

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
<div>回弹弯沉</div> <div>0.01 mm</div>	23.6~41.6	39.0	26.2~46.4	49.6	63.2~114.8	78.7
		37.2		56.4		65.5
		31.5		58.6		62.6
		38.4		47.7		92.1
		45.6		50.0		105.2
		51.7		44.4		133.9
<div>压应力</div> <div>MPa</div>	0.007~0.015	0.014	0.009~0.018	0.010	0.05~0.11	0.032
		0.010		0.013		0.037
		0.009		0.018		0.027
		0.014		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范围内的情况,但是可以看出,这种差别相当小。

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 0.05~0.15 MPa,产生的回弹弯沉有可能超过 1 mm。

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~K0+635,全长 500 m 的土质填方路段。该路段位于公路自然区划Ⅲ₄区,路基土类为黄土状低液限粘土,平均压实度 K=98.4%。

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 0.15 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。

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 下 E_0 /MPa	0.3 MPa 下 E_0 /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
K0+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 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 mm 作为承载板试验的荷载标准,如果还是沿用 1.0 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 MPa 下的代表值,即 $E_0=61.5$ 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~K5+890,长为 60 m 的土质填方路段。该路段位于公路自然区划Ⅱ₄区,路基土类为砂性土,最大干密度 $\rho_{dmax}=2.046$ 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 4~5 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 $E_0=50.0$ 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~K223+550,长为 100 m 的土质填方路段,该路段位于公路自然区划Ⅳ₂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	0.1 MPa 下 E_0	0.2 MPa 下 E_0	0.3 MPa 下 E_0
	MPa	MPa	MPa
K5+830(超车道)	39.3	43.2	37.8
K5+840(超车道)	58.5	57.3	59.6
K5+850(超车道)	52.1	58.9	60.3
K5+860(超车道)	63.3	61.7	61.1
K5+870(超车道)	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(行车道)	72.1	61.0	61.1
K5+840(行车道)	56.9	53.5	54.4
K5+850(行车道)	66.0	60.3	63.6
K5+860(行车道)	51.7	54.1	55.0
K5+870(行车道)	59.6	48.6	51.0
K5+880(行车道)	77.5	62.0	62.0
K5+890(行车道)	65.3	64.3	58.7
平均值	58.0	55.3	56.0
标准差	9.97	6.15	6.64
代表值(90%保证率)	50.0	47.4	47.5

为低液限粘土;最大干密度 $\rho_{dmax}=2.040$ g/cm³,最佳含水量 $w=9.50\%$;平均压实度 $K=96.1\%$ 。

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 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 下的代表值,即 $E_0=48.8$ MPa。

3 承载板测试方法改进

3.1 规范方法分析

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 下 E_0 /MPa	0.2 MPa 下 E_0 /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
代表值(90%保证率)	48.8	44.6

《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。

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—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。

3.2 推荐测试方法

现行规范中并未对承载板试验时具体采用何种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 $p_{0.5}$ 和 p_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					MPa
控制级	子级				
	1	2	3	4	5
$p_{0.5}$	$\frac{p_{0.5}}{5}$	$\frac{2p_{0.5}}{5}$	$\frac{3p_{0.5}}{5}$	$\frac{4p_{0.5}}{5}$	$p_{0.5}$
p_1	$\frac{p_1}{5}$	$\frac{2p_1}{5}$	$\frac{3p_1}{5}$	$\frac{4p_1}{5}$	p_1

为简便起见, p_1 分级中,小于 $p_{0.5}$ 的子级通常取与 $p_{0.5}$ 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					MPa
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

(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 controlling rebound deflection to 1mm; at the same time, puts forward the testing method of controlling stress, coping with different scale road, adopts different loading upper limit and loads stage division.

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