

列车振动荷载作用下南京细砂动强度变化规律研究^①

陈 磊¹, 庄海洋², 沈礼伟², 李 浩¹

(1.江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210005;

2.南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要:以南京细砂为研究对象,采用空心圆柱扭剪仪模拟列车振动荷载作用对应的土体单元所受应力路径,考虑试样围压、加载幅值和排水条件,研究列车振动荷载作用下土体动强度的变化规律。试验结果分析表明:在模拟列车振动荷载作用对土体竖向应变的影响时,采用椭圆应力路径来代替心形应力路径是切实可行的,能克服试验仪器高频加载时无法有效模拟心形应力路径的缺点;其次,当围压和加载幅值都较小时南京细砂主要表现为在振动初期强度强化特征,当振动次数达到一定数量后强度也达到一个稳定阶段;当试验围压较大时,随振动次数增加,南京细砂的强度变化主要以强度弱化阶段为主;同时,排水条件对其强度变化的主要影响表现为对其振动前期强度强化阶段的影响,对其强度弱化阶段的影响并不明显。

关键词:列车振动;南京细砂;动强度;室内试验

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)01-0089-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0089

Variation Rule of Dynamic Strength of Nanjing Fine Sand under Train-induced Vibration Load

CHENL ei¹, ZHUANG Hai-yang², SHEN Li -wei², LI Hao¹

(1.Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd, Nanjing 210005, Jiangsu, China;

2.Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract: Using a GDS hollow cylindrical torsional shear apparatus to model the stress path of strain-induced vibration, we investigated the dynamic strength of Nanjing fine sand under different loading conditions. To simplify the loading method, we modeled the relationship of the normal and shear stresses with an oval, rather than heart-shaped, stress path. Our results show that when the confining pressure and the amplitude of the train-induced vibration are small, the dynamic strength of the Nanjing fine sand first increases and then stays stable over time. However, when the confining pressure increases, the increasing stage of the dynamic strength of the Nanjing fine sand is very short and the dynamic strength values are also much smaller. After some vibration time, the dynamic strength of the Nanjing fine sand decreases almost linearly with increasing vibration. Also, as the amplitude of the vibration increases, the dynamic strength weakens more quickly. This also proves that the drain condition mainly affects the increasing stage of the dynamic strength and has very little influence on its weakening stage.

Key words: train-induced vibration; Nanjing fine sand; dynamic strength; laboratory test

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:江苏省自然科学基金青年项目(SBK201241288);江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX12_0436)

作者简介:陈 磊(1982—),男,江苏南京人,博士,高级工程师,主要从事轨道交通路基变形研究。E-mail:Emerald1982@126.com。

通信作者:庄海洋(1978—),男,副教授,主要从事轨道交通防灾减灾与防护研究。E-mail:zhuang7802@163.com。

0 引言

列车运行引起的路基长期沉降问题是目前轨道交通建设与运营过程中存在的重大技术难题之一^[1]。例如瑞典建在深厚软土地基上的高速铁路,经瑞典国家铁路局和其他单位联合进行的高速列车振动现场测试,发现高速列车的运行引起了非常大的沉降,已超过保证铁路安全运营的界限^[2];上海地铁 1 号线在通车后 8 个月内沉降竟达到 30~60 mm,四年内甚至达到了 140 mm,充分说明在快速轨道交通列车运行振动引起的动应力作用下,地基的长期附加沉降是非常可观的,甚至直接影响工程的正常使用。

近几年随着国内高铁和城市轨道交通的快速发展,对交通荷载作用下土的力学特性有了较多的研究。例如陈云敏、沈扬、姚兆明和唐益群等^[3-6]分别对交通振动荷载作用下土体的累计变形特性、应力应变关系和强度变化等主要动力学特性进行了卓有成效的研究。国外学者 Wichtmann 和 Gidel 等^[7-8]也进行了相近的研究。已有的研究成果已为生产实践提供了很好的指导和工程应用。

饱和新近沉积土在各类交通荷载作用下的动力学特性是预测路基长期沉降的重要基础。早期由于受到试验条件的限制,一般都采用常规振动三轴仪进行室内试验,即只能模拟土体在大主应力轴向循环应力路径下的动力学特性。本文拟采用较为先进的空心圆柱扭剪仪模拟列车振动荷载作用对应的土体单元应力路径,以南京地区新近沉积的细砂为研究对象,试验研究试样围压、加载幅值和排水条件对南京细砂动强度的影响规律。研究成果可为南京及其长江中下游地区轨道交通路基变形的计算与分析提供有力的帮助。

1 试验概况

1.1 南京细砂的物理特性及试样制备

试验土样为南京细砂,对其进行重塑样。试验土样的基本物理指标为:平均天然重度 $\rho = 18.5 \text{ kN/m}^3$;最大孔隙比 $e_{\max} = 1.14$,最小孔隙比 $e_{\min} = 0.62$;不均匀系数 $c_u = 2.31$;曲率系数 $c_c = 1.07$;重塑土样相对密度 $D_r = 0.5$ 。对应的颗粒级配曲线图如图 1 所示。

试验采用三瓣铜模制样器制备砂土试样,分 4 层装样,逐层击实至控制重塑样指标,将砂土均制成内直径 60 mm、外直径 100 mm、高 200 mm 的试

样。试样制备完成后,首先采用抽气通循环水进行饱和,直至连续 10 分钟内不出现气泡;将制备好的试样安装到 GDS 循环仪上,采用压力控制器将反压控制在 100~150 kPa 范围内,继续通循环水进行饱和,直至没有气泡冒出,调整内压、外压和反压,测得有效围压接近预定值时开始固结。试验达到有效围压并固结完成后即加循环荷载,开始振动特性试验分析。

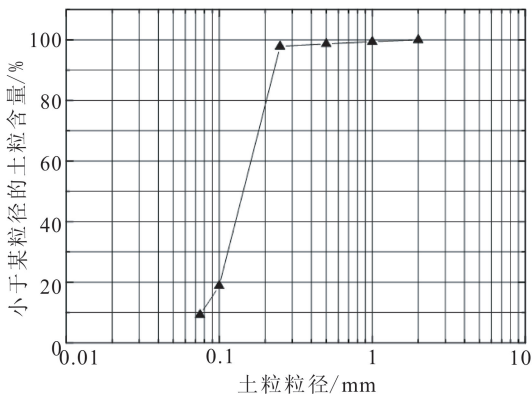


图 1 南京细砂的颗粒级配图

Fig.1 Grain size distribution diagram of Nanjing fine sand

1.2 列车振动荷载的试验加载

试验仪器采用南京工业大学土木工程与防灾减灾实验室内的 GDS 空心圆柱扭剪仪^[图 2(a)]。该仪器上土样尺寸:10 cm(直径)×20 cm(高),最大围压 2.0 MPa,最大动态扭转角度可达 1 080°,可做实心、空心土样在复杂应力路径下静、动力试验。GPS 仪器可对试样施加四个独立的荷载:轴力 W 、扭矩 M_T 、内围压 p_i 和外围压 p_o 。由于试验仪器无法在各种试验条件下较好地完成心形应力路径加载,故试验对心形应力路径进行了简化,采用椭圆形应力路径代替,如图 2(c)中所示。为探明两种加载应力路径对试验结果的影响,分别对两种应力路径下土的累计变形特性进行对比,如图 3 所示。

从图 3 中可以发现,在不同加载幅值条件下,两种应力路径下竖向应变增长趋势十分接近,增长幅度基本相同,100 列次之后的累积竖向应变最大偏差出现在加载幅值 25 kPa 时,而此时的差值也仅为 0.022%。由于试验仪器影响及制样装样过程中不可避免会存在一定偏差,两者竖向应变的增长过程中存在较小的差值属于正常现象。因此可以初步得到结论:在模拟列车振动荷载作用对土体竖向应变的影响时,椭圆应力路径可以代替心形应力路径。具体试验方案见表 1。

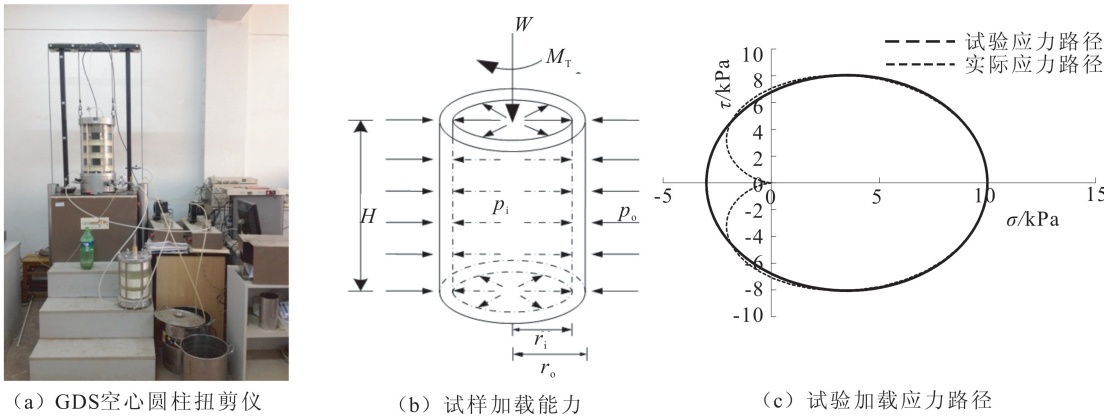


图 2 试验仪器与加载应力路径

Fig.2 Test instrument and the loading stress paths

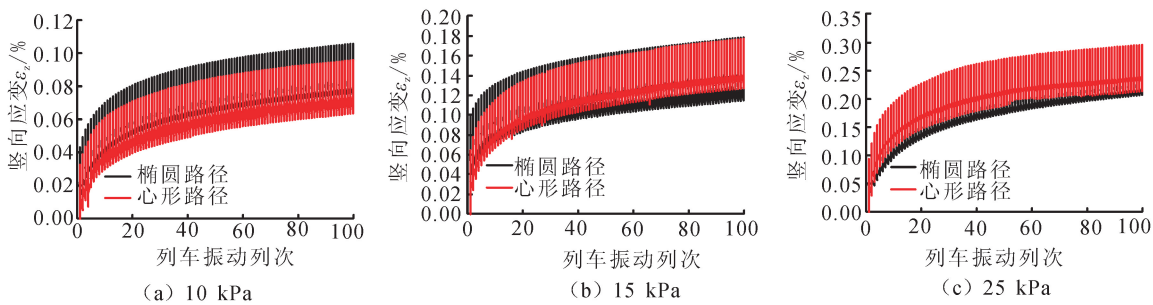


图 3 两种不同加载应力路径下试验竖向应变时程对比 (围压 120 kPa)

Fig.3 Comparison of vertical strain time-histories tested under two different loading stress paths

表 1 试验加载方案

Table 1 The test load plan

试验目的	相对密度	有效围压/kPa	加载频率/Hz	动力加载幅值/kPa	排水条件
累积变形特性	0.5	80	1	10	不排水
				15	
				20	
	0.5	120	1	10	不排水
				15	
				20	

动应变值。

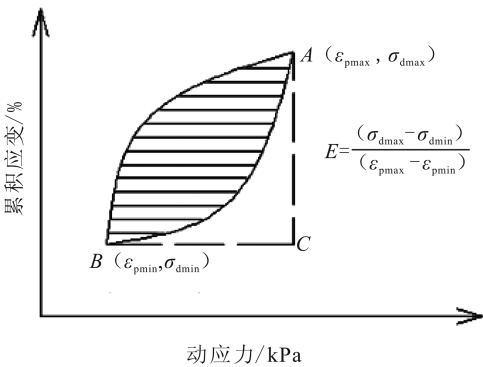


图 4 模量阻尼计算示意图

Fig.4 Calculation diagram of dynamic modulus and damping

2 南京细砂动强度变化规律分析

2.1 循环荷载作用下动模量等效计算方法

通过分析动模量动力参数,探究其随累积轴向应变和偏应力的变化情况,来揭示南京细砂土动模量的发展变化规律。动模量及阻尼比的计算可采用图 4 中所示的方法进行计算:

$$E_d = \frac{\sigma_{dmax} - \sigma_{dmin}}{\epsilon_{pmax} - \epsilon_{pmin}} \tag{1}$$

式中: E_d 为动模量; σ_{dmax} 、 σ_{dmin} 分别为应力-应变滞回圈中土样的最大及最小动应力; ϵ_{pmax} 、 ϵ_{pmin} 分别为应力-应变滞回圈中土样的最大及最小动应力所对应

2.2 动模量变化规律试验结果分析

列车振动荷载作用下动模量的变化分为两个阶段,即振动开始之后的上升阶段和一定振次之后的下降阶段或者稳定阶段。上升阶段:在振动初期土体会随着振动逐渐密实;下降阶段:当应变继续发展到一定程度土体颗粒结构开始发生改变,土体强度降低,动模量开始出现下滑趋势;稳定阶段:若加载幅值偏小,动模量在经历上升阶段后强度无法在现

有振动水平下降低,则会保持一定模量值而不再变化。图 5 给出了不排水条件下有效围压分别为 80 kPa 和 120 kPa 时南京细砂动模量随列车振动次数的变化情况。

当有效围压为 80 kPa 时,振动初期随着列车振动次数的增加,土样逐渐被振动密实,土体强度有一个明显的增强过程。随着加载幅值变大,土体强度增长量及其增长速度也随之变大。当加载幅值增大到 25 kPa 时,由于试验控制精度不够,动模量的变化较为离散,但总体上可以看出有一个明显的下降趋势;当有效围压为 120 kPa 时,南京细砂的动强度在振动初期的增强速度大大增加,尤其是当加载幅值增大到 15 kPa 时土体强度很早就出现了弱化现

象,特别是随着加载幅值由 15 kPa 增加到 25 kPa 时,这种弱化现象尤为明显。

造成上述两种不同围压下南京细砂强度变化规律明显不同的主要原因为:当围压较小时振动加载幅值的变大很容易改变南京细砂颗粒的平衡状态,转化为更为紧密的颗粒结构排列,主要表现为剪缩状态;当围压较大时,上述剪缩过程大大缩短,随着振动次数的增加,孔压增长也变得更加明显,对土体强度的弱化作用也随之增强。图 5 中分别给出了强度变化不同阶段对应的拟合公式。

图 6 为两种不同排水条件下对应的动模量与列车振动次数的关系。由图 6 可知,在试验为排水条件下南京细砂动模量的变化有两个阶段,即上升阶

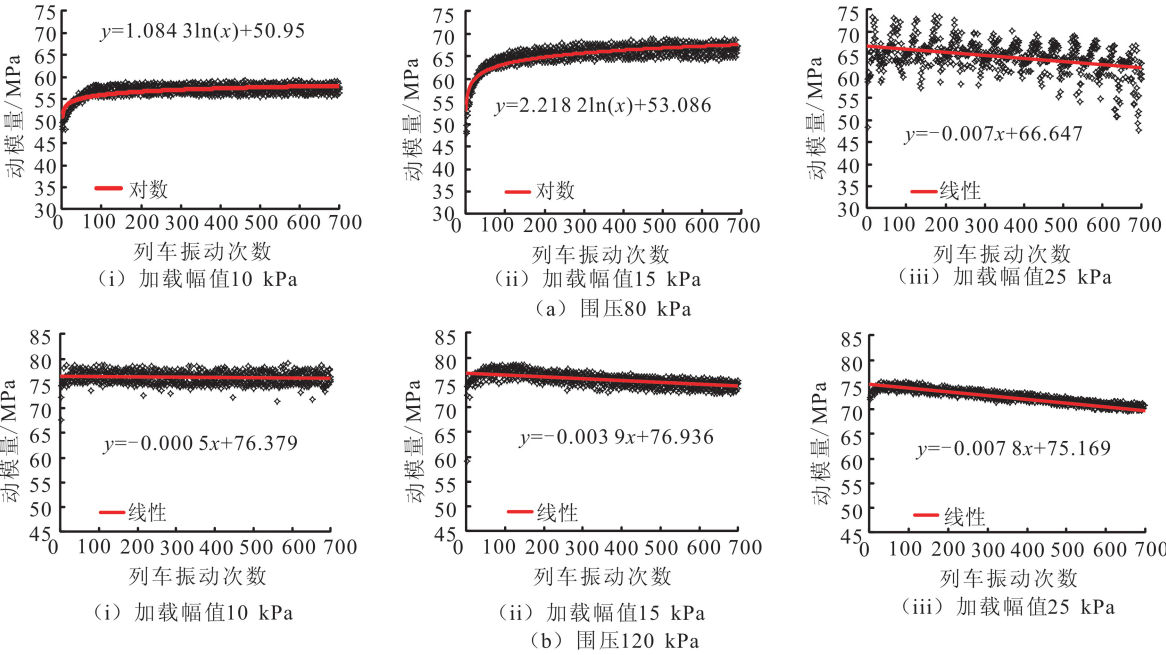


图 5 不排水条件下动模量随列车振动次数的变化

Fig.5 Dynamic modulus changes with the increase of vibration number under undrained condition

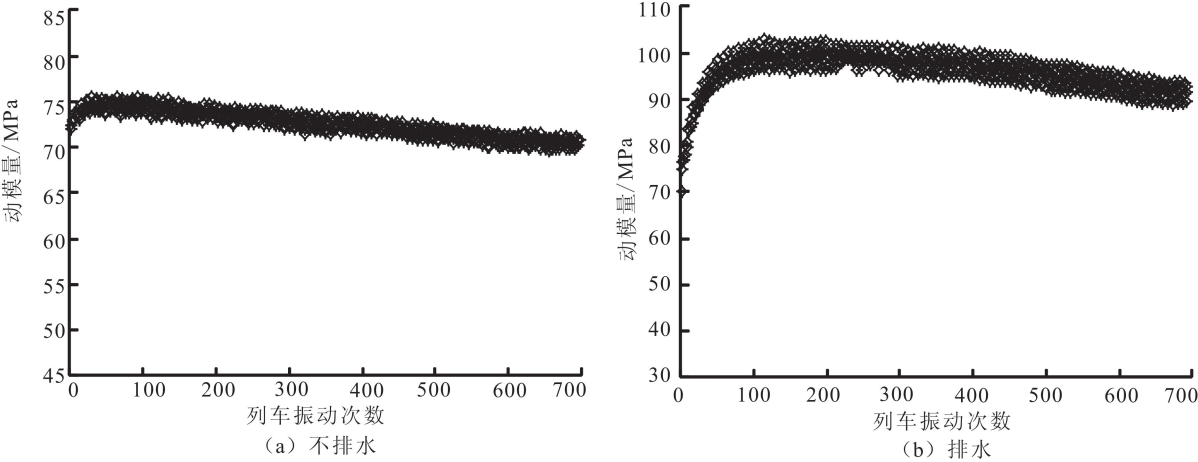


图 6 两种不同排水条件下动模量变化规律对比 (围压 120 kPa, 加载幅值 25 kPa)

Fig.6 The change of dynamic modulus under two different drainage conditions

阶段和下降阶段。此变化规律明显区别于不排水条件下对应的试验结果,即排水条件主要对南京砂土前期的强度强化阶段有明显影响,而对强度弱化阶段的影响并不明显。

3 结论

对南京细砂重塑土样开展交通荷载作用下土动强度变化特性试验研究,通过对不同试验条件下试验结果的分析,得到如下主要结论:

(1) 通过试验结果发现:椭圆应力路径和心形路径对土体竖向应变的影响基本相同,为了试验方便可以用椭圆应力路径代替列车振动荷载作用对应的心形应力路径;

(2) 列车振动荷载作用下南京细砂的强度随振动次数的变化阶段并不完全呈两阶段变化,即当围压和加载幅值都较小时主要表现为在振动初期土体强度强化特征,当振动次数达到一定数量后强度达到一个稳定阶段,且随着加载幅值变大,振动初期土体强度强化越明显;

(3) 当试验围压较大时,南京细砂的强度随振动次数增加的变化阶段主要以强度弱化阶段为主,且随着加载幅值变大强度弱化现象也越来越明显;

(4) 排水条件对南京细砂强度变化的主要影响表现为对其振动前期强度强化阶段的影响,对其强度弱化阶段的影响并不明显。

参考文献(References)

- [1] 卢祖文.高速铁路基础设施的重大技术问题(特稿)[J].中国铁路,2004,8:11-13.
LU Zu-wen.Key Technical Problem of High-speed Railway Infrastructure (Feature)[J].China Railway,2004,8:11-13.(in Chinese)
- [2] 蔡英,曹新文.重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J].西南交通大学学报,1996(1):1-5.
CAI Ying,CAO Xin-wen.Study of the Dynamic Stress and Permanent Strain of the Subgrade-soil under the Repeated Load

- [J].Journal of Southwest Jiaotong University,1996(1):1-5.(in Chinese)
- [3] 陈云敏,陈仁朋,芦森.软土地基地铁施工及运营过程中的几个土力学问题[C]//城市地铁建设与环境岩土工程高级技术论坛.杭州:浙江大学出版社,2002:165-177.
CHEN Yun-min,CHEN Ren-peng,LU Sen,Several Problems about the Soil Mechanics when the Subway is Constructed in Soft Ground[C]//High-technology Forum of the Subway Construction and Environmental Geotechnics, Hangzhou: Zhejiang University Press,2002:165-177.(in Chinese)
- [4] 沈扬,周建,龚晓南,等.考虑主应力方向变化的原状软黏土应力应变性状试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3720-3726.
SHEN Yang,ZHOU Jian,GONG Xiao-nan,et al.Experimental Study of Stress-strain Properties of Intact Soft Clay Considering the Change of Principal Stress Direction[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(12):3720-3726.(in Chinese)
- [5] 姚兆明,黄茂松.考虑主应力轴偏转角影响的饱和软黏土不排水循环累积变形[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2):0391-0399.
YAO Zhao-ming,HUANG Mao-song.Undrained Cyclic Accumulative Deformation of Saturated Soft Clay Considering Influence of Deviation Angle of Principal Stress Axis[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(2):391-399.(in Chinese)
- [6] 唐益群,黄雨,叶为民,等.地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1566-1570.
TANG Yi-qun,HUANG Yu,YE Wei-ming,et al.Critical Dynamic Stress Ratio and Dynamic Strain Analysis of Soils around the Tunnel under Subway Train Loading[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(9):1566-1570.(in Chinese)
- [7] Wichtmann T,Niemunis A,Triantafyllidis Th.Steady Strain Accumulation in Sand Due to Cyclic Loading;Drained Triaxial Tests[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2005(2):967-979.
- [8] Gidel G,Hornych P,Chauvin J,et al.A New Approach for Investigating the Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Material Using the Repeated Load Triaxial Apparatus[J].Bulletin Des Laboratoires des Ponts et Chaussées,2001:5-21.