

利用手持式落锤弯沉仪评价路基路面强度参数

郑京杰

(湖南省交通建设质量监督站 长沙市 410011)

摘 要: 结合湘西通县公路改造工程,应用手持式落锤弯沉仪(HFWD),研究了动回弹模量与旧路面剩余强度、静回弹模量和劈裂强度的关系,得出动回弹模量与路基路面强度参数(剩余强度、静回弹模量和劈裂强度)有较好相关关系的结论。结果表明,手持式落锤弯沉仪可用于路基路面强度参数的快速检测和评价,从而为路面结构的设计提供科学依据。

关键词: 路面改造;手持式落锤弯沉仪;路基路面;强度参数

目前路基路面结构的强度指标——静回弹模量和劈裂强度,作为反映路面结构强度最重要的力学指标,在路面结构的设计和评价中占据重要位置,其取值的大小直接影响着路面结构层的设计厚度。因此,路基路面强度参数的确定和检测尤为重要。

路基路面强度参数的试验测试方法主要有承载板法(室内、室外)、顶面法、劈裂试验法和弯沉测定法(贝克曼梁弯沉仪和FWD落锤式弯沉仪)等^[1],这些测试手段都存在着测试时间长、人员多和偏僻地方不宜到达的缺点。因此,寻找一种快速简便的检测方法至关重要。本文通过大量的现场和室内试验,进行了动回弹模量与静回弹模量、劈裂强度的比对研究,建立了动回弹模量与静回弹模量、劈裂强度的关系,从而提出利用手持式落锤弯沉仪评价路基路面强度参数的方法,为路面结构的设计提供科学依据。

1 手持式落锤弯沉仪的工作原理

手持式落锤弯沉仪(Handhold Falling Weight Deflectometer)简称HFWD,是一种动力试验检测设备,它是继落锤弯沉仪(FWD)后的一种新的用于确定路基、非约束层和道路结构承载能力的检测设备,可获得路基、非约束层和道路结构的动弹性模量(图1为HFWD设备图)。手持式落锤弯沉仪由加载系统、数据采集系统与数据传输系统组成。其工作原理为:将10 kg的落锤提升至固定高度,然后释放,让其自由下落,落锤冲击承载板产生冲击荷载;在冲

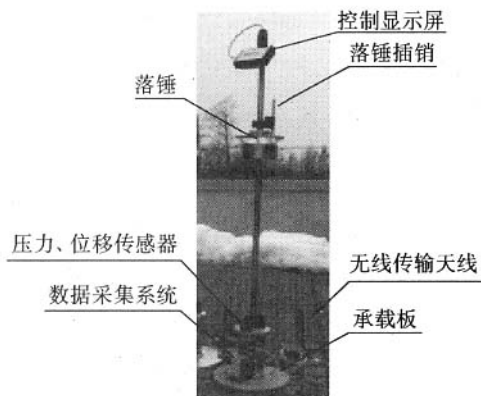


图1 HFWD设备

击荷载作用下,承载板产生竖向位移,位移传感器和压力传感器分别测得刚性承载板中心处的弯沉和压力,从而根据压力和位移的峰值,由弹性半空间体的刚性承载板理论公式确定回弹模量值。

$$E_p = \frac{2\pi p \delta (1 - \mu^2)}{4l} \quad (1)$$

式中: p 为实测的承载板所受荷载,kPa; δ 为承载板半径,现场通常采用半径为150 mm的承载板,室内一般采用半径为50 mm的承载板; μ 为泊松比,取 $\mu=0.35$; l 为实测的承载板中心弯沉, μm ; E_p 为回弹模量,MPa。

2 动回弹模量与旧路面剩余强度的关系

通过实测旧路面的路表回弹模量值,可反映路面结构的整体强度和分析路面出现损坏的原因,为

加铺层结构设计提供设计参数和依据。

为了统一和正确地测量旧路面的承载能力,确定旧路面状况,根据《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059—95)和国内外所采用的方法,于 2005 年 4 月 3 日~15 日采用手持式落锤弯沉仪和现场承载板对湘西地区境内 6 条国、省道典型路面结构路段做了科学的调查和评估,各路段路面结构见表 1。表 1 中的路面结构反映了湘西地区国、省道主干线公路中主要采用的路面结构形式。

表 1 调查路段路面结构

序号	路线名称	路段桩号	长度/m	路面结构/cm
1	G209	K2200+500~ K2200+900	400	8 沥青表处+ 22 泥结碎石
2	G209	K2180+000~ K2180+400	400	5 沥青表处+ 14 泥结碎石
3	G319	K1723+400~ K1723+800	400	6 沥青表处+ 18 泥结碎石
4	G319	K1732+000~ K1732+400	400	4 沥青表处+ 14 泥结碎石
5	S230	K32+300~ K32+700	400	4 沥青表处+ 12 泥结碎石
6	S308	K616+100~ K616+400	300	砂路

在选定路段的行车道上,选择较为平整且纵坡较小的位置作为现场检测的测点布设位置,按 10 m 间隔布置测点,一般每段为 30~40 点,先将标准车开至需测点位测试静回弹模量,当标准车开向下一个测点后,随即用手持式落锤弯沉仪测试动回弹模量。对于每一测点,HFWD 和现场承载板两者间的时差较小,可认为 HFWD 和现场承载板是在相同条件下进行的。测试时间为春季多雨季节,故本次试验是在最不利季节状况下进行的。实测的路表温度在 20℃左右,处于标准温度范围。现场检测结果见表 2。

表 2 现场检测结果汇总

路段 编号	静回弹模量 E_0 /MPa			动回弹模量 E_p /MPa		
	平均值	均方差	变异系数	平均值	均方差	变异系数
路段 1	121	20.53	0.219 7	102	14.34	0.203 1
路段 2	99	43.81	0.307 4	82	29.32	0.268 2
路段 3	112	25.85	0.294 5	114	17.85	0.244 1
路段 4	93	33.98	0.238 8	78	25.23	0.221 3
路段 5	75	19.51	0.260 7	61	10.21	0.167 4
路段 6	62	18.62	0.302 8	52	8.62	0.167 1
总体	100	41.11	0.409 5	80	29.52	0.369 2

从表 2 可以看出,调查路段静、动回弹模量值变异系数分别为 0.409 5 和 0.369 2,表明旧路面的强度和刚度均匀性差。造成模量变异性较大的主要原因是原路面破损较为严重,建议对龟裂严重的旧沥青面层进行翻整压实,以保证原路面的强度和刚度具有良好的均匀性。

为了建立 HFWD 检测的 E_p 与现场承载板检测的 E_0 的关系,将异常点剔除,采用以下 3 种模型对动态模量 E_p 与静态模量 E_0 进行回归拟合,相应的回归关系见表 3。

直线模型: $E_p = A + BE_0$

指数模型: $E_p = Ae^{BE_0}$

双对数模型: $E_p = AE_0^B$

表 3 回归拟合统计

模型	回归系数 A	回归系数 B	相关系数 R
直线模型	9.348 4	0.703 3	0.905 0
指数模型	34.264	0.007 8	0.884 2
双对数模型	1.451 7	0.869 9	0.940 2

表 3 统计结果表明,在旧路面上动回弹模量与静回弹模量之间存在较好的相关关系,双对数的相关关系最好,直线的相关关系次之,指数的相关关系较差,其中动回弹模量比静回弹模量稍小。

3 动回弹模量与水泥稳定碎石基层强度参数的关系

由于水泥的存在,水泥稳定碎石基层强度参数的变化与养护条件有着密切的关系。路面结构基层的强弱和好坏,对于路面特别是沥青混凝土路面的强度、使用质量和使用寿命都有十分重要的影响^[2]。因此,合理地设计基层,选择合适的基层强度参数十分重要。

获取材料强度参数的小型试件的养护条件和施工现场养护条件的差异,造成了设计和施工的分离,即采用实验室内养护的小型试件获得的材料强度参数,与在施工现场养护条件下的强度参数并不一致。本次水泥稳定碎石材料强度参数试验,根据湘西地区气候、材料、施工水平和工程实践经验,按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057—94)和试验路的最佳配合比成型试件,采用室内养护和室外养护不同的养护条件,按龄期 7 d、28 d、60 d、90 d 和 180 d 养护后,按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057—94)分别测定试件的抗压强度 R 、抗压回弹模量 E_t 、劈裂强度 R_t ,用手持式落

锤弯沉仪测试动回弹模量 E_p 。现场养护试件埋置在试验路段的路肩中,为使养护条件与路面中的材料养护条件相似,在埋设试件的底部和顶部铺了一层细砂。试验统计结果见表 4。

表 4 不同龄期基层材料强度参数试验统计结果(95%保证率)

龄期 d	抗压回弹 模量 E_t /MPa		无限制抗 压强度 R /MPa		劈裂强度 R_t /MPa		动回弹模量 E_p /MPa	
	室内	现场	室内	现场	室内	现场	室内	现场
7	624	538	3.8	3.2	0.19	0.16	435	364
28	897	716	5.0	4.5	0.29	0.22	559	447
60	1 189	1 031	6.3	5.9	0.42	0.30	680	581
90	1 542	1 193	8.4	7.5	0.64	0.41	813	645
180	1 771	1 246	9.2	8.4	0.74	0.43	895	667

从试验结果可以看出,采用室内标准养护试件的强度参数高于施工现场养护试件的强度参数。不同养护条件的水泥稳定碎石材料强度参数增长趋势相同,早期的强度参数发展较快,但是随着龄期的增长,在中后期其发展速度开始变得缓慢。

为了建立动回弹模量与其他强度参数指标的相关关系,对试验结果采用双对数关系进行回归分析,得到水泥稳定碎石的动回弹模量与抗压回弹模量、抗压强度、劈裂强度之间的相关关系,见表 5。

表 5 动回弹模量与其他强度指标的相关关系

养护条件	指标	回归系数 A	回归系数 B	相关系数 R
室内养护	$E_{tS} \sim E_{pS}$	0.095 5	1.445 9	0.989
	$R_S \sim E_{pS}$	0.001 8	1.254 3	0.994
	$R_{tS} \sim E_{pS}$	0.000 001 5	1.925 3	0.989
现场养护	$E_{tX} \sim E_{pX}$	0.149 0	1.389 1	0.992
	$R_X \sim E_{pX}$	0.000 5	1.492 2	0.979
	$R_{tX} \sim E_{pX}$	0.000 05	1.599 3	0.982

从表 5 中的数据可知,不同养护条件的水泥稳定碎石材料的动回弹模量,与抗压回弹模量、劈裂强度、抗压强度之间存在良好的相关关系。

表 6 沥青混凝土面层材料强度参数室内试验统计结果(95%保证率)

类型		抗压回弹模量 E_{tS} /MPa			劈裂强度 R_{tS} /MPa			动回弹模量 E_{pS} /MPa		
		均值	变异系数/%	代表值	均值	变异系数/%	代表值	均值	变异系数%	代表值
AC-13I	15 C	1 546	8.03	1 455	1.20	5.31	1.15	437	8.94	405
	20 C	1 259	9.09	1 175	0.92	3.08	0.90	388	5.24	371
AC-16I	15 C	1 385	9.98	1 284	0.95	10.39	0.88	352	9.72	324
	20 C	1 039	12.32	945	0.80	10.93	0.74	315	9.91	289
AM-10	15 C	1 708	8.33	1 604	1.33	3.03	1.30	398	8.68	363
	20 C	1 409	9.17	1 314	0.98	3.12	0.96	362	7.9	338

抗压回弹模量和劈裂强度的测试方法麻烦且测定值离散性比较大、稳定性不好,而 HFW D 回弹模量的试验操作简便且数据稳定性较好。因此,对试验结果重新进行回归分析,找出室内动回弹模量与现场抗压回弹模量、现场劈裂强度之间的回归关系,从而用测试相对容易的动回弹模量推算抗压回弹模量和劈裂强度,利用回归的关系式估算设计参数,具有一定的应用价值。

室内动回弹模量与现场抗压回弹模量的回归关系:

$$E_{tX} = -0.001\ 95E_{pS}^2 + 4.091\ 83E_{pS} - 909.386$$
$$R = 0.994$$

(2)

室内动回弹模量与现场劈裂强度的回归关系:

$$R_{tX} = -0.000\ 000\ 11\ E_{pS}^2 + 0.000\ 757\ 1 \times$$
$$E_{pS} - 0.161\ 222\ 6$$

(3)

$$R = 0.992$$

4 动回弹模量与沥青混凝土面层强度参数的关系

每个地方的沥青材料、地理气候和试验水平,决定了这个地方沥青混合料强度参数的取值。因此,本次沥青类材料强度参数试验的目的,就是要根据湘西地区气候、材料、施工水平和试验水平,对于选取的 3 种沥青混凝土面层材料(AC-13I、沥青砂 AM-10 和 AC-16I),其原材料和配合比严格符合实际工程试验要求,采用室内标准拌和与工地现场拌和两种方式制作试件,试验方法和养生条件按照《公路工程沥青及沥青混合料材料试验规程》(JTJ 052—2000)的要求进行。在 15℃和 20℃条件下,利用万能材料试验机测定试件的抗压回弹模量 E_t 和劈裂强度 R_t ,并用手持式落锤弯沉仪测试大马歇尔试件的动回弹模量 E_p 。

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052—2000)的规定,对室内和现场试验数据进行处理,统计分析结果见表 6 和表 7。

表 7 沥青混凝土面层材料强度参数现场试验统计结果(95%保证率)

类型		抗压回弹模量 E_{tX} /MPa			劈裂强度 R_{tX} /MPa			动回弹模量 E_{pX} /MPa		
		均值	变异系数/%	代表值	均值	变异系数/%	代表值	均值	变异系数/%	代表值
AC-13I	15 C	1 345	15.93	1 188	1.13	6.21	1.05	394	10.21	361
	20 C	1 108	14.66	989	0.86	6.06	0.80	354	5.51	338
AC-16I	15 C	1 260	17.93	1 094	0.88	10.36	0.77	320	10.18	294
	20 C	956	20.65	811	0.73	10.64	0.64	292	9.42	269
AM-10	15 C	1 537	12.86	1 392	1.24	5.05	1.17	372	6.6	352
	20 C	1 282	14.37	1 147	0.91	5.61	0.85	333	9.42	308

从表6和表7可知,沥青混合料抗压回弹模量的变异系数均值为14.02%,劈裂强度变异系数均值为6.65%,动回弹模量的变异系数均值为8.27%。可见,无论何种类型的沥青混合料,其抗压回弹模量数据偏差系数都是最大,劈裂强度和HFWD试验偏差系数基本接近。以同温度的抗压回弹模量与动回弹模量、劈裂强度与动回弹模量进行对比分析,见表8。

表 8 沥青混合料抗压回弹模量与动回弹模量的对比系数

沥青混合料类型	AC-13I		AC-16I		AM-10	
	15 C	20 C	15 C	20 C	15 C	20 C
抗压回弹模量/MPa	1 455	1 175	1 284	945	1 604	1 314
劈裂强度/MPa	1.15	0.9	0.88	0.74	1.30	0.96
动回弹模量/MPa	405	371	324	289	363	338
$E_{pS}/E_{tS}/\%$	27.835	31.574	25.234	30.582	22.631	25.723
$R_{tS}/E_{pS}/\%$	0.284	0.242 6	0.271 6	0.256 1	0.358 1	0.284

从表8可以看出,沥青混合料各种物理力学指标随着温度的变化而变化,在不同的温度下相同类型沥青混合料的强度参数值也是不同的,但是它们之间也有比较稳定的对应关系,找出这种对应关系可以推测不同温度下相应类型沥青混合料抗压回弹模量值。这样在没有实测条件的情况下,可以为沥青混合料抗压回弹模量取值提供一定的设计和检验参考依据。在以上试验的基础上我们把湘西地区3种典型沥青混合料两种温度下的对比系数进行分析,得出20℃与15℃的动回弹模量与抗压回弹模量对比系数均值分别为29.293和27.347,20℃与15℃的劈裂强度与动回弹模量对比系数均值分别为0.260 9和0.304 4,见表9。

表 9 沥青混合料抗压回弹模量同其他强度参数的对比系数均值

沥青混合料类型		AC-13I	AC-16I	AM-10	系数均值/%	
$E_{pS}/E_{tS}/\%$	20 C	31.574	30.582	25.723	29.293	28.320
	15 C	27.835	25.234	22.631	27.347	
$R_{tS}/E_{pS}/\%$	20 C	0.242 6	0.256 1	0.284 0	0.260 9	0.282 6
	15 C	0.284	0.271 6	0.358 1	0.304 4	

综合现场试件和室内试件强度参数试验结果,建立沥青混合料动回弹模量与其他强度参数的相关关系,相关关系见式(4)~式(6)和图2~图4。

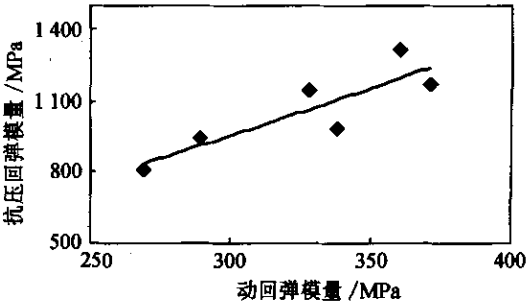


图 2 20℃时 E_p 与 E_t 的关系

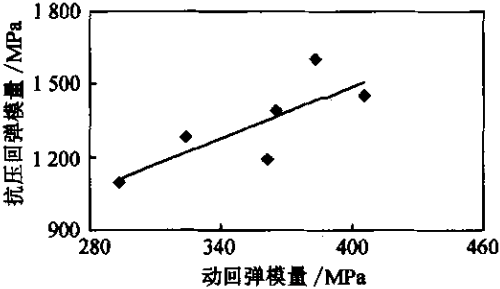


图 3 15℃时 E_p 与 E_t 的关系

在95%保证率下,沥青混合料试件抗压回弹模量 E_t 与动回弹模量 E_p 的关系如下。

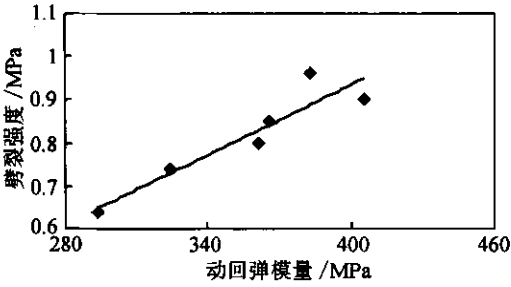


图 4 15℃时 E_p 与 R_i 的关系

20℃时：

$$E_t = 0.842 E_p^{1.2334} \tag{4}$$

$$R = 0.908$$

15℃时：

$$E_t = 4.6817 E_p^{0.9622} \tag{5}$$

$$R = 0.8259$$

在 95% 保证率下，沥青混合料试件劈裂强度 R_i 与动回弹模量 E_p 的关系如下。

15℃时：

$$R_i = 0.0008 E_p^{1.185} \tag{6}$$

$$R = 0.948$$

从式(4)~式(6)和图 2~图 4 可以看出，沥青混合料动回弹模量与抗压回弹模量、劈裂强度存在较好的相关关系，可以用动回弹模量推测不同温度下相应类型沥青混合料抗压回弹模量值和劈裂强度值。

5 结语

本文通过大量的现场和室内试验，进行了动回

弹模量与静回弹模量、劈裂强度的比对研究，得出以下结论：

(1)在旧路面上动回弹模量与静回弹模量之间存在较好的相关关系，双对数的相关关系最好，直线的相关关系次之，指数的相关关系较差，其中动回弹模量比静回弹模量稍小；

(2)不同养护条件的水泥稳定碎石材料的动回弹模量与抗压回弹模量、劈裂强度、抗压强度之间存在良好的相关关系，建立它们之间的回归关系，从而用测试相对容易的动回弹模量值推算抗压回弹模量值和劈裂强度值，利用回归的关系式估算设计参数，具有一定的应用价值；

(3)不同拌和方式的沥青混合料的动回弹模量与抗压回弹模量、劈裂强度存在较好的相关关系，可以用动回弹模量推测不同温度的相应类型沥青混合料抗压回弹模量值和劈裂强度值；

(4)手持式落锤弯沉仪是一种现代无损检测设备，具有检测速度快、精度高的特点，适用于路基路面强度的检测和评价。

参考文献：

[1] 李宇峙，邵腊庚．路基路面工程检测技术[M]．人民交通出版社，2003．
[2] 沙庆林．高等级公路半刚性基层沥青路面[M]．人民交通出版社，1998．
[3] 宋勇，张衡．旧沥青混凝土路面强度评价新技术[J]．公路交通科技，2003，(4)．

Strength Parameters of Subgrade and Pavement Evaluated by Handhold Falling Weight Deflectometer (HFWD)

ZHENG Jing-jie

(Hunan Provincial Construction Supervision Station of Communications, Changsha 410011, China)

Abstract: Through reconstruction engineering of pavement, the relationships of dynamic rebound modulus and residual strength, static rebound modulus and splitting strength of old pavement are studied by HFWD. It is pointed that the obtained satisfactory correlation of dynamic rebound modulus and strength parameters of subgrade and pavement (residual strength, static rebound modulus and splitting strength) is over 0.8. The results show HFWD is feasible to measure and evaluate strength parameters of subgrade and pavement, which provides scientific reference for pavement structure design.

Key word: pavement reconstruction; handhold falling weight deflectometer; subgrade and pavement; strength parameter