文章编号: 0451-0712(2006)12-0146-05

中图分类号:U416.03

文献标识码:B

# 公路路基回弹模量承载板测试方法改进研究

## 马 博,石 鸿

(长安大学公路学院 西安市 710064)

摘 要:针对承载板测试方法的不足,在进行路基顶面应力和位移分析的基础上,选择甘肃省、河南省和河北省的4条不同等级代表路段进行了不同荷载标准下的承载板试验,提出了不同等级公路路面结构下路基顶面产生的回弹弯沉以及压应力的变化范围;分析得出在不同等级公路进行承载板试验时的荷载标准:对于高等级公路(二级以上),荷载标准一般取为回弹变形 0.5 mm 对应的应力;对于三级以下公路,则采用控制回弹弯沉到 1 mm 时结束;同时提出了采用控制应力的测试方法,针对不同等级道路采用不同加载上限及荷载分级方法。

关键词: 路基; 回弹模量; 承载板; 回弹弯沉; 压应力; 改进方法

现场承载板法是现行路面设计规范中所推荐的路基回弹模量测试方法之一,可较为准确地得出路基的回弹模量,所使用仪器结构及操作比较简单,价格低廉,但对于测试人员的技术要求较高,同时存在着以下不足之处。

- (1)现场承载板试验测得的回弹模量为静模量, 不能完全反映路基在承受车辆荷载作用下的应力~ 应变特性。
- (2)现场承载板试验使用的方法较为烦琐,受人为因素和环境影响较大,效率低,无法满足大面积快速检测与路面管理系统数据采集的需要。
- (3)现行规范中对于试验应当加载至什么时候 结束存在争议,在实际测试中采用不同的最大荷载 或最大应变,均可能使测得的结果产生较大的偏差。

#### 1 各等级道路路基顶面应力与位移分析

目前我国不同等级公路路面结构相差较大,即使是同一等级的道路,在不同地区,路面结构层的厚度和材料组合的变化范围也是较大的,并且有不少地区采用了一些新的材料和结构组合及新的施工方法,导致不同地区不同等级公路之间的路基在车辆荷载下产生的应力与位移各不相同。为了统一计算不同等级公路路基应力及位移,以规范推荐结构组合为基础,结合实查全国不同地区59条代表路段路面结构,适当扩大材料参数以及厚度的变化范围,利用弹性半空间体的计算程序进行理论计算,然后通过调查18条已有不同等级道路路面结构进行验证,得出不同等级公路路基顶面回弹弯沉及压应力的分析结果,归纳如表1所示。

基金项目:西部交通建设科技项目(200131882594)

收稿日期:2006-06-01

A concurrent phenomenon is that the air voids become larger and larger at the pavement base, but become smaller and smaller along the depth to the surface. The enlargement of air void content at the base is naturally accompanied with a decrease of air pressure in the voids and connections between voids, which will then make the voids at the base to suck water from the surface even if there exist only micro-cracks in the pavement and cause water destruction. The accumulation of asphalt on the surface may also finally form fat spots or fat strips. This asphalt migration phenomenon from a non-liner viscoelastic mechanics is explained and its affecting factors and technical methods retarding such a migration are discussed.

Key words: asphalt concrete pavement; asphalt migration; viscoelastic mechanics

表 1 各等级公路路基顶面回弹弯沉及压应力

项目	高速公路、一级路		二级路		三、四级路	
	理论计算	实际道路	理论计算	实际道路	理论计算	实际道路
	23.6~41.6	39.0	26.2~46.4	49.6	63. 2~114. 8	78.7
		37.2		56.4		65.5
回弹弯沉		31.5		58.6		62.6
0.01 mm		38. 4		47.7		92.1
		45.6		50.0		105. 2
		51.7		44.4		133.9
		0.014		0.010	0.03 0.05 \sigma 0.05 \sigma 0.11 0.05 \sigma 0.11 0.00 0.00 0.00	0.032
		0.010		0.013		0.037
压应力	0.007.0.015	0.009	0.000 0.010	0.018		0.027
MPa	0.007~0.015	0.014	0.009~0.018	0.020		0.044
		0.015		0.017		0.064
		0.006		0.013		0.113

由表 1 可以看出,各等级道路根据实际结构计算 所得的路基顶面回弹弯沉和压应力与根据规范推荐结 构理论计算的结果相差无几,从而证明了理论计算所 拟各参数变化范围的合理性。两者之间存在的偏差 是由于对于规范推荐结构采用了不同结构层厚度、 模量以及作用不同荷载组合情况下的正交试验进行 计算,而对于实际道路结构只采用了规范中的标准 荷载对既定结构层厚度和模量进行计算。而且我国 现行规范中是以BZZ-100 作为设计依据,因而造 成了实际道路结构计算的结果有可能不在理论计算

因而,对于理论计算和实际结构可以综合起来 考虑,认为对于高等级公路(二级以上),在行车荷载 (BZZ-100) 作用下,路基顶面受到的压应力< 0.05 MPa,产生的回弹弯沉<0.5 mm;对于三、四 级公路,在行车荷载(BZZ-100)作用下,路基顶面 受到的压应力为  $0.05\sim0.15$  MPa,产生的回弹弯沉 有可能超过1 mm。

范围内的情况,但是可以看出,这种差别相当小。

## 2 不同荷载标准下的模量值

为了验证采用不同荷载标准时所测得路基回弹 模量值是否相同,选择4条代表路段进行了不同荷 载标准下的承载板试验,以下是按公路等级划分的 各地区路段实测结果及其分析。

## 2.1 高速公路

课题组在甘肃尹中高速公路和河南三灵高速公 路分别进行了试验,下面以河南三灵高速公路为例 进行说明。

选取河南三门峡至灵宝段高速公路灵宝境内的 函谷关匝道左半副 $K0+135\sim K0+635$ ,全长500 m的土质填方路段。该路段位于公路自然区划 Ⅲ ₄区, 路基土类为黄土状低液限粘土,平均压实度K=98.4%.

0.5 mm 时应力约为 0.15 MPa,1 mm 时约为 0.3 MPa。为了在实际试验时便于操作,采用了控制 应力的方法,加载分级为:0.05 MPa、0.10 MPa、 0.15 MPa、0.20 MPa、0.25 MPa、0.30 MPa,各测 点在不同荷载标准下的回弹模量值如表2所示。

现场承载板试验中,在试压时得知回弹变形为

表 2 不同荷载标准下承载板试验路基回弹模量					
桩号	0. 15 MPa $\overline{T}E_0/\mathrm{MPa}$	0. 3 MPa <b>下</b> <i>E</i> <sub>0</sub> /MPa			
K0+135	59.1	56.7			
K0+185	70.3	67.1			
K0+235	66.6	67.1			
K0+285	73. 2	71.8			
K0+335	65.9	66.5			
K0+385	63.4	61.5			
$K_0 + 435$	69.8	69.8			
K0+485	72.5	72.8			
K0 + 535	63.6	64.8			
K0+585	66.5	70.8			
平均值	67.2	66.9			
标准差	4.42	4.95			
代表值(90%保证率)	61.5	60.5			

由表 2 中数据可以看出,当控制承载板试验荷载标准为 0.5 mm(对应荷载为 0.15 MPa)时所测得的路基回弹模量代表值 61.5 MPa 与荷载标准为 1.0 mm(对应荷载为 0.3 MPa)时所测得的模量代表值 60.5 MPa 相比,前者较后者大了1 MPa。说明了当路基随着所受压力的增大,将在弹性变形的基础上产生部分塑性变形,使得所测回弹模量逐渐变小。因而,荷载标准的不同,将会使得在不同标准下所测得模量值产生差异,从而影响路面结构的设计。

对于该高速公路,由以上理论分析的结果可知,建成后路基顶面实际变形在  $0.5~\mathrm{mm}$  以内,为了和建成后路基实际受力和变形情况相一致,应当采用  $0.5~\mathrm{mm}$  作为承载板试验的荷载标准,如果还是沿用  $1.0~\mathrm{mm}$  的荷载标准,则会使所测模量较实际模量变小,进行路面设计时采用较小的模量值,造成路面结构加厚,产生不必要的浪费。故本次试验回弹模量值宜取控制荷载  $0.15~\mathrm{MPa}$  下的代表值,即  $E_0$  =  $61.5~\mathrm{MPa}$  。

## 2.2 一级公路

选取河北秦皇岛 102 国道改线工程(一级公路)  $K5+830\sim K5+890$ ,长为60 m 的土质填方路段。该路段位于公路自然区划  $\mathbb{I}_4$  区,路基土类为砂性土,最大干密度  $\rho_{\text{dmax}}=2.046$  g/cm³,最佳含水量 w=8.43%,平均压实度 K=99.3%。

现场承载板试验中,在试压时得知回弹变形为 0.5~mm 时 应 力 约 为 0.1~MPa, 1~mm 时 约 为 0.3~MPa。为了在实际试验时便于操作,采用了控制 应力的方法,共分三级控制,即 0.1~MPa、0.2~MPa、0.3~MPa,每级下又分  $4\sim5~\text{个子级}$ ,各测点在不同 荷载标准下的回弹模量值如表 3~所示。

由表 3 中数据可以看出,当控制承载板试验荷载标准为 0.5 mm(对应荷载为 0.1 MPa)时所测得的路基回弹模量代表值 50.0 MPa 与荷载标准为 1.0 mm(对应荷载为 0.3 MPa)时所测得的模量值 47.5 MPa相比,前者较后者大了 2.5 MPa。

对于该一级公路,同理由以上分析结果可知,建成后路基顶面实际变形在 0.5 mm 以内,为了和建成后路基实际受力相一致,应当采用 0.5 mm 作为承载板试验的荷载标准。故本次试验回弹模量值宜取控制荷载 0.1 MPa 下的平均值,即 $E_0 = 50.0 \text{ MPa}$ 。

### 2.3 二级公路

选取河南南阳 S231 线南阳市境二级公路改建工程 $K223+460\sim K223+550$ ,长为100~m 的土质填方路段,该路段位于公路自然区划  $N_2$  区。路基土类

表 3 不同荷载标准下承载板试验路基回弹模量

桩号	$\frac{0.1 \text{ MPa } \mathbf{T} E_0}{\text{MPa}}$	0. 2 MPa <b>下</b> E <sub>0</sub> MPa	0.3 MPa 下 E <sub>0</sub> MPa			
K5+830(超车道)	39. 3	43. 2	37.8			
K5+840(超 <b>车道</b> )	58. 5	57. 3	59.6			
K5+850( <b>超车道</b> )	52.1	58. 9	60.3			
K5+860(超车道)	63.3	61.7	61.1			
K5+870( <b>超车道</b> )	48.1	52.7	53. 1			
K5+880(超车道)	47.0	47.1	48.3			
K5+890(超车道)	53. 5	52. 7	58. 1			
K5+830( <b>行车道</b> )	72.1	61.0	61.1			
K5+840( <b>行车道</b> )	56.9	53. 5	54.4			
K5+850( <b>行车道</b> )	66.0	60.3	63. 6			
K5+860( <b>行车道</b> )	51.7	54.1	55.0			
K5+870( <b>行车道</b> )	59.6	48.6	51.0			
K5+880( <b>行车道</b> )	77.5	62.0	62.0			
K5+890( <b>行车道</b> )	65.3	64.3	58. 7			
平均值	58.0	55.3	56.0			
标准差	9.97	6.15	6.64			

为低液限粘土;最大干密度  $\rho_{\text{dmax}} = 2.040 \text{ g/cm}^3$ ,最 佳含水量 w = 9.50%;平均压实度 K = 96.1%。

47.4

47.5

50.0

现场承载板试验中,在试压时得知回弹变形为 0.5 mm 时应力约为 0.1 MPa, 1 mm 时约为 0.2 MPa。为了在实际试验时便于操作,采用了控制应力的方法,共分两级控制,每级下又分5 个子级,各测点在不同荷载标准下的回弹模量值如表4 所示。

由表 4 中数据可以看出,当控制承载板试验荷载标准为 0.5 mm(对应荷载为 0.1 MPa)时所测得的路基回弹模量代表值 48.8 MPa 与荷载标准为 1.0 mm(对应荷载为 0.2 MPa)时所测得的模量代表值 44.6 MPa 相比,前者比后者大了 4.2 MPa,对路面设计有较大的影响。

对于该二级公路,由以上理论分析的结果可知,建成后路基顶面实际变形在  $0.5~\mathrm{mm}$  以内,为了和建成后路基实际受力相一致,应当采用  $0.5~\mathrm{mm}$  作为承载板试验的荷载标准。故本次试验回弹模量值宜 取控制荷载  $0.1~\mathrm{MPa}$  下的代表值,即  $E_0=48.8~\mathrm{MPa}$ 。

- 3 承载板测试方法改进
- 3.1 规范方法分析

代表值(90%保证率)

代表值(90%保证率)

MPa

表 4 不同荷载标准下承载板试验路基回弹模量					
桩号	0.1 MPa $\overline{}$ $E_0/\mathrm{MPa}$	0. 2 MPa <b>下</b> E <sub>0</sub> /MPa			
K223+460(右幅)	72.5	65.7			
K223+470(右幅)	84.1	67.3			
K223+480(右幅)	78.3	68.9			
K223+490(右幅)	46.4	42.9			
K223+500(右幅)	53.1	47.1			
K223+510(右幅)	52.8	43.4			
K223+520(右幅)	51.4	46.7			
K223+530(右幅)	62.2	53.5			
K223+540(右幅)	49.0	43.7			
K223+550(右幅)	82.4	66.5			
K223+460(左幅)	76.2	61.7			
K223+470(左幅)	57.5	55.6			
K223+480(左幅)	70.3	61.6			
K223+490(左幅)	59.4	54.5			
K223+500(左幅)	65.3	55.0			
K223+510(左幅)	78. 2	62.0			
K223+520(左幅)	63.6	56.6			
K223+530(左幅)	63.0	54.5			
K223+540(左幅)	50.5	46.8			
K223+550(左幅)	60.7	54.2			
平均值/MPa	63.8	55.4			
标准差/MPa	11.7	8. 4			

《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059-95) 中对现场承载板试验的步骤进行了规定,主要是通 过承载板对路基逐级加载、卸载的方法,测出每级荷 载下相应的路基回弹变形值,再经过计算求得路基 回弹模量值。所加荷载通过测力计控制,测点产生的 变形则通过两台贝克曼梁弯沉仪测定。具体测试过 程为:每次加载至预定荷载后,稳定1 min,立即读记 两台弯沉仪百分表数值,然后卸载至零,待卸载稳定 1 min 后,再次读数,每次卸载后百分表不再归零。 当两台弯沉仪百分表读数之差小于平均值的 30% 时,取平均值,如果相差较大,超过30%,则应当重新 测试。

48.8

44.6

从上述规范中规定的测试方法可以看出,在实 际测试过程中,承载板回弹变形=(加载后读数平均 值一卸载后读数平均值)×弯沉仪杠杆比,因此要控 制承载板的回弹变形即位移是比较困难的,往往不 能一次加载到预定的位移,如果第一次未达到,就需 要继续调整所加荷载的大小来使承载板的竖向位移 达到预定大小。而控制应力则比较方便,只需利用测 力计控制千斤顶的加载大小即可。

现行规范中并未对承载板试验时具体采用何种

## 3.2 推荐测试方法

控制方法做出明确规定,采用位移控制和应力控制 实质是相同的,但是控制应力则比较方便,只需利用 测力计控制千斤顶的加载大小即可,测试精度上也 更加精确。故拟对规范中的测试步骤进行改进,即采 用控制应力方法,具体步骤如下。

(1)在一定长度试验路段上选择具代表性的测 点,进行承载板试压,确定应力与回弹变形的关系, 即确定回弹变形 0.5 mm 或 1 mm 时所对应的应力 大小。为全面反映路段情况,可选择3个或5个代表 点,取应力平均值作为应力控制的标准。

(2)确定应力控制的分级,一般在加载上限的基 础上等分为 5 个子级,同时为了对比分析不同加载 上限时模量值,通常将0.5 mm 和1 mm 两个加载上 限一起测试。设两个加载上限分别对应的应力为丸。。 和  $\rho_1$ , 常用的分级方法如表 5 所示。

表 5 承载板试验荷载控制级位及子级

控制级	子级				
	1	2	3	4	5
P 0. 5	<u>\$\oldsymbol{p}_{0.5}\$</u>	2p <sub>0.5</sub> 5	3p <sub>0.5</sub> 5	4 p <sub>0.5</sub> 5	P 0. 5
Þ1	<u>\$\nu_1\$</u> 5	$\frac{2p_1}{5}$	$\frac{3p_1}{5}$	$\frac{4p_1}{5}$	<i>p</i> <sub>1</sub>

为简便起见 $, p_1$  分级中 $, 小于 p_{0.5}$ 的子级通常取 与 $\rho_{0.5}$ 子级中相近的,从而便于在实际加载过程中一 次加载就可得到两个上限所需的不同子级。

现举例如下:某路段进行现场承载板试验,试压 时得知回弹变形为 0.5 mm 时应力约为 0.15 MPa, 1 mm时约为 0.35 MPa,则荷载分级取为表 6 所示。

表 6 承载板试验荷载控制级位及子级

TITE					
控制级	子级				
	1	2	3	4	5
0.15	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
0.35	0.06	0.15	0.21	0.28	0.35

由表 6 可知 1 mm 荷载标准下第 1、第 2 子级本 应为 0.07 MPa 和 0.14 MPa, 但在实际加载过程中, 取为0.5 mm 荷载标准下的0.06 MPa 和0.15 MPa。

这样,实际测试时,加载级位为 0.03 MPa、0.06 MPa、0.09 MPa、0.12 MPa、0.15 MPa、0.21 MPa、0.28 MPa、0.35 MPa,从而可以一次加载至所需荷载上限,避免了对于不同上限需要重复加载的操作。

(3)测出每级荷载下相应的路基回弹变形值,排除显著偏离的回弹变形异常点,绘出荷载P与回弹变形值L的 $P\sim L$ 曲线,如曲线的起始部分出现反弯则修正原点后,在曲线上取各级荷载和回弹变形按线性回归方法计算路基回弹模量,具体计算时所取的荷载子级如表 6 所示,同样, $p_1$  分级中小于  $p_0$ .5的子级取与  $p_0$ .5子级中相近的。

#### 4 结论

division.

- (1)通过弹性半空间体的计算程序对不同等级路面结构下路基顶面产生的回弹弯沉以及压应力进行理论计算,并结合调查已有不同等级道路路面结构进行验证,分析了不同等级公路路面结构下路基顶面产生的回弹弯沉以及压应力,提出其变化范围。
- (2)通过选择不同地区代表路段进行的不同荷载标准下的承载板试验,根据实测结果及其分析,认为路基回弹模量是所受荷载的函数,随着荷载的变化而变化,在进行现场承载板试验时采用不同荷载标准就会使得所测模量值产生差异,一般土质路基

#### 模量将随着荷载的增加而变小。

- (3)在进行现场承载板试验时,对于高等级公路 (二级以上),荷载标准一般取为回弹变形 0.5 mm 对应的应力,采用控制应力的方法,逐级加载、卸载 进行测试;对于三级以下公路,则采用控制回弹弯沉 到 1 mm 时结束。
- (4)通过对现行规范中现场承载板试验步骤的分析,提出了采用控制应力的测试方法,并针对不同等级道路采用不同加载上限,具体荷载分级方法如表5所示。

## 参考文献:

- [1] JTJ059-95. 公路路基路面现场测试规程[S].
- [2] 吴德华,王选仓,姚爱玲.陕西关中地区路基回弹模量研究[J].公路交通科技,2005,22(2).
- [3] 李强. 路基路面检测技术与质量控制[D]. 西安:长安大学,2002.
- [4] 杨永红,王选仓,等. 甘肃黄土地区路基回弹模量[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,(25).
- [5] 王俊梅. 路基回弹模量及其测试方法研究[D]. 西安: 长安大学,2004.
- [6] Radaet G. Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material [R]. Transportation Research Record 810. T. R. B., 1981.

## Research on Ameliorative Method for Testing Subgrade Rebound Modulus by Bearing Plane

#### MA Bo, SHI Hong

(College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at many shortcomings in bearing plane testing method and on the basis of analyzing stress and displacement on top of subgrade, this paper chooses four typical roads of Gansu Province, Henan Province and Hebei Province to do bearing plane experiments at different load standards; presents the variation range of rebound deflection and compressive stress generated on subgrade surface in different scale highway pavement structure; concludes the load standards for bearing plane tests on highways of various levels: regarding high grade highway (second grade above), loads standard commonly derives as the corresponding stress of rebound distortion 0.5 mm, and regarding the highway following third class, then adopts controling rebound deflection to 1mm; at the same time, puts forward the testing method of controling stress, coping with different scale road, adopts different loading upper limit and loads stage

**Key words:** subgrade; rebound modulus; bearing plane; rebound deflection; compressed stress; ameliorative method