

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.007

# 基于 FWD 旧沥青路面加铺层设计方法研究

柯能信

(中交武汉港湾工程研究院有限公司 海工结构新材料及维护加固重点实验室, 湖北 武汉 430048)

**摘要:**为了确定合理的加铺层厚度,需计算现有路面的有效结构能力  $SN_{eff}$ , AASHTO 推荐采用无损检测(NDT)方法,有两种方法可以应用。方法 1:基于 FWD 弯沉盆反算旧路面各层的回弹模量,然后将回弹模量与层位系数、排水系数以及各结构层厚度联系,累加便可得到  $SN_{eff}$ ;方法 2:依据 FWD 弯沉盆中心最大挠度  $d_0$ 、路面总厚度、土基模量,得出  $E_p$ ,进而求得  $SN_{eff}$ 。该文依据哥斯达黎加高速公路项目路面加铺层设计,分别采用方法 1、2,研究加铺层设计方法,最后依据 AASHTO 2002 提供的疲劳开裂、永久变形模型进行验证评价。

**关键词:** 道路工程; 沥青路面; 落锤式弯沉仪; 加铺层; AASHTO 设计

随着公路使用年限的增加,作用于公路的荷载次数逐次累加。当作用的荷载次数达到一定数值时,路面材料会出现破坏。为了保证公路安全和舒适使用性能,常采用在旧沥青路面上加铺新的沥青层,以延长公路的使用寿命。事实上,AASHTO 老路加铺设计正是基于公路的剩余寿命,其基本公式为:

$$SN_{ol} = SN_f - SN_{eff} \quad (1)$$

式中: $SN_{eff}$  为老路有效结构数,即公路使用一定年限后结构数变小后其剩余的结构数; $SN_{ol}$  为加铺层所需的结构数; $SN_f$  为未来交通所需的结构数,由交通量决定。

这里“SN”结构数反映的是公路的使用性能,它与路面作用次数  $N$  存在函数关系,而材料(包括 AC、无机结合料)的寿命,依据 Miner 定律的累积损伤原理,它与作用次数紧密相关,即加铺厚度  $D_{ol}$ 、次数  $N$ 、材料剩余寿命建立起如下关系:

$$D_{ol} \leftarrow SN \leftrightarrow N \leftrightarrow \text{剩余寿命}$$

## 1 FWD 弯沉盆

落锤式弯沉仪在计算机控制下,把一定质量的重锤由液压传动装置提升至一定高度后自由落下,冲击力作用于承载板上并传递到路面,从而对路面施加脉冲荷载,导致路面表面产生瞬时变形,分布于距测点不同距离的传感器检测结构层表面的变形,记录系统将信号传输至计算机,即测定在动态荷载作用下产生的

动态弯沉及弯沉盆。图 1 为哥斯达黎加高速公路改扩建项目的 5 组实测弯沉盆数据。

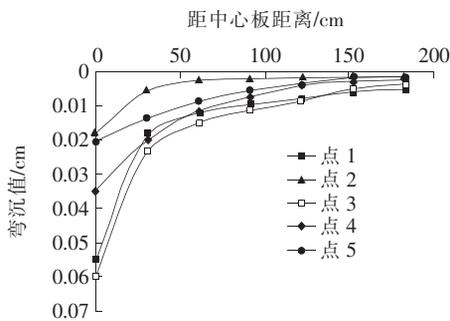


图 1 FWD 弯沉盆

## 2 $SN_{eff}$ 的计算方法

AASHTO 推荐使用两种方法来获得老路的有效结构数。

### 2.1 方法 1

在 AASHTO 设计方法中,HMA、基层和底基层的质量性能用其结构数  $SN$  表示,其计算式为:

$$SN = \sum a_i D_i m_i = a_1 D_1 m_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (2)$$

式中: $a_i$  为层位系数; $D_i$  为老路路面结构层厚度; $m_i$  为排水系数。

层位系数  $a_i$  用于度量某种材料作为路面的结构组成部分,即单位厚度具有的相对功能。它与材料的回弹模量存在函数关系。其中:沥青混凝土面层的层

收稿日期:2021-03-12(修改稿)

作者简介:柯能信,男,硕士,工程师。E-mail:2691834615@qq.com

位系数  $a_1$  可由 AASHTO T274 进行试验,根据确定的 HMA 回弹模量与层位系数关系曲线取值。

稳定基层的层位系数为:

$$a_2 = 0.249(\log E_2) - 0.977 \quad (3)$$

粒料底基层的层位系数为:

$$a_3 = 0.227(\log E_3) - 0.839 \quad (4)$$

对于粒料基层和底基层,应当根据实地调查的排水状况和含水率,查表 1、2 得到  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 。

表 1 排水状况

等级	水排除时间	等级	水排除时间
优	2 h	差	1 个月
好	1 d	很差	永不排干
良	1 周		

表 2 排水系数

等级	不同路面结构含水量接近饱和状态的 时间百分数(%)的排水系数			
	<1	1~5	5~25	>25
优	1.40~1.35	1.35~1.30	1.30~1.20	1.20
好	1.35~1.25	1.25~1.15	1.15~1.00	1.00
良	1.25~1.15	1.15~1.05	1.00~0.80	0.80
差	1.15~1.05	1.05~0.80	0.80~0.60	0.60
很差	1.05~0.95	0.95~0.75	0.75~0.40	0.40

注:表 1、2 源自 AASHTO(1986)。

根据实地调查,该项目排水状况为优,且路面结构含水量饱和状态的时间百分数大于 25%,故排水系数  $m_i$  取 1.0。

依据现场调查得到的老路使用状况和各层层厚,输入 FWD 弯沉盆数据,用 BAKFAA 软件反算老路各层弹性模量。反算模量如表 3 所示。

表 3 各点各层的反算模量 MPa

点号	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
1	584.533 82	803.167 30		199.679 09
2	193.609 00	406.041 48	161.467 15	114.608 26
3	644.084 09	212.721 86		175.405 62
4	2 206.398 48	306.942 61		242.417 76
5	159.434 60	703.406 99	255.171 15	120.271 84

## 2.2 方法 2

依据现场调查得到的老路使用状况和各层层厚以及 FWD 荷载弯沉值  $d_i$ ,求得土基模量  $M_R$ 、整个路面

当量弹性模量  $E_P$ ,进而求得老路的有效结构数。

### 2.2.1 土基回弹模量 $M_R$

在距荷载足够远的地方,测量得到的路面弯沉量仅是由路基变形引起的,并且也与荷载板的尺寸无关。可以通过下列方程,用弯沉测量数据和荷载幅值反算土基回弹模量。

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r} \quad (5)$$

式中: $M_R$  为反算的土基回弹模量 (psi, 1 psi = 0.006 89 MPa); $P$  为施加的荷载(磅,1 磅 = 4.45 N); $d_r$  为距荷载中心一定距离的弯沉量(in, 1 in = 2.54 cm); $r$  为距荷载中心的距离(in)。

用于反算土基回弹模量的弯沉必须在足够远的地方测量,这样能对土基回弹模量进行很好的估计而不受任何上层结构层的影响。但是也应该足够的近,对精确测量来说也不能太小。最小的距离可以通过下述关系式确定:

$$r \geq 0.7a_e \quad (6)$$

其中:

$$a_e = \sqrt{\left[ a^2 + \left( D \sqrt{\frac{E_P}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

式中: $a_e$  为路基路面截面处的应力球半径; $a$  为落锤式弯沉仪荷载板半径; $D$  为路基以上路面结构的总厚度; $E_P$  为路基以上所有路面结构层的当量弹性模量。

### 2.2.2 路面当量弹性模量 $E_P$

依据式(8)计算:

$$\frac{M_R d_0}{P} = 1.5 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_P}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{\left( \frac{E_P}{M_R} \right)} \right\} \quad (8)$$

式中: $d_0$  为荷载板中心处的弯沉测量值(应调整到标准温度下再换算); $P$  为 NDT 荷载板压力值; $a$  为 NDT 荷载板半径; $D$  为路基以上路面结构的总厚度; $E_P$  为路基以上路面结构的等效弹性模量。

对半径为 15 cm 的荷载板可以由规范(AASHTO 1993)相关图表确定  $\frac{E_P}{M_R}$  的比值。更进一步, $E_P$  可以通过已知的  $M_R$  值得到。

### 2.2.3 现有路面的有效结构数( $SN_{eff}$ )

$$SN_{eff} = 0.0045 D \sqrt[3]{E_P} \quad (9)$$

式中: $D$  为路基以上所有结构层的总厚度; $E_P$  为路基

以上结构层的当量弹性模量。

需要注意的是,以上 2 种方法都要考虑标准化温度和荷载,因为以上公式都是在规定温度和荷载情况下取得的。首先由大气温度  $T_{\text{aire}}$  确定路面面层的温度  $T$ :

$$T = (1.18 - 0.017z)T_{\text{aire}} + (0.76z - 1.7) \quad (10)$$

式中: $T$  为路面面层的温度;  $T_{\text{aire}}$  为大气实测温度;  $z$  为沥青混凝土面层厚度的一半。然后依据规范中图表查得温度调整系数  $F_A$ 。

综上,依据方法 2 处理的结果见表 4。

表 4 各点有效结构数

点号	$M_R/\text{MPa}$	$CM_R/\text{MPa}$	$E_P/\text{MPa}$	$SN_{\text{eff}}$
1	392.847 13	130.951 34	1 374.968 4	5.71
2	151.152 82	50.386 57	529.034 87	7.23
3	229.946 86	76.651 25	804.814 01	4.07
4	395.458 44	131.819 48	1 384.104 54	4.88
5	110.839 43	36.944 18	387.934 56	6.17

注: $C$  为调整系数,具体见后文介绍。

### 3 未来交通所需结构数的测定( $SN_f$ )

旧路加铺层未来交通所需结构数( $SN_f$ )的测定和新建路面的方法是一致的,都是由交通量调查、轴次换算系数  $ELAF$  确定累积当量轴载作用次数  $ESAL$ 。

其中轴次换算系数  $ELAF$  应当根据等损伤原则确定,即轴载在路面通过一次产生的损伤与标准轴载 80 kN 通过一次产生的损伤之比,也可结合当地规范和项目经验直接确定。表 5 为哥斯达黎加当地常用的  $ELAF$  取值。

表 5 轴次换算系数  $ELAF$

车型	$ELAF$	车型	$ELAF$
小汽车	0.01	三轴卡车	1.28
轻型货车	0.02	四轴卡车	1.83
巴士	1.71	五轴卡车	2.38
两轴卡车	0.63		

依据 AASHTO 道路试验的成果,并进行气候条件和土基支承条件修正,可以确定累积当量轴载作用次数  $ESAL$  和交通所需结构数  $SN_f$  的方程关系:

$$\log W_{18} = z_r S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.2 +$$

$$\frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1.094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_r - 8.07 \quad (11)$$

式中: $W_{18}$  为设计年限内 80 kN 累计当量轴载作用次数  $ESAL$ ;  $z_r$  为给定可靠的正太偏移;  $S_0$  为标准离差;  $SN$  为路面结构数;  $\Delta PSI$  为服务能力变化值;  $M_r$  为路基土有效土基回弹模量。值得注意的是  $M_r$  的取值问题,回弹模量必须:① 能反映季节的变化;② 与 AASHTO 公路试验土壤的回弹模量值一致。如果需要,季节影响的调整可以从弯沉反推的  $M_r$  值与柔性路面设计方程中 AASHTO 公路试验土壤试验室测得的数据一致。当试验施加大约 40 kN 的荷载时,推荐对于设计中确定  $SN_f$  的路基等效回弹模量(反推得到的)乘以一个调整系数  $C = 0.33$ 。如果用户采用此数据用于其土壤和弯沉的测量试验,应对它进行评估和调整。因此,应该采用下面  $M_r$  的设计值来确定  $SN_f$  值。

$$M_{r\text{设计值}} = C \left( \frac{0.24P}{d_{r,r}} \right) \quad (12)$$

建议  $C = 0.33$ 。

### 4 加铺层厚度的确定

沥青混凝土加铺层厚度的计算如下:

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{a_{ol}} = \frac{(SN_f - SN_{\text{eff}})}{a_{ol}} \quad (13)$$

式中: $D_{ol}$  为沥青加铺层厚度;  $SN_{ol}$  为加铺所需的结构数(无量纲);  $a_{ol}$  为新加铺沥青的层位系数(可由弹性模量试验获得,无量纲);  $SN_f$  为未来交通所需结构数;  $SN_{\text{eff}}$  为现有路面的有效结构数。

图 2 为计算的各点加铺层厚度。

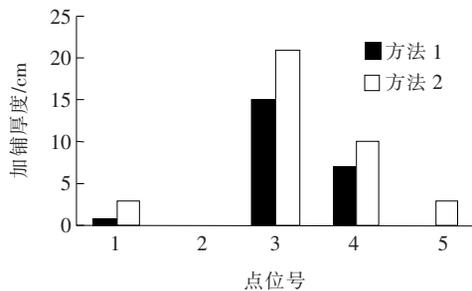


图 2 各点加铺厚度

由图 2 可以看出:各点按方法 2 加铺的厚度均大于方法 1,说明相对于方法 1 来说,方法 2 更加保守。点 1 两种方法加铺层厚度之差为 2 cm,但一般沥青混

合料加铺层都有最小厚度要求,两种方法加铺厚度都应满足最小厚度要求;点 2 两种方法计算得出都不需要加铺,说明这路段老路的结构能力能够满足使用年限内要求;点 3 两种方法加铺的厚度分别为 15、21 cm,均较大,说明这个路段老路沥青面层破坏较为严重,上面层的路用性能大大折减;对于此路段应特别注意现场路况调查,对于损害严重的地方应铣刨并翻新基层;点 4 方法 1、2 加铺厚度分别为 7、10 cm,应对于老路的反射裂缝、路面龟裂等加以关注、论证;点 5 方法 1 算出不需要加铺层,而方法 2 需要加铺 3 cm 沥青层,两种方法差别较大。下文的力学经验法以点 5 加铺的结构模型进行重点分析。

## 5 力学—经验法验证

与新建路面一样,加铺的旧路也需要进行力学—经验法预估其开裂和损伤,最常用的破坏准则有疲劳开裂和永久变形(即车辙)。

### 5.1 预估模型

荷载采用单轴双轮 80 kN 标准轴载,即胎压为 0.7 MPa,车胎的当量圆半径为 9.765 cm,路面损伤模型如图 3 所示。

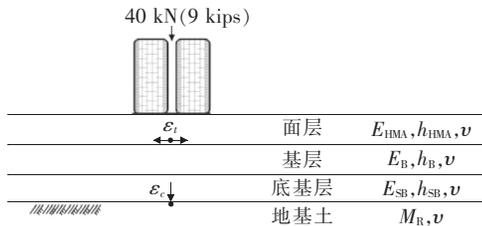


图 3 路面损伤模型

### 5.2 疲劳开裂

#### 5.2.1 沥青混合料的疲劳开裂

为了模拟沥青面层的疲劳破坏,常用下式表达:

$$N_f = Ck_1 \epsilon_c^{-k_2} E^{-k_3} \quad (14)$$

式中: $N_f$  为疲劳开裂重复作用次数; $\epsilon_c$  为临界位置拉应变; $E$  为沥青混合料的动态模量; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为试验回归系数; $C$  为现场标定系数。

经过现场标定试验确定相关参数,最终模型为:

$$N_f = 0.00432C\epsilon_c^{-3.291} E^{-0.854} \quad (15)$$

$$C = 10^M \quad (16)$$

$$M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right) \quad (17)$$

式中: $V_b$  为有效集料的含量(%); $V_a$  为空隙率(%)。

#### 5.2.2 无机结合料的疲劳开裂

美国公路合作研究组织 NCHRP 于 2006 年基于

应力比  $\left( \frac{\sigma_t}{E_R} \right)$  对无机结合料稳定粒料的疲劳破坏进行预测,疲劳开裂方程如下:

$$\log N_f = \frac{k_{c1} \cdot \beta_{c1} - \left( \frac{\sigma_t}{E_R} \right)}{k_{c2} \cdot \beta_{c2}} \quad (18)$$

式中: $N_f$  为无机结合料稳定粒料允许荷载重复作用次数; $\sigma_t$  为无机结合料稳定粒料最大层底拉应力; $E_R$  为无机结合料稳定粒料 28 d 断裂模量; $k_{c1}$ 、 $k_{c2}$  为全体标定系数, $k_{c1} = 0.972$ ,  $k_{c2} = 0.0825$ ;  $\beta_{c1}$ 、 $\beta_{c2}$  为地方标定系数, $\beta_{c1} = 1.0645$ ,  $\beta_{c2} = 0.9003$ 。

#### 5.2.3 永久变形

永久变形是柔性路面的荷载相关破坏的主要类型之一,是车载重复作用的积累,表现为轮迹处纵向沉陷并伴随着轮迹边缘的隆起。车辙的宽度和深度取决于路面结构、交通大小及分布以及环境因素。许多年来设计者都是通过限制土基的竖向应变可以降低车辙水平。随着时间推移和技术的发展,人们认识到车辙是由路面各层的永久变形累加起来的。即:

$$RD_{\text{总}} = RD_{AC} + RD_{GB} + RD_{SG} \quad (19)$$

研究发现,车辙绝大部分发生在沥青面层,因而只计算沥青混合料的永久变形。沥青混合料的车辙模型数学公式为:

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \alpha_1 T^{\alpha_2} N^{\alpha_3} \quad (20)$$

式中: $\epsilon_p$  为  $N$  个重复荷载作用次数的累积塑性应变; $\epsilon_r$  为沥青混合料的回弹应变; $N$  为重复荷载作用次数; $T$  为实时温度; $\alpha_i$  为非线性回归参数。

经过试验标定,最终模型为:

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.15552} T^{1.734} N^{0.39937} \quad (21)$$

表 6 为点 5 按方法 1、2 以软件 PITRA PAVE 算得的力学响应,各层均以弹性均质材料计算。

#### 5.2.4 力学经验法验证

根据哥斯达黎加交通部 MOPT 文件 DVOP-6152-07 和 DVOP-5170-07,该项目的当量轴载累计作用次数  $ESAL$  为 11 464 114 次。结合以上模型的力学响应以及试验室试验参数,该路面应变、应力比、弹性变形结果如表 7 所示。

##### (1) 沥青混合料疲劳开裂验算

将表 7 中 HMA 层底拉应变代入式(15)。

方法 1: $N_f = 0.00432 \times 10^{-0.9196} (0.000122)^{-3.291} \times (440000)^{-0.854} = 59726210$ , 大于  $ESAL$ 。

表 6 方法 1、2 力学响应

方法	点号	$z$ 方向的 位移/cm	$\epsilon_{xx}$ (1)	$\epsilon_{yy}$ (1)	$\epsilon_{zz}$ (1)	$\sigma_{xx}$ /MPa	$\sigma_{yy}$ /MPa	$\sigma_{zz}$ /MPa
	1	$3.05 \times 10^{-2}$	$-1.22 \times 10^{-4}$	$-1.22 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^{-1}$	$1.78 \times 10^{-1}$	$3.87 \times 10^{-1}$
1	2	$2.45 \times 10^{-2}$	$-1.49 \times 10^{-4}$	$-1.49 \times 10^{-4}$	$2.63 \times 10^{-4}$	$-1.09 \times 10^{-1}$	$-1.09 \times 10^{-1}$	$9.85 \times 10^{-2}$
	3	$1.50 \times 10^{-2}$	$-6.02 \times 10^{-5}$	$-6.02 \times 10^{-5}$	$1.11 \times 10^{-4}$	$-1.44 \times 10^{-2}$	$-1.44 \times 10^{-2}$	$1.67 \times 10^{-2}$
	1	$2.27 \times 10^{-2}$	$-1.22 \times 10^{-4}$	$-1.22 \times 10^{-4}$	$2.27 \times 10^{-4}$	$-1.44 \times 10^{-1}$	$-1.44 \times 10^{-1}$	$2.12 \times 10^{-1}$
2	2	$1.86 \times 10^{-2}$	$-9.68 \times 10^{-5}$	$-9.68 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-4}$	$-7.65 \times 10^{-2}$	$-7.65 \times 10^{-2}$	$5.59 \times 10^{-2}$
	3	$1.24 \times 10^{-2}$	$-4.23 \times 10^{-5}$	$-4.23 \times 10^{-5}$	$7.75 \times 10^{-5}$	$-1.03 \times 10^{-2}$	$-1.03 \times 10^{-2}$	$1.15 \times 10^{-2}$

表 7 路面应变、应力比、弹性变形结果

方法	HMA 层底 拉应变	粒料层 应力比	路面弹性 变形/cm
1	$-1.22 \times 10^{-4}$	0.34	$5.91 \times 10^{-3}$
2	$-1.22 \times 10^{-4}$	0.42	$4.89 \times 10^{-3}$

方法 2:  $N_f = 0.00432 \times 10^{-3.3396} (0.000122)^{-3.291} \times (440000)^{-0.854} = 227073$ , 小于  $ESAL$ 。

(2) 无机结合料层底疲劳开裂验算

将表 7 中粒料层应力比代入式(18)。

$$\text{方法 1: } \log N_f = \frac{0.972 \times 1.0645 - 0.35}{0.0825 \times 0.9003} =$$

9.21898, 则  $N_f = 1655711957$ , 大于  $ESAL$ 。

方法 2:  $N_f = 189006925$ , 大于  $ESAL$ 。

(3) 车辙验算

将表 7 中路面的弹性变形代入式(21)。

$$\text{方法 1: } \epsilon_p = 10^{-3.15552} T^{1.734} N^{0.39937} \epsilon_r = 7.39 \text{ mm}。$$

$$\text{方法 2: } \epsilon_p = 10^{-3.15552} T^{1.734} N^{0.39937} \epsilon_r = 11.13 \text{ mm}。$$

综上所述,点 5 按方法 1 没有加铺层,其沥青混合料为老路本身的沥青层,验算其疲劳开裂次数小于  $ESAL$ ,这说明其不能满足疲劳开裂的要求;但无机稳定结合料的疲劳开裂次数大于  $ESAL$ ,可以满足要求的车辙深度 7.39 mm,满足当地规范要求的小于 12.7 mm;按方法 2 加铺层厚度为 3 cm,其沥青混合料、无机结合料的疲劳开裂次数均大于  $ESAL$ ,这表明它们均能满足疲劳开裂的要求,车辙深度为 11.13 mm 也小于 12.7 mm。

## 6 结论

(1) AASHTO 加铺层设计在落锤式弯沉仪测得路面弯沉盆的基础上,采用两种方法计算加铺层厚度。对比该项目 5 组数据可以看到:方法 2 加铺厚度大于

方法 1,且经力学经验法验算,方法 2 更加合理、可靠。

(2) 依据现场 FWD 弯沉盆数据,用相关软件反算模量时,由于模量对于弯沉值不是十分敏感,故在应用 FWD 反算模量时应结合实地调查、检测并应给出合适的初始模量值。

(3) 加铺层的厚度应做好路面状况调查工作,根据当地交通量、经济发展速度、气候、路用材料等综合决定,同时应考虑到最小厚度要求和沥青混合料施工因素。对于旧路较为严重的损坏应修补,应特别关注反射裂缝的问题。

(4) 与新建路面一样,加铺的旧路也需要进行力学一经验法预估其开裂和损伤,采用的疲劳开裂模型、车辙模型应根据当地试验室结果重新标定,避免直接套用。

## 参考文献:

- [1] 黄仰贤.路面分析与设计[M].余定选,齐诚,译.北京:人民交通出版社,1998.
- [2] MOPT, Costa Rica. Enmienda de Oficio Pedro Castro DiseÑosDvop-5170-07[R], 2007.
- [3] 倪明,姚祖康.旧水泥混凝土路面上沥青加铺层的应力分析[J].同济大学学报,1989(1).
- [4] 查旭东.路面结构层模量反算方法综述[J].交通运输工程学报,2002(4).
- [5] 沙庆林,王旭东.水泥混凝土路面加铺沥青混凝土面层的技术研究[J].公路,2002(11).
- [6] 颜可珍,林峰,江毅.交通荷载下沥青加铺层路面力学分析[J].中南大学学报(自然科学版),2011(7).
- [7] 杨斌.旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究[D].长安大学博士学位论文,2005.
- [8] 王朝辉,王选仓.基于沥青加铺层结构疲劳寿命的夹层位置确定[J].中国公路学报,2008(1).
- [9] 臧国帅,孙立军.基于 FWD 的半刚性基层开裂状况无损评价模型[J].土木工程学报,2019(1).