作用的荷载按 45°扩散到混凝土板上,按阿灵顿半经验公式计算板底应力;Punya P K 把 BIMODPAV 程序扩展为可以考虑地基、基层和底基层材料非线性进行路面结构应力计算^[3];中国的长安大学、同济大学、空军工程大学等科研单位利用空间等参元、层状体系理论、断裂力学等理论对复合式路面结构进行了研究,取得了一定成果^[4-5]。本文采用扩大基础的三维有限元分析模型,计算分析了贫混凝土基层-沥青面层的复合式路面结构在行车荷载作用下的应力状况,分析了沥青面层厚度、模量及应力吸收层厚度、模量和贫混凝土基层裂缝宽度对沥青面层反射裂缝形成的作用,为合理进行结构层设计提供了理论依据。

1 结构分析模型及其参数

计算采用的路面结构由沥青面层、模拟层间接触条件的夹层 1、贫混凝土基层、模拟层间接触条件的夹层 2 和基础共 5 层组成。沥青面层、贫混凝土基层和基础等结构层采用三维 8 节点正交各向同性单元;模拟层间接触条件的夹层 1 和夹层 2 采用三维 8 节点正交各向异性单元,其材料模量与贫混凝土模量相同,通过剪切模量的变化,模拟不同的层间接触条件,所取参数见表 1。

表 2 不同沥青面层厚度下沥青面层的应力

面层厚度/cm	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	τ_{xz} /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	τ_{\max} /MPa	σ_e /MPa
10	-1.254	-0.329	-0.342	-0.555	-0.079	-0.328	-1.518	0.720	1.332
12	-0.932	-0.249	-0.312	-0.501	-0.032	-0.248	-1.213	0.590	1.089
14	-0.734	-0.200	-0.290	-0.445	-0.014	-0.199	-1.011	0.499	0.918
16	-0.578	-0.161	-0.267	-0.398	0.007	-0.161	-0.851	0.429	0.787
18	-0.263	-0.080	-0.232	-0.362	0.027	-0.080	-0.611	0.364	0.652
20	-0.352	-0.104	-0.222	-0.325	0.046	-0.105	-0.619	0.332	0.604

注: σ_1 为第一主应力(最大主应力); σ_2 为第二主应力; σ_3 为第三主应力; σ_x 为 x 方向上拉应力; σ_y 为 y 方向拉应力; σ_z 为 z 方向上拉应力; τ_{\max} 为最大剪应力; τ_{xz} 为 xz 面上剪应力; σ_e 为等效应力。

由表 2、图 2 可以看出,随着沥青面层厚度的增加,沥青面层层底 σ_1 略有增大,在沥青面层厚度为 14~16 cm 时,存在 $\sigma_1=0$ 的拉压分界厚度。在沥青面层厚度从 10 cm 增加到 16 cm 时,沥青面层厚

表 1 路面结构几何尺寸及材料计算参数

结构层	几何尺寸($x \times y \times z$)/m	正交各向同性材料	
		E /MPa	ν
沥青面层	10.01×4.5×0.1	1 200	0.25
夹层 1	(5+5)×4.5×0.001	20 000	0.15
贫混凝土层	(5+5)×4.5×0.2	20 000	0.15
夹层 2	(5+5)×4.5×0.001	20 000	0.15
基础	16.01×10.5×9	120	0.30

注:层间完全连续,通过把夹层 1、夹层 2 作为贫混凝土材料来实现;裂缝宽度取 1 cm; E 为模量; ν 为泊松比。

地基采用扩大尺寸模拟,对各结构层作如下假定:①各结构层为均匀、连续的弹性体;②各层层间竖向、水平位移均连续;③地基地面各向位移为 0,地基侧面水平方向位移为 0;④不计路面结构的自重影响;⑤接缝宽度 1 cm,且接缝处无传荷能力。

应力分析时采用 BZZ-100 标准车型,轴重 100 kN,轮压 0.7 MPa,双轮中心距为 32 cm,轮距 182 cm,单个轮压作用范围 18.9 cm×18.9 cm,接触面积为 357.21 cm²,荷载作用于临界荷位,见图 1。

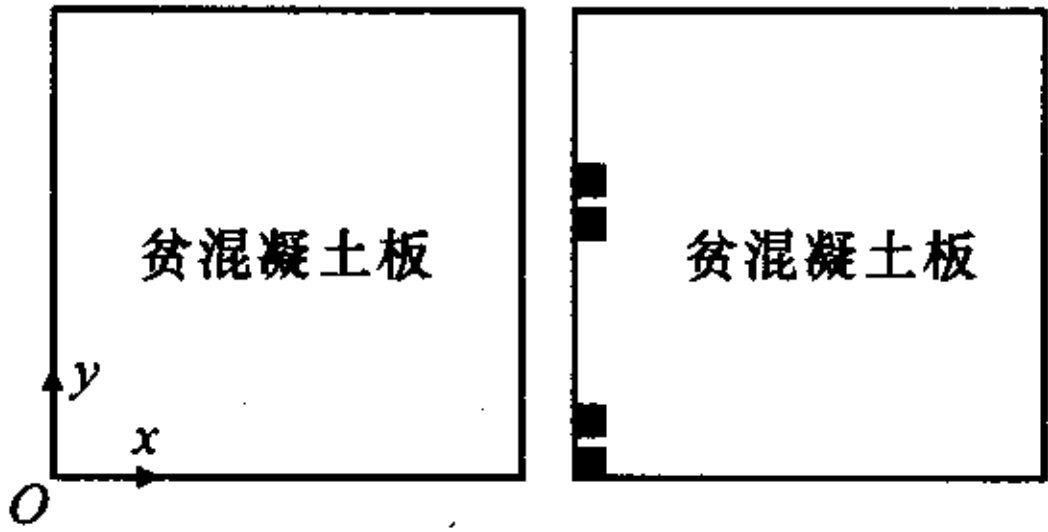


图 1 荷载作用位置

2 荷载应力分析

2.1 沥青面层厚度

沥青面层厚度是进行复合式路面结构设计的重要参数,采用上述力学模型和基本的力学参数,对沥青面层厚度为 10、12、14、16、18、20 cm 的结构层应力分别进行计算,结果如表 2、图 2 所示。

度的变化对沥青面层层底 τ_{\max} 和 σ_e 的影响比较大;沥青面层厚度为 18 cm 时, τ_{\max} 和 σ_e 分别为沥青面层厚度为 10 cm 时的 50.6%和 48.9%;继续增加沥青面层厚度, τ_{\max} 和 σ_e 继续减小,但减小的速度相应

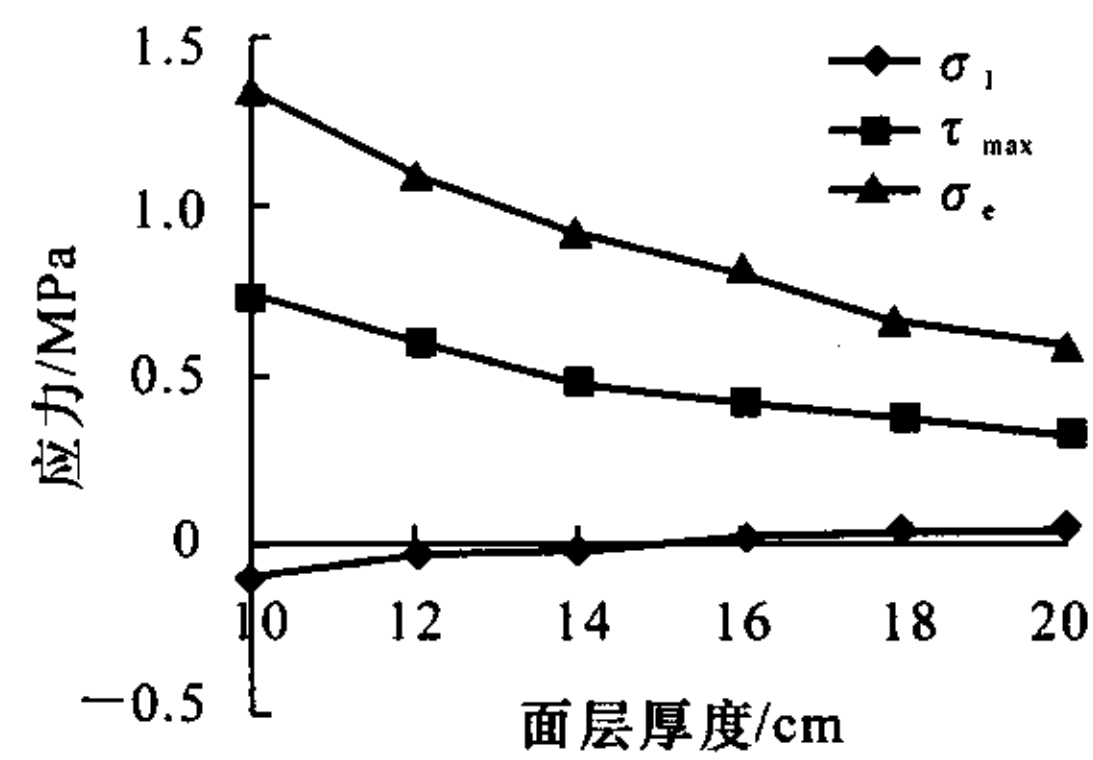


图 2 不同沥青面层厚度下沥青面层中的应力

变小。这表明,如果各结构层保持完全连续,适当增加沥青面层厚度,对降低反射裂缝的形成是十分有效的。

2.2 沥青混合料模量

沥青混合料模量和强度随着温度的变化而变化。研究表明^[6],沥青混合料的模量变化将导致沥青面层对荷载响应的变化。因此,在车辆荷载作用下,不同

季节沥青面层中产生的应力和应变是不同的。
由表 3、图 3 可以看出,随着沥青面层模量的增加,σ₁ 略有增大,在沥青面层模量为 1 600~1 800 MPa 时,存在一拉压分界模量,使沥青面层主应力为 0。对于同一厚度、同一材料的沥青混合料而言,其模量随温度降低而增大,故气温越低,沥青面层内的应力加剧了反射裂缝的扩展。在冬季,气温降低,

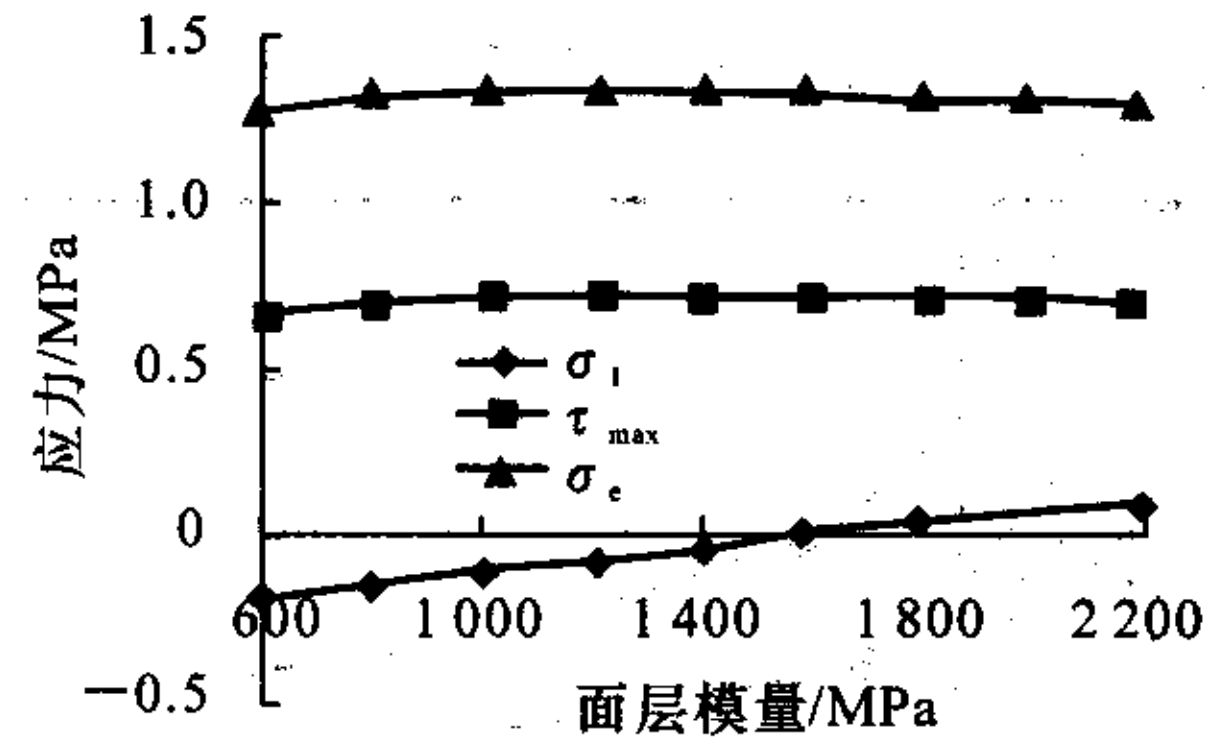


图 3 不同沥青面层模量下沥青面层中的应力

表 3 不同沥青面层模量下沥青面层的应力 MPa

面层模量	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	τ_{\max}	σ_e
600	-1.350	-0.360	-0.358	-0.456	-0.180	-0.359	-1.530	0.675	1.270
800	-1.340	-0.356	-0.354	-0.499	-0.145	-0.354	-1.550	0.703	1.313
1 000	-1.304	-0.344	-0.348	-0.531	-0.112	-0.342	-1.542	0.715	1.330
1 200	-1.254	-0.329	-0.342	-0.555	-0.079	-0.328	-1.518	0.720	1.332
1 400	-1.196	-0.312	-0.335	-0.576	-0.047	-0.311	-1.486	0.720	1.327
1 600	-1.135	-0.294	-0.328	-0.592	-0.015	-0.294	-1.449	0.717	1.317
1 800	-1.071	-0.276	-0.321	-0.607	0.017	-0.276	-1.410	0.714	1.306
2 000	-1.007	-0.258	-0.314	-0.619	0.049	-0.258	-1.370	0.710	1.294
2 200	-0.942	-0.240	-0.308	-0.630	0.081	-0.239	-1.331	0.706	1.282

沥青混合料的模量变大,更易产生反射裂缝。沥青面层模量对沥青面层层底 τ_{\max} 和 σ_e 的影响不大,沥青面层层底 τ_{\max} 和 σ_e 的最大值与最小值分别只相差了 6.6%和 4.8%。因此,如果各结构层保持完全连续,通过提高沥青面层强度的方法来减少反射裂缝其作用并不显著。

2.3 应力吸收层厚度

应力吸收层混合料是一种新型的沥青混合料,属于悬浮密实结构。该混合料沥青用量较大,集料细,矿料用量大,空隙率小,石料基本上悬浮于沥青与矿料形成的胶浆之间,碾压成型后,空隙率小,饱和度大。应力吸收层沥青结合料要求具有较高的软化点,优良的弹性恢复性能和低温延性,与矿料粘附性强。应力吸收层是较早被用来防治反射裂缝的措施之一。通过在贫水泥混凝土基层与沥青面层之间设置一定厚度的应力吸收层,吸收由各种因素产生的路面应力,以达到减少反射裂缝的作用。一些工程实践也表明^[7]:在贫混凝土基层与沥青面层之间设置应力吸收层,具有一定的延缓或抑制反射裂缝

产生的作用。但应力吸收层一般模量较低,造价高,从结构受力和经济性两方面考虑,应力吸收层存在一合理的厚度。
计算采用的基本路面结构在前述路面结构的沥青面层与夹层 1 之间增加一层应力吸收层,假定应力吸收层为各向同性材料,其模量取为 600 MPa,计算结果如表 4、图 4 所示。
由表 4、图 4 可以看出,在应力吸收层厚度变化范围内,σ₁ 的变化幅度不大。随着应力吸收层厚度的增加,σ₁ 略有增大;在应力吸收层厚度为 2 cm 时 σ₁ 达到最大;厚度超过 2 cm 后,σ₁ 又随其厚度的增加而略减。应力吸收层厚度在 0~3 cm 之间变化时对 τ_{\max} 和 σ_e 的影响比较大。当应力吸收层厚度为 3 cm 时, τ_{\max} 和 σ_e 仅为其厚度为 0 时的 37.5%和 38.9%;当继续增加应力吸收层厚度时, τ_{\max} 和 σ_e 继续减小,但减小的速度相应地变小。因此,应力吸收层的厚度宜小于 3 cm。另外,从施工性能和应力吸收层的结构功能来考虑,应力吸收层厚度应大于 2 cm为宜。

表 4 不同应力吸收层厚度下沥青面层的应力

应力吸收层厚度/cm	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	τ_{xz} /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	τ_{\max} /MPa	σ_e /MPa
0	-1.254	-0.329	-0.342	-0.555	-0.079	-0.328	-1.518	0.720	1.332
0.5	-0.556	-0.161	-0.440	-0.486	-0.008	-0.161	-0.989	0.491	0.914
1.0	-0.372	-0.106	-0.432	-0.422	0.021	-0.106	-0.825	0.423	0.790
2.0	-0.220	-0.052	-0.387	-0.321	0.029	-0.053	-0.635	0.332	0.627
3.0	-0.158	-0.027	-0.351	-0.250	0.017	-0.030	-0.523	0.270	0.518
4.0	-0.124	-0.012	-0.327	-0.202	0.010	-0.022	-0.452	0.231	0.447
5.0	-0.103	-0.004	-0.310	-0.169	0.010	-0.021	-0.405	0.208	0.401

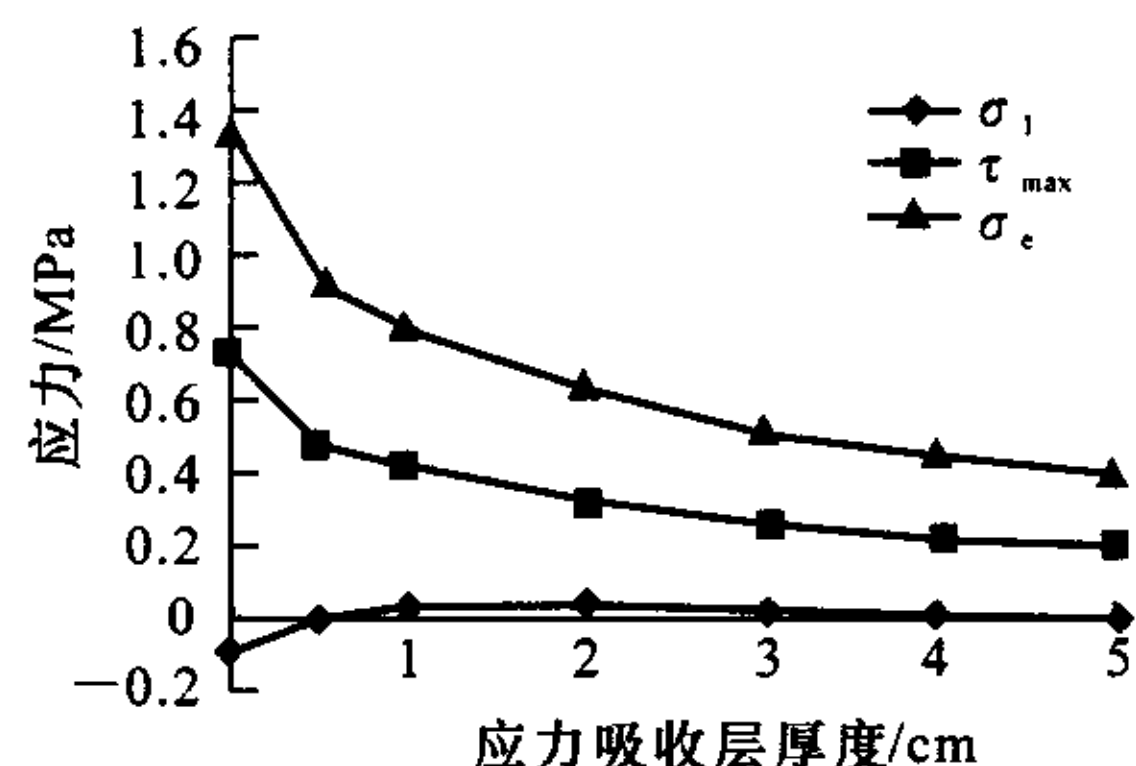


图 4 不同应力吸收层厚度下沥青面层中的应力

通过比较表 4 与表 2 的数据可以发现,在沥青面层厚度为 10 cm、应力吸收层厚度为 2 cm 时,沥青面层的受力状况与沥青面层厚度 18 cm 时的受力状况相当。这说明,设置应力吸收层能有效改善面层受力状况,减薄贫混凝土基层沥青结构层厚度。

2.4 应力吸收层模量

应力吸收层作为沥青面层与贫混凝土基层之间的一个软弱夹层,其模量值对沥青面层的受力具有一定的影响。计算结果如表 5、图 5 所示。

由表 5、图 5 可以看出,随着应力吸收层模量的增大, σ_1 略有减小;当模量大于 800 MPa 时,随着应力吸收层模量的增加, σ_1 减小的速度也有所减慢。应力吸收层模量对 τ_{\max} 和 σ_e 的影响也不十分明显,在模量小于 800 MPa 时, τ_{\max} 和 σ_e 的值随其模量的增加略有增加;随后 τ_{\max} 和 σ_e 的值随应力吸收层模量的增加变化很小。

表 5 不同应力吸收层模量下沥青面层的应力

MPa

吸收层模量	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	τ_{\max}	σ_e
200	-0.036	-0.010	-0.324	-0.222	0.096	-0.018	-0.447	0.272	0.496
400	-0.141	-0.026	-0.353	-0.265	0.043	-0.029	-0.533	0.288	0.543
600	-0.184	-0.037	-0.367	-0.282	0.023	-0.039	-0.572	0.298	0.567
800	-0.207	-0.046	-0.377	-0.289	0.011	-0.047	-0.593	0.302	0.577
1 000	-0.221	-0.052	-0.385	-0.291	0.000	-0.053	-0.605	0.303	0.580
1 200	-0.230	-0.057	-0.391	-0.290	-0.008	-0.058	-0.611	0.301	0.579

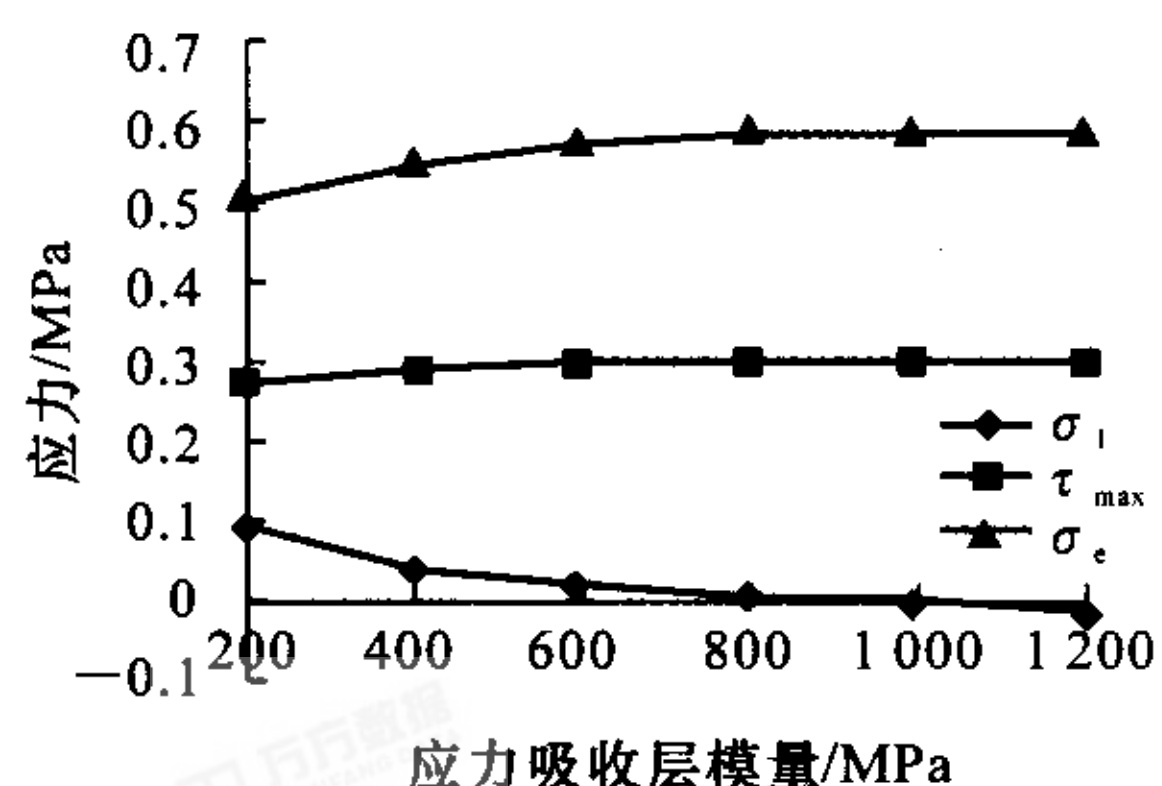


图 5 不同应力吸收层模量下沥青面层中的应力

2.5 裂缝宽度

表 6、图 6 给出不同裂缝宽度对沥青面层受力的影响。

由表 6、图 6 可以看出,随着裂缝宽度的增加, σ_1 不断增大。但在裂缝宽度为 0.8~1.4 mm 时, σ_1 变化不大。对于 τ_{\max} 和 σ_e ,在裂缝产生初期, τ_{\max} 和 σ_e 反而比没有裂缝时还要小。这说明,贫混凝土层微裂缝的存在有助于改善沥青面层的受力状况。当裂

缝宽度超过 0.4 mm 时, τ_{\max} 和 σ_e 大于无裂缝时沥青面层的受力状况,并随着裂缝宽度的增加逐渐增大;当裂缝宽度从 0.6 mm 变到 0.8 mm 时, τ_{\max} 和 σ_e 增长幅度比较大。

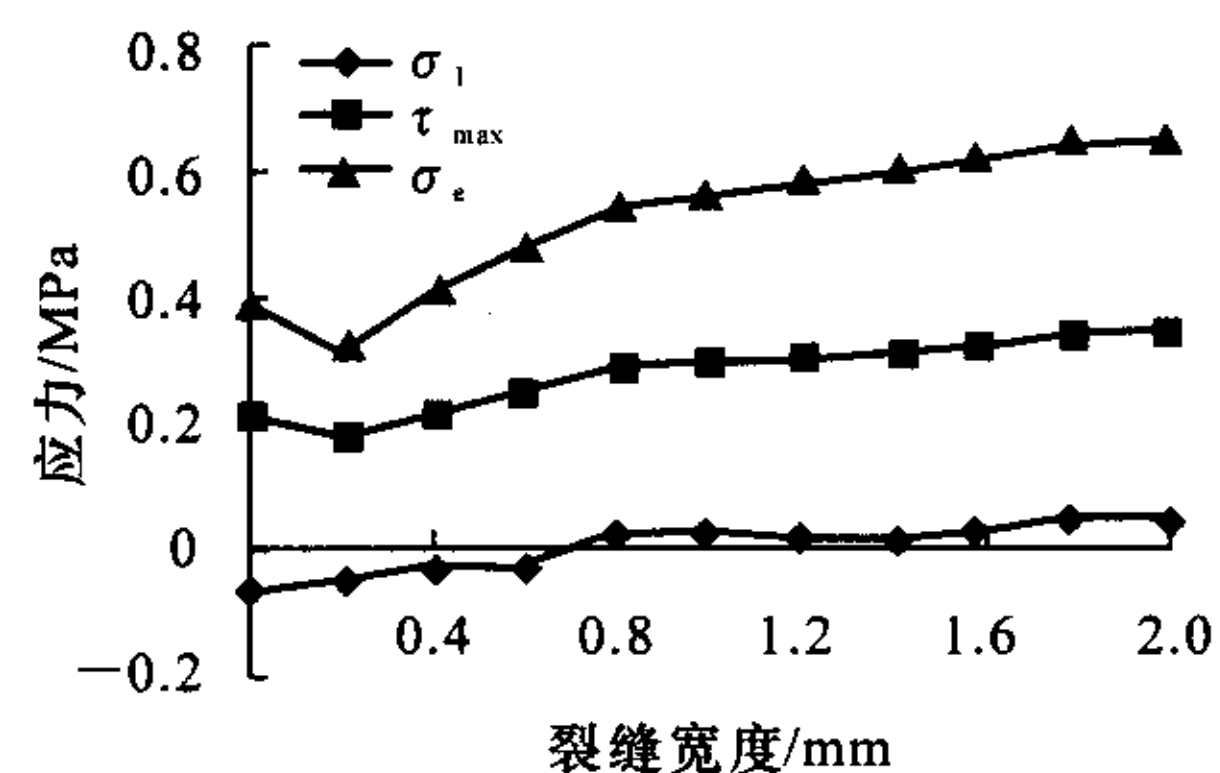


图 6 不同裂缝宽度下沥青面层中的应力

裂缝宽度为 0.8~1.2 mm 时, τ_{\max} 和 σ_e 变化比较小。随着裂缝宽度的增加, τ_{\max} 和 σ_e 的增大速度有所加快。这说明,裂缝宽度从 0.6 mm 变化到 0.8 mm 时,应力增长幅度比较大。

表 6 不同裂缝宽度下沥青面层的应力

裂缝宽度/mm	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	τ_{xz} /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	τ_{\max} /MPa	σ_e /MPa
0	-0.133	-0.059	-0.476	-0.041	-0.059	-0.129	-0.481	0.211	0.392
0.2	-0.268	-0.037	-0.299	-0.112	-0.037	-0.170	-0.396	0.179	0.314
0.4	-0.211	-0.029	-0.314	-0.187	-0.028	-0.069	-0.456	0.214	0.409
0.6	-0.196	-0.031	-0.337	-0.228	-0.020	-0.038	-0.506	0.243	0.476
0.8	-0.179	-0.032	-0.351	-0.275	0.025	-0.034	-0.553	0.289	0.551
1.0	-0.184	-0.037	-0.367	-0.282	0.023	-0.039	-0.572	0.298	0.567
1.2	-0.196	-0.043	-0.380	-0.289	0.017	-0.044	-0.591	0.304	0.580
1.4	-0.200	-0.046	-0.389	-0.301	0.022	-0.048	-0.610	0.316	0.600
1.6	-0.203	-0.049	-0.395	-0.311	0.028	-0.051	-0.624	0.326	0.617
1.8	-0.196	-0.049	-0.394	-0.327	0.048	-0.050	-0.637	0.343	0.642
2.0	-0.202	-0.051	-0.396	-0.330	0.047	-0.052	-0.643	0.345	0.646

3 结 语

- (1)在贫混凝土基层-沥青面层的复合式路面结构中,适当增加面层厚度对防治反射裂缝是十分有效的,但增加到一定厚度以后,其效果并不明显。
- (2)提高沥青面层强度并不能很好地消除反射裂缝的形成。
- (3)在贫混凝土基层-沥青面层的复合式路面结构中设置应力吸收层,能有效改善面层受力状况,减薄沥青结构层厚度。综合分析,应力吸收层厚度为2~3 cm,应力吸收层的模量小于 800 MPa,可有效改善沥青层的受力状况。
- (4)当贫混凝土基层裂缝宽度从 0.6 mm 变化到 0.8 mm 时,应力增长幅度比较大,应采取措施防止裂缝的扩展。

参考文献:

References:

[1] 武建民,伍石生. 用三维有限元方法评价带接缝的旧水泥混凝土路面罩面[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22(1):10-13.
WU Jian-min, WU Shi-sheng. Evaluating of overlay on cement concrete slab with joints by 3D FEM[J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition,2002,22(1):10-13.

[2] 陈拴发,郑木莲,杨 斌,等. 破裂水泥混凝土路面板沥青加铺层温度应力影响因素[J]. 交通运输工程学报,2005,5(3):25-30.
CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, YANG Bin, et al. Thermal stress influence factors of asphalt overlay on cement concrete pavement cracking slab [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,

2005,5(3):25-30.

[3] Punya P K, Michael S M. Program BIMODPAV for analysis of flexible pavements [J]. Journal of Transportation Engineering ASCE, 1997, 123 (1): 7-68.

[4] 马 磊,胡长顺. 旧沥青路面对超薄水泥混凝土路面荷载应力影响[J]. 交通运输工程学报,2003,3(1): 43-46.
MA Biao, HU Chang-shun. Effects of existing asphalt pavement on loading stress of ultra-thin-whitetopping pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003,3(1):43-46.

[5] 谢水友,郑传超. 水平荷载对沥青路面结构的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):14-17.
XIE Shui-you, ZHENG Chuan-chao. Influence of horizontal loads on asphalt pavement structure[J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition,2004,24(2):14-17.

[6] 牛开民,田 波. 水泥混凝土路面等效疲劳温度应力系数[J]. 中国公路学报,2006,19(5):23-28.
NIU Kai-min, TIAN Bo. Equivalent fatigue thermal stress coefficient of cement concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (5):23-28.

[7] 赵炜诚,许志鸿,黄 文. 混凝土面层与贫混凝土基层的层间作用对荷载应力和弯沉的影响[J]. 中国公路学报,2003,16(4):9-16.
ZHAO Wei-cheng, XU Zhi-hong, HUANG Wen. Influence of load stress and deflection on interfacia linteraction between portland concrete pavement and lean concrete base[J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16(4):9-16.