

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.04.016

级配碎石基层沥青路面 FWD 反算模量换算系数

庄传仪^{1,2}, 叶亚丽¹, 王 林²

(1. 山东交通学院 土木工程学院, 济南 250357;
2. 高速公路养护技术交通行业重点实验室, 济南 250031)

摘 要:为了获取真实反映沥青路面结构力学特性和材料性状的结构模量参数, 铺筑了 4 种结构级配碎石基层沥青路面足尺试验路, 对其进行加速加载疲劳破坏试验和路面弯沉检测。基于 FWD 弯沉测试方案, 应用分层检测分析方法逐层检测了路面结构层的弯沉, 并根据足尺路面加载破坏的损坏程度, 进行了路表 FWD 弯沉测试和弯沉迭代反演, 分析了 FWD 反算模量受荷载水平、位置和路面温度的影响规律, 建立了 FWD 反算模量与实验室动态模量的关系, 提出了沥青混凝土、级配碎石和路基土实验室动态模量与 FWD 反算模量的换算系数 K 。研究表明: 沥青混凝土模量受温度和轮载作用的影响最大, 路面结构完好的沥青层反算模量换算系数 $K=0.7\sim 1.0$; 路面出现 Top-down 开裂后, $K=1.3\sim 1.5$; 沥青层层底出现疲劳破坏时, $K>1.5$; 级配碎石层反算模量换算系数为 $1.32\sim 1.49$; 土基反算模量换算系数与其所受的应力水平及土质类型相关, 随应力水平的降低, 土基反算模量换算系数减小。

关键词: 沥青路面; 级配碎石基层; 反算模量; 换算系数; 落锤式弯沉仪; 加速加载试验

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2014)04-100-09

Conversion coefficient for backcalculated modulus of unbound aggregate base asphalt pavement

ZHUANG Chuanyi^{1,2}, YE Yali¹, WANG Lin²

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;
2. Key Laboratory of Expressway Maintenance Technology of Ministry of Transport(Jinan), Jinan 250031, China)

Abstract: In order to get pavement structure modulus which can real reflect pavement mechanical characteristics and the properties of pavement materials, four kinds of full-scale unbound aggregate base asphalt pavement test road are constructed, accelerated pavement testing is conducted and pavement deflection is tested. Based on FWD testing program, layered measure and analysis method are introduced to measure deflections, FWD deflection testing is conducted in different stages of pavement damage. The influence characteristics of loading level, position and pavement temperature on FWD backcalculated modulus are analyzed, the relationship between FWD backcalculated modulus and laboratory dynamic modulus is established, and the conversion coefficients of asphalt concrete, unbound aggregate and subgrade soil are put forward. The results show that the asphalt concrete modulus is greatly affected by temperature and wheel loads, asphalt layer backcalculated modulus conversion coefficients is of 0.5 to 1.0 if the

收稿日期: 2013-11-02

基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2011 319 817 480); 山东省交通科技创新计划项目(2011-10); 山东交通学院科研基金项目(Z201244)

作者简介: 庄传仪(1980-), 男, 博士, 主要从事路面结构与材料性能研究, (E-mail) xahu@qq.com.

pavement is in good condition, and it is of 1.3 to 1.5 if pavement top-down cracking is occurred. If the pavement is damaged at the bottom of the asphalt layer, the conversion coefficient is more than 1.5. The conversion coefficient of unbound aggregate is of 1.32 to 1.49; the subgrade soil backcalculated modulus conversion coefficient is related with stress level and soil types, the conversion coefficient of inverse modulus for soil base decreases with decreasing stress.

Key words: asphalt pavement; unbound aggregate base; backcalculated modulus; conversion coefficient; falling weight deflectometer(FWD); accelerated pavement testing

沥青路面材料参数是路面设计研究工作的主要内容,在以弹性层状体系理论为基础的沥青路面设计方法中,材料参数的取值对路面设计结果有很大的影响^[1-2]。而在路面材料参数中,路面材料模量是路面设计研究的基础问题,但由于路面材料组成和性质的多变性,及其对湿度、温度和应力依赖性和使用过程中路面材料性能的衰减变化,准确选取路面材料的模量一直是困扰研究和设计人员的难题^[3]。路面结构模量更加真实反映沥青路面结构力学特性和路面材料性状,但与实验室材料模量试验受力条件和环境条件的理想化、简单化不同,路面结构模量的获取较为复杂,需要在现场进行测试。基于 FWD 弯沉盆的路面结构层模量反算为路面结构模量的确定提供了一个新的途径,已成为获取路面结构模量的有效技术手段^[4]。由于 FWD 反算模量并不等于实验室模量,为了与现行路面结构设计参数取值相统一,需对 FWD 反算模量建立系数进行调整,以便可以通过 FWD 无损检测数据进行路面结构设计。虽然近年来不少学者研究了沥青层 FWD 反算模量及其温度修正系数^[5-9],但路面 FWD 反算模量与室内试验材料测试模量之间的关系缺乏研究,造成室内模量与现场模量的脱节,不利于路面结构的分析,且沥青路面在不同损伤阶段的材料模量也存在差异,此方面的研究亦是空白。

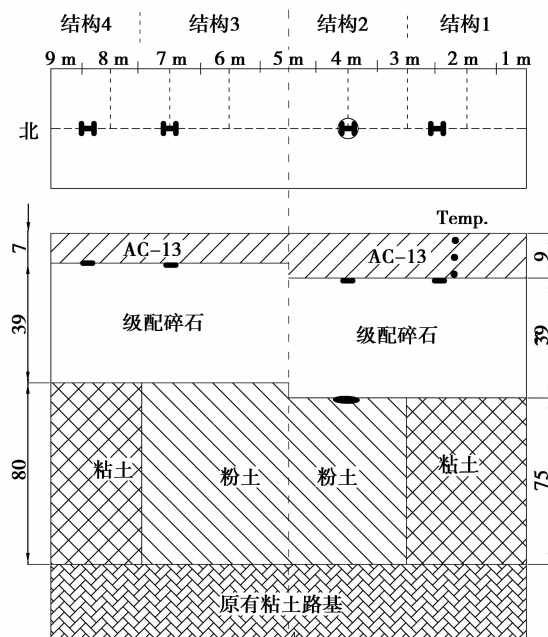
解决上述问题的技术措施通常需要铺筑实体工程试验路,在路面使用过程中进行跟踪观测和 FWD 弯沉检测,分析路面结构在不同破坏阶段的结构模量,但这种试验需要投入大量的人力、财力和物力,需要花费几年至十几年的时间,操作难度很大。修建足尺试验路并进行路面加速加载试验是解决上述问题的有效措施之一,它克服了野外实体工程路面试验周期长、耗资大等缺陷,成为解决 FWD 反算模量换算系数研究的最有效方法和技术手段。文中通过铺筑不同结构的足尺直道试验路,对其进行加速加载疲劳破坏试验,基于分层弯沉检测和跟踪检测试验路不同损坏程度的路面 FWD 弯沉,分析 FWD 反算模量随荷载大小、位置和温

度的变化规律,研究级配碎石基层沥青路面 FWD 反算模量与室内动态模量的换算系数,为路面结构设计和分析以及旧路加铺设计提供基础数据和核心依据。

1 足尺试验路加速加载试验与无损检测方案

1.1 足尺试验路路面结构

足尺试验路位于山东交通学院路面加速加载实验室内,试验路试槽宽 4 m,长 50 m,原始土层深约 10 m。足尺直道试验路根据沥青层厚度和路基土类型分为 4 种路面结构^[10],每种路面结构长度约为 2 m,如图 1 所示。



注:图中尺寸为 cm H 沥青应变仪 ● 土压力盒 • 温度传感器

图 1 足尺试验路路面结构

足尺试验路按照交通部颁布的路基、路面基层和面层施工技术规范进行质量控制,按正常的施工工艺进行施工,并采用水准仪实测了各桩号和各结构层的厚度。试验路修建时,将原始土基挖至路面

结构设计深度并夯实,再用粉土和粘土逐层填筑压实(路基土的物性参数见表 1),施工时严格控制每层的含水量,在接近最佳含水量时进行压实,每层压实结束后,立即用灌砂法测定该层的压实度和含水量,其中粉土路基平均压实度为 96.5%,粘土路基

平均压实度为 98%;级配碎石采用规范推荐的连续级配,现场取料筛各筛孔通过率如表 2 所示,最佳含水量为 5.68%,最大干密度为 2.223 g/cm³;沥青混凝土采用 AC-13 沥青混合料,其体积参数如表 3 所示。

表 1 路基土的物性参数

试样	颗粒分析/%			比重	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数/ %	最大干 密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含 水率/%	依规范 分类
	0.25~ 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm							
①		92.0	8.0	2.53	28.7	16.0	12.7	2.02	12.1	粘土
②	4.6	84.4	11.0	2.68	22.5	14.8	7.7	1.70	11.4	粉土

表 2 级配碎石级配组成

筛孔/mm	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配范围	上限	100	100	95	88	82	71	55	40	32	25	20	13	8
	下限	100	90	75	66	59	46	30	18	13	9	6	3	0
通过率/%	100	94.6	86.6	83.7	76.7	62.2	39.3	26.2	19.1	13.4	9.4	7.5	6.3	

表 3 现场沥青混合料体积指标

混合料 类型	马氏试件标准 密度/(g·cm ⁻³)	芯样毛体积 密度/(g·cm ⁻³)	现场空 隙率/%	压实 度/%	矿料间隙率 VMA/%	沥青饱和度 VFA/%
AC-13	2.46	2.40	6.5	97.6	14.5	65.8

1.2 加速加载试验

足尺试验路采用可移动直线式路面加速加载实验系统(accelerated loading testing, ALT)进行疲劳破坏试验,如图 2 所示。

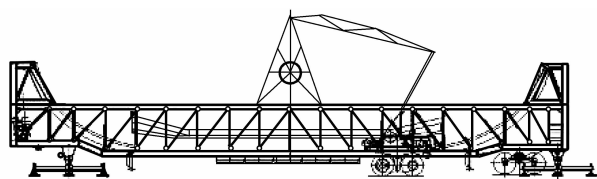


图 2 直线式路面加速加载试验设备 ALT

ALT 采用单向加载方式,依靠单侧单轴或单侧双联轴施加荷载,加载有效长度为 9 m,最大单轴轴载为 280 kN,有效运行速度 10~26 km/h,每天可向路面施加约 6 000~9 000 次轮载作用。轮胎为子午线全钢丝胎,轮胎直径 1.03 m,双轮组轮隙宽度 11 cm,能自动实现横向偏移从而模拟实际道路行车

荷载的轮迹分布,再现货车轮胎荷载对路面的破坏作用。试验采用 22 km/h 的运行速度单侧单轴集中加载,轮载无横向分布,单轴轴载设为 165 kN(单侧双轮荷载为 82.5 kN),胎压为 1.0 MPa,每加载循环 1 次历时约 11 s,与实际公路荷载间歇时间基本一致。

2009 年 10 月~2010 年 11 月完成疲劳加载试验,共施加单轴荷载 905 246 次,考虑轮载横向分布及轴载当量换算,相当于路面作用标准轴载次数为 $905\,246 \times 2.03 \times (165/100)^{3.97} = 134\,175\,71$ 次。因加速加载试验位于室内,路面不直接受太阳照射和降雨的影响,在路面加载期间,实测了每小时路面温度变化(见图 3)。可知,路面温度在 15~27 °C 区间占了很大比重,通常认为路面发生疲劳开裂的温度为 15~25 °C,温度较高或较低都不利于裂缝的产生,可见路面温度基本符合沥青混凝土疲劳试验的环境条件。

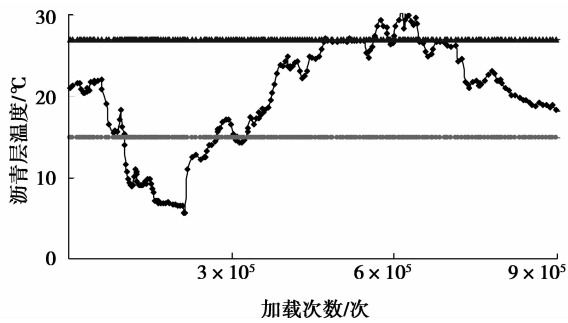


图 3 加载过程中路面温度变化

1.3 足尺试验路无损检测方案

依托级配碎石基层沥青路面加速加载足尺试验路,应用分层检测分析方法逐层检测了路面结构层的弯沉^[1],并同时记录气温、沥青层温度、级配碎石基层和路基湿度参数。利用实测的 FWD 弯沉盆,反算不同应力水平下的结构层模量。其次,为了研究路面结构强度变化规律和沥青混合料模量衰变规律以及随温度的变化规律,在不同的加载阶段,进行路表 FWD 弯沉检测。

表 5 沥青层 FWD 传感器分布

传感器号	D ₀	D ₂₀₃	D ₃₀₅	D ₄₅₇	D ₆₁₀	D ₉₁₄	D ₁₂₁₉	D ₁₅₂₄	D ₁₈₂₉
与荷载中心距离/mm	0	203	305	457	610	914	1 219	1 524	1 829

2)季节性或周期性 FWD 弯沉检测。检测是在路面建成后进行,每隔一段时间,在固定测点进行 FWD 弯沉检测,了解温度变化和路面结构性能衰变对结构层模量的影响。

3)FWD 荷载动力响应测试。在每个传感器埋设点的路面上进行 FWD 检测,同时采集 FWD 荷载引起的应力或应变响应。

2 沥青层反算模量及换算系数

为使 FWD 无损检测能准确评价路面的承载能力,应对 FWD 反算得来的模量值进行换算,以使反算模量可以更好的与室内模量测试值统一。定义 FWD 反算模量换算系数 K 为实验室模量与结构层反算模量的比值,即 $K = E_{\text{室内}} / E_{\text{反算}}$,其中 $E_{\text{室内}}$ 是通过实验室测试或者预估模型所得的模量值, $E_{\text{反算}}$ 是通过反算程序对 FWD 弯沉盆进行反算所得的模量值。由于不同材料的特性不同,所以各种材料的反算模量修正系数 K 的取值以及变化规律是不同的。

2.1 沥青层 FWD 模量反算

基于弹性层状体系理论,采用迭代法反演各结构层模量。但目前迭代法反演路面结构层模量都存

采用的 FWD 弯沉检测方案如下:

1)试验路修建过程中,定点逐层检测 FWD 弯沉,同时记录结构层的温度和湿度。对土基采用直径 D45 cm 承载板,施加 5 级荷载,分别为 215、280、350、424、470 kPa。级配碎石层顶采用直径 D45 cm 承载板,施加 4 级荷载,分别为 210、280、350、420 kPa,路基和级配碎石基层 FWD 弯沉传感器按表 4 布置。

表 4 路基和级配碎石基层 FWD 传感器分布

传感器号	D ₀	D ₃₀₅	D ₄₅₇	D ₆₁₀	D ₉₁₄	D ₁₂₁₉
与荷载中心距离/mm	0	305	457	610	914	1 219

对沥青层 FWD 检测采用直径 D30 cm 承载板,采用三级荷载,分别为 566、707、848 kPa,每级荷载重复 3 次试验,即每个测点需要施加 9 次 FWD 荷载,弯沉传感器共有 9 个,按表 5 布置。

在一定缺陷,特别是当分层较多,或结构层太薄(小于 75 mm)时反算所得到的数据偏差较大,而且离散性也很大。一般认为,当路面结构分层在 4 层及 4 层以下时得到的数据具有一定的可比性^[1]。足尺试验路结构层模量采用美国华盛顿州的 EVERCALC5.0 软件进行反算,将足尺试验路路面结构分为 3 层,即路基、级配碎石层和沥青面层,FWD 检测位置各结构层厚度如表 6 所示,反算时采用 5tFWD 荷载检测的弯沉盆数据。

表 6 FWD 检测位置结构层厚度 cm

种类	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4
沥青面层	8.8	10.0	8.9	8.5
级配碎石基层	38.1	39.2	39.0	41.7
土基	粘土	粉土	粉土	粘土

在足尺试验路快速加载试验中,在沥青层顶共进行了 5 次 FWD 弯沉检测,分别为开始运行、加载至 37 538、119 963、218 287、704 120 次。进行 FWD 测试时准确记录沥青层温度,以保证模量反算的准

确性和有效性,5次 FWD 弯沉测试反算的各结构层模量列于表 7。

表 7 足尺路面不同加载次数下的结构层反算模量 MPa

加载次数/ 路面温度	路面 结构	土基反 算模量	级配碎石 反算模量	沥青层反 算模量
0 次/27 °C	结构 1	185.4	136.2	9 120.7
	结构 2	180.7	122.7	11 109.5
	结构 3	188.9	121.0	13 311.7
	结构 4	209.4	108.5	8 813.8
37 538 次/ 21.1 °C	结构 1	201.3	248.8	12 272.5
	结构 2	175.2	184.4	17 885.8
	结构 3	172.2	207.9	20 722.8
	结构 4	171.6	208.9	10 960.9
119 963 次/ 9.8 °C	结构 1	205.7	282.2	30 200.4
	结构 2	182.0	130.7	29 484.9
	结构 3	205.6	125.1	30 499.9
	结构 4	243.2	250.0	17 637.7
218 287 次/ 7.6 °C	结构 1	213.8	338.0	32 859.7
	结构 2	188.4	131.6	31 679.9
	结构 3	200.6	133.4	30 625.4
	结构 4	243.9	326.1	19 070.8
704 120 次/ 26.4 °C	结构 1	210.5	145.2	5 992.1
	结构 2	219.0	93.4	6 766.5
	结构 3	215.7	106.4	6 154.0
	结构 4	232.6	138.4	7 012.3

从表 7 不同加载次数结构层 FWD 反算模量可以看出:

1) 粘土路基反算模量值较为稳定,结构 1 粘土路基模量均值为 203.4 MPa,结构 4 粘土路基反算模量均值为 220.1 MPa;对于粉土路基结构,在加载的初期阶段,结构 2 和结构 3 基本不变,约 185~190 MPa,加载至末期(约 70 万次时),模量均有所增加,反算模量值为 215~220 MPa,增幅为 12%~18%。

2) 级配碎石层模量变异性较大,结构 1 和结构 4 级配碎石层模量在加载初期,随加载次数缓慢增大后减小;结构 2 和结构 3 级配碎石层模量在加载初期随加载次数增加略有增长,而后保持稳定,加载末期,级配碎石层模量均有所降低,但降幅较小。

3) 沥青混合料是一种感温性较强的粘弹性材料,温度的变化对沥青层模量有着重要的影响。从图 4 沥青层模量随加载次数的变化可以看出,随路面温度的降低,反算沥青层模量增大,随温度升高而减小。结构 1、结构 2 和结构 3 均表现出了一致的规律性,且模量值大致相等;结构 4 沥青层模量值较其他结构差异较大,与该结构沥青路面被切割后埋设动态称重系统相关。

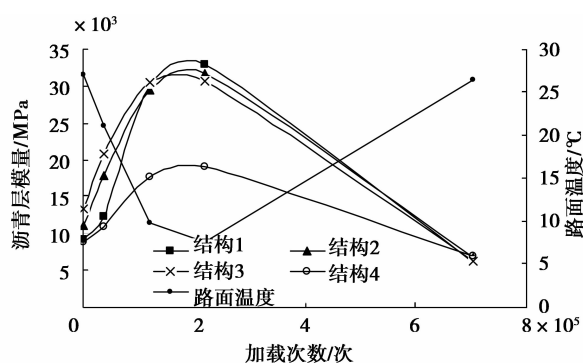


图 4 沥青层模量随加载次数的变化

2.2 沥青层材料室内动态模量

参考 AASHTO TP62 试验方法,采用常应变控制方式,对旋转压实成型的圆柱体试件施加连续正弦荷载,测试沥青混合料试件在规定试验条件下的动态模量,整个试验过程在弹性工作范围内进行,试件经受动荷载的重复作用。

文中通过旋转压实仪成型了与现场路面相同空隙率的圆柱体试件,然后将试件取芯、切割成 $\Phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱体试件,采用 SPT 简单性能试验机测试了 AC-13 沥青混合料试件在不同温度时的动态回弹模量。动弹模量的测试加载频率为 10 Hz,试验温度分别为 5、10、15、20、30、40 °C,根据动态模量试验结果进行动弹模量与温度的回归分析,即可得到沥青混合料动态回弹模量随温度变化而变化的曲线方程,如式(1)所示。根据回归的动态模量随温度变化的方程,即可计算出任意温度条件下沥青混合料的动态模量,表 8 给出了 FWD 路表弯沉测试时沥青层材料的动态回弹模量。

$$E = 313\,53 e^{-0.046\,4T}, \quad (1)$$

式中: E 为 AC-13 沥青混合料动态回弹模量,MPa; T 为温度,°C。

2.3 沥青层反算模量换算系数 K

将实验室沥青混合料动态模量与足尺试验路沥青层反算模量对比,得出 FWD 弯沉检测温度时的沥青层反算模量换算系数 K ,如表 8 所示。

表 8 沥青层反算模量换算系数 K

结构	荷载作用次数	FWD 检测温度/°C	反算模量/MPa	动态模量/MPa	K
结构 1	0	27.0	9 120.7	8 957	0.98
	37 538	21.1	12 275.2	12 096	0.99
	119 963	9.8	30 200.4	19 897	0.66
	218 287	7.6	32 859.7	22 035	0.67
	704 120	26.4	6 992.1	9 210	1.32
结构 2	0	27.0	11 109.5	8 957	0.81
	37 538	21.1	24 465.8	12 096	0.68
	119 963	9.8	29 484.9	19 897	0.67
	218 287	7.6	31 679.9	22 035	0.70
	704 120	26.4	6 766.5	9 210	1.36
结构 3	0	27.0	12 811.7	8 957	0.70
	37 538	21.1	23 947.4	12 096	0.58
	119 963	9.8	30 499.9	19 897	0.65
	218 287	7.6	30 625.4	22 035	0.72
	704 120	26.4	6 154.0	9 210	1.50
结构 4	0	27.0	8 813.8	8 957	1.02
	37 538	21.1	10 960.9	12 096	1.10
	119 963	9.8	17 637.7	19 897	1.13
	218 287	7.6	19 070.8	22 035	1.16
	704 120	26.4	7 012.3	9 210	1.31

由表 8 可以看出,沥青层反算模量换算系数 K 随荷载作用次数的增加先减小而后增大,这与沥青层模量的衰变规律相吻合。路面未施加轮载前,模量换算系数 $K=0.70\sim 1.01$; 轮载作用 37 538 次时,沥青层模量修正系数较未加载前反而有所降低,这与面层沥青混合料被行车荷载的进一步压实有关;加载至 704 120 次时,模量换算系数 $K=1.31\sim 1.50$,此时足尺试验路各结构轮迹带已出现了自顶向下发展的纵向裂缝,除了结构 3 沥青层层底开始出现结构性开裂外,其余结构均未发生结构性开裂,因此,当沥青层层底开始出现疲劳开裂时,沥青层 FWD 反算模量换算系数 $K>1.50$ 。

3 级配碎石基层模量反算与换算系数

3.1 级配碎石层模量反算

级配碎石基层严格按照施工技术规范施工,压实后表面稍干即撒铺乳化沥青,在其表面进行 FWD 弯沉检测。检测时采用 45 cm 直径的承载板,荷载应力水平采用 210、280、350、420 kPa 4 级荷载,每个应力水平作用 3 次。

在级配碎石顶进行 FWD 弯沉测试时,将路面结构划分为路基和级配碎石层两层,基于迭代法进行路面结构层模量反演。在反算过程中,对于反常的弯沉盆数据予以剔除,反算结果如表 9 所示。

表 9 级配碎石基层顶 FWD 反算模量

结构与桩号		应力水平/kPa								路基土类型
		210		280		350		420		
		GB	Sg	GB	Sg	GB	Sg	GB	Sg	
结构 1	2 m	100.6	200.5	105.9	190.9	103.7	183	99.5	175.5	粘土
	8 m	133.4	190.0	133.3	176.8	126.0	171.6	120.8	164.4	
结构 4	10 m	148.1	187.7	144.2	177.7	135.5	172.9	126.1	167.4	
	均值	140.8	188.9	138.8	177.3	130.8	172.3	123.5	165.9	
	标准差	10.39	1.63	7.71	0.64	6.72	0.92	3.75	2.12	
	变异系数/%	7.4	0.9	5.6	0.4	5.1	0.5	3.0	1.3	
结构 2	4 m	128.4	144.4	143.5	141.3	137.5	138.6	138.7	135.7	
	5 m	145.6	144.8	151.6	140.3	152.6	139.2	151.9	136.3	
结构 3	6 m	136.3	136.8	147.6	132.9	149.2	131.3	149.0	130.1	
	7 m	145.3	143.7	152.5	144.5	151.0	145.6	148.1	144.3	
	均值	138.9	142.4	148.8	139.8	147.6	138.7	146.9	136.6	
	标准差	8.22	3.78	4.13	4.91	6.86	5.85	5.72	5.84	
	变异系数/%	5.9	2.7	2.8	3.5	4.6	4.2	3.9	4.3	

注:GB—级配碎石;Sg—路基

由表 9 反算结果可知,级配碎石基层和路基的模量均随应力水平升高而降低,但受应力水平的影响并不明显。在 210 kPa 的应力水平时,反算值反而减小,这可能跟级配碎石材料的松散特性及结构层上并无其他结构层的约束有关。

通过级配碎石顶 FWD 弯沉检测可知,在 280 kPa 应力水平时,级配碎石层反算模量约 140~150 MPa,粘土路基反算模量约 190~200 MPa;粉土路基反算模量约 140~150 MPa。可见,随着级配碎石层的铺筑,在级配碎石顶反算的路基模量较路基顶 FWD 反算的路基模量值要大,符合路基模量随应力水平变化的规律。

3.2 级配碎石层反算模量换算系数

根据实测的 APT 试验路级配碎石层底压应力水平,推算级配碎石层 1/3 深度位置偏应力和围压,结合现场取料制备试件的室内 UTM 重复加载三轴压缩回弹模量试验结果,得出 APT 试验路级配碎石基层材料室内回弹模量为 179.9 MPa^[1],将该模量值与相同环境条件下沥青层顶 FWD 反算的级配碎石层模量值进行对比,得到级配碎石基层的反算模量换算系数(见表 10)。计算结果表明级配碎石层的 FWD 反算模量小于级配碎石材料室内重复加载回弹模量值,即反算模量换算系数大于 1,比值范围为 1.32~1.49,也即说明对于级配碎石基层沥青路面结构,级配碎石层的反算模量为室内重复加载试验回弹模量的 0.67~0.75。AASHTO2002 中指出沥青层下卧层为级配碎石基层(或底基层)时,级配碎石层反算模量与室内重复加载回弹模量的比值为 0.67^[1],因此,级配碎石层反算模量换算系数与级配碎石所处的层位以及路面结构类型相关,文中计算结果与 AASHTO2002 设计指南基本一致。

表 10 级配碎石基层反算模量换算系数 K

	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4
K	1.32	1.47	1.49	1.35

4 土基材料反算模量与换算系数

路基回弹模量是表征路基抗变形能力及路面结构设计的重要力学参数,对路基路面结构的强度、刚度、稳定性、使用性能和使用寿命起着决定性的作用,其取值大小直接影响着路面结构层的厚度设计和路基路面的施工质量。

研究表明,路基土的压实度和含水量是影响路基土模量的关键因素^[13]。路基施工过程中,对每层路基土进行了压实度和含水量检测,严格按照施工技术规范进行施工。因足尺试验路路基土的厚度约 10 m 左右,在路面结构层模量反算时,可以不考虑路基土底部岩层的影响,将路基作为一个整体结构层考虑。

4.1 路基顶 FWD 检测与模量反算

按照检测计划,在足尺直道试验路施工过程中,每一结构层施工完成后都在其表面进行 FWD 检测,并采集了温度、湿度和结构层厚度等参数。土基顶面进行了 1.0、1.7、5.5、6.5 m 桩号的 FWD 弯沉,采用 EVERCALC5.0 进行路基模量的反算,结果如表 11 所示。

表 11 不同荷载作用下路基模量反算结果 MPa

路基土 类型	桩号/ m	应力水平/kPa				
		210	270	340	410	460
ML	5.5	—	96	94.1	93.8	93.6
	6.5	—	93.3	93.2	93.5	94.7
CL	1.0	162.6	158.1	153.9	150.3	147.4
	1.7	153.0	153.5	150.9	146.9	144.0

由表 11 可以看出:1)粘土路基或粉土路基的模量随应力水平增大而减小,呈现出应力弱化的特征。按照上述规律,当路基顶应力水平为 35 kPa 时,粘土路基的模量约 173 MPa,粉土路基模量约 100 MPa;2)应力水平对路基模量的影响不大,应力水平增大 1 倍,路基模量仅减小 9.4%,说明应力水平对路基模量的影响较小。

4.2 土基材料模量换算系数

FWD 反算结果表明,土基材料的反算模量随着路面结构层厚度的增加而增大,而室内模量试验值也是随着路面结构层厚度的增大而增大的,但是增加的幅度小于反算模量增加的幅度。

以土基材料的室内重复加载回弹模量值以基准,与土基顶 FWD 弯沉反算模量(见表 11)、级配碎石层顶 FWD 弯沉反算模量(见表 9)和沥青层顶 FWD 弯沉反算模量(见表 7)中的路基反算模量值进行对比,得到土基材料的反算模量换算系数,如表 12 所示。

表 12 土基材料的反算模量换算系数 K

土基 类型	FWD 测试 位置	反算模量换算系数 K			变异性 系数/%
		最小值	最大值	平均值	
	土基顶	0.32	0.35	0.34	12.4
ML	级配碎石顶	0.22	0.24	0.23	2.7
	沥青层顶	0.17	0.19	0.18	6.2
	土基顶	0.38	0.45	0.42	13.10
CL	级配碎石顶	0.33	0.40	0.37	0.90
	沥青层顶	0.28	0.33	0.31	2.60

由表 12 可以看出,随 FWD 检测层位的不同,路基反算模量换算系数 K 不同。由路基顶 FWD 弯沉检测反算路基模量与室内重复加载三轴压缩回弹模量试验结果比较可知,路基无损检测反算模量高于室内重复加载三轴压缩回弹模量值,粉土路基顶 FWD 检测反算模量换算系数均值为 0.34;级配碎石层顶 FWD 反算路基模量换算系数均值为 0.23,沥青层顶 FWD 反算路基模量换算系数均值为 0.18。粘土路基顶 FWD 检测反算模量换算系数均值为 0.42;级配碎石层顶 FWD 反算路基模量换算系数均值为 0.37,沥青层顶 FWD 反算路基模量换算系数均值为 0.31。可见,随着 FWD 弯沉检测层位的上移,土基反算模量换算系数减小。此外,土基的反算模量与其下卧层刚度和厚度有关,设计者在计算路基模量时,要考虑它代表的是整个路面基础的模量。

5 结 论

根据足尺试验路结构层厚度测量和环境观测,对试验路进行了 FWD 弯沉测试,并且对测试结果进行反算,得出如下结论:

结构完好路面的沥青层反算模量换算系数 $K=0.7\sim 1.0$;路面出现 Top-down 开裂后, $K=1.3\sim 1.5$;沥青层层底出现疲劳损伤时, $K>1.5$ 。

级配碎石基层和路基的模量均随应力水平升高而减小,但受应力水平的影响并不显著。级配碎石层反算模量换算系数与级配碎石所处的层位以及路面结构类型相关:当沥青层下卧层为级配碎石层时,级配碎石层反算模量换算系数为 $1.32\sim 1.49$,与 AASHTO2002 基本一致。

沥青面层模量受温度和轮载作用次数的影响最大;级配碎石结构层反算模量结果变异性较大,但与现行规范推荐模量和室内重复加载三轴压缩

回弹模量相差不大;土基 FWD 反算模量大于现行规范推荐的静态回弹模量和重复加载三轴压缩回弹模量。

土基反算模量换算系数与其所受的应力水平及土质类型相关,随着 FWD 弯沉检测层位的上移,土基反算模量换算系数减小。低液限粘土 FWD 反算模量换算系数变动于 $0.31\sim 0.42$;低液限粉土路基 FWD 反算模量换算系数变动于 $0.18\sim 0.34$ 范围内。

参考文献:

- [1] NCHRP Project1-37A. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures Final Report[R]. Final Report Part2 Chapter2: Material Characterization, 2004.
- [2] NCHRP. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Final Report, Appendix II-1, Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements, February 2004.
- [3] Gedafa D S, Hossain M, Romanoschi S A, et al. Field verification of superpave dynamic modulus [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(5): 485-494.
- [4] Technical Support Services Contractor, LAW PCS. LTPP manual for falling weight deflectometer measurements operational field guide-lines (Version 3.1) [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2000.
- [5] Baltzer S, Jansen J M. Temperature correction of asphalt moduli for FWD measurements [C] // Proceedings of the 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, August 17-21, 1994, Minneapolis, MN. [S. 1]: ICBCRA, 1994: 753-768.
- [6] 徐艳玲,唐伯明,谢国栋,等.基于 FWD 的沥青层反算模量修正系数[J].长安大学学报:自然科学版,2012, 32(3):24-29.
XU Yanling, TANG Boming, XIE Guodong, et al. Back calculated modulus correction coefficient for asphalt concrete layer based on FWD [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(3): 24-29.
- [7] Lukanen E O, Stubstad R, Briggs R. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement[R]. Mclean: Federal Highway Administration, Research and Development Tumer-Fairbank Highway Research Center, 2000.
- [8] 周亮,凌建明,林小平,等.沥青层反算模量的温度修正系数[J].同济大学学报:自然科学版,2011, 39(11): 1641-1645.

- ZHOU Liang, LIN Jianming, LIN Xiaoping, et al. Temperature adjustment factor for back-calculated modulus of asphalt pavement layer [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39 (11): 1641-1645.
- [9] Chen D H, Bilyeu J, Lin H H, et al. Temperature correction on falling weight deflectometer measurements [J]. Transportation Research Record, 2000, 1716(4): 30-39.
- [10] 管志光, 庄传仪, 林明星. 足尺沥青混凝土路面加速加载动力响应 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 24-31.
- GUAN Zhiguang, ZHUANG Chuanyi, LIN Mingxing. Dynamic response based on accelerated loading testing for full-scale asphalt pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 24-31.
- [11] Timm D H, Priest A L. Material properties of the 2003 NCAT test track structural study [R]. Alabama: National Center for Asphalt Technology Auburn University, 2006.
- [12] 庄传仪. 基于加速加载响应的柔性基层沥青路面设计指标与参数研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 99 页)

- [14] 杨天春, 易伟建, 鲁光银, 等. 预应力 T 梁束孔管道压浆质量的无损检测试验研究 [J]. 振动工程学报, 2006, 19(3): 411-415.
- YANG Tianchun, YI Weijian, LU Guangyin, et al. Experimental study of nondestructive testing for grouting quality in prestressed concrete T-beam [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 411-415.
- [15] 吕培文. 基于 CFD 离心泵数值模拟及性能优化 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [16] Starkey A, Ivanovic A, Rodger A A, et al. Condition monitoring of ground anchorages by dynamic impulses GRANIT system [J]. Meccanica, 2003, 38(2): 265-282.
- [17] 徐向锋. 孔道压浆性能试验及施工质量的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [18] 冯大斌, 董建伟, 孟履祥. 后张预应力孔道灌浆现状 [J]. 施工技术, 2006, 35(4): 49-51.
- FENG Dabin, DONG Jianwei, MENG Lüxiang. The situation of post-prestressed grouting [J]. Construction Technology, 2006, 35(4): 49-51.
- [19] 李传平, 刘耀武, 张保和. 公路桥梁 140 米长预应力孔道压浆质量控制 [J]. 施工技术, 2005, 34(7): 59-60.
- LI Chuanping, LIU Yaowu, ZHANG Baohe. Quality control of grouting of a 140 meters prestressed duct of road bridges [J]. Construction Technology, 2005, 34(7): 59-60.

(编辑 陈移峰)