

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.006

# 浅析法标混合式沥青路面结构设计

赖增成, 肖军良

(中国路桥工程有限责任公司, 北京市 100011)

**摘要:**目前中国高等级公路主要以半刚性基层沥青路面结构为主,对混合式沥青路面结构的使用和研究较少,该文介绍了法标下该结构的设计控制指标、容许值、标准轴载下结构层应力应变计算过程和结构的破坏模式,同时论述了混合式沥青路面结构的结构层材料选择和设计注意事项,并对混合式沥青路面结构的优缺点进行了分析。

**关键词:** 沥青路面; 混合式沥青路面结构; 破坏模式; 法国规范

近年来中国企业在非洲法语区国家承建了多个规模较大的高速项目,如阿尔及利亚东西高速、摩洛哥绕城高速、塞内加尔 TT 高速、科特迪瓦铁布高速、喀麦隆雅杜高速、多哥洛美绕城高速等,这些项目皆采用法国标准进行设计,但由于缺乏对法标规范的了解以及对法标体系各种路面结构类型认识不足,导致设计阶段的路面结构比选论证遇到困难。法标体系下的沥青路面结构类型有 5 种,分别为:薄层柔性沥青路面结构、厚沥青路面结构、混合式沥青路面结构、半刚性沥青路面结构、倒装结构沥青路面。其中混合式沥青路面结构在中国很少采用,只有个别科研单位曾经进行过研究,中国工程案例较少,但该结构在法国、德国、日本等国皆有使用,在法语区国家进行路面结构选择研究,经常需要对该结构进行比选。

该文通过介绍法国规范体系下混合式沥青路面结构的破坏模式和设计方法,为中国同行了解法国的混合式沥青路面结构设计方法提供参考。

根据法国沥青路面技术指南(1994年版)介绍,混合式沥青路面结构是介于半刚性路面与全厚式沥青路面结构的一种沥青路面结构类型,因其具有防反射裂缝、总体使用性能好、造价相比全厚式沥青路面低而被应用在高速公路上。该结构 20 世纪 80 年代在法国开始使用,并且在沥青价格高昂时期曾替代过全厚式沥青路面结构,是一种具有一定使用价值的路面结构类型。

## 1 混合式沥青路面结构设计指标

### (1) 设计控制指标

根据法标规范及指南,混合式沥青路面结构尺寸设计时分两阶段对路面结构进行验算,并结合容许值公式反算每个阶段可承受的总重车数,当验算结构可承受的重车数大于设计年限的预测累计重车数则该路面结构满足设计要求。设计过程的控制指标主要由水稳层底基层层底拉应力以及沥青混合料基层层底拉应变控制。

关于车辙控制标准主要通过控制路基顶面压应变值,尽管法标规范中将该值纳入设计指标验算范畴,但控制性作用不强,由于混合式沥青路面结构整体模量较大,标准轴载作用下的路基顶面压应变值实际较小,都能满足规范要求。

### (2) 容许值计算

法国规范体系下沥青路面结构层各层的容许值是根据室内疲劳试验获取材料的相关疲劳参数,综合施工误差以及实际路面结构破坏进程进行综合修正后获取。总体以材料疲劳试验破坏规律为依据。混合式结构计算按照两阶段进行容许值计算:第一阶段容许值计算包括水稳层底基层层底拉应力  $\sigma_{t,ad}$ 、路基顶面竖向压应变  $\epsilon_{z,ad}$ ;第二阶段容许值计算包括沥青混凝土基层层底拉应变  $\epsilon_{t,ad}$ 、路基顶面竖向压应变  $\epsilon_{z,ad}$  等指标。各个指标计算如下:

#### ① 累计当量轴次:

$$NE = NPL \times CAM \quad (1)$$

式中:  $NE$  为累计当量轴次;  $NPL$  为设计年限内一个车道的重车交通量;  $CAM$  为相对于标准轴载的重车车辆破坏系数。

收稿日期:2020-10-25(修改稿)

基金项目:中国路桥工程有限责任公司科技研究项目(编号:2018-zlkj-13)

作者简介:赖增成,男,硕士,高级工程师, E-mail: laizc@crbc.com

② 土基顶面压应变允许值:

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.012 \times (NE)^{-0.222} \quad (2)$$

③ 沥青混凝土基层层底拉应变容许值  $\varepsilon_{t,ad}$ :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6 (10^\circ\text{C}; 25 \text{ Hz}) \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}} \times k_c \times k_r \times k_s \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_6$  为温度  $10^\circ\text{C}$  以及加载频率为  $25 \text{ Hz}$  条件下可承受疲劳实验加载 100 万次的应变值;  $\theta_{eq}$  为等效温度, 根据当地气候综合确定。

④ 水稳层底基层层底拉应力容许值  $\sigma_{t,ad}$ :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times k_c \times k_d \times k_r \times k_s \quad (4)$$

式中:  $\sigma_6$  为可承受疲劳实验加载 100 万次的应变值;  $NE$  为累计当量轴次;  $b$  为材料疲劳性能表现的斜率;  $k_c$  为结构计算模型修正系数;  $k_s$  为路基承台调整修正系数, 路基模量  $E_0$  为  $80 \sim 120 \text{ MPa}$  时, 取  $1/1.065$ ,  $E_0 \geq 120 \text{ MPa}$  时, 取  $1.0$ ;  $k_r$  为风险因子, 需业主方确定,  $k_r = 10^{-ub\delta}$ , 该系数通过结构破坏风险值相关系数  $u$ 、材料疲劳性能表现的斜率  $b$ 、疲劳断裂对数差异系数  $\delta$  综合确定。

(3) 结构层应力及应变值计算

法国规范体系下沥青路面结构各结构层在标准荷载作用下的应力和应变值计算采用多层弹性体系力学模型, 标准轴载为  $130 \text{ kN}$ , 单侧双轮组, 单轮当量圆半径  $R$  为  $0.125 \text{ m}$ , 轮间距为  $0.375 \text{ m}$ , 轮压为  $0.662 \text{ MPa}$ 。

根据混合式沥青路面结构模型假定, 第一阶段计算的层状弹性结构模型剖面如图 1 所示, 此阶段各层面相互黏结, 考虑底基层材料硬度较大, 沥青混凝土基层受到变形较小, 主要通过模型计算路基顶面压应变值  $\varepsilon_{z,cal}$  以及水稳层底基层的层底拉应力  $\sigma_{t,cal}$ 。图 1 中:  $E_0$  为路基模量;  $E_1$  为水稳层底基层模量;  $E_2$  为沥青混凝土基层模量;  $E_3$  为磨耗层模量;  $\nu_0$  为路基泊松比;  $\nu_1$  为水稳层底基层泊松比;  $\nu_2$  为沥青混凝土基层泊松比;  $\nu_3$  为磨耗层泊松比, 下同。

根据混合式结构模型假定第二阶段的结构计算模型剖面如图 2 所示, 此阶段假定水稳层底基层已发生疲劳开裂损害, 沥青混凝土基层与水稳层底基层界面会因底基层发生破坏或者下沉而致使层间发生滑移, 因而进行结构分析时, 界面按照滑移对待; 同时水稳层底基层模量剩余值采用其原始值的  $1/5$ 。通过模型计算出路基顶面压应变值  $\varepsilon_{z,cal}$  以及沥青混凝土基层的

层底拉应力  $\sigma_{t,cal}$ 。图 2 中:  $E_1/5$  为水稳层底基层模量, 其他参数意义同前。

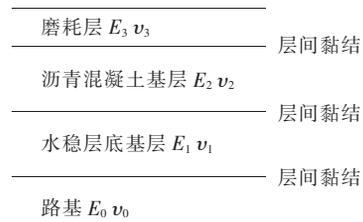


图 1 第一阶段结构计算模型

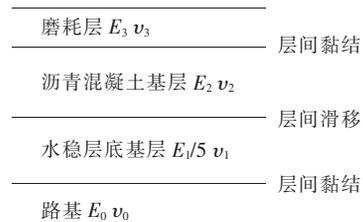


图 2 第二阶段结构计算模型

(4) 结构容许累计重车数  $N$  的验算

关于结构容许累计重车数的验算, 法国规范体系主要采用反算方式, 通过拟定结构建立第一阶段的结构模型计算出各结构层的应力及应变值, 以该值作为容许值, 利用容许值与当量轴次关系式(1)、(2)以及式(4)反算出第一阶段的可承受的累计重车数  $NPL_1$ ; 同理通过第二阶段的结构模型计算出各结构层的应力及应变值反算第二阶段可承受的累计重车数  $NPL_2$ , 进而求出结构两阶段累计重车数  $N$ , 要求  $N \leq NPL$  才满足设计要求。最后核查沥青混凝土厚度与路面结构层总厚度之比是否满足定义的要求。

## 2 混合式沥青路面结构破坏模式

法标中关于混合式沥青路面结构对各层厚度比例有明确界限。按照结构组成从上至下由沥青混凝土磨耗层、沥青混凝土基层以及水稳层底基层构成, 其中沥青混凝土磨耗层和基层与路面总厚度之比  $K$  值最低为  $0.4 \sim 0.5$ , 即沥青混合料层的厚度与水稳层的厚度相当, 如此主要是为了减缓反射裂缝的产生。

(1) 结构破坏模式以及机理分析

法国路面规范及设计指南对混合式路面结构的破坏类型及模式有所介绍, 认为混合式路面结构在正常合理的施工条件下建成, 路面结构的破坏类型主要为疲劳裂缝和车辙。

且法国规范和指南根据混合式路面结构破坏类型,构建混合式沥青路面结构破坏模型分为两阶段进行的假设,以模拟结构的破坏过程。

第一阶段即刚施工完成的混合式结构,假定各结构层处于黏结状态,由于底基层采用半刚性水稳材料,依靠底基层半刚性材料的强大支撑和层间黏结作用,在车辆荷载累积作用下水稳层材料层底产生疲劳开裂,该阶段在车辆作用下沥青混凝土基层层底拉应力较小,不考虑车辆荷载对沥青混凝土基层产生的损伤作用,该阶段下路表面未出现疲劳开裂;第二阶段为在车辆荷载累积作用下水稳层已经产生疲劳开裂,底基层整体强度和支撑作用下降,在荷载作用下底基层将会有微小的下沉,此时的水稳层底基层与沥青混凝土

基层的层间作用发生改变,由黏结状态改变为滑移作用,沥青混凝土基层在车辆荷载作用下将产生更大的弯曲变形,其层底将产生较大的拉应力和拉应变,经过车轮荷载累积作用导致基层底产生疲劳开裂并最终导致表面出现疲劳裂缝。

## (2) 结构计算结果分析

为深入了解混合式结构的破坏机理以及认识两个阶段的沥青混合料基层层底拉应变以及水稳层底基层拉应力在不同阶段受标准轴载作用下的变化情况,拟对 8 cm 沥青混凝土面层 BBSG2+13 cm 沥青混合料基层 GB3+25 cm 水泥稳定碎石的混合式沥青路面结构进行计算。表 1 为采用 ALIZE—LCPC 路面软件计算的各结构层应力应变值。

表 1 第一、二阶段结构计算结果

阶段	厚度/ m	模量/ MPa	泊松比	竖向计算 Z 值/m	$\epsilon_{t,cal} /$ $\mu\epsilon$	$\sigma_{t,cal} /$ MPa	$\epsilon_{z,cal} /$ $\mu\epsilon$
第一 阶段	0.08	2 200	0.35	0.000	-25.4	-0.024	131.1
				0.080	-28.4	0.094	195.0
	0.13	2 700	0.35	0.080	-28.4	0.102	164.1
				0.210	8.5	0.144	61.3
	0.25	23 000	0.25	0.210	8.5	0.375	5.0
				0.460	-22.5	-0.657	13.9
土基	120	0.35	0.460	-22.5	0.003	86.2	
第二 阶段	0.08	2 200	0.35	0.000	-6.6	0.070	88.4
				0.080	-36.9	0.050	195.9
	0.13	2 700	0.35	0.080	-36.9	0.049	166.6
				0.210	-143.5	-0.397	196.9
	0.25	4 600	0.25	0.210	60.2	0.473	-1.3
				0.460	-90.7	-0.508	58.2
土基	120	0.35	0.460	-90.7	0.006	288.1	

表 1 显示:第一阶段的基层 GB3 拉应变值为  $8.5 \times 10^{-6}$ ,水稳层的拉应力为 0.657 MPa(水稳层的抗拉强度为 0.9 MPa);第二阶段的基层 GB3 拉应变值为  $143.5 \times 10^{-6}$ ,水稳层的拉应力为 0.508 MPa。

通过以上计算分析可得,第一阶段由于沥青混合料基层 GB3 的层底拉应变值非常小,理论上小于  $70 \times 10^{-6}$ ,是疲劳耐久极限值,将不会产生疲劳破坏;而水稳层的拉应力为 0.657 MPa,应力水平为 73%,应力水平较高,水稳层在荷载累积作用下将会首先产生疲

劳开裂,此时裂缝尚未反射至路表面;从受力分析可知混合料结构的第一阶段破坏模式的合理性。第二阶段为水稳层底基层开裂后,按照法国规范建议水稳层模量折减为原值的 20%,同时沥青混合料基层与水稳碎石底基层的层间黏结状态变为滑动状态。此时计算结果显示沥青混合料基层 GB3 的层底拉应变值提高了约 17 倍,达到  $143.5 \times 10^{-6}$ ,应变水平将会大幅度提高,沥青混合料 GB3 层将在荷载累积作用下产生疲劳开裂,至此水稳层的裂缝将透过基层反射至路面。以

上计算结果分析显示:结构层应力应变响应与结构模型的分阶段进行模拟有很好的匹配度,采用两阶段进行模拟较为合理。如采用一阶段进行设计则明显不符合结构的破坏模式。

### 3 混合式沥青路面结构的各结构层材料选择

(1) 面层。法标中对沥青路面结构面层的要求主要体现在功能上,要求面层具备一定抵御车轮作用导致的磨损作用,防止雨水下渗及使驾驶具有安全性和舒适性。混合式结构沥青路面建议选择标准材料中的BBSG2、BBSG3、BBME2、BBME3,至于BBDR排水性混合料以及BBTM等超薄型混合料不建议采用。

(2) 基层。基层在法标中被认为是非常重要的结构层,主要承担上部荷载向下传递至底基层或者路基顶面。其疲劳性能要求更高,为此法国规范对基层材料的抗疲劳性能强于面层,这一点与中国路面设计有很大差别,针对混合式路面结构建议选择GB3、GB4、EME2等抗疲劳性能较好的混合料,具体选择何种针对项目具体情况进行论证比选确定,而GB2以及EME1等基层材料相比抗疲劳性能不及上述3种,不建议采用。

(3) 底基层。法标中混合式沥青路面底基层可采用经过水泥石灰以及道路专用黏结剂等水硬性半刚性材料,因而其可选材料较为宽泛。法国规范根据其配比及其相应的力学特性将水硬性材料划分为不同的力学等级,同时对底基层中不适宜的材料提出限制要求,如材料力学等级低于S1级的材料不能用作底基层材料。鉴于水硬性材料具有明显的收缩导致的开裂特性,水硬性材料要求施工时进行预开裂处理,这种强制性要求的做法也与中国的习惯不同。关于水硬性材料的力学指标,建议设计前通过不同水泥掺量确定其力学指标后再合理进行设计,因为不同地区的水硬性材料可能会有很大差异。

### 4 法标混合式沥青路面结构设计方法的注意事项

法标中混合式路面结构设计方法总体是建立在室内试验获得具体的设计参数并结合法国本土实际道路工程监测进行修正的一套相对严谨的计算方法,需要

根据具体的环境气候进行调整设计参数以及结合所在地的调整计算过程的修正系数。如此导致在法国以外的国家使用该规范时需要很多专项研究工作。例如等效温度、相对于标准轴载的重车车辆破坏系数CAM值以及结构修正系数等参数的确定都需要进行研究才能获取,法国规范中只是提供其本土设计参数。

## 5 混合式沥青路面结构的优缺点分析

### 5.1 混合式沥青路面结构优势

(1) 法标中由于对混合式沥青路面结构的沥青层厚度占比有明确要求,从结构构造上分析,因水稳层底基层厚度一般不低于20 cm,进而导致该结构的沥青层厚度一般不低于20 cm。20 cm以上的沥青层在抵御气候变化引起水稳层底基层的干湿变形以及温度变化引起热胀冷缩变形造成的损伤方面可起到较好的保护作用。

根据大连理工大学康海贵等实测沥青路面温度场分布规律可知,距离路面表面越远其受到气温影响越小,温度梯度越小,温度随着深度的增加,温度变化速率逐渐减小,根据其研究过程可知:在20 cm以下的路面内部每天的温度变化范围较小(25 cm时不超过2℃),而混合式沥青路面结构的水稳层已经处于该范围以下,其受每天气温频繁变化导致的疲劳损伤将会显著降低,进而一定程度上延缓了水稳层底基层开裂。结构组合上依靠半刚性底基层的强大支撑作用,充分发挥了水稳材料优点,也能使沥青层材料疲劳开裂大幅度延缓。

(2) 混合式沥青路面结构相比全厚式沥青路面结构可大幅度降低沥青层厚度,明显降低建设造价。

如重交通量等级下,运营期累计 $6.52 \times 10^6$ 辆重车作用下(假定 $CAM_{\text{沥青层}} = 0.8$ , $CAM_{\text{水稳层}} = 1.3$ ,路基强度统一采用120 MPa路基强度)采用全厚式沥青路面结构为5 cmBBSG2面层+28 cmGB3基层才能满足要求,总厚度为33 cm,计算结果如表2所示。

而采用混合式结构则为5 cmBBSG2面层+17 cmGB3基层+22 cm水稳碎石GC3底基层,总厚度为44 cm才可满足,计算结果如表3所示。

根据以上结构层,考虑不同地区路面材料单价差别较大,通过拟定不同参考单价计算两种结构的单价,计算结果如表4所示。通过分析了解可知,采用混合式路面结构相比采用全厚式沥青路面可明显降低建设期工程造价,降幅为14%~17%。

表 2 全厚式沥青路面结构的计算结果

厚度/ m	模量/ MPa	泊松比	竖向计算 Z 值/m	$\epsilon_{t,cat}/$ $\mu\epsilon$	$\sigma_{t,cat}/$ MPa	$\epsilon_{z,cat}/$ $\mu\epsilon$
0.05	2 200	0.35	0.000	28.3	0.184	57.3
			0.050	23.0	0.243	143.8
0.28	2 700	0.35	0.050	23.0	0.293	111.1
			0.330	-125.7	-0.446	118.3
土基	120	0.35	0.330	-125.7	0.002	327.6

表 3 混合式沥青路面结构的第一、二阶段计算结果

阶段	厚度/ m	模量/ MPa	泊松比	竖向计算 Z 值/m	$\epsilon_{t,cat}/$ $\mu\epsilon$	$\sigma_{t,cat}/$ MPa	$\epsilon_{z,cat}/$ $\mu\epsilon$
第一 阶段	0.05	2 200	0.35	0.000	-20.1	-0.010	124.8
				0.050	-5.4	0.105	185.7
	0.17	2 700	0.35	0.050	-5.4	0.123	152.3
				0.220	8.9	0.143	54.6
	0.22	23 000	0.25	0.220	8.9	0.381	3.6
				0.440	-25.1	-0.731	15.4
土基	120	0.35	0.440	-25.1	0.003	97.3	
第二 阶段	0.05	2 200	0.35	0.000	9	0.122	76.5
				0.050	2.2	0.148	169.9
	0.17	2 700	0.35	0.050	2.2	0.177	137.1
				0.220	-150.9	-0.438	194.6
	0.22	4 600	0.25	0.220	63.8	0.491	-8.8
				0.440	-95.3	-0.531	60.9
土基	120	0.35	0.440	-95.3	0.007	314.4	

表 4 全厚式沥青路面与混合式沥青路面造价对比

元/m<sup>2</sup>

材料	参考单价 1	参考单价 2	参考单价 3	参考单价 4	参考单价 5
5 cmBBSG	60.0	80	100	120	140
28 cmGB3	336.0	448	560	672	784
17 cmGB3	204.0	272	340	408	467
22 cm 水稳定碎石	73.6	92	110	132	158
全厚式沥青路面	396.0	528	660	792	924
混合式沥青路面	337.6	444	550	660	774

## 5.2 混合式沥青路面结构的缺点

(1) 混合式沥青路面结构由于采用了水稳层作为底基层,其结构破坏很大程度上受控于水稳层的完整性,尽管受上部沥青层的保护使其能够延缓开裂,但是在车辆荷载作用下以及受环境气候变化引起收缩导致的横向裂缝将是难免的,当出现了轻微的横向裂缝时

为了避免横向裂缝的扩展导致路面加速破坏需要及时对裂缝进行封堵。如此导致道路养护成本相比全厚式沥青路面会有所增加。

(2) 混合式沥青路面结构采用了水稳材料等半刚性材料作为结构层,使得其承受多轴货车重载荷载作用产生损伤相比全厚式沥青路面有大幅度增加。根据

法标规范 NF 98-082 中提到的关于不同联轴的单个轴载相当于标轴轴载产生的折算系数如式(5),CAM 计算公式如式(6):

$$A = K \times \left( \frac{P}{130} \right)^a \quad (5)$$

$$CAM = \frac{\sum A_i}{NPL} \quad (6)$$

式中: $A$  为不同联轴的单个轴载相当于标轴轴载产生的折算系数; $K$  为取决于路面结构和车轴的几何特征,如表 5、6 所示; $a$  为取决于路面材料的抗疲劳性能,沥青混合料基层与底基层取 5,水稳层半刚性材料取 12; $P$  为不同联轴的单个轴载重量(kN)。

表 5 混合式沥青路面结构  $K$  值

结构层类型	K 值		
	单轴	双联轴	三联轴
半刚性水稳层	1	12.00	113.0
沥青基层	1	0.75	1.1

表 6 全厚式沥青路面结构  $K$  值

结构层类型	K 值		
	单轴	双联轴	三联轴
沥青基层与底基层	1	0.75	1.1

由表 5 及式(5)可知:随着联轴数从单轴到三联轴,对于水稳层的  $K$  值从 1 提高到 113,且三联轴的单轴超过 13 t 后,将按照 12 次方的幂级数递增。为验证上述说法,通过一辆六轴超载车总重 78 t 进行计算,按照前轴 6 t、双联轴中轴 30 t(15 t + 15 t)、三联轴后轴 42 t(13.5 t + 13.5 t + 13.5 t),经计算可知,该辆超载车针对水稳层的标准当量轴数折算系数  $CAM = 666.8$ ,而对于沥青基层和底基层该辆超载车对沥青基层和底基层的标准当量轴数折算系数  $CAM = 7.07$ ,两者相差约 94 倍。说明超载车辆对半刚性材料路面的破坏比沥青层材料的破坏更为严重。

针对这一特性,在运营道路的重车比例中,多轴车占比较大且存在一定程度的多轴车的单轴超载,采用混合式沥青路面结构不如全厚式沥青路面抵御多轴车超载能力。

## 6 结论

(1) 法标混合式沥青路面结构按照混合式结构的破坏模式采用两阶段进行模拟结构破坏过程建立的计算方法是一种值得借鉴的结构计算方法;通过计算分析显示:结构层应力应变响应与结构模型的分阶段进行模拟有很好的匹配度,分析认为采用两阶段进行模拟较为合理。

(2) 混合式沥青路面结构面层材料主要选择 BBSG2、BBSG3、BBME2、BBME3,基层材料选择 GB3、GB4、EME2,底基层采用水硬性材料,鉴于不同地区的水硬性材料可能会有很大差异,水硬性材料的力学指标,建议设计前通过不同水泥掺量确定其力学指标,以便合理进行设计。

(3) 混合式沥青路面相比半刚性路面能够较好减少横向反射裂缝的出现,同时造价上相比全厚式沥青路面结构能够降低,该结构在高等级道路上具有一定推广使用价值。

(4) 混合式沥青路面结构采用了水硬性半刚性材料作为承重结构层,分析认为多轴超载货车对混合式路面产生损伤相比全厚式沥青路面有大幅度增加。采用混合式沥青路面结构不如全厚式沥青路面抵御多轴车超载能力。

### 参考文献:

- [1] SETRA, LCPC. Conception et Dimensionnement Des Structures De Chaussee Guide Technique [M]. Paris, 1994.
- [2] 徐鸥明.长寿命沥青路面设计指标与设计方法研究[D].长安大学博士学位论文,2017.
- [3] 康海贵,郑元勋,蔡迎春,等.实测沥青路面温度场分布规律的回归分析[J].中国公路学报,2007(6).
- [4] 吁新华,谈至明.沥青路面压应力分布规律的研究[J].中外公路,2016(6).
- [5] 蒋松利,丁淑巍.基于法国标准的复合式基层沥青路面结构设计案例分析[J].中外公路,2018(5).
- [6] 黄开宇,钟梦武.混合式基层沥青路面结构设计方法的研究[J].公路工程,2010(5).