

列车振动荷载作用下黄土动力特性分析^{*}

柯雨田^{*,1} 尹叶鹏² 梁收运¹

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:利用 GDS 动三轴仪, 根据列车振动荷载“长持时, 小振幅”的特点探究黄土动力特性。试验结果表明: 在动应力过程中, 动孔压波动变化且单调增长; 土的动应变随着振次的增加而明显变大, 且动应变相对动应力作用滞后, 说明黄土的滞后性; 试样的原有强度逐渐减小, 最后剩余强度大幅度丧失。试样在 3700 次左右发生破坏。由此可见, 在列车循环荷载作用下的黄土路基容易产生较大沉降, 需合理预测和控制黄土在振动作用下的沉降。

关键词:列车振动; 黄土; 动力特性; 动三轴试验; 等向固结; 荷载

中图分类号: TU4 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2015.03.009

Analysis of Loess Dynamic Characteristics under Train Vibrating Load^{*}

KE Yutian^{*,1} YIN Yepeng² LIANG Shouyun¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: With GDS three dynamic triaxial apparatus and according to the "long duration, small amplitude" code of train vibration load, the dynamic characteristics of loess are explored. Test results have showed that in the process of dynamic stress, dynamic pore water pressure fluctuating changes and monotonically increases, with dynamic strain of soil obviously much larger with the increasing of vibration times, thus the effect of dynamic strain is lagging behind that of dynamic stress which implies the hysteretic nature of loess, the original strength is reducing and finally its residual strength suffers great loss. And the destruction model of sample occurred at about 3700 times. Roadbed of loess can easily generate great sediment upon the train looping loading effect, so it's necessary to reasonably predict and control the sediment of loess considering the influence of vibration.

Key words: train vibration; loess; dynamic characteristics; three dynamic triaxial test; isotropic consolidation; load

1 引言

随着列车的提速以及高速交通线路在我国和世界许多国家大规模的不断新建, 特别是近年来在我国西部黄土地区上规划和新建的高速铁路、公路以及城市轨道越来越多, 如已建的郑西高速铁路和正在建设的兰州地铁, 施工过程中的土动力学和岩土问题也日益增多。地基在列车振动作用下产生的附加沉降相当显著, 而沉降过大必然会影响到列车的正常运行, 甚至危及列车的行驶安全^[1]。

关于黄土的动力特性已有很多的研究成果, 王兰民^[2]等对随机地震荷载作用下黄土的动本构模型、弹性模量、阻尼比和动强度进行了较为广泛的研究, 并对不同地震荷载下的黄土动力参数进行了对比试验; 谢定义^[3]等则在振动三轴仪上, 对黄土在

等幅正弦循环荷载作用下的应力应变关系、强度、弹性模量和阻尼比做了大量研究。然而, 以往针对的多是地震作用的黄土振动, 而列车的振动特征明显不同: 振幅小, 振动荷载作用的持续时间长; 振动频率主要集中在低频区域; 荷载产生的振动具有多普勒效应, 随着列车运行速度的提高还可能产生共振现象。因此, 探究列车振动荷载作用下的黄土动力响应, 分析黄土在列车荷载作用下所表现出的物理力学特性, 不仅对黄土路基上高速线路的沉降控制和减振设计具有很重要的实际意义, 而且能丰富黄土动力学研究的基本课题, 扩展其研究领域。

本文利用 GDS 动三轴仪, 根据列车振动荷载“长持时, 小振幅”的特点去探究黄土动力特性。

2 试验简述

2.1 试验土样与制备

试验土样取自兰州典型黄土场地区, 取土深度为 4 m。经土工试验得到黄土样的基本物理指标, 如表 1 所示。

2014-12-18 收稿, 2015-01-31 接受

^{*} 国家级大学生创新创业训练计划(201310730118)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: keyt10@lzu.edu.cn

表 1 试验土样基本物理指标

含水率 $W(\%)$	容重 (kN/m^3)	孔隙比	饱和度 ($\%$)	塑性 指数	主要粒径分布($\%$)		
					粘粒	粉粒	砂粒
5.40	13.6	1.2	12.8	9~11	60	27	13

为使试样达到预定的密度和含水率,在一定试样体积内混入相应的干土(使误差不超过预控密度的 2%),装入击实筒击实,使试样的粒度、密度和结构在各方面分布均匀,避免分选或细粒的散失,或下粗上细。试样密度的均匀性采用分层法,按层厚和要求的密度控制填入土样重量。而且由于振密、压密或捣密上部土层时,下部土层必然会受到影响,因此采用未充分压实法,即对下层土预留一定的压实度。然后将击实土削制成型,试样直径为 39.1 mm,高度 80.0 mm。

2.2 实验方案

黄土在动荷载作用下的变形强度发展规律以及表征这些特性的基本指标,必须通过室内或现场的动力测试来获取。黄土动力特性分析的实验要求根据实验方案,先在一定的试样容器中制备土的试样,使其处于要求的密度、湿度、结构和静应力状态;然后施加一定形式和不同强度的动荷载,测量出此动荷载作用下土试样所受实际作用的动应力时程曲线、动应变时程曲线和动孔压时程曲线;最后根据这三类基本的时程曲线及其对应的关系来研究土性和有关指标的变化规律,做出定性和定量的判断。试验方案流程如图 1 所示。

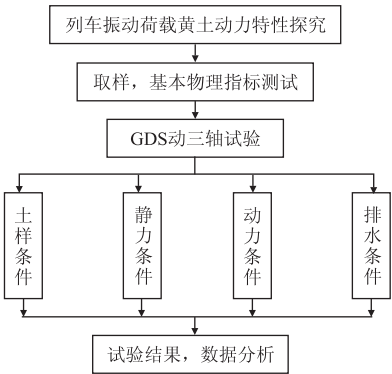


图 1 试验方案流程图

3 动三轴试验

高速交通荷载下黄土动力响应的研究,离不开对交通荷载的合理简化模拟。由于试验条件和装备仪器的不同与限制,以及不同区域、不同土质以及不同项目的室内动力试验的差异,实验设计和相关模拟也会不一样。参考近年来文献中模拟交通荷载时

式样的土体类型、初试应力条件、动荷形式、频率、排水条件以及最大振次的相关信息:试样初始应力条件以等向固结或者特定围压下的等向固结为主,少数为不等向固结状态。动力加载仪器多为动三轴仪;动力波形以正弦波为主;排水条件主要为不排水,少数为部分排水或者低温条件;加载动力波频率范围 0.1~10 Hz,以 1~2 Hz 为主,其中部分设定固定频率,部分设定多组频率;动力荷载作用的次数在 10~10⁶ 量级,其变化范围很大。由此确定项目列车振动荷载作用下黄土动力响应动三轴试验的试验方案。即试验采用 $K_c=1$,固结应力 $\sigma_c=100\text{ kPa}$,动荷载形式为正弦循环荷载,幅值为 25 kPa,频率为 0.01 Hz,不排水条件。

动三轴试验采用试验室的 GDS 动三轴仪,由成样系统、激振系统和量测系统共同组合配置而成,是目前测试土动力特性最常用的一种室内试验仪器。

试验步骤主要包括施加静荷载,施加动荷载和测记动应力、动孔压、动应变的时程变化几个环节。试样等向固结,固结压力 100 kPa,固结时间约 12 h,待排水体变化基本稳定时固结结束。待试样完全固结后施加动荷载。同时观察试样的变化和各个参数的变动情况,轴向变形达到 3% 左右,终止试验,得到试验记录的动应力时程、动孔压时程和动应变时程曲线(图 2)。

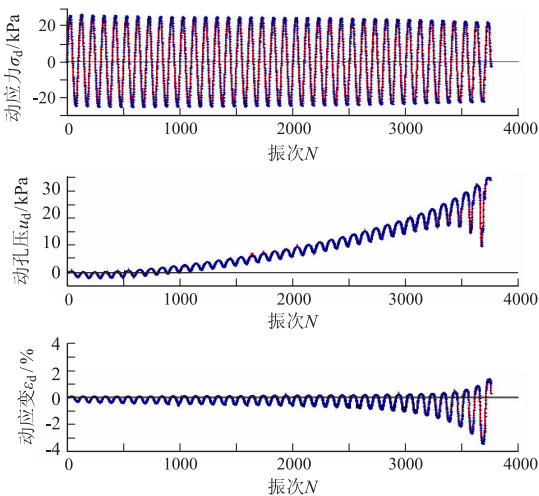


图 2 动应力、动孔压、动应变的时程变化

4 试验结果分析

4.1 动孔压发展规律

在动应力作用过程中,动孔压既是波动变化,又呈单调增长。从孔压的波动变化来看,其特点主要表现在两个阶段:振动初期和非弹性变形后。在前

一个阶段,孔压与动应力同相位变化,土样在该阶段的变性特征以内弹性为主;后一阶段发生时,同相位变化的特性被打破,应变滞后于应力,反映了土发生剪胀剪缩变化的特性。从单调增长的残余孔压来看,振动会引起其土层结构发生衰化现象从而导致动孔压逐渐上升,最后达到一个与动应力、相对应的稳定值。

将单调增长的残余孔压随振次变化曲线改为孔压比-振次比曲线,即 $\frac{u_d}{\sigma_c} - \frac{N}{N_L}$ 曲线(如图 3 所示)。可将其拟合为一条数学曲线,得到此情况下的动孔压模型为

$$\frac{u_d}{\sigma_c} = 0.378 \left(\frac{N}{N_L} - 0.119 \right)^2 + 0.008 \tag{1}$$

式中, u_d 为残余动孔压, σ_c 为固结应力, N 为振次, N_L 为土体达到控制变形的次数。

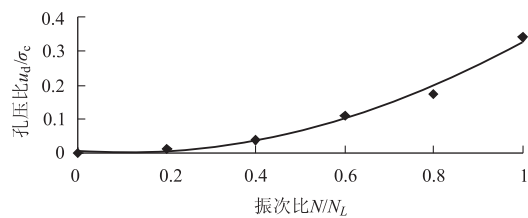


图 3 孔压比-振次比曲线

4.2 动应变的发展规律

在动应力作用的过程中,土的动应变经历了一个类似动孔压发展的增长过程,开始增长较小,接着迅速增长,最后出现一个“喇叭口”形急速增长的变化。其动应变随着振次的增加而明显扩大。

在一个振次循环周期内,动应力与动应变都在变化,动应变的发展滞后于动应力的作用。这体现了黄土的滞后性,称为滞后曲线。如图 4 所示,选取循环周期为 35 次土样动应力和动应变时程曲线,得到一个振次循环周期内不同时刻动应力-动应变关系曲线。一个振次内动应力与动应变关系具有滞回圈的形状,滞回圈面积大小与黄土的阻尼特性有关,随着阻尼的增大而增大。

4.3 动强度分析

在动应力作用过程中,黄土试样的动孔压的增加和动应变的增大都说明黄土的原有强度在逐渐减小。动应变“喇叭口”明显扩大的时刻,标志着土的剩余强度大幅度丧失。

如果给定一个动强度的破坏标准,如规定破坏应变 ε_f ,则可以将动应变曲线破坏动应变对应的振次作为破坏振次 N_f ,与相应的动应力 σ_d 一起,在

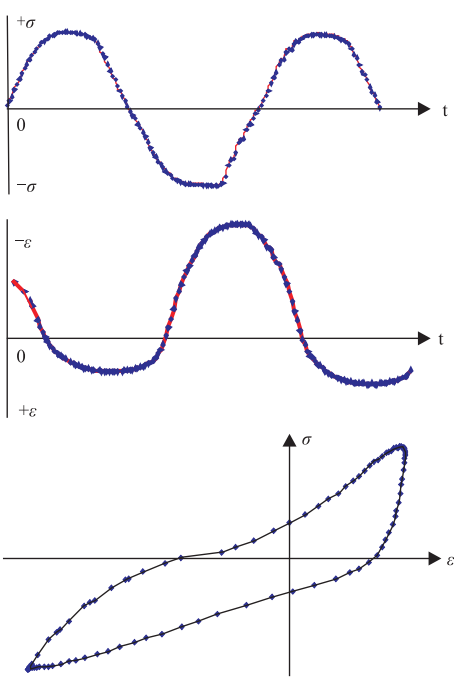


图 4 一个振次循环周期内不同时刻动应力-动应变关系曲线(滞回曲线)

$\sigma_d - N_f$ 坐标图上作出一个动强度点。当用同样的方法求不同的 σ_d 对应的 N_f ,即可得到黄土在列车振动荷载作用下的动强度曲线。

黄土试样在动荷载振幅为 25 kPa,固结应力比 $K_c = 1$,振动频率 0.01 Hz,振动次数达到 3700 次作用时产生破坏。

5 结论

列车振动荷载作用下黄土试样动三轴试验可以得出以下结论:

- 1)黄土样在一定动应力作用下,动孔压和动应变都随振次增大而增大。动孔压模型拟合曲线为 $\frac{u_d}{\sigma_c} = 0.378 \left(\frac{N}{N_L} - 0.119 \right)^2 + 0.008$ 。同时,动应变随着振次增大而增大,因其增长速率的变化,导致后期出现一个“喇叭口”形急速增长的变化。在一个振次循环周期内,动应力与动应变都在变化,但动应变的发展滞后于动应力的作用,两者之间关系呈滞回圈形状,滞回圈面积大小随着阻尼的增大而增大。
- 2)黄土试样在设定的试验条件下,振动次数达到 3700 次作用的产生破坏,即土的原有强度及剩余强度都大幅度丧失。
- 3)试验结果说明,在列车循环振动荷载作用下,黄土路基将产生较大的沉降。高速列车对路轨平顺度要求较高,所以在高速列车运营下黄土路基

振动沉降预测和控制的合理性,是保证运行线路平整性和列车运行安全性的关键。

致谢

感谢刘高教授对本文撰写的细心指导和对试验方案的修正以及亓磊同学为本文原始数据获取提供的帮助。

参考文献

- [1] 陈云敏,边学成. 高速交通引起的振动和沉降[C]//中国振动工程学会土动力学专业委员会. 第七届全国土动力学学术会议论文集. 北京:清华大学出版社,2006:3-7.
- [2] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [3] 谢定义,余雄飞. 原状黄土动力特性研究中的一些问题讨论[C]. 中国水利学会岩土力学专业委员会. 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编. 西安:陕西机械学院,1986:398-401.
- [4] 朱祖亭,周健,胡晓燕. 长期动力荷载作用下饱和软粘土振陷分析[J]. 港口工程,1998,(3):1-5.
- [5] 周健,屠洪权,安原一哉. 动力荷载作用下软粘土的残余变形计算模式[J]. 岩土力学,1996,17(1):54-60.
- [6] 杨坪,唐益群,周念清,等. 车辆荷载作用下冲填土的孔压发展实验研究[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(2):253-258.
- [7] 杨坪,唐益群,沈峰,等. 行车荷载作用下冲填土变形特性试验研究[J]. 工程地质学报,2007,15(6):823-827.
- [8] 耿大新,钟才银,郑明新. 交通荷载作用下软土路基残余变形的

研究[J]. 华东交通大学学报,2007,24(4):46-50.

- [9] 耿大新,钟才银. 交通荷载作用下路堤高度对残余变形影响研究[J]. 路基工程,2007,(6):117-118.
- [10] 王常晶,陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软粘土不排水循环性状的影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(11):1742-1747.
- [11] 朱占元,凌贤长,胡庆立,等. 中国青藏铁路北麓河路基冻土动应变速率试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(10):1472-1476.
- [12] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(7):1156-1160.
- [13] 杨广庆,管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(6):659-662.
- [14] 雷华阳,姜岩,陆培毅,等. 交通荷载作用下结构性软土动应力-动应变关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,27(增刊I):3052-3057.
- [15] 宫全美,廖彩凤,周顺华,等. 地铁行车荷载作用下地基土动孔隙水压力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊I):1154-1157.
- [16] 谢定义. 土动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [17] 谢伟平,王国波,于艳丽. 移动荷载引起的土变形计算[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):318-322.
- [18] 万战胜,杨喆,王家鼎. 列车振动荷载作用下原状黄土动力特性试验[J]. 煤田地质与勘察,2011,39(2):47-51.
- [19] 黄博,丁浩,陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报,2011,33(2):195-202.

(上接第 225 页)

器“快-慢-快”的接合规律;汽车在不同节气门开度下起步,慢起步模式冲击度较小,滑磨功较大,而在急起步模式下,冲击度相对较大,滑磨功相对较小;同时,在极端条件下,为了避免发动机熄火,需要适当修正离合器接合速度。

参考文献

- [1] 刘晓军,杜王强. 汽车自动变速器的现状和发展前景[J]. 科技信息,2012,(26):491-492.
- [2] 张金乐,马彪,张英锋,等. 双离合器自动变速器换挡特性与控制仿真[J]. 农业机械学报,2010,41(5):6-11.
- [3] 孙伟,杨永利. 基于发动机恒转速控制的 DCT 双离合器联合起步

研究[J]. 机械传动,2012,36(10):28-30,34.

- [4] 桂鹏程,尹良杰,胡亮. 湿式双离合器自动变速器的起步控制[J]. 合肥工业大学学报,2014,37(2):137-140.
- [5] 廖林清,沈余阳,张君. 汽车起步过程离合器滑磨功仿真分析[J]. 重庆理工大学学报,2012,26(4):5-10,44.
- [6] 孟兆辉,苏铁熊. 双离合自动变速器应用前景分析[J]. 机械工程与自动化,2010,4(161):212-213,216.
- [7] GALVAGNO E, VELARDOCCIA M, VIGLIANI A. Dynamic and kinematic model of a dual clutch transmission[J]. Mechanism and Machine Theory,2011,46(6):794-805.
- [8] LIU Y, TSENG C. Simulation and analysis of synchronisation and engagement on manual transmission gearbox [J]. International Journal of Vehicle Design,2007,43(1-4):200-220.

作者简介

高奇峰(1978-),男,硕士,副教授,主要研究方向:机械设计与优化。