

文章编号: 1002-0268 (2000) 05-0018-03

水泥土动态模量试验的分析

郭大进, 王旭东
(交通部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 通过对水泥土动态模量试验的研究, 分析了动态试验中的塑性变形规律, 阐述了动态模量随荷载变化的原因。
关键词: 水泥土; 动态模量
中图分类号: U416. 216. 03 **文献标识码:** A

Analysis of Dynamic Modulus Testing of Cement-soils

GUO Da-jin, WANG Xu-dong
(Research Institute of Highway, Beijing 100088, China)

Abstract: By investigation on dynamic modulus test of cement-soils, the plastic deformation law in dynamic test was analyzed, and the reason for dynamic modulus changing with load was discussed.
Key words: Cement-soils; Dynamic modulus

水泥土是一种公路工程中常用的路面材料, 它是在素土中掺入一定比例的水泥而形成, 由于具有较高的强度, 又称为半刚性材料。模量是路面结构设计中一个重要的力学参数, 用动态测试方法测定的模量称为动态模量。以往国内测定路面材料模量的方法都是采用静态的试验方法, 这种方法与路面结构实际的受力状态存在较大的差异, 得到的模量值。不能真正反映路面材料实际的力学性质, 所以研究模量动态的测试方法是十分必要的。

1 动态试验介绍

国外研究表明, 实际路上材料的受荷频率不高, 一般在 10Hz 左右, 故采用 MTS 试验系统进行路面材料的动态试验是适合的。试验在 MTS810 试验机上进行, 通过 MTS 试验机产生垂直方向的动态压缩荷载, 荷载频率设定为 10Hz, 荷载波形为半正弦波, 荷载采用逐级增大然后再逐级减小的荷载序列, 每级荷载作用 200 次。试验通过 LVDT 传感器采集试件的轴向压缩变形, 试验的波形设定、加载序列、荷载变形的采集均通过计算机控制。计算机自动采集每级荷载的

最后 5 个荷载波形和变形波形, 然后根据这 5 个波形计算每个荷载级位下的动态模量。其中动态模量 E_d 的计算公式为

$$E_d = \left| \frac{\sigma(t)}{\epsilon(t)} \right| = \left| \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \right| \tag{1}$$

式中, $\sigma(t)$, $\epsilon(t)$ 分别为应力和相应应变的时间函数; σ_0 , ϵ_0 分别为应力和应变的振幅。

水泥土动态试验的试件尺寸采用 $\phi 10\text{cm}$, 高 10cm 的圆柱形试件, 由于是单轴压缩试验, 故动态模量的计算公式可改写为

$$E_d = \left| \frac{F_0}{l_0} \right| \cdot \frac{l}{S} = A \left| \frac{F_0}{l_0} \right| \tag{2}$$

式中, A 为尺寸常数; F_0 , l_0 分别为荷载振幅和变形振幅; S , l 分别为试件的顶面积和试件高度。

2 试验结果及分析

表 1 为动态模量的统计表, 试件静态强度的平均值为 1.95MPa, 变异系数为 18.8%。

试验中发现: ①预定荷载振幅级位与实际产生的荷载振幅比较接近, 除 0.5 级位时误差 4% 以外, 其余均在 1% 以内; ②位移传感器初始读数与最终读数

相差 0.136mm，说明在动态试验中试件产生了一定的塑性压缩变形；③ 动态模量随荷载振幅的增加而增

加，并随荷载振幅的减小而减小。

动态模量试验统计表

表 1

荷载振幅, kN	0.5	1	2	3	4	5	6	5	4	3	2	1	0.5
动态模量, MPa	238	307	344	373	404	440	474	432	395	358	321	288	273
变异系数, %	0.32	0.26	0.23	0.22	0.21	0.20	0.18	0.19	0.21	0.21	0.23	0.26	0.33

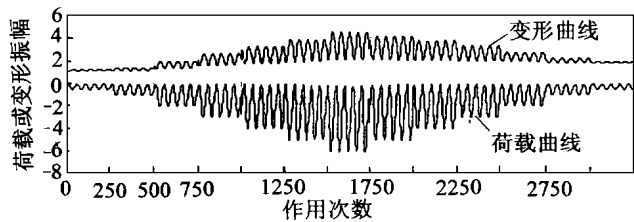


图 1 水泥土动态模量试验荷载和变形波形图

水泥土是一种强度比较高的路面材料，在动态荷载作用且荷载级位并不大的情况下（最大荷载振幅相当于其强度 50% 以下），产生如此明显的塑性变形是值得研究的。图 1 为整个加载卸载过程中每级荷载最后 5 个周期荷载和变形曲线，为了便于观察，图中变形曲线适当放大。由图 1 看出，随着荷载级位的增大，变形曲线在振幅增大的同时，其最小变形值也逐渐增加；另一方面，当荷载级位逐渐减小时，变形振幅和最小变形也逐渐减小。但在相同级位的情况下，卸载时的最小变形值比加载时略大，而且在同一荷载振幅下，变形振幅基本一样，并没有随荷载作用次数增加而变化。说明试件没有产生疲劳效应，也就是说，这种塑性变形即使在级位不大的动荷载作用下也会产生，这是由材料性质决定的。塑性变形的产生也不仅仅是试件的压密而产生，因为试件压密的变形是不可恢复的，它随荷载增大而增大，但不会随荷载减小而减小。为更清楚说明问题，根据动态试验加载-卸载过程中的平均荷载和平均变形值绘制曲线如图 2。图中表现出试件在加载和卸载过程中的荷载-变形规律。加载曲线中第 1 点与其他点比较明显异常，应进行修正，连接第 2 点和第 3 点与纵坐标相交于 A 点作为第 1 点的修正点。从图看出在相同荷载下，加载和卸载时的平均变形并不相同，随着荷载级位的减小，两者的变形差越来越大。这个变形差实际就是试件在这个加载过程中的塑性变形。这个塑性变形不仅与相应的荷载级位有关，而且与最大荷载和试验的荷载序列有关，可以预见，当试验加载序列变化后，塑性变形也会改变。图 3 为试验测定的水泥土荷载变形的滞回曲线，由图看出随荷载振幅的增大，滞回曲线

的面积越来越大，反映出材料在振动过程中存在阻尼，荷载越大阻尼也越大。这可解释水泥土动态模量随荷载振幅增大而增大的原因。

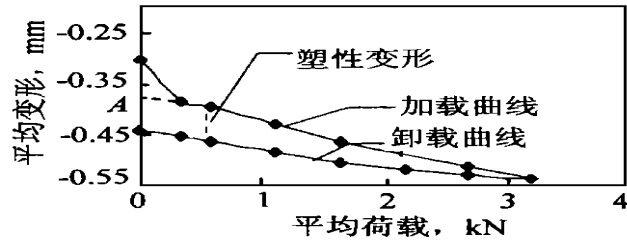


图 2 水泥土平均荷载和平均变形关系曲线

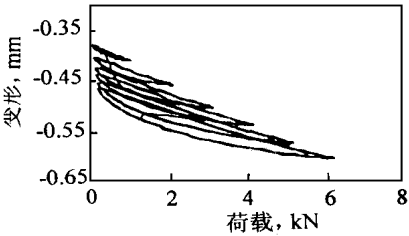


图 3 水泥土荷载变形的滞回曲线

设水泥土的刚度为 k ，阻尼为 c ，振动荷载用复数形式表示为 $F(t) = F_0 e^{j\omega t}$ 。根据图示振动方程可写为

$$F(t) = kl(t) + m\ddot{l}(t) + c\dot{l}(t) \quad (3)$$

则相应的变形响应为: $l(t) = l_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)}$ ， φ_0 为滞后相位，由实测数据结果表明，水泥土振动时，变形响应与荷载振动基本同步，可令 $\varphi_0 = 0$ 。则由公式 (3) 得到

$$F_0/l_0 = k - m\omega^2 + j\omega c \quad (4)$$

由动态模量的定义

$$E_d = \left| \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \right| = \left| \frac{F_0}{l_0} \right| \cdot A = A \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2} \quad (5)$$

因为 k ， m 为定值，荷载频率 ω 也保持不变，则动态模量 E_d 是阻尼 c 的函数， c 增加， E_d 也增加。一般来说，材料的阻尼 c 可分为两大类：粘性阻尼和结构阻尼。由于实测水泥土的滞后相位趋于零，则水泥土的粘性阻尼很小，主要是结构阻尼。材料的

结构阻尼主要是由于不完全弹性的材料内摩擦荷载和在结构固定连接处，接触面之间的摩擦力引起的，又称迟滞阻尼。显然在动态模量的试验过程中这两种引起结构阻尼的因素都存在。

首先，随荷载振幅的增加，试件产生一定的逐渐增大的塑性压缩变形，材料颗粒间排列更加紧密，导致材料内摩擦力的增大，结构阻尼增加，所以动态模量也逐渐增加。其次，在动态试验过程中，被测试件放置在试验台上，顶面放有压块。试件与试验设备的连接是自由的，当动态试验时，试件与试验设备的接触面间必然会产生摩擦，这种摩擦力会随荷载的增大而增加，最终导致结构阻尼的增大。

总之，由于结构阻尼的存在，这种动态试验方法测定的动态模量与荷载振幅大小有关，荷载振幅越大

动态模量也越大。国外的试验结果也表明有同样的规律，显然，这种规律与试验方法关系密切，用其他方法，如共振柱法、波传法，则不存在这种现象。

3 结论

(1) 水泥土类路面材料即使在小的动态荷载作用下也会产生一定的塑性变形。这种塑性变形与荷载大小、加载序列等因素有关。

(2) 水泥土动态模量随荷载振幅的增大而增大，这是由于试验中存在结构阻尼，这个结构阻尼既包括材料的内摩擦力，也包括试件接触面的摩擦力的因素。

(3) 水泥土动态模量试验中，粘性阻尼很小而结构阻尼较大。

(上接第 14 页)

$\$ G \$ 11=\$ G \$ 9$

$\$ L \$ 11=\$ L \$ 9$

按“确定”后，单击“求解”即可求出结果，如表1所示。

根据各集料的级配情况和合成级配等的要求，可随便“添加”或“删除”约束的条件。如果各集料的级配良好，可将“约束”改成合成级配等于相应级配要求的中值，从而求出理想的合成级配。如果不满意，也可直接修改各个成分的配比，直至得到的级配满意为止。

1.3 绘制级配要求和合成级配曲线图

利用 Excel 的“图表向导”绘制级配要求和合成级配曲线图，操作非常简单。首先，选中筛孔尺寸所有数值，然后，按住“Ctrl”键，用鼠标分别选中级配要求的最大值和最小值、合成级配数值，使其单元格变成黑色，再单击“工具栏”中的“图表向导”，按图表向导步骤即可绘制出图 2 所示的级配要求和合成级配曲线图。

2 结论

利用 Excel 的“规划求解”功能，可简单准确地进

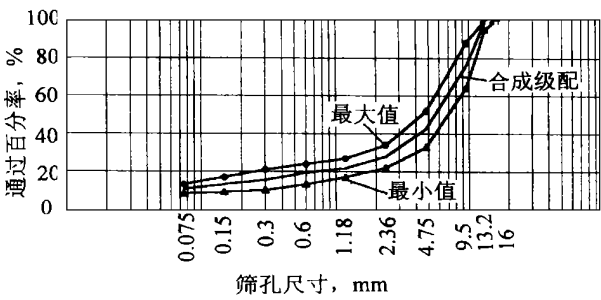


图 2 级配要求和合成级配曲线图

行沥青混合料配合比的优化计算，集料的种类可以是几种以上，而且其操作都在可视化界面上输入、输出，操作简单。同时，做完一个配合比设计后，将该工作表保存下来，可作为一个应用程序，以后做配合比设计时，只要打开该文件，将有关各集料的通过百分率和级配要求输入表格中，单击“工具”下拉菜单的“规划求解”，按所要求修改约束条件，单击“求解”即可求出相应的合成级配以及绘制级配要求和合成级配曲线图。该工作表格程序可以反复使用、扩充等。

另外，应用 Excel 还可以计算出击实数据和绘制击实曲线，计算界限含水量等。