

沥青路面贫混凝土基层应力计算

仰建岗 , 王秉纲

(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)

摘 要 : 为分析贫混凝土基层沥青路面新型路面结构的基层应力情况 , 通过有限元分析方法计算贫混凝土基层的荷载应力 , 并利用弹性层状体系理论分析沥青面层厚度对其影响 , 由此推导出基层荷载应力的计算公式 . 根据不同自然区划的温度场和最大温度梯度 , 得出贫混凝土基层沥青路面中的基层温度应力的有限元解 , 于此提出了基层温度应力的计算公式 . 上述两公式为贫混凝土基层沥青路面结构中基层厚度设计的重要依据 .

关键词 : 道路工程 ; 沥青面层 ; 贫混凝土基层 ; 荷载应力 ; 温度应力 ; 结构设计

中图分类号 : U 416.01 文献标识码 : A

0 概述

在行车荷载和温度变化的反复作用下 , 贫混凝土基层内会产生荷载疲劳应力和温度疲劳应力 . 当两者之和超过贫混凝土的弯拉强度时 , 贫混凝土基层板将发生断裂 , 继而整个路面结构破坏 . 因此 , 在贫混凝土基层沥青路面中 , 应计算基层的荷载疲劳应力和温度疲劳应力 , 且两者之和不应超过贫混凝土的设计弯拉强度 , 以控制因基层板断裂而造成的结构损坏 .

日本学者曾将沥青层表面作用的荷载按 45° 角扩散到混凝土层上 , 再按阿灵顿经验公式计算层底应力 . Majizadth 等人应用二维有限元法对沥青加铺层内的应力进行分析 , 并就此提出了计算面层拉应力的方法 . Nanjin chen 等人应用三层弹性体系求解面层拉应力 , 其中考虑了为防止反射裂缝而设置的应力消解层的效应 . Mahmoud 等人对混凝土基层上的沥青层利用八面体应力进行了分析 , 提出了沥青层的临界厚度 . 在美国 , 通常采用有效厚度法、挠度法和 ASSHTO 的力学 - 经验法等进行旧水泥混凝土路面沥青加铺层设计 .

在国内长安大学公路学院以空间等参元理论和弹性层状体系理论为基础 , 引入正交各向异性接触模型 , 计算了碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面结构的荷载和温度应力 , 并形成较完整的碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面设计方

法^[1-2] . 同济大学、空军工程学院等单位利用有限元法、断裂力学理论等对旧水泥混凝土路面加铺沥青层的结构进行了分析 . 东南大学也对碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面的温度梯度进行了研究 , 就此也提出相应的计算方法 .

国内外对与贫混凝土基层沥青路面相类似的普通水泥混凝土、碾压水泥混凝土和沥青混凝土复合式路面结构的荷载与温度进行了众多研究 , 而针对贫混凝土基层结构和材料特性的分析研究尚不多见 , 也未成系统 . 笔者根据贫混凝土基层沥青路面结构和材料特性 , 计算该路面结构中贫混凝土基层的应力情况 .

1 荷载应力

1.1 应力计算

在贫混凝土基层沥青路面中 , 基层作承重层 , 面层作表面功能层 . 荷载应力分析时 , 以基层为重点 , 首先不考虑面层 , 计算基层的荷载应力 ; 然后 , 利用弹性层状体系理论 , 分析面层厚度对基层弯拉应力的影响 . 最后 , 计算基层的荷载应力 .

贫混凝土基层 , 一般是通过振碾成型 , 这样就与土基结合较为紧密 , 可认为基层与土基处于连续接触状态 . 但随着时间的推移 , 在车辆轴载、温度变化和湿度变化的共同作用下 , 两者间的啮合作用将逐渐衰减 , 使得层间趋于半连续半光滑的接触状态 . 这种半连续半光滑接触状态不使

某个指标或参数来表征.因此,在计算贫混凝土基层底面弯拉应力时,对贫混凝土基层与地基的层间接触按照绝对光滑和完全连续两种情况进行分析.

沥青面层与贫混凝土基层的层间结合条件良好,可视其层间接触为完全连续.

1.1.1 无青面层时贫混凝土基层底面弯拉应力
不同材料参数^[3]及层间接触状况的临界荷位处贫混凝土基层底面的最大荷载力进行计算,其计算结果见表 1 和表 2.

计算参数如下:
贫混凝土基层平面尺寸 $4.5 \times 15 \text{ m}$;
汽车荷载:双轮组 BZZ-100,轮压 $p = 0.7 \text{ MPa}$;
计算临界荷位:贫混凝土基层纵边中部;
泊松比: $\mu_c = 0.15$, $\mu_s = 0.25$;
模量: $E_c = 12\,000 \sim 26\,000 \text{ MPa}$;
模量比: E_c/E_s 取 75,100,125,150,175,200,225,250;
基层厚度: h_c 取 16,18,20,22,24,26,28 cm;
面层厚度: h_a 取 6,8,10,12,14,16,18,20 cm

表 1 弯拉应力 σ_0 (完全连续)

h_c/cm	E_c/E_s							
	75	100	125	150	175	200	225	250
16	1.706	1.899	2.044	2.173	2.302	2.384	2.516	2.641
18	1.454	1.616	1.741	1.852	1.960	2.028	2.141	2.245
20	1.273	1.412	1.521	1.618	1.708	1.767	1.864	1.953
22	1.139	1.259	1.356	1.441	1.519	1.570	1.655	1.731
24	1.036	1.142	1.229	1.304	1.372	1.417	1.492	1.558
26	0.957	1.051	1.129	1.196	1.256	1.295	1.361	1.420
28	0.893	0.978	1.048	1.109	1.162	1.197	1.257	1.309

表 2 弯拉应力 σ_0 (绝对光滑)

h_c/cm	E_c/E_s							
	75	100	125	150	175	200	225	250
16	2.006	2.234	2.412	2.557	2.679	2.785	2.879	2.963
18	1.752	1.931	2.071	2.185	2.281	2.365	2.438	2.504
20	1.548	1.700	1.818	1.915	1.996	2.067	2.129	2.185
22	1.397	1.525	1.625	1.706	1.775	1.834	1.887	1.934
24	1.279	1.389	1.473	1.542	1.601	1.651	1.696	1.736
26	1.182	1.278	1.352	1.412	1.463	1.507	1.546	1.581
28	1.111	1.191	1.253	1.304	1.347	1.384	1.417	1.446

1.1.2 有沥青面层时贫混凝土基层底面应力
沥青面层对贫混凝土基层底面应力的影响可利用弹性层状体系理论来分析.其思路有两种:一是采用弹性地基无限大板上覆弹性层求解.对贫混凝土基层按弹性小挠度薄层理论求解,再按弹性层状体系来分析沥青面层的应力和位移.另一是采用三层弹性体系求解,即将贫混凝土基层视

为弹性层来求解.这两种解法在研究贫混凝土基层荷载应力的变化规律时结论是一致的.就解的绝对值来说,前者略大,但后者更符合实际情况.因此,采用后者解法来分析沥青面层对贫混凝土基层底面应力的影响.

在不考虑沥青面层即沥青厚度 $h_a = 0$ 时,层底应力为,考虑沥青面层后,贫混凝土基层底面应力为

$$\sigma_p = \beta \cdot \sigma_0$$

(1)

式中: β 为沥青面层对贫混凝土基层底面应力的影响函数.按 $\beta = 1 - Bh_a$ 线性模式进行回归.影响系数 B 随 E_c/E_a 和 h_a 的增大而减少,具体计算值见表 3 和表 4.

表 3 影响系数 $B(\times 10^{-3})$ (完全连续)

h_c/cm	E_c/E_s							
	75	100	125	150	175	200	225	250
16	20.890	20.560	20.308	20.104	19.933	19.787	19.658	19.544
18	20.079	19.655	19.332	19.072	18.855	18.669	18.507	18.363
20	19.154	18.714	18.379	18.110	17.885	17.693	17.525	17.377
22	18.462	17.970	17.597	17.298	17.049	16.836	16.651	16.487
24	17.908	17.375	16.972	16.650	16.383	16.154	15.956	15.780
26	17.499	16.941	16.520	16.184	15.906	15.668	15.461	15.279
28	16.373	15.848	15.452	15.136	14.874	14.651	14.457	14.285

表 4 影响系数 $B(\times 10^{-3})$ (绝对光滑)

h_c/cm	E_c/E_s							
	75	100	125	150	175	200	225	250
16	21.003	20.802	20.647	20.52	20.412	20.319	20.237	20.163
18	19.491	19.256	19.074	18.925	18.799	18.690	18.594	18.508
20	18.886	18.625	18.422	18.257	18.117	17.996	17.889	17.793
22	18.048	17.765	17.546	17.368	17.216	17.085	16.97	16.866
24	17.314	17.015	16.783	16.594	16.434	16.295	16.173	16.063
26	16.666	16.354	16.111	15.913	15.746	15.601	15.473	15.359
28	16.088	15.764	15.513	15.308	15.135	14.984	14.852	14.733

2 温度应力

路面结构不但受到行车荷载的反复作用,而且在自然环境下受到太阳辐射、气温等因素不断变化的影响.因此,路面结构内的温度是随着气温日变化甚至年变化而变化.当温度下降时,贫混凝土基层会出现收缩变形,同时又受到各结构层的相互约束,使得在基层内产生温度伸缩和翘曲应力.而影响贫混凝土基层应力的主要是温度翘曲应力.

目前,国内外对普通水泥混凝土路面的温度应力进行了深入的研究^[4,5],但对贫混凝土基层沥青路面中基层温度应力研究尚未开展.由于贫混凝土基层的平面尺寸较普通水泥混凝土路面

大,且在其上方铺筑了沥青面层,改变了基层的温度特性,因此需要对贫混凝土基层沥青路面的温度场和温度应力进行分析。

2.1 温度梯度

计算温度应力,必须先确定该路面结构的温度场。影响贫混凝土基层沥青路面结构中基层的最大温度梯度因素是基层本身的特性和外部情况。前者包括材料的导温系数、路面材料对太阳辐射的吸收率和放热系数等;后者包括沥青层厚度,太阳辐射和气温。

对于沥青面层、贫混凝土基层、底基层和土基的多层体系,利用有限元法可求解该路面的非线性

性瞬态温度场。在求解时,空间上利用有限元法,时间上采用差分法,获得了不同自然区划的温度场和最大温度梯度推荐值。结合贫混凝土的强度特性和贫混凝土基层沥青路面结构特性,计算了贫混凝土基层沥青路面的温度梯度。表 5 列举了沥青层厚度为 0~20 cm,基层厚为 22 cm 时,各自然区划内最大温度梯度变化范围。其中,沥青层的太阳辐射吸收率为 0.85,导热系数为 0.001 8;基层的太阳辐射吸收率为 0.63,导热系数为 0.003 12。当基层厚度 h_c 不等于 22 cm 时,可按表 6 进行修正。

表 5 不同自然区划的最大温度梯度推荐值表

Tab.5 Recommended value of the maximum thermal gradient in various regions						
h_a/cm	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
0	0.88-0.94	0.95-1.00	0.93-0.98	0.90-0.96	0.92-0.97	0.98-1.04
4	0.62-0.66	0.65-0.71	0.64-0.70	0.63-0.68	0.64-0.69	0.69-0.74
8	0.43-0.46	0.48-0.51	0.46-0.50	0.44-0.47	0.45-0.49	0.50-0.53
12	0.30-0.32	0.32-0.34	0.31-0.33	0.30-0.32	0.30-0.33	0.33-0.35
16	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.31-0.33
20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

表 6 不同 h_c 的最大温度梯度修正系数表

Tab.6 Revised factor of the maximum thermal gradient for various h_c			
h_c/cm	修正系数	h_c/cm	修正系数
16	1.19	24	0.93
18	1.13	26	0.87
20	1.08	28	0.81
22	1.00		

2.2 温度应力计算

层间光滑时,底基层的热物理特性对基层层底翘曲应力几乎没有影响。在计算时,把底基层作为弹性材料。但层间连续时,由于底基层热物理特性对基层层底翘曲应力有一定的影响,计算时必须考虑底基层的热物理特性。如果考虑这个因素,会使得参数增多,计算复杂。从计算结果来看,层间连续和层间光滑的温度应力比较接近,前者大约是后者的 96%。因在基层应力中,温度应力本身占的比例比较小。所以,实际应用时,为方便起见层间连续的温度应力可用层间滑动解的 0.96 倍。

按照以下参数计算贫混凝土基层沥青路面的温度应力:

$$h_c = 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 \text{ cm};$$
$$E_c = 12\,000, 14\,000, 16\,000, 18\,000, 20\,000, 22\,000, 24\,000, 26\,000 \text{ MPa};$$
$$\mu_c = 0.15 \text{ 或 } 0.18; \mu_s = 120 \text{ MPa};$$

平面尺寸 $= 4.5 \times 10 \text{ m}^2$;
线胀系数 $\alpha_c = 0.84 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。无沥青面层时的温度应力 σ_{0x} 计算结果见表 7。

表 7 温度应力 σ_{0x}

Tab.7 Thermal stress σ_{0x}	
h_c/cm	E_c/MPa
	12 000 14 000 16 000 18 000 20 000 22 000 24 000 26 000
16	1.256 1.358 1.463 1.571 1.680 1.793 1.907 2.024
18	1.418 1.541 1.666 1.794 1.925 2.058 2.193 2.330
20	1.581 1.597 1.871 2.020 2.171 2.325 2.481 2.639
22	1.744 1.909 2.076 2.246 2.418 2.592 2.769 2.948
24	1.893 2.074 2.256 2.439 2.624 2.811 3.000 3.190
26	2.056 2.258 2.460 2.665 2.871 3.078 3.288 3.498
28	2.218 2.440 2.664 2.889 3.115 3.343 3.573 3.805

表 8 影响系数 B' ($\times 10^{-3}$)

Tab.8 Factor B' ($\times 10^{-3}$)	
h_c/cm	E_c/MPa
	12 000 14 000 16 000 18 000 20 000 22 000 24 000 26 000
16	25.091 24.73 21.855 20.238 18.622 17.006 15.390 17.74
18	21.865 20.456 19.047 17.638 16.230 14.822 14.140 12.007
20	19.331 18.085 16.838 15.593 14.347 11.02 11.857 10.612
22	17.293 16.178 15.064 14.949 12.835 11.722 10.608 9.495
24	15.622 14.615 16.08 12.602 11.596 10.590 9.585 8.580
26	14.226 13.09 12.391 11.474 10.558 9.641 8.725 7.809
28	12.45 12.204 11.363 10.522 9.682 8.842 8.001 7.162

贫混凝土基层沥青路面的 E_a 变化对 σ_x 的影响很小,而主要受 h_a 的影响。因此,有沥青面层时的温度应力为

$$\sigma_x = (1 + B' \cdot h_a) \sigma_{ox} \quad (2)$$

式中: σ_x 为基层温度应力; B' 为 h_a 的影响系数; σ_{ox} 为 $h_a = 0$ 时的基层温度应力, 见表 7; B' 的计算结果见表 8.

3 结语

基于有限元理论计算了无沥青面层时不同结构组合、不同材料参数及层间接触状况的临界荷载处贫混凝土基层底面的最大荷载力, 利用弹性层状体系理论分析了沥青面层厚度的影响, 由此提出计算贫混凝土基层沥青面层中路面基层的荷载应力的实用计算公式.

根据不同自然区划的温度场和最大温度梯度推荐值, 基于无沥青面层时贫混凝土基层温度应力有限元计算结果, 利用弹性层状体系理论分析沥青面层厚度的影响, 提出计算贫混凝土基层沥青路面中路面基层的温度应力的实用计算公式.

根据两者的实用计算公式, 计算贫混凝土基

层的总应力, 可作为贫混凝土基层沥青路面结构设计的一项控制指标.

参考文献:

- [1] 贾玉钧, 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面荷载应力的统一分析方法[J]. 西安公路交通大学学报, 1995, 15(4): 6 ~ 13.
- [2] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理和施工技术[J]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 徐江萍, 王秉纲, 马建, 等. 贫混凝土基层材料强度特性研究[C]. 道路工程学会学术交流会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002. 158 ~ 163.
- [4] 贺晓东. 水泥混凝土路面最大温度梯度值的推算[J]. 中国科技信息, 2005(20): 71 ~ 75.
- [5] 朱秋菊, 韩菊红, 乐金朝. 闸墩施工期温度应力仿真分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(1): 47 ~ 49.
- [6] 仰建岗. 贫混凝土基层沥青路面结构分析与设计[D]. 西安: 长安大学, 2003.

Stress Calculation of Lean Concrete Base under Asphalt Pavement

YANG Jian - gang, WANG Bing - gang

(Key Laboratory of Ministry of Education for Special Area's Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to analyze the base stress of such a new type pavement which asphalt surface goes upon lean concrete base, calculating the load stress without asphalt surface through FEM firstly, and then analyzing the effecting of asphalt surface's thickness based upon elasticity theory, and finally the formula of calculating load stress of lean concrete base with asphalt surface worked out according to the previous data. According to the different thermal fields and the maximum thermal gradient, the thermal stress of lean concrete base with asphalt surface can be calculated through FEM, and the formula of calculating thermal stress for lean concrete base with asphalt surface is also brought forward based on that. Both of above formulas are the key rules of designing the pavement of asphalt surface with lean concrete.

Key words: highway engineering; asphalt surface; lean concrete base; load stress; thermal stress; structure design