

马林,张军,刘亚明.车辆荷载作用下山西路基重塑黄土的动力特性研究[J].地震工程学报,2018,40(1):101-104.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.101

MA Lin,ZHANG Jun,LIU Yaming.Study on the Dynamic Characteristics of Remolded Loess in Shanxi Expressway Subgrade under Vehicle Loads[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):101-104.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.101

## 车辆荷载作用下山西路基重塑黄土的动力特性研究<sup>①</sup>

马 林<sup>1,2</sup>, 张 军<sup>1,2</sup>, 刘亚明<sup>1,2</sup>

(1.山西省交通科学研究院黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,山西 太原 030006;

2.黄土地区公路建设与养护技术山西省重点实验室,山西 太原 030006)

**摘要:**针对车辆荷载对山西高速公路路基土体影响研究不足的现状,从试验角度出发,研究车辆荷载水平、波形、干密度和围压对路基土体的动力特性响应。研究表明:路基土体的体变随波形比的增大而增大,随车辆荷载的增大而增大;路基土体的动弹性模量随干密度的增大而增大,随围压的增大而增大,阻尼比随围压的增大而减小。

**关键词:**车辆荷载;动力特性;重塑黄土;影响

中图分类号:TU444

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)01-0101-04

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.101

## Study on the Dynamic Characteristics of Remolded Loess in Shanxi Expressway Subgrade under Vehicle Loads

MA Lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, LIU Yaming<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

**Abstract:** To determine the effects of vehicle load on the soil mass of an expressway subgrade soil in Shanxi Province, we investigated the dynamic response from vehicle loads, the seismic waveforms, and the soil dry density and confining pressures. The results show that the volume deformation of the subgrade soil increased with an increase in waveform ratio and vehicle load, the dynamic elastic modulus increased with an increase in dry density and confining pressure, and the damping ratio decreased with an increase in confining pressure.

**Key words:** vehicle load; dynamic characteristics; remolded loess; influence

### 0 引言

车辆荷载对路基路面的冲击使得路基沉降不断累积,进而导致路基大变形和不均匀沉降等病害,影响路面行车安全。目前对于车辆荷载作用下路基路

面工作状态的研究较多,如王国昀<sup>[1]</sup>、兰国冠等<sup>[2]</sup>通过在路基中埋设压力盒实测了车辆荷载作用下路基的力学行为,分析了不同影响因素下路基的动力响应。张悦<sup>[3]</sup>通过 ANSYS 有限元软件分析了不同车

① 收稿日期:2017-01-04

基金项目:山西交通运输厅科技项目(2014-1-2);交通运输部建设科技项目(2014318771100)

作者简介:马林(1986-),男,陕西杨凌人,硕士,工程师,从事黄土路基与工程研究工作。E-mail:327759595@qq.com。

辆荷载条件下路面结构力学行为的变化规律。黎冰等<sup>[4]</sup>通过 Boussinesq 解和分层总和法分析了不同车辆荷载对路基的影响深度及影响因素。董晓轩<sup>[5]</sup>通过对路基影响因素研究提出了路基病害处治措施。王兰民等<sup>[6]</sup>对黄土场地的液化情况进行了工程评判,对相关评判指标和方法进行了系统研究。

上述研究对于车辆荷载的研究均是从现场试验、数值模拟、理论分析的角度进行阐述,且其研究对象为宏观路基车辆组合体。对于车辆荷载作用下路基的动力响应而言,更应关注路基土体的力学行为。因此本文从试验角度,采用 GDS 动三轴仪,将车辆荷载作用模式等效为特定的波形,系统分析不同影响因素对路基动力特性的影响规律。

## 1 试验方案

在处理车辆荷载时,根据《公路水泥混凝土路面设计规范 JTG D40-2011》<sup>[7]</sup>中重载水平不小于 700 kPa 的规定,考虑到路面的折减效应,参照相关经验<sup>[8-10]</sup>,一般车辆荷载取值为 10~20 kPa。为研究车辆荷载作用时间对路基动力特性的影响,制定了车辆作用时间与间歇时间比值分别为 1:1、1:2 和 1:3 的半正弦波型。另一方面,制定了干密度  $\rho_d$  分别为 1.5、1.6 及 1.7 g/cm<sup>3</sup> 和围压  $\sigma_3$  分别 100、200、300 及 400 kPa 的试验方案,旨在分析路基压实度和固结围压对土体动力特性的影响规律。

## 2 重塑黄土动力特性敏感性分析

### 2.1 路基土体体变的演化规律

#### (1) 波形比的影响

山西省运煤重载车辆较多,路基土体在重载车辆作用下的动力特性不容忽视。考虑到车辆荷载作用特点,将其等效为作用时间与间歇时间间隔的半正弦波(图 1),以此分析车辆荷载对路基土体的重要影响。

图 2 表明,随着波形比的增大试样的体变逐渐增大,这是因为随着波形比的增大,作用在土样上的振幅间歇时间减小,相对而言作用在土样上的振幅振动时间增大,土样受到的力持续时间增大,在相同条件下土样的体变逐渐增大。

#### (2) 振幅的影响

从图 3 可以看出,在开始阶段,即振次较小时,土体体变增幅较大,随着振次不断增大土体体变逐渐趋于稳定。同时随着荷载水平不断增大,土体体变随之增大,且增幅越来越大。原因主要是该组土

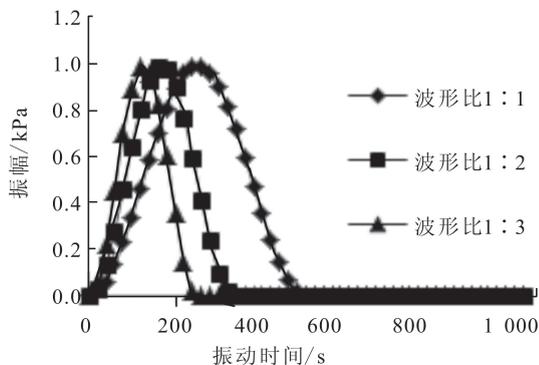


图 1 不同波形比下振幅与振动时间关系曲线  
Fig.1 The relationship between amplitude and vibration time under different waveform ratios

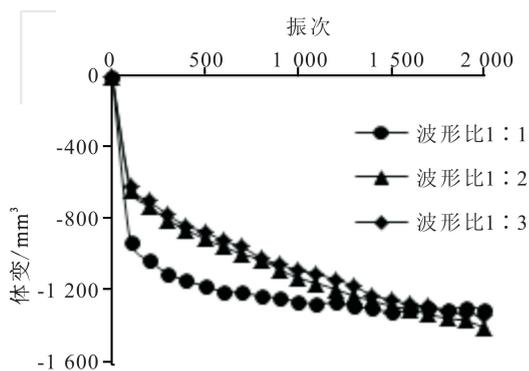


图 2 不同波形比下体变与振次的关系曲线  
Fig.2 The relationship between volume change and vibration times under different waveform ratios

样试验曲线均为硬化曲线,即试样在试验过程中无明显剪切带破坏,试样在轴向荷载作用下是一个不断压密的过程。而在初始阶段,即振次较小时,试样相对疏松,孔径较大,因此压密作用较明显。随着时间的推进,试样逐渐趋于密实状态,在同样大小的荷载作用下压密难度增大,表现为较小的压密变形,宏观现象表现为试样体变趋于平缓。在相同振次时,随着荷载水平不断增大试样间作用力增强,致使土体的压密效果越显著,表现为试样体变随荷载水平的增大而增大。

### 2.2 动弹性模量和阻尼比的演化规律

动弹性模量是描述土体在动荷载作用下抵抗变形的能力。在数据整理过程中通常取每级荷载下动应力和动应变与振次关系曲线上第 4 或第 5 个循环的数据作为样本,分别取各自曲线的最大值和最小值,求差取半,即可得到该级动荷载下的动应力和动应变。根据式(1)即可求取该级荷载下的动弹性模

量。

$$E_d = \sigma_d / \epsilon_d \quad (1)$$

式中: $E_d$  为动弹性模量; $\sigma_d$  为动应力; $\epsilon_d$  为动应变。

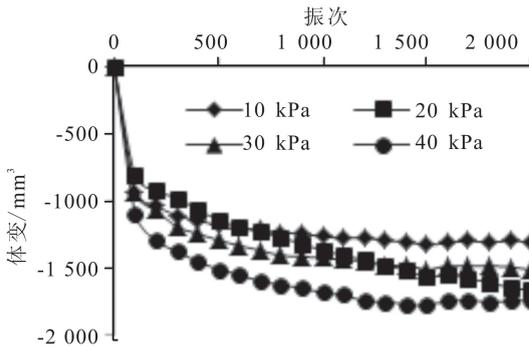


图 3 不同振幅下体变随振次的变化曲线

Fig.3 The relationship between volume change and vibration times under different amplitudes

土的阻尼比反映了土在周期性动荷载作用下动应力-动应变滞回曲线表现出的滞后性,常通过绘制动应力-应变曲线求取其数值,如图 4 所示。选取曲线上最上端点 A 和最下端点 C 的动应力和动应变值,求差取半;然后用此两值作积求半,即可得到  $\Delta AOB$  的面积  $S_{AOB}$ ;再通过 origin 软件求取椭圆 AOC 的面积  $S_{AOC}$ ;最后根据式(2)求取阻尼比的值。

$$\lambda = S_{AOC} / 4\pi S_{AOB} \quad (2)$$

阻尼比是土体发生变形时土颗粒间的内摩擦作用消耗能量造成的,反映了土体在动荷载作用下能量因土内部阻力而损失的性质,是土动力特性的一个重要性质。

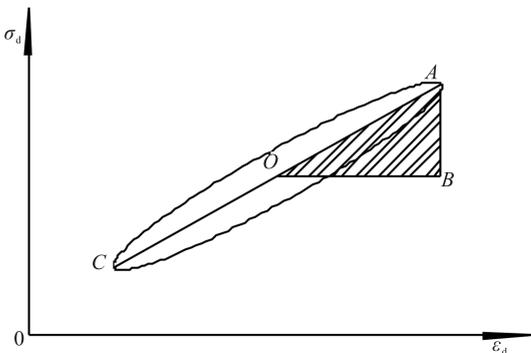


图 4 阻尼比求解示意图

Fig.4 Damping ratio solution diagram

(1) 围压的影响

图 5 给出了不同围压下动弹性模量与动应变的关系曲线。可以看出在相同的初始状态下,土体的动弹性模量随动应变的增大而减小。动应变相同时

土体的动弹性模量随围压的增大而增大。原因主要是在固结应力比一定时,围压越大竖向固结应力越大。随着竖向固结应力的增大,土颗粒间咬合更紧密,土体变得更密实,使土颗粒间的相对滑动变得更加困难;此外,围压的增大促使土颗粒间的黏聚力增强,从而使土颗粒间发生相对滑动的初始动剪应力增大。

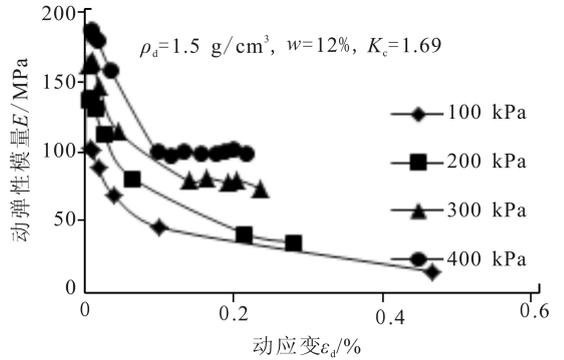


图 5 不同围压下动弹性模量与动应变曲线

Fig.5 Relationship between dynamic elastic modulus and dynamic strain under different confining pressures

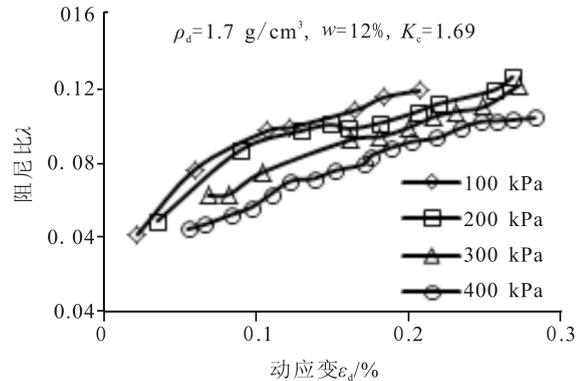


图 6 不同围压下阻尼比与动应变曲线

Fig.6 Relationship between damping ratio and dynamic strain under different confining pressures

图 6 表明不同干密度下压实黄土动弹性模量随动应变的增大而减小。动应变相同时,动弹性模量随着干密度的增大而增大。原因是随着干密度的增大,土体趋向密实,土颗粒间的联结力增大,促使土体抵抗剪切变形的能力增强,土体产生相同动应变所需要的动应力增大,即动弹性模量增大。

(2) 干密度的影响

压实度是控制路基质量的决定性指标,因此本文研究了不同干密度对路基动力特性的影响规律(图 7)。可以看出,不同干密度下压实黄土动弹性模量也随动应变的增大而减小。动应变相同时,动

弹性模量随着干密度的增大而增大。原因主要是随着干密度的增大,土体趋向密实,土颗粒间的联结力增大,促使土体抵抗剪切变形的能力增强,土体产生相同动应变所需要的动应力增大,即动弹性模量增大。

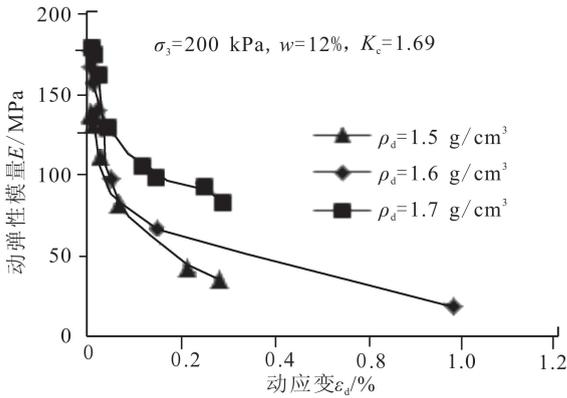


图7 不同干密度下动弹性模量与动应变曲线

Fig.7 Relationship between dynamic elastic modulus and dynamic strain under different dry densities

### 3 结论

山西高速公路运煤重载车辆较多,车辆荷载已成为影响路基路面寿命的一个重要因素。本文从试验角度出发,研究了车辆荷载及其他因素对路基土体动力特性的影响,得出了如下结论:

(1) 路基土体的体变随波形比的增大而增大,随车辆荷载的增大而增大,因此路基设计中要以轴间距小、载重大的车辆对路基力学行为的影响为标准。

(2) 路基土体的动弹性模量随干密度的增大而增大,随围压的增大而增大,土体的阻尼比随围压的增大而减小。

### 参考文献(References)

[1] 王国钧.车辆荷载对公路路基动力响应的现场试验研究[J].公路与汽运,2010,137(2):79-82.  
WANG Guoyun.Field Test Study on Dynamic Response of Vehicle Load to Highway Subgrade[J].Highways & Automotive

Applications,2010,137(2):79-82.

- [2] 兰国冠,许文杰,郭磊.车辆荷载对公路路基的动力作用研究[J].成都大学学报(自然科学版),2010,29(4):346-348.  
LAN Guoguan,XU Wenjie,GUO Lei.Study on Dynamic Effect of Vehicle Load on Highway Subgrade[J].Journal of Chengdu University (Natural Science),2010,29(4):346-348.
- [3] 张悦.不同车辆荷载对重载交通路面影响分析[J].低温建筑技术,2014,36(11):80-82.  
ZHANG Yue.Analysis of Influence of Different Vehicle Loads on Heavy Haul Traffic Pavement[J].Cryogenic Building Technology,2014,36(11):80-82.
- [4] 黎冰,高玉峰,魏代现.车辆荷载的影响深度及其影响因素的研究[J].岩土力学,2005,26(增刊):310-313.  
LI Bing,GAO Yufeng,WEI Daixian.Study on the Influence Depth of Vehicle Load and Its Influence Factors[J].Rock and Soil Mechanics,2005,26(Supp):310-313.
- [5] 董晓轩.公路路基边坡的综合防护措施[J].山西交通科技,2005,3(3):12-13.  
DONG Xiaoxuan.Comprehensive Protection Measures of Highway Subgrade Slope[J].Shanxi Science & Technology of Communications,2005,3(3):12-13.
- [6] 王兰民,袁中夏,汪国烈.饱和黄土场地液化的工程初判和详判指标与方法研究[J].地震工程学报,2013,35(1):1-8.  
WANG Lanmin,YUAN Zhongxia,WANG Guolie.Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):1-8.
- [7] 公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.  
Specifications of Cement Concrete Pavement Design for Highway[S].Beijing,China Communications Press,2011.
- [8] ZHANG Jun,ZHENG Junjie,CHEN Baoguo,et al.Coupled Mechanical and Hydraulic Modeling on Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Embankment[J].Computers and Geotechnics,2013,52:28-37.
- [9] HAN J,GABR M A.A Numerical Study of Load Transfer Mechanisms in Geosynthetic Reinforced and Pile Supported Embankments Over Soft Soil[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(1):44-53.
- [10] ZHENG J J,CHEN B G,Abusharar S W.The Performance of an Embankment on Soft Ground Reinforced With Geosynthetics and Pile Walls[J].Geosynthetics International,2009,16(3):171-181.