

# 基于模量反算的共振碎石化沥青加铺结构验算

周亮

(岳阳市公路桥梁基建总公司, 湖南 岳阳 414000)

**摘要:** 目前国内早期修筑的水泥砼路面大多处于大中修阶段, 旧水泥砼路面的加铺改造设计需确定设计参数。文中以湖南某高速公路大修工程加铺结构为例, 利用 FWD 采集 7 个传感器位置的弯沉, 得到共振碎石化加铺结构的实测弯沉盆, 采用 BISAR 程序拟合得到各结构层的模量组合, 根据动态弯沉值和拟合结果进行加铺结构刚度验算和厚度设计。得出旧砼板共振碎石化加铺层材料的刚度不得低于 1 128.59 MPa; 加铺结构半刚性基层层底拉应力、沥青混合料层总的永久变形量满足要求, 拟定的加铺层厚度合理。

**关键词:** 公路; 弯沉盆; 加铺结构; 共振碎石化; 结构验算

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0070-05

在中国, 对于水泥砼路面的维修, 经常是在水泥砼路面上铺筑沥青面层, 这样不仅利用了水泥砼路面的强度, 同时对环境和交通的影响较小。旧水泥砼路面加铺技术根据加铺材料可分为旧水泥砼上加铺沥青砼路面(“白加黑”)、旧水泥砼上加水泥砼路面(“白加白”)两种, 根据旧水泥砼路面的处理工艺可分为板块碎石化、板块注浆稳定两种, 其中采用板块碎石化后加筑沥青砼面的工艺称为“白改黑”。经过板块碎石化后直接铺筑沥青面层施工简便, 能改善旧水泥砼路面的使用性能, 延长其使用寿命, 降低维修成本, 故应用最多。

在模量反算方面, Chua K. M. 采用非线性有限元程序和试差法, 对 FWD 实测弯沉盆数据进行了面层模量反算; 孙立军等提出水泥砼路面存在惰性点, 并利用该点解决了水泥砼路面模量反算解的唯一性问题, 提高了反算精度和速度, 同时分析了惰性点位置和弯沉与路面结构参数的关系并给出了相应关系式。但对其结构验算的研究还不够深入。JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》在验算路面设计指标的选择上较原规范有较大调整, 增加了沥青混合料层永久变形量设计指标。控制沥青路面车辙量的关键是控制沥青层的永久变形, 特别是无机结合料稳定基层和底基层路基的沥青路面, 荷载在无机结合料稳定层和路基上反复作用引起的永久变形的累积量不大, 仅占路面总车辙的一小部分, 可认为永久变形不会发生。路面上的车辙主要是由沥青混合料层的永久变形所引起。对加铺层结构也是如此, 验算沥青混合料层永久变形量和层底拉应变对

行车舒适性和结构安全至关重要。该文结合实体工程, 对共振碎石化加铺结构进行验算, 为大修工程的结构选择提供参考。

## 1 弯沉采集及分析

### 1.1 工程背景

(1) 工程介绍。以湖南邵阳某高速公路大修工程加铺结构为例, 对旧路加铺结构进行结构验算, 原路面结构参数见图 1(a)。随着使用年限的增加, 交通量激增, 路面出现了很严重的结构破坏。为保障行车安全, 对其进行加铺改造, 改造方式是在病害处置的原路面上就地碎石化后加铺沥青层, 加铺后结构参数见图 1(b)。

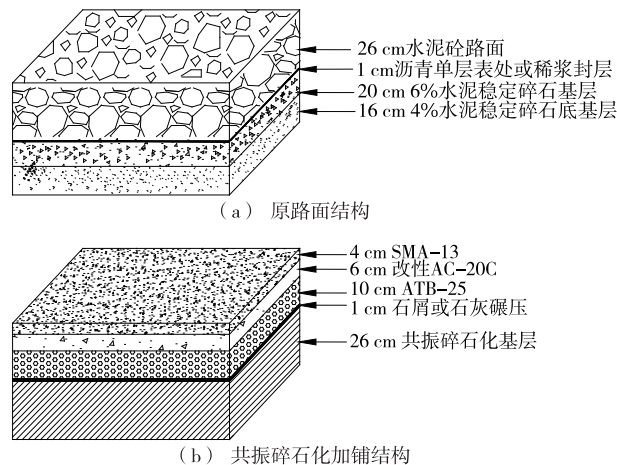


图 1 路面结构示意图

(2) 交通数据及气象资料。沥青路面设计使用年限为 15 年, 根据交通量 OD 调查分析, 该项目断

面大型客货交通量为 7 104 辆/d,交通量年增长率为 7.6%。根据设计资料,方向系数取 55.0%,根据《公路沥青路面设计规范》,车道系数取 80.0%,则设计车道初始年大型客货日均交通量为 3 126 辆/d,计算得设计使用年限内设计车道大型客货累计交通量为 19 001 411 辆,荷载等级为特重。根据《公路沥青路面设计规范》计算得到对应于沥青混合料层永久变形量和层底拉应变的当量设计轴载累计作用次数为  $1.92 \times 10^7$  次,对应于无机结合料层疲劳开裂的当量设计轴载累计作用次数为  $4.88 \times 10^7$  次。

湖南邵阳地处亚热带,属于典型中亚热带湿润季风气候,自然区划属东南湿热Ⅳ5区,沥青路面气候分区属Ⅰ-4区,年均降雨量 1 100~1 400 mm,年平均气温 16.1~17.4℃。其中 7 月最热,平均气

温 26.6~28.5℃;1 月最冷,多年月平均气温为 4.7~5.6℃。

1.2 模量拟合

利用 FWD 采集弯沉数据,弯沉检测通常受结构组合、厚度、路基土湿度、各结构层模量、层间连接状态等影响,高速公路大修工程还会受到通行区重型车辆通行的影响。为减少误差,提高数据的可信度,将采集密度设置为每 50 m 一点,并记录准确桩号和具体位置,在沥青加铺完成后采集 C0~C6 7 个传感器位置的弯沉,共采集 20 个位置的弯沉,取其平均值作为测点的弯沉。对比实测弯沉盆数据,根据 BISAR 程序拟合原理并通过不断调整参数,直至 C0~C6 传感器位置的弯沉综合误差基本满足要求。弯沉理论值与实测值的对比见表 1、图 2。

表 1 弯沉理论值与实测值对比

传感器编号	距落锤中心 距离/mm	弯沉理论值/ (0.01 mm)	弯沉实测值/ (0.01 mm)	相对平方误差/ ( $\times 10^{-4}$ )	相对平方误差和/ ( $\times 10^{-3}$ )
C0	0	64.81	63.14	7.000	
C1	203	49.52	50.43	3.300	
C2	305	43.70	43.71	0.001	
C3	457	38.39	37.76	2.800	1.66
C4	610	33.94	34.33	1.300	
C5	914	27.53	27.95	2.300	
C6	1 219	22.70	22.67	0.020	

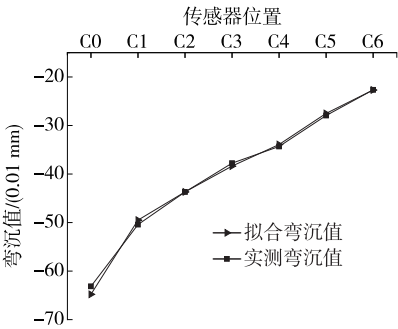


图 2 弯沉拟合值与实测值对比

由表 1 和图 2 可看出:弯沉理论值与实测值拟合较好,且曲线较平缓,可用于后续结构验算的参数选取。依据实测弯沉值通过 BISAR 程序拟合的模量见表 2。

2 加铺结构刚度验算

2.1 CMSR 程序

加铺结构刚度验算采用 CMSR 计算。该程序通过在新建或改建的原结构表面进行刚性承载板测试,获得顶面当量刚度后结合加铺层厚度和加铺结

表 2 结构层参数及模量拟合结果

结构层	层厚/m	泊松比	拟合模量/MPa
SMA-13	0.04	0.25	10 000
AC-20C	0.06	0.25	8 000
ATB-25	0.10	0.25	11 000
共振碎石化层	0.27	0.20	4 000
水稳基层	0.20	0.25	1 700
水稳底基层	0.16	0.25	780
土基	—	0.40	495

构顶面设计弯沉,快速计算加铺层结构刚度需达到的量化指标,还可通过现场刚性承载板测试,经过计算获得加铺层的实际刚度和压实质量。CMSR 程序结构为函数式结构,基本命令格式如下:

$$[E_{dx}] = \text{CMSR}(E_0, E_{\min\_max}, h, p, R, m\mu, wdx, \dot{c}_{sust})$$

式中: $E_0$ 为旧路表面的当量回弹模量(MPa); $h$ 为加铺层厚度(m); $E_{\min\_max}$ 为加铺层模量的拟设计值数组向量(MPa); $p$ 为等效荷载集度(MPa); $R$ 为刚性承载板半径(m); $m\mu$ 为旧路表面和新加铺层材料

的泊松比,以数组表示; $w dx$  为加铺后结构顶面回弹弯沉的设计值或控制值(0.01 mm)。

## 2.2 刚度验算

(1) 旧砗板共振碎石化路面当量回弹模量。经实地检测和计算,共振碎石机的振动频率为 48 Hz、行进速度为 1.3 km/h 时,旧砗板共振碎石化路面的顶面回弹模量为 541.28 MPa,变异系数为 24.5%。共振碎石化加铺结构参数取值见表 3。

表 3 共振碎石化加铺结构参数取值

参数	设计值	参数	设计值
$E_0/\text{MPa}$	541.28	$p/\text{MPa}$	0.7
$E_{\min\_max}/\text{MPa}$	[500, 1 500]	$R/m$	0.15
$w dx/(0.01 \text{ mm})$	20.1	$m\mu$	0.25
$h/\text{cm}$	0.20		

(2) 加铺层刚度。将表 3 中参数输入 CMSR 程序,输出结果见图 3。

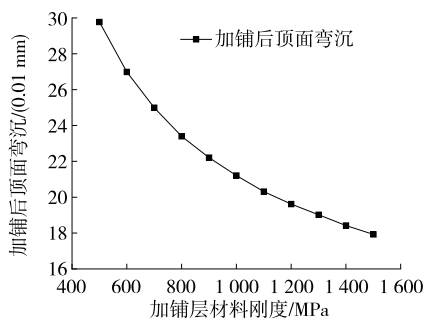


图 3 共振碎石化加铺结构刚度与弯沉的关系

加铺层拟加铺厚度  $h_a$  为 200 mm,铺筑后顶面设计弯沉为 20.1 (0.01 mm),计算出加铺层材料的刚度不得低于 1 128.59 MPa。

## 3 沥青加铺层厚度拟定与验算

拟定的路面结构方案及各结构层厚度见表 4。

表 4 路面结构方案及各结构层厚度

结构层	材料类型	厚度/mm	泊松比
面层	SMA-13(SBS 改性沥青)	40	0.25
	AC-20C(SBS 改性沥青)	60	0.25
	ATB-25(基质沥青)	100	0.25
基层	旧水泥板共振碎石化	260	0.25
底基层	水泥稳定碎石	360	0.25
土基	低液限黏土	—	0.40

根据 1.2 节拟合结果,水稳基层模量为 1 700 MPa,考虑到层间补偿原因,水稳碎石层模量根据设计资料取值,SBS 改性沥青 SMA-13 上面层、改性沥青 AC-20C 中面层、土基模量和水稳碎石层模

量与旧沥青路面直接加铺结构相同。参考规范中路面结构材料取值范围,基质沥青 ATB-25 层模量取 9 000 MPa,共振碎石化层模量参考文献[16]取 800 MPa。根据《公路沥青路面设计规范》,需要验算的设计指标为水泥稳定碎石层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量和层底拉应变。

### 3.1 水泥稳定碎石层层底拉应力

目标可靠度和目标可靠指标  $\beta$  分别取 95%、1.65,季节性冻土地区调整系数  $k_a$  取 1.0,基准路面结构温度调整系数  $k_{Ti}=1.45$ ,按《公路沥青路面设计规范》计算路面结构的温度调整系数。当量沥青面层换算如下:

$$h_a^* = h_{a1} + h_{a2} = 100 + 100 = 200 \text{ mm}$$

$$E_a^* = \frac{E_{a1} h_{a1}^3 + E_{a2} h_{a2}^3}{h_{a1} + h_{a2}} + \frac{3}{h_{a1} + h_{a2}} \left( \frac{1}{E_{a1} h_{a1}} + \frac{1}{E_{a2} h_{a2}} \right)^{-1} = 9\,480.26 \text{ MPa}$$

式中: $h_a^*$  为当量沥青面层厚度; $E_a^*$  为当量沥青面层模量。

当量基层换算如下:

$$h_b^* = h_{b1} + h_{b2} = 260 + 360 = 620 \text{ mm}$$

$$E_b^* = \frac{E_{b1} h_{b1}^3 + E_{b2} h_{b2}^3}{h_{b1} + h_{b2}} + \frac{3}{h_{b1} + h_{b2}} \left( \frac{1}{E_{b1} h_{b1}} + \frac{1}{E_{b2} h_{b2}} \right)^{-1} = 2\,359.06 \text{ MPa}$$

式中: $h_b^*$  为当量基层厚度; $E_b^*$  为当量基层模量。

无机结合料稳定层疲劳开裂相关参数如下:

$$\lambda_E = \frac{E_a^*}{E_b^*} = 4.019$$

$$\lambda_h = \frac{h_a^*}{h_b^*} = 0.323$$

$$A_E = 0.10\lambda_E + 0.89 = 1.292$$

$$A_h = 0.73\lambda_h + 0.67 = 0.905$$

$$B_h = 0.44\ln(\lambda_h/0.45) = -0.146$$

$$B_E = 0.15\ln(\lambda_E/1.14) = 0.189$$

式中: $\lambda_E$  为面层与基层当量模量之比; $\lambda_h$  为面层与基层当量厚度之比; $A_E$ 、 $A_h$ 、 $B_E$ 、 $B_h$  为与面层、基层厚度和模量有关的函数。

温度调整系数为:

$$k_{T2} = A_h A_K k_{T2}^{\wedge 1+B_h+B_E} = 1.723$$

式中: $k_{T2}$  为温度调整系数; $k_{T2}^{\wedge}$  为基准路面结构温

度调整系数。

现场综合修正系数为:

$$k_c = c_1 e^{c_2(h_a + h_b)} + c_3 = -1.272$$

式中:  $k_c$  为现场综合修正系数;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为参数;  $h_a$ 、 $h_b$  分别为沥青混合料层和计算点以上无机结合料稳定层厚度。

按《公路沥青路面设计规范》选取计算点, 按照弹性层状体系理论计算水泥稳定碎石层层底拉应力, 得  $\sigma_t = 0.130$  MPa, 水泥稳定碎石层疲劳开裂寿命为:

$$N_{f2} = k_a k_{T2} 10^{a-b(\sigma_t/R_s)+k_c-0.57\beta} =$$

$$263\ 908\ 241.2 \text{ 次} \geq 4.88 \times 10^7 \text{ 次}$$

水泥稳定碎石层层底拉应力满足设计要求。

### 3.2 沥青混合料层永久变形量

根据《公路沥青路面设计规范》, 基准等效温度  $T_\xi = 23.9^\circ\text{C}$ , 沥青混合料层永久变形等效温度为:

$$T_{\text{pef}} = T_\xi + 0.016h_a = 27.1^\circ\text{C}$$

将沥青混合料层分为 8 层, 其中: 40 mm 改性沥青 SMA-13 上面层分为 10 mm+15 mm+15 mm 3 层; 60 mm 改性沥青 AC-20C 中面层分为 20 mm+20 mm+20 mm 3 层; 100 mm 基质沥青 ATB-25 下面层分为 50 mm+50 mm 2 层。分别计算设计荷载作用下各分层顶部的竖向压应力, 8 个分层应力分别以  $P_1 \sim P_8$  表示, 结果见表 5。

表 5 各分层顶部压应力计算结果 MPa

分层应力	竖向压应力	分层应力	竖向压应力
$P_1$	0.70	$P_5$	0.58
$P_2$	0.70	$P_6$	0.48
$P_3$	0.68	$P_7$	0.39
$P_4$	0.65	$P_8$	0.19

计算得  $h_a = 200$  mm 时  $d_1 = -3.54$ ,  $d_2 = 0.635$ 。各分层深度和永久变形综合修正系数  $k_{Ri}$  见表 6。

表 6 各分层修正系数计算结果

分层深度/ mm	综合修 正指数	分层深度/ mm	综合修 正指数
15.0	3.98	70.0	6.07
17.5	4.70	90.0	4.61
32.5	7.05	125.0	2.51
50.0	7.22	175.0	0.91

经测试, 试验温度为  $60^\circ\text{C}$ 、压强为  $0.7$  MPa、加载次数为  $2\ 520$  次时, 加铺层车辙试验变形深度  $R_0$  分别为  $1.65$ 、 $1.98$ 、 $2.38$  mm。根据以上参数计算各

分层永久变形量和沥青混合料层总的永久变形量, 结果见表 7。

表 7 各分层的永久变形量和沥青混合料层的

总永久变形量

各分层永 久变形	永久变形 量/mm	各分层永 久变形	永久变形 量/mm
$R_{a1}$	0.79	$R_{a5}$	2.06
$R_{a2}$	1.40	$R_{a6}$	1.11
$R_{a3}$	2.00	$R_{a7}$	0.63
$R_{a4}$	3.01	$R_{a8}$	0.06
总变形量 $R_a$		11.06	

由表 7 可知: 考虑一定折减系数的沥青混合料层总的永久变形量为  $11.06 \text{ mm} < 15 \text{ mm}$ , 满足规范要求。

### 3.3 沥青混合料层层底拉应变

采用弹性层状体系理论, 计算得沥青混合料层厚度为  $200$  mm 时沥青混合料层层底拉应变为  $134.9 \mu\epsilon$ 。高速公路目标可靠度和目标可靠指标  $\beta$  分别取  $95\%$ 、 $1.65$ , 季节性冻土地区调整系数  $K_a$  取  $1.0$ 。当量沥青面层和当量基层换算与水泥稳定碎石层层底拉应力相同。沥青混合料疲劳开裂相关参数如下:

$$A_E = 0.76\lambda_E^{0.09} = 0.703$$

$$A_h = 1.14\lambda_h^{0.17} = 0.941$$

$$B_E = 0.14\ln(\lambda_E/20) = -0.225$$

$$B_h = 0.23\ln(\lambda_h/0.45) = -0.076$$

温度调整系数为:

$$k_{T1} = A_h A_E k_{T1}^{1+B_h+B_E} = 0.841$$

根据施工和试验资料, SMA-13 混合料的油石比为  $5.82\%$ , 沥青饱和度  $VFA = 82.5\%$ ; AC-20C 混合料的油石比为  $4.50\%$ ,  $VFA = 70.6\%$ ; ATB-25 混合料的油石比为  $3.8\%$ ,  $VFA = 65.2\%$ 。沥青混合料层的疲劳开裂寿命为:

$$k_b = \left[ \frac{1 + 0.3E_a^{0.43}(VFA)^{-0.85}e^{0.024h_a-5.41}}{1 + e^{0.024h_a-5.41}} \right] = 8.440$$

$$N_{f1} = 6.32 \times 10^{15.96-0.29\beta} k_a k_b k_{T1}^{-1} \left( \frac{1}{\epsilon_a} \right)^{3.97} \cdot$$

$$\left( \frac{1}{E_a} \right)^{1.58} (VFA)^{2.72} = 30\ 129\ 613.26 \text{ 次} >$$

$$1.92 \times 10^7 \text{ 次}$$

沥青混合料层的疲劳开裂寿命满足设计要求。

综上, 加铺结构半刚性基层层底拉应力、沥青混

合料层总的永久变形量满足要求,拟定的加铺层厚度合理。

#### 4 结论

利用 FWD 对旧水泥砼路面共振碎石化加铺结构进行动态弯沉采集,基于动态弯沉盆数据,运用 BISAR 程序拟合得到旧水泥砼路面共振碎石化加铺结构各结构层的弹性模量,并应用 CMSR 程序对加铺结构的刚度进行验算,结果表明:直接加铺结构加铺层材料刚度不得低于 1 128.59 MPa,拟定的加铺结构满足刚度要求。

利用 BISAR 程序拟合所得结构层动态模量,考虑一定折减系数,对沥青直接加铺结构进行验算,结果表明:水泥稳定碎石层层底拉应力、沥青混合料层总的永久变形量及层底弯拉应力均满足设计和规范要求,拟定的加铺层厚度合理。

#### 参考文献:

- [1] 张碧琴,马亚坤,张强,等.重载作用下沥青路面结构验算方法[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(1):1-6.
- [2] 林益恭,陈少幸,舒翔.广东省主要高速公路超载作用下路面结构验算分析[J].中外公路,2008,28(5):79-83.
- [3] 杨圣超,邵显智,陈凤晨.基于非线性黏弹模型的沥青路面车辙同步验算[J].公路交通科技(应用技术版),2016(8):109-111.
- [4] CHUA K M.Evaluation of moduli backcalculation programs for low-volum roads [C]//First International

Symposium on Nondestructive Testing of Pavements & Backcalculation of Moduli.1989.

- [5] 孙立军,八谷好高.水泥混凝土路面板模量反算的一种新方法:弹性弯沉法[J].土木工程学报,2000,33(1):83-87.
- [6] 戴学臻.水泥混凝土路面基层应力验算必要性探讨[J].公路交通科技,2009,26(2):22-26.
- [7] 尤清贵.超重交通下的路面结构强度验算[J].公路与汽运,2005(6):57-59.
- [8] 曹阳.陡坡急弯路段沥青路面力学响应及其设计方法的研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [9] 丁建国,王海龙,皮杰,等.刚性路面道路刚度计算方法理论研究[J].振动与冲击,2015,34(22):192-198.
- [10] 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.
- [11] 张叔林,支喜兰,史仍超,等.旧水泥混凝土路面共振碎石化施工质量评价方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017(10):55-57.
- [12] 徐柱杰,凌建明,黄琴龙.旧水泥混凝土路面共振碎石化效果研究[J].中国公路学报,2008,21(5):26-32.
- [13] 徐柱杰,凌建明,黄琴龙,等.旧水泥混凝土共振碎石化路面模量分析[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(9):1195-1198+1209.
- [14] 李盛,马永波,刘朝晖,等.共振碎石化控制参数和结构模量研究[J].内蒙古公路与运输,2019(1):1-4.
- [15] 刘朝晖,周婷,李盛,等.现行规范旧水泥混凝土路面加铺层设计的若干问题研究[J].公路交通科技,2014,31(5):31-36.

收稿日期:2019-12-08

\*\*\*\*\*

(上接第 69 页)

程地质条件及岩溶的危害与发育分布特点,有针对性地提出不同岩溶地质条件下的处治措施。跟踪表明该工程岩溶处理措施的实施效果良好,未发生较大面积的变形或地质灾害。该工程对岩溶地区路基溶洞、岩溶水等的处理技术可供同类地质条件的处治提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 党政.高速公路岩溶路基塌陷地质勘察及处治研究[J].黑龙江交通科技,2019(9):79+81.
- [2] 张庆.高速铁路路基施工质量控制与沉降预防对策[J].科技资讯,2019(19):71-72.
- [3] 陈楚鹏,张海威.云湛高速公路隐伏型岩溶路基处治技

术研究[J].广东交通职业技术学院学报,2017,16(4):15-18.

- [4] 庄仲欣.长昆高铁湖南段岩溶地段路基设计[J].铁道勘察,2018,44(3):90-95.
- [5] 李庆贺.岩溶路基稳定分析与处治技术[J].山西交通科技,2014(2):34-37.
- [6] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG/T D30-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [7] 陈武,陈忠华,曾勇,等.利万高速公路湖北段岩溶路基处治方案设计[J].公路与汽运,2012(5):112-116+175.
- [8] 袁腾方.岩溶区高速公路路基强夯处治技术及其稳定性分析[D].长沙:湖南大学,2018.

收稿日期:2020-05-12