

# Experimental Study on Dynamic Compressive Modulus of Semi-Rigid Base Materials

Junhua Zhang<sup>1</sup>, Xiaoyan Wang<sup>2</sup>, Bin Li<sup>1</sup>, Sixin Yu<sup>2</sup>, Jianmin Guo<sup>1</sup>, Yongqi Yang<sup>1</sup>, Yuxin Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shandong Hi-speed Limited Company, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Highway Maintain Technology Ministry of Communication (Jinan), Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Email: sonorra@163.com

Received: Nov. 12<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 9<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 16<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper studies the dynamic modulus of three different semi-rigid base materials (two ash gravel, lime improved soil and two lime soil) under different strain and frequency conditions. Under the same stress state, the dynamic modulus of these three semi-rigid base materials increases with the increase of loading frequency. At the same time, the dynamic modulus has stress dependence. As the load increases (the axial strain increases), the dynamic modulus of this material decreases.

## Keywords

Dynamic Compressive Modulus, Semi-Rigid Base, Strain, Frequency

---

# 半刚性基层材料动态抗压模量试验研究

张军华<sup>1</sup>, 王晓燕<sup>2</sup>, 李彬<sup>1</sup>, 余四新<sup>2</sup>, 郭建民<sup>1</sup>, 杨永奇<sup>1</sup>, 李玉鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东高速股份有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 高速养护技术行业重点实验室, 山东 济南

Email: sonorra@163.com

收稿日期: 2019年11月12日; 录用日期: 2019年12月9日; 发布日期: 2019年12月16日

---

## 摘要

本文通过研究二灰碎石、石灰稳定土和二灰土三种不同的半刚性基层材料在不同的应变和频动条件下的

动态模量。可以得出这三种半刚性基层在应力状态下, 动态模量随加载频率的增大而增大, 同时动态模量具有应力依赖性, 即随着荷载的增大(轴向应变增大), 动态模量减小的规律。

## 关键词

动态抗压模量, 半刚性基层, 应变, 频率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在力学 - 经验路面设计方法[1]中, 对半刚性基层材料疲劳性能的分析需要结合力学理论进行层底拉应力的计算, 而理论计算结果的准确性, 除了与力学模型有关外, 与模量参数的选取有很大关系[2] [3] [4] [5], 半刚性材料模量参数根据受力状态的不同有弯拉模量、抗压模量、拉伸模量等, 根据加载方式又有静态模量和动态模量的区别。在路面结构分析中, 选择的模量参数与实际不符将严重影响应力计算的结果。疲劳试验和小梁弯拉强度试验力学模拟表明[6] [7] [8] [9], 弯拉模量与半刚性基层材料弯拉状态下的受力状态最接近, 弯拉模量也与半刚性基层材料在路面结构中的实际受力状态较接近。在路面设计中, 采用半刚性基层材料的动态模量计算力学响应更为相符。本文通过研究二灰碎石、石灰稳定土和二灰土三种不同的半刚性基层材料的动态抗压模量试验, 分析不同的应变和频率对其动态模量的影响规律, 为沥青路面结构计算提供理论依据。

## 2. 动态抗压模量试验方法

动态模量试验采用常应变或常应力控制方式, 对试件施加正弦荷载[10]。加荷确保试件载弹性范围内变形, 不发生破坏, 加载大小参考材料在路面结构中承受的压应力大小。接触应力为最大应力振幅的 5%。在每个荷载水平下分别采用 25、20、10、5、2、1、0.50、0.20、0.10、0.01 Hz 这 10 个加载频率加载并测定动态模量和相位角。在本文研究中, 动态抗压模量采用澳大利亚 IPC 公司的 SPT 和 UTM 两种加载设备进行对比试验, SPT 和 UTM 采用应变控制方式进行加载, 波形采用 haversine 波。其中在应力控制模式下, 应力循环特征值, 最大压应力为 0.7 MPa, 试验过程中荷载控制方式如图 1 所示, 图 2 为试件安装传感器就绪, 等待加载试验。

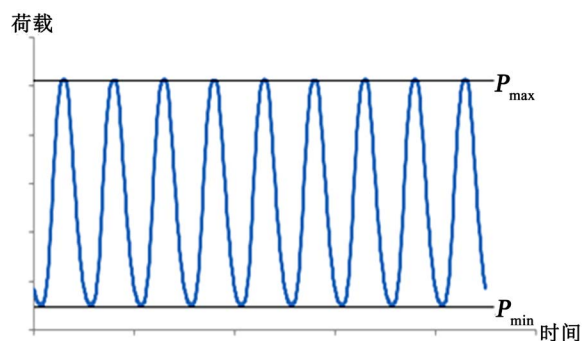


Figure 1. Loading mode of dynamic modulus test

图 1. 动态压缩模量试验加载方式

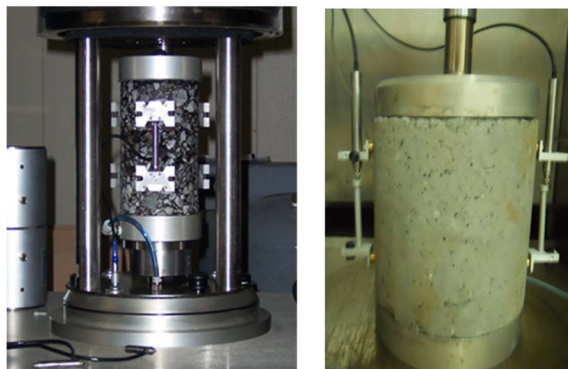


Figure 2. LVDT sensor installation  
图 2. LVDT 传感器安装

### 3. 二灰碎石动态抗压模量

本文试验在成型完二灰碎石大梁试件上钻芯，共计 2 个芯样，分别进行了不同应变水平及加载频率下二灰碎石的动态抗压回弹模量试验。不同应变和不同频率下的动态模量试验结果见表 1，表 2 所示，不同加载频率和应力状态下的动态抗压回弹模量见图 3，图 4 所示。

Table 1. Test results of dynamic resilient modulus of specimen 1

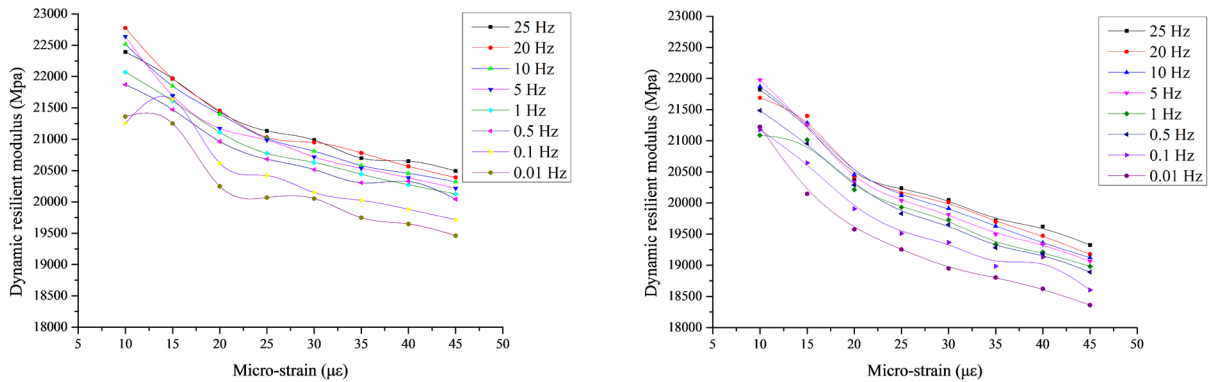
表 1. 试件 1 动态抗压回弹模量试验结果

应变/ $\mu\epsilon$	动态抗压回弹模量/Mpa							
	25 Hz	20 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz	0.01 Hz
10	22,393	22,776	22,515	22,640	22,071	21,874	21,255	21,363
15	21,965	21,972	21,850	21,695	21,610	21,472	21,637	21,251
20	21,436	21,454	21,404	21,173	21,113	20,965	20,617	20,249
25	21,133	21,031	21,012	20,987	20,775	20,682	20,420	20,069
30	20,987	20,950	20,810	20,718	20,629	20,515	20,150	20,053
35	20,698	20,781	20,581	20,538	20,441	20,305	20,023	19,747
40	20,650	20,568	20,456	20,385	20,274	20,325	19,882	19,647
45	20,493	20,389	20,319	20,217	20,124	20,042	19,715	19,460

Table 2. Test results of dynamic compressive resilient modulus of specimen 2

表 2. 试件 2 动态抗压回弹模量试验结果

应变/ $\mu\epsilon$	动态抗压回弹模量/Mpa							
	25 Hz	20 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz	0.01 Hz
10	21,818	21,690	21,869	21,976	21,088	21,486	21,176	21,223
15	21,270	21,399	21,286	21,257	21,014	20,956	20,644	20,148
20	20,369	20,422	20,457	20,338	20,215	20,289	19,906	19,578
25	20,240	20,155	20,119	20,040	19,931	19,831	19,511	19,256
30	20,050	20,015	19,916	19,815	19,731	19,655	19,366	18,949
35	19,720	19,701	19,630	19,499	19,339	19,284	18,985	18,805
40	19,622	19,475	19,357	19,339	19,211	19,184	19,129	18,623
45	19,325	19,176	19,124	19,065	18,982	18,893	18,603	18,361



**Figure 3.** Dynamic resilient modulus of specimens 1 & 2 under different loading frequency and stress state  
**图 3.** 不同加载频率和应力状态下试件 1 和 2 的动态抗压回弹模量

从表 1 和表 2 中，可以看出试件在不同加载频率和应力状态下的动态抗压回弹模量的变化规律，从试件在不同加载频率和应力状态下的动态抗压回弹模量曲线图 3 中可看出，在相同的应力状态下，动态模量随加载频率的增大而增大。在相同的加载频率条件下，动态模量随应变的增大而减小。随着应变的增加，动态模量开始减小较快，后期减小趋缓。同时从动态模量随应力变化的规律可知二灰碎石材料具有应力依赖的非线性特征，线性材料的动态模量应该是一个常数。

#### 4. 石灰土动态抗压模量

稳定土消石灰掺量 8%，最大干密度 1.71 g/cm<sup>3</sup>，最佳含水量 17%。压实度平均为 98%左右，最小为 96%，最大为 99%。力学性质试验试件成型压实度 98%，室内养生龄期 6 个月。稳定土无侧限抗压强度试验试件尺寸  $\Phi 10 \times 10 \text{ cm}$ ，无侧限抗压强度平均值 1.62 MPa，变异系数 11.4%。

动态模量试验在无侧限条件下进行。为比较不同应力状态的试验结果，采用常应变控制模式，分别进行轴向应变 20  $\mu\epsilon$ 、40  $\mu\epsilon$ 、80  $\mu\epsilon$ 、100  $\mu\epsilon$  的动态模量试验。图 4 为加载频率 10 Hz，轴向应变接近 40  $\mu\epsilon$  时的应力应变历程。动态模量试验结果见表 3 和图 5。

**Table 3.** Dynamic modulus results of stabilized soil, MPa  
**表 3.** 稳定土动态模量结果，MPa

加载频率/Hz	轴向应变			
	20 $\mu\epsilon$	40 $\mu\epsilon$	80 $\mu\epsilon$	100 $\mu\epsilon$
25	3006	2924	2729	2694
20	2997	2912	2712	2675
10	2956	2869	2677	2638
5	2922	2830	2640	2602
2	2872	2783	2600	2563
1	2845	2758	2575	2536
0.5	2818	2744	2551	2514
0.2	2801	2706	2530	2488
0.1	2749	2687	2514	2472

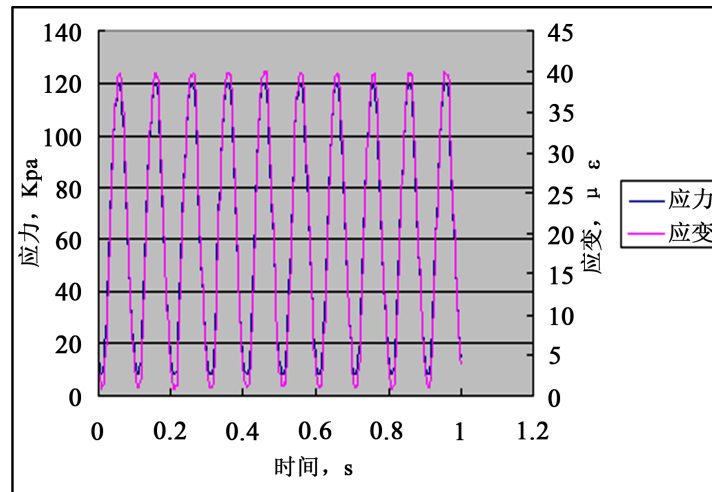


Figure 4. Stress and strain history of dynamic modulus test of stabilized soil  
图 4. 稳定土动态模量试验应力和应变历程

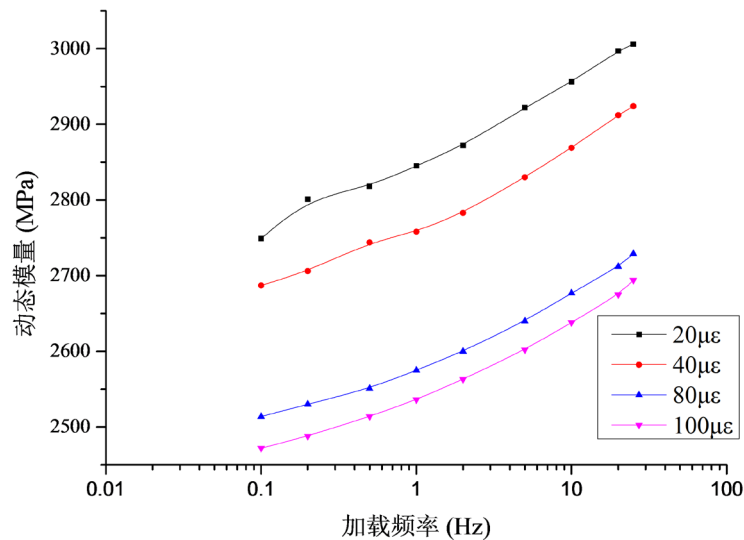


Figure 5. Test results of dynamic modulus of stabilized soil  
图 5. 稳定土动态模量试验结果

从试验结果可知, 石灰稳定土的动态模量有轻微的加载时间依赖性, 即随着加载频率的增大, 动态模量随着增大。动态模量还有应力依赖性, 即随着荷载的增大(轴向应变增大), 动态模量减小。

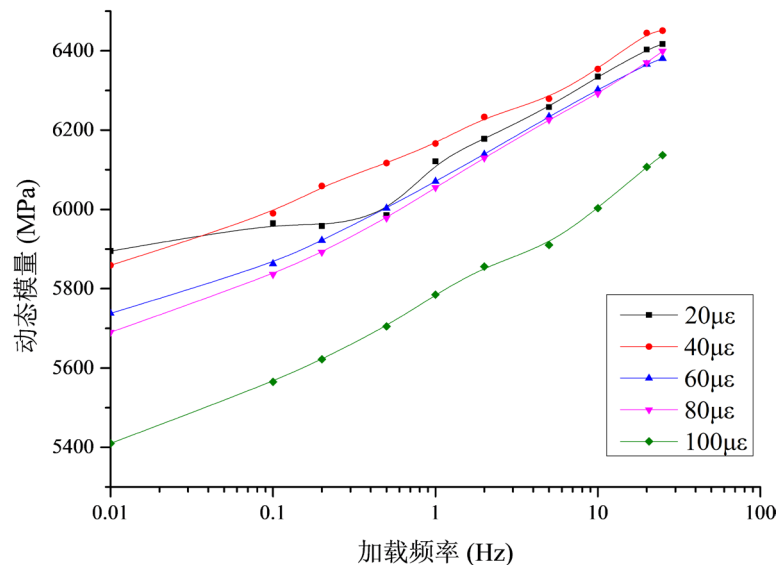
## 5. 二灰土动态抗压模量

二灰土采用消石灰: 粉煤灰: 土按照 10:20:70 的比例进行成型试件, 本试验的二灰土的最大干密度为  $1.55 \text{ g/cm}^3$ , 最佳含水量为 19.8%, 成型压实度 98%, 室内养生龄期 6 个月。二灰土无侧限抗压强度试验试件尺寸  $\Phi 10 \times 10 \text{ cm}$ , 无侧限抗压强度平均值 4.65 MPa。采用与稳定土动态模量试验相同的试验方法测试二灰土的动态模量。动态模量试验结果见表 4 和图 6。

从二灰土的动态模量曲线可以得出二灰土的动态模量有轻微的加载时间依赖性, 即随着加载频率的增大, 动态模量随着增大。另外二灰土动态模量具有应力依赖性, 即随着荷载的增大(轴向应变增大), 动态模量有减小的趋势。

**Table 4.** Dynamic modulus test of lime flyash soil, MPa  
**表 4.** 二灰土动态模量试验, MPa

加载频率/Hz	轴向应变				
	20 $\mu\epsilon$	40 $\mu\epsilon$	60 $\mu\epsilon$	80 $\mu\epsilon$	100 $\mu\epsilon$
25	6417	6451	6381	6399	6137
20	6403	6445	6366	6370	6107
10	6335	6354	6302	6292	6003
5	6258	6279	6234	6226	5910
2	6178	6233	6139	6130	5856
1	6121	6166	6071	6055	5785
0.5	5985	6117	6003	5978	5705
0.2	5958	6059	5922	5892	5622
0.1	5965	5990	5863	5836	5565
0.01	5895	5859	5738	5690	5410



**Figure 6.** Dynamic modulus curve of lime flyash soil  
**图 6.** 二灰土动态模量曲线

## 6. 结论

- 1) 不同加载频率扫描下, 二灰碎石动态压模量变化幅度很小, 表明该类材料线弹性明显。
- 2) 在相同的应力状态下, 二灰碎石动态模量随加载频率的增大而增大; 在相同的加载频率条件下, 动态模量随应变的增大而减小。
- 3) 石灰稳定土和二灰土的动态模量有轻微的加载时间依赖性, 即随着加载频率的增大, 动态模量随着增大。
- 4) 半刚性基层材料的动态模量有应力依赖性, 即随着荷载的增大(轴向应变增大), 动态模量减小。

---

## 参考文献

- [1] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 338-360.
- [2] Thompson, M.R. (1994) High-Strength Stabilized Base Thickness Design Procedure. Transportation Research Record.
- [3] Portland Cement Association (1995) Soil-Cement Constuction Handbook.
- [4] Thompson, M.R. (1986) Mechanistic Design Concept for Stabilized Base Pavements. Civil Engineering Studies, Transportation Engineering Series No. 46, Cooperative Highway and Transportation Series No. 214, University of Llinois, Urbana.
- [5] U.S. Department of Transportation (1981) Federal Aviation Administration AC NO. 150/5370-10.
- [6] Sherwood, P.T. (1968) The Properties of Cement-Stabilized Material, RRL Report LR 205, Road Receach Laboratory, England.
- [7] 张立翔. 混凝土疲劳损伤强度可靠置信限分析[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 39-43.
- [8] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 282-285.
- [9] Butler, J.E. (1989) The Performance of Concrete Containing High Proportions of Steel Fiber with Particular Reference to Rapid Fatigue Loading, FRCC Recent Development. *ACI*, **12**, 32-38.
- [10] Lemaitre, J. (1984) How to Use Damage Mechnics. *Nuclear Engineering and Design*, **80**, 233-245.  
[https://doi.org/10.1016/0029-5493\(84\)90169-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(84)90169-9)