

硬质沥青混凝土设计及等效厚度计算^{*}牛红杰¹, 徐希忠^{2,3}, 王洪亮¹, 韦金城^{2,3}, 刘金路¹, 王秀峰¹

(1.聊城市交通发展有限公司, 山东 聊城 252000; 2.山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102;

3.养护技术交通行业重点实验室(济南), 山东 济南 250102)

摘要: 为了建立相同疲劳寿命下硬质沥青混凝土层与常规沥青混凝土层的等效厚度关系, 为含硬质沥青混凝土层路面结构设计提供参考依据, 文中依托山东省实体工程, 以实测参数预估得到的疲劳寿命为等效标准, 计算相同疲劳寿命下全厚式和半刚性沥青路面结构中硬质沥青混凝土层与常规沥青混凝土层的等效厚度关系。结果表明, 对于全厚式和半刚性沥青路面, 含硬质沥青混凝土层结构的疲劳寿命平均分别为常规沥青混凝土层的 1.730 倍、1.083 倍; 全厚式路面结构下常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的沥青层厚度 h -疲劳寿命关系 N_e 分别为 $h = 1.920 4 N_e^{0.160 0}$ 、 $h = 1.706 3 N_e^{0.170 7}$, 半刚性基层沥青路面结构下常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的沥青层厚度-疲劳寿命关系分别为 $h = 4 \times 10^{-9} N_e^{1.013 2}$ 、 $h = 2 \times 10^{-9} N_e^{1.041 3}$ 。

关键词: 公路; 沥青路面; 硬质沥青混凝土; 等效厚度; 疲劳寿命

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0046-05

高模量沥青混凝土最初在法国提出并应用超过 20 年, 其实现途径主要包括采用硬质沥青、添加高模量改性剂、添加岩沥青等。相比于添加高模量改性剂法, 采用硬质沥青配制高模量沥青混凝土质量较易控制, 且经济优势明显^[1]。硬质沥青是指 25 ℃ 针入度小于 25 (0.1 mm) 的沥青胶结料, 其主要特点是针入度小、黏度大, 与矿料拌和后制得高模量沥青混凝土, 可大幅度缓解沥青路面车辙, 提升结构性能^[2-3]。文献[4]的研究表明, 硬质沥青混合料综合性能优良, 可用于沥青路面结构提升层。硬质沥青混合料可用于道路和机场铺面^[5-7], 还可用于城市道路交叉口和长大纵坡路段预防车辙^[8]。目前对硬质沥青混凝土与常规沥青混凝土等效厚度转换关系的研究仍是空白。本文参考国内外相关研究成果, 结合实体工程, 以相同的疲劳寿命为标准, 分析硬质沥青混凝土用于全厚式及半刚性沥青路面时与常规沥青混凝土的等效厚度关系, 为含硬质沥青混凝土层路面结构设计提供参考。

1 沥青路面结构层等效厚度基本理论

1.1 等效厚度原理

不同的沥青混凝土具有不同的性能, 其在结构

中的受力状态不同, 发挥的作用也不同。沥青混凝土的模量和强度越高, 抗疲劳性能越好, 其在结构中发挥的作用越大。特别是当沥青混凝土模量大于 14 000 MPa 时, 其材料性质会发生较大变化^[9]。在法国、英国等欧洲国家, 在确定路面结构沥青混凝土层总厚度时, 均会考虑沥青混凝土模量和疲劳性能的不同而进行调整^[10]。

1.2 等效厚度原则

当前, 高模量沥青混凝土等效厚度一般采用两种原则, 分别为弯沉等效原则和疲劳寿命等效原则。弯沉等效原则是按沥青路面弯沉等效进行厚度计算, 计算公式如下:

$$H_1^3 \sqrt{E_1} = H_2^3 \sqrt{E_2} \quad (1)$$

式中: E_1 、 H_1 分别为沥青混凝土材料 1 的模量和厚度; E_2 、 H_2 分别为与沥青混凝土材料 1 弯沉等效的沥青混凝土材料 2 的模量和厚度。

根据式(1), 在相同弯沉指标的前提下, 材料模量高的沥青层总厚度可相应减小。考虑到众多的沥青路面设计体系中均不采用弯沉作为设计指标, 以弯沉等效的计算过程不再赘述。

疲劳寿命等效原则是根据不同沥青混合料的模量计算沥青层底弯拉应力或应变, 由疲劳开裂预估

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42107213); 国家重点研发计划项目(2018YFB1600100); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE271; ZR2020KE024); 山东省重点研发计划项目(2019GSF109020; 2019GGX101042)

模型计算沥青路面疲劳寿命,根据疲劳寿命相等的原则确定不同材料的等效厚度。下面以法国 GB3 和 EME2 等效厚度计算为例,说明路面结构疲劳寿命等效原则下硬质沥青混凝土层等效厚度的计算过程,基本计算参数见表 1。根据表 1,10 Hz 条件下 EME2 的动态模量是 GB3 的 1.5~1.6 倍。

表 1 法国两种沥青混凝土的材料参数

材料 类型	公称粒径/ mm	动态模量	疲劳应变 ϵ_6 (疲劳试
		(15 ℃, 10 Hz)/MPa	验,100 万次,10 ℃, 25 Hz)/ 10^{-6}
GB3	0~14 或 0~20	9 000	90
EME2	0~14 或 0~20	14 000	130

按照疲劳等效原则,先计算不同基层类型的沥青层底弯拉应变。由于 EME2 的动态模量比 GB3 增加 1.5~1.6 倍,其沥青层底弯拉应变降低约 23%。法国沥青路面疲劳方程为:

$$N_e=10^6 \times \left(k_c k_r k_s \frac{\epsilon_6}{\epsilon}\right)^5$$

(2)

式中: k_c 为现场调整系数; k_r 为风险系数; k_s 为路基模量调整系数; ϵ_6 为最下面一层沥青混合料的 100 万次疲劳应变; ϵ 为沥青层底计算弯拉应变。

考虑到 k_c 修正系数及动态模量增加会降低沥青层底弯拉应变的贡献,按式(3)计算 EME2 疲劳寿命与 GB3 疲劳寿命的比值,计算结果为 6.3 倍。

$$\left(\frac{1 \times 130}{1.3 \times 90 / [1 / (1 - 0.23)]}\right)^5 \approx 6.3$$

(3)

由于中国高模量沥青混凝土设计及工程应用与

英国、法国不同,不可直接照搬法国、英国的标准,须结合中国实际。在相同的疲劳寿命下等效一般是将不同材料的模量取值代入弹性层状体系中进行计算,得到沥青层底弯拉应变,并根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[11] 计算沥青路面疲劳寿命,以此确定不同沥青混凝土的等效厚度。本文遵循这个思路确定硬质沥青混凝土层与常规沥青混凝土层的等效厚度。

2 硬质沥青混凝土设计

2.1 试验材料

依托山东省沾临(沾化—临沂)高速公路试验路工程,集料选用螺蛳山石灰岩,沥青胶结料采用国产 15[#] 硬质沥青,其基本技术指标见表 2。选取 EME-14(连续)、EME-14(间断)和 EME-20 3 种级配作为研究级配,级配设计结果见表 3。

表 2 15[#] 硬质沥青的技术指标

项目	试验结果	技术要求
针入度(100 g,5 s,25 ℃)/(0.1 mm)	16.9	10~20
软化点/℃	66.6	60~70
15 ℃延度/cm	21.7	—
TFOT 或 RTFOT 质量变化/%	0.051	≤0.5
后残留物 残留针入度/%	71	≥55

2.2 硬质沥青混凝土设计

参考法国设计方法进行硬质沥青混凝土设计,设计结构及要求见表 4。

表 3 硬质沥青混合料的级配

级配类型	以下筛孔(mm)的通过率/%											
	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
EME-14(连续)	—	—	100.0	97.0	90.1	48.7	33.1	25.7	16.1	10.6	7.9	5.70
EME-14(间断)	—	—	100.0	88.6	63.7	47.1	33.9	26.4	16.4	10.7	7.7	5.76
EME-20	100.0	96.2	86.2	75.4	56.2	34.6	24.3	19.3	12.6	8.9	7.1	5.70

表 4 硬质沥青混凝土设计结果

混凝土类型	丰度系数 K	空隙率(旋转 压实,0.6 MPa, 100 次)/%	抗压强度 比(多列士 试验)/%	变形率(车 辙试验 30 000 次)/%	模量(15 ℃, 10 Hz)/MPa	疲劳应变 ϵ_6 (疲劳试 验,100 万次,10 ℃, 25 Hz)/ 10^{-6}	破坏应变(低 温性能试验, —10 ℃)/ 10^{-6}
EME-14(连续)	3.46	1.434	101.20	4.36	16 139	135	2 500.72
EME-14(间断)	3.49	3.638	102.04	4.58	16 219	142	2 351.75
EME-20	3.44	3.674	101.94	3.18	14 649	140	3 044.60
规范要求	>3.40	≤6.000	≥75.00	≤7.50	>14 000	≥130	≥2 000.00

注:法国由于气候原因,不考虑沥青混凝土低温性能。为将硬质沥青混凝土用于中国工程实践,测试硬质沥青混凝土的低温性能。

3 结构参数获取

将上述 3 种硬质沥青混凝土通过 SGC 旋转压实成型直径 150 mm、高度 170 mm 左右的试件,经取芯、切割后制成直径 100 mm、高度 150 mm 的标准试件并放入恒温箱中。试件达到 20 ℃ 后保温 4 h,以保证试件温度分布均匀。之后在 20 ℃、0.1~25.0 Hz 条件下进行动态模量试验。为对接 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[11],试验采用简单性能试验机 SPT 进行。根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》对沥青混凝土参数取值的要求,取 20 ℃、10 Hz 条件下动态模量进行路面结构设计。按照上述试验方法进行试验获得的参数见表 5。

表 5 硬质沥青混凝土及常规沥青混凝土的计算参数

混凝土类型	空隙率/%	动态模量(20 ℃, 10 Hz)/MPa
EME-14(连续)	3.12	15 300
EME-14(间断)	5.32	15 900
EME-20	5.24	16 100
SMA-13	4.00	9 000
AC-20	4.30	11 000
AC-25	4.10	11 500
LSPM-25	12.80	9 500
FAC-13	2.60	9 000

选取全厚式沥青路面及半刚性沥青路面作为计算结构,参考山东省公路工程实践经验拟定计算结构(见表 6)。根据相关研究成果,对于全厚式沥青路面,硬质沥青混凝土层位于下面层及下基层最合理;对于半刚性沥青路面,硬质沥青混凝土的合理层位为下面层。因此,计算中按照表 6 所示结构布局,以硬质沥青混凝土 EME-20 替代下面层,以硬质沥

青混凝土 EME-14 替代下基层[鉴于 EME-14(连续)和 EME-14(间断)的模量差别不大,不作区分,模量统一取 15 500 MPa],进行结构疲劳寿命计算,计算方案见表 7。

表 6 结构计算参数

结构类型	层序	材料类型	厚度/cm	模量/MPa
全厚式结构	1	SMA-13 SBS	4	9 000
	2	AC-20 SBS	6	11 000
	3	AC-2570 [#]	10	11 500
	4	LSPM-2570 [#]	10	9 500
	5	FAC-13	6	9 000
	6	改善土基	—	160
半刚性结构	1	SMA-13SBS	4	9 000
	2	AC-20SBS	6	11 000
	3	AC-2570 [#]	8	11 500
	4	水稳碎石	18	12 000
	5	水稳碎石	18	12 000
	6	水稳碎石	18	9 000
	7	改善土基	—	160

表 7 疲劳寿命计算方案

结构类型	层位	上限厚度/ cm	下限厚度/ cm	阶差厚度/ cm
全厚式结构	下面层	20	6	2
	下基层	20	6	2
半刚性结构	下面层	20	6	2

按照表 6 所示结构,根据表 7 所示计算方案,参考 JTG D50—2017《公路沥青路面结构设计规范》^[11] 计算全厚式路面沥青层及半刚性基层路面无机结合料的疲劳寿命,计算结果分别见表 8、表 9。

表 8 全厚式沥青路面疲劳寿命计算结果

沥青层总厚度/cm	层底拉应变/ 10^{-6}		疲劳寿命/次		硬质沥青与常规沥青疲劳寿命比
	常规沥青混凝土层	硬质沥青混凝土层	常规沥青混凝土层	硬质沥青混凝土层	
32	34.7	31.6	35 518 829	50 369 250	1.418 099 96
36	29.0	25.6	53 834 184	86 203 378	1.601 275 836
40	24.1	21.3	97 280 501	154 769 967	1.590 965 974
44	20.4	17.6	175 769 863	307 308 185	1.748 355 376
48	18.2	15.3	265 953 079	514 731 954	1.935 423 932
52	15.6	13.3	477 994 756	873 862 115	1.828 183 477

续表8

沥青层总厚 度/cm	层底拉应变/ 10^{-6}		疲劳寿命/次		硬质沥青与常规沥 青疲劳寿命比
	常规沥青混凝土层	硬质沥青混凝土层	常规沥青混凝土层	硬质沥青混凝土层	
56	13.9	11.7	740 862 167	1 423 462 358	1.921 359 224
60	11.9	10.2	1 349 645 753	2 410 480 111	1.786 009 481

表 9 半刚性基层沥青路面疲劳寿命计算结果

沥青层总厚 度/cm	层底拉应变/ 10^{-6}		疲劳寿命/次		硬质沥青与常规沥 青疲劳寿命比
	常规沥青混凝土层	硬质沥青混凝土层	常规沥青混凝土层	硬质沥青混凝土层	
18	0.108	0.105	2 988 695 111	3 230 587 173	1.080 935 677
20	0.102	0.099	3 340 574 449	3 582 635 050	1.072 460 771
22	0.097	0.094	3 643 890 495	3 910 493 868	1.073 164 485
24	0.093	0.089	3 876 947 388	4 284 886 559	1.105 221 745
26	0.088	0.085	4 292 098 447	4 577 347 730	1.066 459 166
28	0.084	0.081	4 595 390 655	4 904 659 841	1.067 299 868
30	0.080	0.076	4 933 719 925	5 423 749 828	1.099 322 603
32	0.077	0.073	5 159 143 691	5 675 450 032	1.100 075 976

由表 8 可知:在相同厚度条件下,含硬质沥青混凝土的沥青层的疲劳寿命平均为常规沥青混凝土的 1.73 倍。根据计算结果,拟合出全厚式沥青路面结构下常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的沥青层厚度 h 与累计标准轴次 N_e 的关系分别为:

$$h=1.920\ 4N_e^{0.160\ 0},R^2=0.996\ 0$$

$$h=1.706\ 3N_e^{0.170\ 7},R^2=0.990\ 3$$

由表 9 可知:在相同厚度条件下,含硬质沥青混凝土的半刚性基层路面结构无机结合料的疲劳寿命平均为常规沥青混凝土的 1.083 倍。根据计算结果,拟合出半刚性基层路面结构下常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的沥青层厚度 h 与累计轴次 N_e 的关系分别为:

$$h=4\times10^{-9}N_e^{1.013\ 2},R^2=0.997\ 5$$

$$h=2\times10^{-9}N_e^{1.041\ 3},R^2=0.997\ 6$$

两种路面结构下沥青层厚度-累计标准轴次曲线即等效厚度曲线见图 1、图 2。

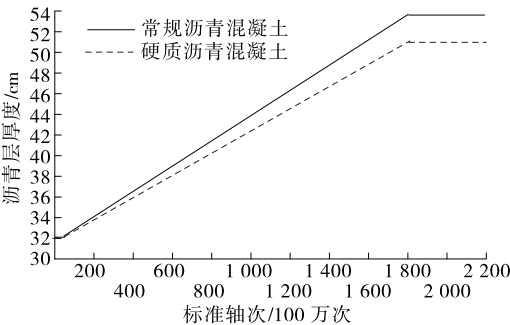


图 1 全厚式沥青路面等效厚度曲线

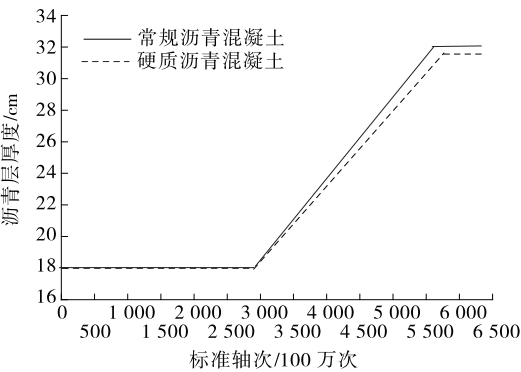


图 2 半刚性基层沥青路面等效厚度曲线

在进行高速公路设计时,可根据交通荷载按图 1、图 2 中等效厚度曲线设计沥青层总厚度,同时对拟定的沥青路面结构进行力学计算及性能验算。

4 结论

本文依托实体工程,以疲劳寿命等效为原则,选择全厚式及半刚性两种沥青路面结构,计算含硬质沥青混凝土、常规沥青混凝土的路面结构的疲劳寿命。主要结论如下:

- (1) 对于全厚式沥青路面结构,含硬质沥青混凝土层结构的疲劳寿命平均为常规沥青混凝土层结构的 1.73 倍,常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的厚度 h -轴载 N_e 关系分别为 $h=1.920\ 4N_e^{0.160\ 0}$ 、 $h=1.706\ 3N_e^{0.170\ 7}$ 。
- (2) 对于半刚性基层沥青路面结构,含硬质沥

青混凝土层结构的疲劳寿命平均为常规沥青混凝土层结构的 1.083 倍, 常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的厚度-轴载关系分别为 $h = 4 \times 10^{-9} N_e^{1.0132}$ 、 $h = 2 \times 10^{-9} N_e^{1.0413}$ 。

本文仅对力学-经验法疲劳预估模型下硬质沥青混凝土等效厚度进行了研究, 后续将开展基于 Miner 疲劳累积损伤定律的等效厚度研究。

参考文献:

- [1] 王知乐. 硬质沥青与岩沥青改性沥青高模量混合料路用性能对比试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(5): 121-125.
- [2] 马峰, 傅珍. 硬质沥青和高模量沥青混凝土在法国的应用[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 221-223.
- [3] BARI J, WITCZAK M. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 381-423.
- [4] 刘宏富, 郑健龙, 钱国平, 等. 硬质沥青及其混合料疲劳性能对比试验研究[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 205-209.
- [5] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土路面疲劳研究[J].

土木工程与管理学报, 2013, 30(1): 30-34.

- [6] LEIVA-VILLACORTA F, TAYLOR A, WILLIS R. High-modulus asphalt concrete (HAMC) mixtures for use as base course[R]. NCAT Report 17-04, 2017: 1-61.
- [7] 杨琳. 基于低标号沥青与岩沥青掺配技术高模量沥青混合料耐久性试验研究[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 297-301.
- [8] 欧阳新峰. 高模量沥青混合料在调坡路面中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [9] ARNOLD G, ROGERS D, HALL S, et al. High modulus asphalt to prevent rutting at intersections [C]//17th AAPA International Flexible Pavements Conference, 2017: 1-11.
- [10] HERNANDE M I G, SHAHRI A. Effect in the high modulus asphalt concrete with the temperature[C]//6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2016: 235-247.
- [11] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.

收稿日期: 2023-03-15

(上接第 45 页)

高弹改性沥青, 且油石比较高, 沥青膜厚度超过 $15 \mu\text{m}$, 增加了沥青混合料的韧性, 能较好地抵抗沥青路面磨耗层服役期车辆荷载的冲击。

3 结论

本文针对普通超薄沥青磨耗层存在的缺陷, 设计一种 GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料, 并对其高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗松散性能及抗冲击特性展开试验研究, 结论如下:

(1) GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料的最佳油石比为 7.9%, 此时沥青膜厚度超过 $15 \mu\text{m}$, 其高温抗车辙性能、水稳定性及抗松散性能较好, 满足规范要求。

(2) 与传统 AC-13、SMA-13 沥青混合料相比, GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料具有更高的弯曲破坏应变与冲击韧性, 其低温抗开裂性能与抗冲击性能更好。

参考文献:

- [1] 叶康, 张毅, 李杰. 超薄罩面层间黏结性能评价指标与

检测方法分析[J]. 公路与汽运, 2023(1): 91-94.

- [2] CHEN D H, SCULLION T. Very thin overlays in Texas[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 108-116.
- [3] 胡勇, 鹿蓉, 黄卫国, 等. 空隙率对多孔超薄沥青磨耗层性能和渗水功能的影响[J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 9-15.
- [4] 罗检萍, 黄红明. 高韧超薄沥青磨耗层在旧砼桥面铺装中的应用[J]. 公路与汽运, 2022(2): 126-129.
- [5] 虞将苗, 陈富达, 彭馨彦, 等. 高韧超薄沥青磨耗层在港珠澳大桥珠海人工岛通道上的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(1): 48-56.
- [6] 沈钱超. 玄武岩纤维沥青路面超薄磨耗层性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [7] 张兵. 稳定型橡胶改性沥青超薄磨耗层的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [8] 张彩利, 李天豪, 丁维哲, 等. 超薄磨耗层高黏高弹沥青混合料性能研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12241-12249.
- [9] 高磊, 吴旷怀. 基于正交试验的复合高黏高弹改性沥青制备及性能研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 323-329.

收稿日期: 2023-04-17