

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.008

# 基于弯沉等效原理的沥青路面结构承载力评价研究

吴小恋

(广东省交通运输建设工程质量检测中心, 广东 广州 510420)

**摘要:**为了准确评价沥青路面的结构承载力,利用弯沉等效原理,将室内动态模量初始值转化为结构层的当量模量标准值;根据动态模量与劲度模量的相似变化规律,确定不同交通荷载等级、不同材料类型的模量衰减阈值;依托试验路中5种结构形式沥青路面的实测弯沉盆,反算得到路面结构层衰减量;将衰减量与标准值的比值与阈值比较,评价沥青路面结构承载力的强弱,评价结果与试验路的实际路用性能一致。

**关键词:**道路工程; 沥青路面; 承载力评价; 弯沉盆反算; 动态模量阈值

准确、有效地掌握沥青路面结构的承载力并预测其变化规律,对路面设计、施工和养护具有重大的意义。JTG H20—2007《公路技术状况评价标准》根据路面结构强度指数这一综合指标来评价沥青路面结构强度,而该指标与路面整体或各结构层的承载力相关性差。在落锤式弯沉仪(FWD)诞生后,通过弯沉盆反算路面结构层模量的方法,为沥青路面结构承载力的评价开辟了一条路径。

FHScriver(1968)首次将FWD弯沉盆应用到路面结构力学的反问题中,并编制了诺模图;随后学者们又相继开发了MODCOMP(Irwin, 1983)、WESDEF(1989)、MODULUS(Uzah, 1988)、SIDMOD(王复明,

1996)等反算程序。2005年, SIDMOD与MODULUS、MODCOMP、WESDEF软件的初值敏感性、用户敏感性、拟合误差、反算精度及实用性的对比结果表明, SIDMOD在“沥青层+基层+路基”3层式的路面结构中反算精度最高。在此基础上,唐伯明(1989)建立了路表弯沉与路面性能之间的关系,并分别提出了路基、基层和面层弹性模量预估公式;黄卫(1998)、Hee Mun Park(2001)通过回归分析,建立了路面弯沉与路用性能指标的关系。随后,关于反算模量与室内模量的对比研究也层出不穷, AASHTO(1993)、FHWA(1994)分别认为反演模量是静模量的3倍、2倍以上;职雨风(2005)对各层材料反算结果的变异性进行

- \*\*\*\*\*
- [10] 高哲. 基于落锤式弯沉仪(FWD)的半刚性基层沥青路面结构性能评价[D]. 山东建筑大学硕士学位论文, 2016.
  - [11] 曾胜. 路面性能评价与分析方法研究[D]. 中南大学博士学位论文, 2003.
  - [12] 余四新, 徐飞萍, 刘甲荣, 等. 基于新版沥青路面设计规范的路面结构设计分析[J]. 中外公路, 2019(2).
  - [13] 周育名, 李金明, 李平, 等. 考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法[J]. 中外公路, 2019(1).
  - [14] 任瑞. 沥青路面热反射层材料与性能研究[J]. 中外公路, 2018(6).
  - [15] 彭妙娟, 储楷风. 沥青路面黏弹性力学反问题研究[J]. 中外公路, 2018(1).
  - [16] 谢懿. 基于FWD的沥青路面裂缝状况快速评价[J]. 中外公路, 2017(6).
  - [17] 李强, 黄葵阳, 王朝晖. 沥青路面内部温度预估方法与预估模型[J]. 中外公路, 2017(5).
  - [18] 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).
  - [19] Andrzej Pozarycki, Przemyslaw Górnas, Dariusz Wana-towski. The Influence of Frequency Normalisation of FWD Pavement Measurements on Backcalculated Values of Stiffness Moduli[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(1).
  - [20] 王剑, 臧国帅, 刘黎萍, 等. 改建工程中半刚性基层损坏状况评估方法[J]. 中外公路, 2017(6).
  - [21] 宋小金, 樊亮. 基于FWD的沥青路面动态弯沉温度修正系数[J]. 土木工程学报, 2018(3).
  - [22] 王晓帆, 徐森. 基于中国与南非规范的FWD旧路评测及改建设计研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017(5).

收稿日期: 2020-01-16

作者简介: 吴小恋, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 276527183@qq.com

了分析,表明变异性由大到小依次为水稳基层、沥青面层、土基;朱金鹏(2016)根据 FWD 检测到的路基动态弯沉,利用反算模型建立了路基动态静态回弹模量之间的幂指数关系,以此评价路基的强度;彭妙娟(2018)通过建立沥青路面黏弹性反算模量的有限元模型,将反算结果替换原始模型中的初始模量,并进行正分析,结果表明正反分析的弯沉盆匹配度较高。

综上所述,利用弯沉盆进行模量反算的研究方法大体可以分为 3 类:① 利用反算模量进行有限元数值模拟或者计算解析解来获取关键层底应力和应变,以预估路面寿命;② 通过回归分析等手段建立路面弯沉盆指标与路面结构使用性能之间的关系来评价路面结构承载能力;③ 建立反演模量与室内材料模量关系来评价路面结构承载能力。

然而,第①类研究中的模量反算和疲劳寿命预估两个阶段的误差累计会导致精度较低;第②类研究中

的预估公式仅反映路面单一方面的使用性能,且适用性不高;第③类研究紧密联系了反算模量与室内材料模量的关系,但忽略了温度对沥青材料的影响,造成变异性较大、可行性差。

该文依托某高速公路科研试验路中 5 种路面结构的温度采集数据,通过室内试验、弯沉盆反算、动态模量阈值确定,建立沥青路面结构承载力的评价方法,评价结果与试验路使用性能相符。研究成果可为沥青路面承载力的快速评价提供参考和借鉴。

## 1 试验路概况

某高速公路科研路中的 5 种路面结构形式如表 1 所示,上面层均采用 4% SBS+4% U II 复合改性沥青;中面层均采用 3.5% SBS 改性沥青;下面层、柔性基层均采用 70# 基质沥青。

表 1 某高速公路科研试验路结构形式

结构	沥青路面结构形式
1	4 cm 复合改性 AC-13+6 cm SBS 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+15 cm 普通 AC-30+35 cm 级配碎石
2	4 cm 复合改性 AC-13+6 cm SBS 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+15 cm 普通 AM-30+35 cm 级配碎石
3	4 cm 复合改性 AC-13+6 cm SBS 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+15 cm 普通 ATB-30+35 cm 级配碎石
4	4 cm 复合改性 SMA-13+6 cm SBS 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+36 cm 水稳碎石
5	4 cm 复合改性 SUP-12.5+6 cm SBS 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+36 cm 水稳碎石

## 2 弯沉盆等效原理

弯沉盆等效原理用于将室内动态模量初始值转化为各结构层的当量模量标准值。

具体应用方法如下:在 5 种结构中埋置温度传感器以获取各结构层实时温度,结合沥青混合料室内动态模量试验获得的主曲线和移位因子,得到各结构层在对应温度下的动态模量初始值;将动态模量初始值输入 Bisar3.0 计算软件,层间接触条件设置为完全连续,得到各结构对应的理论弯沉盆;根据理论弯沉盆,应用反算程序得到各结构层的当量模量,反算过程中假设层间接触条件为完全连续,称此当量模量为标准值。

## 3 动态模量真值

### 3.1 沥青混合料动态模量真值

已有研究表明:级配类型或胶结料的性能相似时,

可将沥青混合料动态模量归为同类予以研究。根据科研试验路沥青混合料类型,胶结料相同时,将 AC-13、SMA-13、Superpave12.5、AC-20 归为一类,同时将 AC-25、AC-30、AM30、ATB30 分别归为一类。

归类后,室内共进行了 8 种混合料的动态模量试验,试验温度为-10、5、20、35、50℃,荷载频率为 0.5、1、2、5、10、20、25 Hz。试验结果如表 2 所示。

根据各结构层埋置的温度传感器实测得到各结构层的实时温度,利用表 2 中已建立的动态模量主曲线模型,得到各沥青层的动态模量初始值,如表 3 所示。

### 3.2 基层材料动态模量真值

科研试验路水稳基层合成级配如表 4 所示;三灰稳定碎石的配比为水泥:石灰:粉煤灰:碎石=2:5:13:80,其中,(1~3 cm 碎石):(0.5~1 cm 碎石):石屑=30:25:45;试验采用 P.O.42.5 级水泥。

在试件成型、养生 28 d、密封保存 180 d 后,进行恒定温度 20℃下的动态模量测试。

表2 不同混合料的主曲线模型

混合料类型	主曲线模型
AC-13(4%SBS+4%U II)	$\lg( E^* ) = 2.3251 + \frac{1.204728}{1 + e^{-0.15765 + 1.60874 \lg t_r}}$
SMA-13(4%SBS+4%U II)	$\lg( E^* ) = 2.59455 + \frac{0.922778}{1 + e^{-0.1495 + 1.79636 \lg t_r}}$
Sup-12.5(4%SBS+4%U II)	$\lg( E^* ) = 2.25700 + \frac{1.272832}{1 + e^{-0.28129 + 1.59776 \lg t_r}}$
AC-20(3.5%SBS)	$\lg( E^* ) = 2.5129 + \frac{1.037634}{1 + e^{-0.405311 + 1.42292 \lg t_r}}$
AC-25(70#)	$\lg( E^* ) = 1.83545 + \frac{1.711808}{1 + e^{-0.28619 + 1.36773 \lg t_r}}$
AC-30(70#)	$\lg( E^* ) = 2.33245 + \frac{1.21250}{1 + e^{-2.22651 + 1.61720 \lg t_r}}$
ATB-30(70#)	$\lg( E^* ) = -0.03394 + \frac{3.578888}{1 + e^{-3.51671 + 0.78461 \lg t_r}}$
AM-30(70#)	$\lg( E^* ) = 2.681824 + \frac{0.863118}{1 + e^{-1.99641 + 1.93036 \lg t_r}}$

注:表中参考温度为20℃,  $E^*$  为动态模量(ksi), 1 ksi=6.895 MPa;  $t_r$  为加载时间(s)。

表3 试验路沥青层动态模量真值

结构	上面层		中面层		下面层		柔性基层	
	实测温度/℃	动态模量/MPa	实测温度/℃	动态模量/MPa	实测温度/℃	动态模量/MPa	实测温度/℃	动态模量/MPa
1	16.2	20 047	14.4	19 101	10.2	20 461	6.7	23 904
2	22.4	18 720	16.5	18 451	11.9	20 016	7.5	23 893
3	19.9	19 286	16.4	18 482	12.0	19 988	7.8	23 888
4	23.5	19 536	18.6	17 757	12.8	19 765		
5	24.2	18 418	18.8	17 689	12.7	19 793		

表4 水泥稳定碎石设计级配

集料/ mm	通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%							
	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
20~30	89.9	63.8	4.8	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
10~20	100	100	94.6	3.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5~10	100	100	100	84.5	4.8	0.7	0.7	0.7
0~5	100	100	100	100	98.2	75.5	38.9	13.7
合成级配	98.9	96.0	87.1	42.8	27.4	20.6	10.7	3.9

根据FWD荷载作用时间(约为0.28s)换算荷载作用频率为35Hz左右。由表5试验结果可得水稳碎石的动态模量真值为1435.4ksi(9818MPa),三灰碎石的动态模量真值为274ksi(1874MPa)。

### 3.3 底基层及土基模量真值

由于底基层及土基材料黏聚力较弱,在冲击荷载作用下易分散,故难以通过动态模量试验测试动态模量初始值。

表 5 基层材料试验结果

材料类型	不同荷载频率(Hz)下的动态模量/ksi						
	0.5	1	5	10	20	30	35
水稳碎石	1 037.2	1 084.6	1 136.7	1 164.3	1 219.3	1 316.9	1 435.4
三灰碎石	196.6	217.7	222.7	221.1	231.3	257.1	274.0

注:1 ksi=6.895 MPa。

因此,通过建设期 FWD 的大量测试反算数据,得到了压实度、强度满足规范要求下的级配碎石、水稳砂砾及土基的动态模量真值,如表 6 最后一列所示。

表 6 底基层材料及土基模量真值

材料	模量反算值/MPa	真值/MPa
级配碎石	500~800	500
水稳砂砾	700~900	700
土基	150~180	150

#### 4 动态模量衰减阈值

为了研究动态模量衰减阈值,开展了同温度(20℃)、同频率(10 Hz)、不同应力比下沥青混合料与水稳碎石材料动态模量与弯拉劲度模量的比值关系研究,试验结果如表 7 所示。在不同应力比作用下,AC-20 的动态模量与弯拉劲度模量比值基本相等,动态模量与弯拉模量同大或同小,表明弯拉模量同动态模量的变化规律一致。为了验证该结论,在 AC-20 基础上,通过分别改变沥青类型(4.5% SBS 改性沥青)、添加抗车辙剂(0.4%路宝)、添加纤维(0.4%纤维),亦可得到此结论。此外,如表 8 所示,水泥稳定碎石在不同应力比下的比值也基本相同,进一步验证了此结论。因此,在难以获取动态模量衰减规律时,可通过研究弯拉模量的衰减规律来间接获取。

在试验室内获取动态模量的衰减规律,目前暂无

表 7 不同材料动态模量与劲度模量比值

材料类型	不同应力比下动态模量与劲度模量比值	
	0.4	0.6
AC-20	3.80	3.75
4.5% SBS 改性 AC-20	2.15	2.05
AC-20+0.4%路宝	1.65	1.60
AC-20+0.4%纤维	2.75	2.70

表 8 水稳材料动态模量与劲度模量比值

应力比	动态模量与劲度模量比值
0.77	17.0
0.68	16.5
0.50	16.5

较好的方法。然而,MTS810 试验系统中的四点弯曲恒应力疲劳试验可以获取弯拉模量的衰减规律,如此便为研究动态模量衰减规律和衰减阈值提供了一条途径。定义弯拉衰减模量阈值为弯拉模量加速衰减时对应的弯拉模量,通过疲劳曲线中的转折点来确定。根据上文弯拉模量与动态模量的同大同小变化规律,可以通过衰减模量阈值来确定动态模量衰减阈值。

沥青混合料应力水平共 3 个水平,分别为 0.4、0.6、0.8;水泥稳定碎石应力水平共 7 个水平,分别为 0.80、0.75、0.70、0.65、0.60、0.55、0.50;试验温度分别为 15、20℃,试验频率均为 10 Hz,加载波形均为偏正弦波,试件尺寸均为 40 mm×40 mm×200 mm,平行试验为 3 次。试验结果如表 9、10 所示。

表 9 不同混合料试件的劲度模量衰减阈值

混合料类型	应力比	50 次劲度模量/MPa	衰减劲度模量/MPa	疲劳寿命/次	衰减阈值
AC-20+0.4%纤维	0.8	6 380.51	3 218.93	492	0.5
	0.6	5 988.63	4 966.74	1 276	0.8
	0.4	5 595.77	5 686.27	4 357	1.0
4.5% SBS 改性 AC-20	0.8	6 540.54	2 973.88	989	0.5
	0.6	5 145.40	3 887.94	2 998	0.8
	0.4	4 866.71	3 869.74	9 634	0.8
AC-20+0.4%路宝	0.8	6 155.76	2 927.86	398	0.5
	0.6	5 731.04	3 607.32	765	0.6
	0.4	5 542.47	4 534.83	3 103	0.8
AC-20	0.8	6 217.22	3 423.67	121	0.6
	0.6	5 289.84	4 397.12	725	0.8
	0.4	5 671.79	5 375.78	3 963	0.9

表 10 水泥稳定碎石小梁试件动态弯拉劲度模量衰减阈值

试件编号	应力比	初始模量/MPa	临界破坏模量/MPa	疲劳寿命/次	衰减阈值
1	0.80	23 580	14 712	19 244	0.6
2	0.75	23 107	14 244	37 391	0.6
3	0.70	26 693	19 693	191 364	0.7
4	0.65	17 409	13 211	774 578	0.8
5	0.60	17 941	13 330	1 327 062	0.7
6	0.55	21 255	18 219	4 198 407	0.9
7	0.50	21 351	18 965	4 669 484	0.9

由表 9、10 可得:随着应力比的增大,小梁试件疲劳寿命不断降低,弯拉劲度模量衰减加快,劲度模量阈值减小;不同应力比对应不同的交通荷载等级,表明重载交通对于路面结构使用年限减少作用显著。沥青混合料和水泥稳定碎石衰减规律不同,后者随着应力比的增加衰减更为显著。可见,对于不同交通荷载等级、不同材料类型应给定不同的模量衰减阈值。

路基强度是整个路面结构强度的基础,路基结构模量衰减对于路面结构承载力水平影响极为重要。因此,路基结构动态模量不宜采用衰减评价方法。

综合考虑,将应力比 0.6 作为划分轻、重交通等级的界限。各结构层模量衰减阈值如表 11 所示。

## 5 沥青路面结构承载力评价

在对科研试验路进行温度采集的同时,应用 FWD

表 11 各结构层动态模量衰减阈值

结构层	动态模量衰减阈值	
	重交通	轻交通
沥青层	0.6	0.7
基层	0.7	0.7
路基	1.0	1.0

以获得路面结构实际弯沉盆,再应用反算程序得到各结构层的反算模量,称此反算模量为当量模量衰减值。

文献[6]表明 SIDMOD 反算程序在“沥青层+基层+路基”3 层式的路面结构中精度最高,因此,选择 SIDMOD 反算程序对 FWD 获取的弯沉盆进行路面结构层的模量反算。此外,根据某科研路的交通量及通车后的实际路况,反算过程中提出层间完全连续的假设是合理的。

根据理论弯沉盆、实测弯沉盆反算得到了当量模量标准值和当量模量衰减值,通过将后者与前者的比值与阈值比较,以评价沥青路面结构承载力的强弱。

科研试验路交通量约为 2 500 pcu/d,货车比例低,无超载车辆,属于轻交通等级。此外,根据历年病害统计,结构 1、2 柔性基层路面无车辙、开裂损坏;结构 3 柔性基层路面有轻微的路面裂缝;结构 4、5 半刚性基层沥青路面试验段存在基层反射开裂问题,无车辙损坏。

如此便建立了相同温度下当量模量标准值与当量模量衰减值的——映射关系,根据两者比值同阈值的大小关系以进行沥青路面结构承载力的评价,承载力评价结果如表 12 所示。

表 12 科研试验路路面结构承载力评价

结构	桩号	当量模量标准值/MPa			当量模量衰减值/MPa			衰减值与标准值比值		
		面层	基层	路基	面层	基层	路基	面层	基层	路基
1	1-1	20 100	568	142	17 653	1 015	315	0.9	1.8	2.2
	1-2	20 100	568	142	15 708	1 218	345	0.8	2.1	2.4
	1-3	20 100	568	142	13 987	1 397	377	0.7	2.5	2.7
2	2-1	19 849	549	140	15 248	409	311	0.8	0.7	2.2
	2-2	19 849	549	140	14 295	442	268	0.7	0.8	1.9
	2-3	19 849	549	140	15 478	587	286	0.8	1.1	2.0
3	3-1	20 500	552	151	10 884	894	405	0.5	1.6	2.7
	3-2	20 500	552	151	10 912	756	390	0.5	1.4	2.6
	3-3	20 500	552	151	9 986	821	359	0.5	1.5	2.4
4	4-1	22 000	2 118	140	19 987	1 534	360	0.9	0.7	2.6
	4-2	22 000	2 118	140	18 316	1 430	340	0.8	0.7	2.4
	4-3	22 000	2 118	140	18 657	1 219	365	0.8	0.6	2.6

续表 12

结构	桩号	当量模量标准值/MPa			当量模量衰减值/MPa			衰减值与标准值比值		
		面层	基层	路基	面层	基层	路基	面层	基层	路基
	5-1	22 000	2 068	145	19 802	1 835	307	0.9	0.9	2.1
5	5-2	22 000	2 068	145	17 951	1 726	310	0.8	0.8	2.1
	5-3	22 000	2 068	145	16 624	1 045	257	0.8	0.5	1.8

与表 11 的动态模量阈值比较,结构 1、2 路面面层、基层、路基标准动态模量与衰减动态模量比值均大于阈值,路面结构承载力良好,结构 3 路面面层标准动态模量与衰减动态模量比值小于阈值,表明沥青层承载力不良,结构 4、5 路面基层标准动态模量与衰减动态模量比值小于阈值,表明半刚性基层承载力不良。

5 种路面结构承载力评价结果与路面使用性能总体表现一致,表明该文提出的承载力评价方法具备可行性和准确性。

## 6 结论

(1) 基于弯沉盆等效原理,利用动态模量初始值、理论弯沉盆、实测弯沉盆数据,根据当量模量衰减值与当量模量标准值比值同阈值的大小关系,提出了一种评价沥青路面结构承载力的方法。

(2) 确定了轻、重交通荷载等级下沥青层模量衰减阈值分别为 0.6、0.7;而不同交通荷载等级下基层和路基的衰减阈值分别为 0.7、1.0。

(3) 利用该方法,将科研路 5 种结构的当量模量衰减值和标准值的比值与阈值比较,可分别或综合评价各结构层或结构整体的承载能力,评价结果与试验路的实际路用性能一致。

### 参考文献:

[1] JTG H20—2007 公路技术状况评价标准[S].  
 [2] H. Scriver, W. M. Moore, W. F. Mcfarland, et al. A Systems Approach to the Flexible Pavement Design Problem [R]. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, 1968.

[3] Uzan, J., R. L. Lytton, F. P. Germann. General Procedure for Backcalculating Layer Moduli, STP 1026, ASTM.  
 [4] Rohde G. T, Scullion. T. MODULUS 4.0: Expansion and Validation of the MODULUS Back—Calculation System[R]. Research Report, Texas Transportation Institute, 1988.  
 [5] 王复明,刘文廷.路面无损检测与评价技术的研究与应用[M].北京:科学出版社,1997.  
 [6] 姬亦工,王复明,郭忠印.基于落锤式弯沉仪(FWD)动态数据的路面模量反演方法[J].土木工程学报,2002(3).  
 [7] 唐伯明.路面结构状况的评价[D].东南大学博士学位论文,1990.  
 [8] 黄卫,何平.柔性路面弯沉和路基压应变指标分析[J].岩土工程学报,1998(3).  
 [9] Hee Mun Park. Use of Falling Weight Deflectometer Multi—Load Level Data for Pavement Strength Estimation [D]. Ph. D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2001;33—38.  
 [10] AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures[S]. Washington D. C. AASHTO, 1993.  
 [11] T. Paul Teng, P. E. Back—Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections. Publication No. FHWA—RD—01—113, Washington, D. C. ; Federal Highway Administration, September 1997.  
 [12] 职雨风.弯沉仪的路面施工质量评定方法研究[D].华南理工大学博士学位论文,2005.  
 [13] 朱金鹏,王志强,林超.山西省路基动静态回弹模量相关关系研究[J].中外公路,2016(2).  
 [14] 彭妙娟,储楷风.沥青路面黏弹性力学反问题研究[J].中外公路,2018(1).  
 [15] 刘少文,李文良,胡旭东,等.大粒径沥青混合料 LSAM 设计方法与路用性能研究[R],2011.