

路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定

陈声凯, 凌建明, 张世洲

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092)

摘 要: 采用多层弹性体系理论计算分析了我国沥青路面路基土的受力水平, 对国内 139 个实际路面结构进行了计算统计, 并据此确定了路基土室内三轴重复加载试验的加载序列, 为改进回弹模量室内试验方法提供了参考。

关键词: 路基土; 应力水平; 回弹模量; 重复加载三轴试验; 加载序列

路基土的回弹模量是性质、状态(含水量和密实度)和应力状况等的函数。对处于特定状态(一定含水量和密实度值)的各类路基土来说, 影响其模量值的主要因素便是应力状况。在不同的交通等级下, 以及不同的路面类型和结构组合中, 路基土的应力状况是不相同的, 故其模量值也是不一样的。因而, 路基土模量参数的测试方法和指标值取用, 一方面要遵循反映材料基本特性的要求, 另一方面则要与结构应力—应变分析时所选用的方法和条件相一致。我国现行沥青路面设计规范中采用“室内试验法(小承载板法)”及“现场实测法(承载板法或贝克曼梁法)”来确定路基模量, 而室内小承载板试验中试件的受力状况与现场路基土的应力状态并不一致, 并且这种测试方法仅适于静态模量标定, 这些都影响了路基回弹模量取值的科学性和合理性。所以有必要对我国各种路面结构中路基土的受力水平进行分析, 并制定更加合理的室内三轴重复加载实验测试回弹模量的方法与取值标准。

1 关于计算过程的几点说明

参考相关文献和自己的计算经验, 对于计算过程的一些问题进行了考虑。限于篇幅, 在这里仅对一些问题做简要说明。

1.1 对于路基土材料非线性的考虑

邬洪波、凌建明对路基顶面竖向应力的各项影响因素做了分析, 其中对材料非线性利用增量法分析, 结果显示, 在标准轴载作用下, 路基土非线性特性对轴载中心下路基土中竖向应力的影响很小。因此, 在计算

路基土竖向应力时可不考虑材料非线性特性的影响。

1.2 对超载的考虑

在对实际结构进行计算统计之前, 对几种比较典型的路面结构进行了超载试算, 取荷载大小为 1.0 MPa 和标准轴载 0.7 MPa 进行比较, 统计规律见本文第 5 节。

1.3 计算点位置的布置

对路基来说, 双轴荷载中心处为其竖向应力最大位置, 所以取计算点位置为双轴荷载中心正下方, 路基顶面以下每 20 cm 取一个点, 计算深度为路基有效工作区域, 一般为 1.5~1.8 m。

1.4 计算结构与计算参数

计算中, 采用全国各地拟定的典型路面结构以及实际的沥青路面结构, 包括少部分柔性基层路面, 不考虑厚强式沥青混凝土路面、全厚式沥青混凝土路面、复合式路面, 并按公路等级分类。

各层计算参数主要考虑动态回弹模量、泊松比与密度。参照国内外研究经验, 沥青处治材料的回弹模量按照公称粒径、级配类型和层位的不同分别取 2 000~3 500 MPa, 泊松比取 0.3~0.35, 密度取 2.3~2.4 g/cm³。无机结合料稳定材料回弹模量按照材料组成和层位的不同分别取 500~4 500 MPa, 泊松比取 0.15~0.2, 密度取 1.5~2.4 g/cm³。粒料和路基土材料回弹模量按照材料组成和层位的不同分别取 40~550 MPa, 泊松比取 0.35~0.4, 密度取 1.7~2.4 g/cm³。

1.5 应力计算模型

将柔性路面结构视为多层弹性连续体系, 荷载

采用双圆垂直均布荷载。

2 计算方法

在结构分析中,只计算荷载应力与自重应力,不考虑温度及湿度变化引起的应力,即结构中的总应力是荷载应力与自重应力累加的结果。

(1)确定结构层的模量、泊松比和厚度以计算荷载应力。参数取值及计算模型如上文所述。荷载应力计算采用 SHELL 公司的 BISAR 程序。

(2)确定计算点处的自重应力:

$$p_0=h'_n\gamma_n+\sum_{i=1}^{n-1}h_i\gamma_i$$

(1)

式中: p_0 为上覆结构自重引起的垂直压力; $n-1$ 为计算点所在层(第 n 层)的上覆结构层层数; h_i 、 γ_i 为第 i 层的层厚和容重($i=1,\dots,n-1$); h'_n 、 γ_n 为计算点距其所在层层顶的距离及其所在层的容重。

(3)确定计算点处的总垂直应力:

$$\sigma_1=\sigma_z+p_0$$

(2)

式中: σ_z 为应用弹性层状理论计算所得的轮载产生的垂直应力。

(4)确定侧压力系数 k_0 。

粒料层与路基内的侧压力系数按表 1 取值,也可按式(2)或式(3)计算。

$$\text{粘性材料(如粘土):} k_0=\frac{\mu}{1-\mu}$$

(3)

$$\text{非粘性材料(如砾石和砂):} k_0=1-\sin\varphi$$

(4)

式中: μ 为泊松比; φ 为有效内摩擦角。

对重型压实的过固结土,上述公式所得值偏小。

(5)确定计算点处的总侧向应力:

$$\sigma_3=\sigma_{x,y}+k_0(p_0)$$

(5)

式中: $\sigma_{x,y}$ 为应用弹性层状理论计算所得轮载产生的水平应力。

为保证该点的体应力 θ 不变,最终侧向应力取 x 、 y 两个方向计算结果的平均值。如平均值为正(受拉),按 0 处理。

上述计算方法未考虑剪应力的影响,所得 σ_1 、 σ_3 不是真正意义上的主应力,但对于较高级的路面来说,剪应力的影响很小。同时,在最后制定加载应力时会考虑可靠性,因此这种计算方法作为路基土应力的估算已足够。

3 计算结果统计

根据我国柔性路面结构调查的结果,在其中选

取139 种沥青路面结构(真实结构71 种,各地区拟定的典型结构 68 种)进行应力计算。在对实际结构进行计算统计之前,选取了几种典型结构进行试算,并对超载进行了考虑,并记入最终统计汇总表。计算中,全部采用动模量,荷载仅取 $p=0.7\text{ MPa}$,路基模量取值范围为43~160 MPa。具体计算结果略。统计结果见表 1~表 6。

表 1 试算结构路基中的应力水平统计(1)
(二级及二级路以上, 0.7 MPa)

σ_3/kPa	σ_1/kPa					
	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70
0~10		2 (1.0%)	3+5* (4.1%)	3+1* (2.1%)	1+1* (1.0%)	
10~20		10 (5.1%)	33+27* (30.8%)	2* (1.0%)		
20~30		1* (0.5%)	9+1* (5.1%)	33+21* (27.7%)	4+9* (6.7%)	
30~40				4* (2.1%)	13+9* (11.3%)	3* (1.5%)

注: * 表示路基模量 $\geq 150\text{ MPa}$,共 8 个;路基模量 $<150\text{ MPa}$ 的 12 个。括号内为应力级位所占百分比。

表 2 试算结构路基中的应力水平统计(2)
(二级及二级路以上, 1.0MPa)

σ_3/kPa	σ_1/kPa					
	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70
0~10			3+1* (2.0%)	3+4* (3.5%)	2+1* (1.5%)	1 (0.5%)
10~20		4 (2.0%)	28+16* (22.0%)	11+13* (12.0%)		
20~30			7 (3.5%)	33+19* (26.0%)	6+13* (9.5%)	
30~40				2 (1.0%)	19+8* (13.5%)	4* (2.0%)

注:同表 1。

表 3 实际结构的路基应力水平统计
(高速公路、一级路, 0.7 MPa)

σ_3/kPa	σ_1/kPa					
	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70
0~10	1 (0.1%)	37 (4.4%)	5+1* (0.7%)			
10~20		198 (23.8%)	125+3* (15.4%)			
20~30		4 (0.5%)	150+2* (18.2%)	169+2* (20.5%)	12 (1.4%)	
30~40			1 (0.1%)	78+1 (9.5%)	43+1 (5.3%)	

注: 共计 89 个结构。* 表示不含半刚性层, 此仅 1 个。括号内为应力级位所占百分比。

表 4 部分实际结构的路基应力水平统计
(二级路, 0.7MPa)

σ_3/kPa	σ_1/kPa						
	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
0~10		14 (5.2%)	11+2* (4.9%)	1 (0.4%)	1* (0.4%)		
10~20		45 (16.8%)	48+17* (24.3%)	3* (1.1%)	1* (0.4%)	1* (0.4%)	1* (0.4%)
20~30			36+7* (16.0%)	44+10* (20.1%)	2 (0.7%)		
30~40				13+7* (7.5%)	4 (1.5%)		

注: 共计 28 个结构。* 表示不含半刚性层, 此为 5 个。括号内为应力级位所占百分比。

表 5 部分实际结构的路基应力水平统计
(三、四级路, 0.7 MPa)

σ_3/kPa	σ_1/kPa						
	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
0~10		2 (1.0%)	3+1* (1.9%)	4+4* (3.9%)	2+4* (2.9%)	2* (1.0%)	2* (1.0%)
10~20		21 (10.1%)	41+21* (30.0%)	3+9* (5.8%)	1 (0.5%)		1 (0.5%)
20~30			26+5* (15.0%)	22+21* (20.8%)			
30~40				3+3* (2.9%)			
0~10	1* (0.5%)		1* (0.5%)	1* (0.5%)			
10~20			1* (0.5%)			1* (0.5%)	
50~60							1* (0.5%)

注: 共计 22 个结构。* 表示不含半刚性基层, 此为 8 个。括号内为应力级位所占百分比。

表 6 路基应力分布汇总

数据源	应力覆盖范围/kPa	典型应力水平/kPa	说 明
表 1	σ_1 : 20~70 σ_3 : 0~40	σ_1 : 30~50 σ_3 : 10~30	示例结构, 高速、一级、二级路, $p = 0.7 \text{ MPa}$
表 2	σ_1 : 20~70 σ_3 : 0~40	σ_1 : 30~60 σ_3 : 10~30	示例结构, 高速、一级、二级路, $p = 1.0 \text{ MPa}$
表 3	σ_1 : 10~60 σ_3 : 0~40	σ_1 : 20~50 σ_3 : 10~30	实际结构, 高速、一级路, $p = 0.7 \text{ MPa}$
表 4	σ_1 : 20~80 σ_3 : 0~40	σ_1 : 20~50 σ_3 : 10~30	实际结构, 二级路, $p = 0.7 \text{ MPa}$
表 5	σ_1 : 10~180 σ_3 : 0~60	σ_1 : 20~50 σ_3 : 10~30	实际结构, 三、四级路, $p = 0.7 \text{ MPa}$

由表 6 则可得出如下结论:

(1) 路基中的应力覆盖范围大致为: σ_1 为 10~180 kPa, σ_3 为 0~60 kPa;

(2) 路基中的典型应力水平为: σ_1 为 30~50 kPa, σ_3 为 10~30 kPa。

4 路基土回弹模量重复加载三轴试验的加载序列

4.1 应力组合序列确定的原则

(1) 确保测试试件过早破坏的潜在可能性最小, 以获得最大数量的数据点; (2) 能够覆盖测试层内的常见应力范围; (3) 便于试验操作。

4.2 预载条件的确定

预载有如下作用: 模拟施工期间路用材料承受的应力历史; 消除压实阶段与加载阶段、初始加载与重复加载等差异因素带来的影响, 减小后续所测回弹模量的变异性; 降低试件自身缺陷带来的有害影响, 消除试件端部与压盘之间原有的不良接触(尤其是对粘性土)。

由于在施工期间结构层承受了比交通荷载大得多的施工荷载, 因而其在施工期间的应力状态要较运营期间高得多, 即预载应采用比后续加载序列更苛刻的条件(但必须保证不破坏试件)。可以通过对施工期间结构层中应力的实测或进行施工荷载模拟计算来预估预载条件, 亦可按如下经验确定: $\sigma_1 = 50 \sim 100 \text{ kPa}$, $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0 \sim 3.0$; 预载循环为 500~2 000 次。

4.3 测试阶段应力组合序列的确定

(1) 粗粒土路基。

对于非粘性粒料材料($c=0$), 在材料摩擦角(φ)与临界破坏主应力比(σ_1/σ_3)之间存在一种直接的关系:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)_f = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{6}$$

换句话说, 低主应力比越低意味着测试试件潜在的破坏可能性越低。因此, 对基层/底基层粒料的应力组合序列, 按不同主应力比由低到高分为 5~6 组, 每组又由低到高分列 3~5 级应力水平(即围压和偏应力都由小到大排列)。即对每一组应力组合, 是通过同时提高两个主应力来维持常主应力比的。第一应力组处在最小的主应力比, 所以试件破坏的可能性是最小的。随着每个应力组采用越高的主应力比, 也就意味着存在越高的破坏可能性。

(2) 细粒土路基。

对于纯粘性材料($\varphi=0$),材料的强度由粘聚力控制:

$$(\sigma_d)_f=2c$$

(7)

即粘结强度越高的材料,其极限破坏偏应力越高。因此,对于这种类型的材料,应力加载序列从最小的偏应力开始可以使材料过早破坏的可能性降到最低。但在一个常偏应力条件下降低两个主应力会导致主应力比增加。虽然对于纯粘性材料,主应力比是不重要的。然而对于带有部分摩擦力的粘性材料,随着偏应力或主应力比的增加,其破坏的潜在可能性也在增加。所以,对纯粘性材料的应力组合序列,按不同偏应力水平由低到高分为 4~5 组,每组又将围压由高到低分列 3~5 级应力水平。

以上是在 $\tau \sim \sigma$ 空间中依据材料的 Mohr-Coulomb 强度理论,通过控制 σ_1/σ_3 来布置加载应力路径的(其中 τ 和 σ 为试件某一截面上的剪应力和正应力)。亦可在 $p \sim q$ 空间中通过控制来布置加载应力路径(p 和 q 为平均正应力和偏应力, $p=\theta/3=(\sigma_1+2\sigma_3)/3, q=\sigma_1-\sigma_3, q/p$ 一般控制在 0~2.5 之间)。布置应力路径时,一般采用变侧限应力(VCP),为了简化,亦可采用常侧限应力(CCP)。

4.4 推荐的应力组合序列

按照上述方法,根据前述统计结果,在借鉴 NCHRP 1-28A 推荐应力组合序列经验的基础上,制订如下应力组合,如表7 和表8 所示。图1~图4 则分别给出了 $\tau \sim \sigma$ 空间与 $p \sim q$ 空间中上述应力组合相应的加载应力路径

表 7 流程 Procedure-I——路基粗粒土试件加载序列

加载序号	围压应力 σ_3/kPa	应力 σ_d/kPa	竖直应力 σ_1/kPa	加载次数 次	σ_1/σ_3
0-预载	30	60	90	1 000	3.0
1	15	8	23	100	1.5
2	30	15	45	100	1.5
3	45	23	68	100	1.5
4	60	30	90	100	1.5
5	80	40	120	100	1.5
6	15	15	30	100	2.0
7	30	30	60	100	2.0
8	45	45	90	100	2.0
9	60	60	120	100	2.0
10	80	80	160	100	2.0
11	15	30	45	100	3.0
12	30	60	90	100	3.0
13	45	90	135	100	3.0
14	60	120	180	100	3.0
15	80	160	240	100	3.0

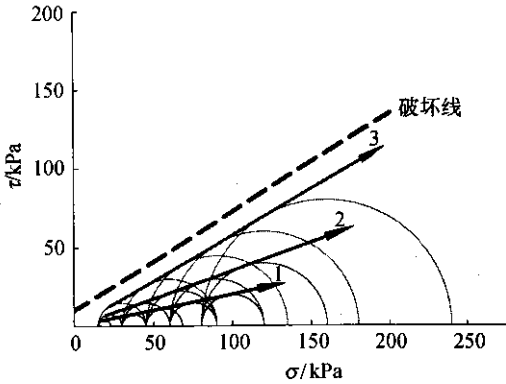


图 1 路基粗粒土加载路径示意(1)

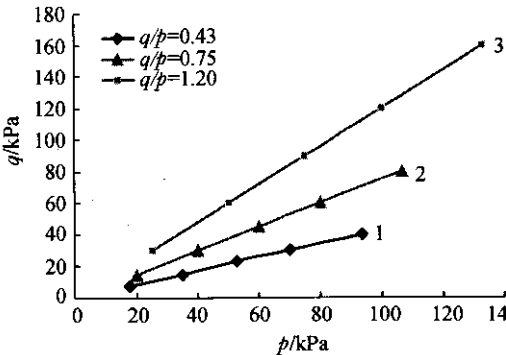


图 2 路基粗粒土加载路径示意(2)

表 8 流程 Procedure-II——路基细粒土试件加载序列

加载序号	围压应力 σ_3/kPa	循环偏应力 σ_d/kPa	竖直应力 σ_1/kPa	加载次数 次	σ_1/σ_3
0-预载	30	55	85	1 000	2.7
1	60	30	90	100	1.5
2	45	30	75	100	1.7
3	30	30	60	100	2.0
4	15	30	45	100	3.0
5	60	55	115	100	1.9
6	45	55	100	100	2.2
7	30	55	85	100	2.8
8	15	55	70	100	4.7
9	60	75	135	100	2.3
10	45	75	120	100	2.7
11	30	75	105	100	3.5
12	15	75	90	100	6.0
13	60	105	165	100	2.8
14	45	105	150	100	3.3
15	30	105	135	100	4.5
16	15	105	120	100	8.0

4.5 测试阶段每个加载组合的加载次数

参照国外研究成果,模量测试阶段每一加载级位组合的加载循环次数一般取100~200,待应变水平稳定后取最后 5~10 次的数据来计算回弹模量值。

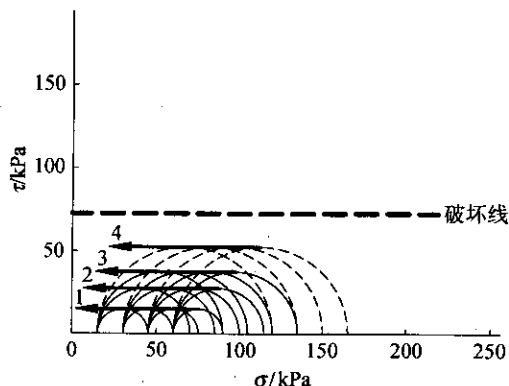


图3 路基细粒土加载路径示意(1)

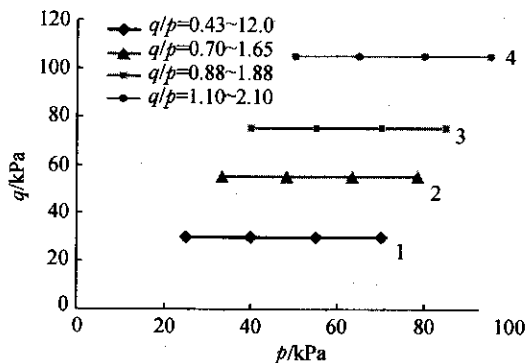


图4 路基细粒土加载路径示意(2)

5 结语

通过以上分析,最终得出了符合我国路面结构特点的路基土三轴重复加载实验的加载序列,粗粒

土和细粒土加载流程分别如表7和表8所示,具体加载示意图分别如图1~图4所示。本文成果对修订我国沥青路面设计规范中路基回弹模量参数的测试与取值提供了参考和依据,对路基土永久变形的研究工作也有参考意义,但其科学性与合理性还有待大量的试验和实体工程来检验。

参考文献:

- [1] Project 1-28. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design[R]. National Cooperative Highway Research Program, 1997.
- [2] T307-99: Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate[S]. AASHTO Standadr Method of Test, 1999.
- [3] T292-91: Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials[S]. AASHTO Standadr Method of Test, 2000.
- [4] 凌建明, 邬洪波. 行车荷载的动力模式及其对路基回弹模量的影响[J]. 同济大学学报, 2001, 29(12).
- [5] 凌天清, 王士杰, 许志鸿, 等. 路基土重复三轴试验研究结果及其本构模型[J]. 重庆交通学院学报, 1998, 17(2).
- [6] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [7] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [8] JTJ 051-93, 公路土工试验规程[S].
- [9] JTJ 059-95, 公路路基路面现场测试规程[S].

Fixing Loading Sequence for Resilient Modulus Test of Subgrade Soil

CHEN Sheng-kai, LING Jian-ming, ZHANG Shi-zhou

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The stress levels of subgrade soil of domestic asphalt pavement base on elastic multiple layered theory are analyzed. A statistical calculation is performed for 139 actual pavement structures and the loading sequence for repeated loading triaxial test is fixed. This could help to improve the method of laboratory determination of resilient modulus for subgrade soils.

Key words: subgrade soil; stress level; resilient modulus; repeated loading triaxial test; loading sequence