

DOI: 10.11779/CJGE2019S2018

# 黄土含量对太原砂动剪切模量和阻尼比的影响

程 科, 苗 雨\*

(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 太原地铁 2 号线沿线黄土与太原砂混合料广泛分布, 迫切需要该粉质砂土的动剪切模量  $G$  与阻尼比  $\lambda$  进行场地地震反应分析。利用英国 GDS 公司研制的共振柱对不同黄土含量 LC 的重塑粉质砂土样进行了测试。试验结果表明: 随着 LC 的增大, 混合料受力骨架由砂粒向土粒转变, 这是导致不同 LC 混合料性质差异的主要原因。混合料  $G$  随 LC 的增大呈现先减小后增大的趋势,  $\lambda$  则相反, 且存在明显阈值黄土含量  $LC_{th}$ , 饱和状态与干状态下试样的  $LC_{th}$  不同。干状态下, 混合料与太原砂的  $G$  和  $\lambda$  的大小关系与 LC 有关。饱和状态下, 由于黄土塑性, 混合料的  $G$  小于太原砂, 其  $\lambda$  大于太原砂。

**关键词:** 太原地铁; 粉质砂土; 共振柱试验; 黄土含量; 动剪切模量; 阻尼比

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)S2-0069-04

**作者简介:** 程 科(1991—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事土动力学特性方面的研究工作。E-mail: chengkehust@163.com。

## Effects of loess content on dynamic shear modulus and damping ratio of Taiyuan sand

CHENG Ke, MIAO Yu

(School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The mixtures of loess and Taiyuan sand are distributed widely along the No. 2 metro line of Taiyuan, which leads to an urgent need for the dynamic shear modulus  $G$  and damping ratio  $\lambda$  to analyze the seismic response. The resonant column tests on remodeling silty sand with various loess contents (LC) are conducted by the GDS-RCA apparatus made by GDS Instruments Ltd. from the UK. The results show that the load bearing frame of the mixtures is changed from sand to soil particle with the increase of LC, which leads to the property difference of the mixtures with various LCs. The  $G$  of the mixtures decreases firstly and then increases with the increase of LC. However, the change of  $\lambda$  is opposite. The threshold loess content  $LC_{th}$  exists obviously. The  $LC_{th}$  of the saturated and dried samples is different. The size relationship between the  $G$  and  $\lambda$  of mixtures and Taiyuan sand is dependent on the LC in the dried state. As for the loess plasticity, the  $G$  of the mixtures is smaller than that of Taiyuan sand, and the  $\lambda$  of the mixtures is larger than that of Taiyuan sand in the saturated state.

**Key words:** Taiyuan metro; silty sand; resonant column test; loess content; dynamic shear modulus; damping ratio

## 0 引言

中国是世界上黄土面积分布最多的国家, 在山西、陕西、甘肃、河南等中西部地区分布着大约 70 万平方公里的黄土。黄土作为一种特殊土, 其显著的结构性与强烈的水敏性, 使其工程力学性质较其他类土有较大差别<sup>[1]</sup>。随着我国经济建设的发展与西部大开发战略的推进, 黄土地区的基础建设发展迅猛, 高等级公路、隧道、高速铁路等工程方兴未艾。太原作为八度抗震设防地区, 目前正在修建地铁 2 号线。2 号线位于汾河附近, 工程地层主要是粉土、黄土、细砂等混合料。这就迫切需要了解该粉质砂土的动力学特性, 来进行场地地震反应研究。

由于砂土动力学性质的特殊性, 自 20 世纪以来, 国内外很多学者对砂土的动力学特性进行了研究, 并且取得了丰硕的成果<sup>[2-3]</sup>。但是这些砂土大多为纯净砂, 如日本的丰浦砂, 中国福建的标准砂等<sup>[4]</sup>。而自然界的纯净砂并不多见, 更多的是砂土混合料。大量研究表明, 细粒含量 FC (粒径小于 0.075 mm 的土颗粒质量百分比) 对土体动力特性影响显著<sup>[5]</sup>。目前, 国内外已有学者对含细粒的砂土动力学性质进行了研究, 但更多是针对砂土的液化与强度问题<sup>[6-9]</sup>, 关于动

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778260, 51378234)

收稿日期: 2019-04-29

\*通讯作者 (E-mail: miaoyu@hust.edu.cn)

剪切模量和阻尼比的研究相对较少,且研究细粒均为非塑性细粒,关于塑性细粒的研究很少。例如,吴琪等<sup>[7]</sup>开展了循环三轴试验,探究了非塑性细粒含量对细粒-砂粒-砾粒混合料动强度的影响,结果显示细粒含量对混合料的抗液化强度影响显著;王勇等<sup>[8]</sup>利用长江沿岸粉细砂,开展了不同非塑性细粒含量的砂粉混合料循环三轴试验,探究了细粒含量与动弹性模量和阻尼比的关系,结果显示混合料动弹性模量随细粒含量的增加先减小后增大;朱建群等<sup>[9]</sup>对含无塑性粉粒的砂土进行了三轴固结不排水试验,结果显示粉粒含量通过颗粒组成和结构对粉砂强度和变形产生重要影响。动剪切模量和阻尼比这两个土动力特性参数,是土体工程特性的重要表征,在地震荷载等动力作用下场地响应分析、饱和砂土液化判别等方面有着重要作用<sup>[10]</sup>。由于黄土的特殊性以及分布的广泛性,含黄土的砂土混合料动剪切模量和阻尼比研究就更有意义。鉴于此,本文以太原地铁项目为依托,以现场原状土为基础,人工配制不同含量黄土的太原砂土混合料,利用英国GDS公司生产的共振柱测试设备,从黄土含量、干湿状态等方面,对含黄土的砂土混合料的动剪切模量和阻尼比进行试验研究,分析含黄土的砂土混合料动力学性质,从而为工程实践提供一定的参考。

## 1 试验仪器、试样制备及试验方法

### 1.1 试验仪器

试验仪器采用英国GDS公司研制的GDS-RCA高精度固定-自由型共振柱测试系统。该系统在圆柱形试样顶部放置4个磁线圈作为驱动系统产生扭矩,在试样的自振频率下激振试样,试样的底部固定。通过测量自由端的运动,获得传递波的速度和材料的阻尼比。为统一描述黄土含量对砂土动剪切模量以及阻尼比的影响,本试验选取的应变范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$ 。

### 1.2 试验材料

试样为人工配制重塑土样,直径为50 mm,高度为100 mm。原材料来自太原地铁工程现场。由于原状土样不均匀且离散性较大,将原状样烘干,碾压,筛分之后,去除石块等杂质,将材料分为黄土与太原砂两类。为保证均匀,将黄土碾压后过0.075 mm的筛,重塑黄土的基本参数见表1。筛分、清洗、烘干后的纯净太原砂整体呈褐色,松散,有棱角,分选性较好。太原砂级配曲线见图1。

表1 重塑黄土基本参数

Table 1 Basic parameters of remodeling loess

类别	最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	最小干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	塑限/%	液限/%	塑性指数
粉质黄土	1.503	1.169	20	31.5	11.5

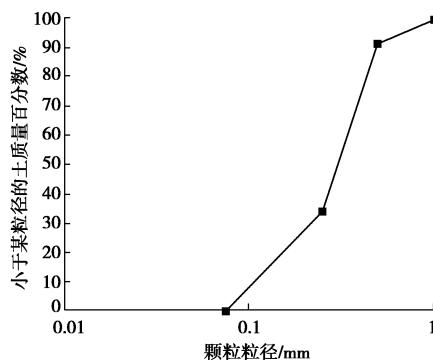


图1 太原砂级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of Taiyuan sand

### 1.3 试验方法

试验从黄土含量、干湿状态等方面入手,对含黄土的砂土混合料的动剪切模量和阻尼比进行试验研究。对于饱和样,按比例分4次称取相应质量的太原砂和黄土,充分混合后,分4次振捣装入饱和器。再将饱和器置入真空缸进行初步抽真空饱和。之后,将初步饱和的试样装入仪器,并进行反压饱和,直至B值(孔压变化量与围压变化量的比值)大于0.95时认为试样的饱和度达到要求。维持反压不变,增加围压,使二者压力差达到所需固结应力值,对试样进行等压排水固结。当反压体积变化量5 min内不大于5 mm<sup>3</sup>认为试样已固结完成。根据试验方案,本次黄土掺入质量比LC分别取0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%。按照《土工试验方法标准》<sup>[11]</sup>的要求,分别测出不同黄土含量下试样的最大、最小干密度。选择相对密度50%作为试样的控制条件,进而得到试样的干密度,算出试样的质量以及掺入黄土的质量。不同黄土含量混合料的最大最小干密度如图2所示。

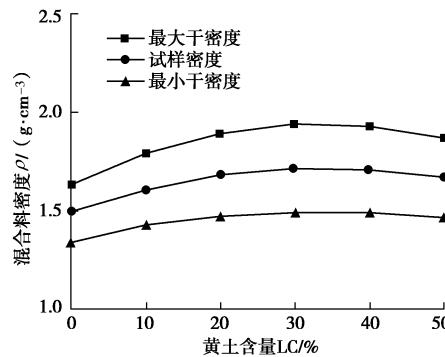


图2 不同含量黄土-太原砂混合料密度曲线

Fig. 2 Curves of Taiyuan sand and loess mixtures with various LCs

## 2 动剪切模量

### 2.1 不同黄土含量对饱和试样的影响

100 kPa有效围压下,不同黄土含量LC饱和试样的动剪切模量G与剪应变γ的关系曲线如图3所示。由图3可知,随着剪应变的增加,不同黄土含量饱和

试样的动剪切模量均不断减小,且衰减速率逐渐增大。不同黄土含量试样的剪切模量差异较大,黄土含量对试样的剪切模量影响显著。随着黄土含量的增加,试样的剪切模量并非线性变化,而是呈现先减小后增大的趋势。当黄土含量为30%时,试样的动剪切模量达到最小值。当黄土含量为0,即纯砂状态,此时试样的动剪切模量最大。混合料LC<sub>th</sub>为30%。

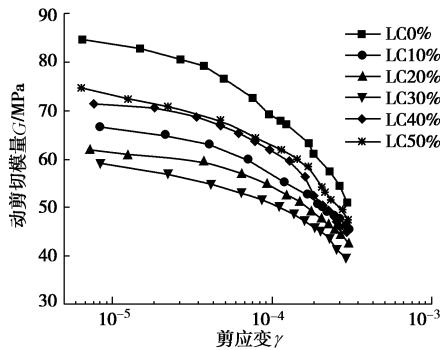


图3 不同黄土含量饱和试样动剪切模量与剪应变关系

Fig. 3 Evolution of dynamic shear modulus of saturated samples of various LCs with shear strain

## 2.2 不同黄土含量对干试样的影响

100 kPa 围压下, 不同黄土含量 LC 干试样的动剪切模量  $G$  与剪应变  $\gamma$  的关系曲线如图 4 所示。与饱和试样相似, 随着剪应变的增加, 不同黄土含量干试样的动剪切模量均不断减小, 但衰减速率并不相同。随着黄土含量的不断增加, 各试样动剪切模量随剪应变衰减速率逐渐增大。曲线形状逐渐由纯砂状态时的类似斜直线向抛物线转变。不同黄土含量试样的剪切模量差异较大, 黄土含量对试样的剪切模量影响显著。随着黄土含量的增加, 试样的动剪切模量呈现先减小后增大的趋势。当黄土含量为 20% 时, 试样的动剪切模量达到最小值。当黄土含量为 50% 时, 此时试样的最大动剪切模量最大。混合料 LC<sub>th</sub> 为 20%。

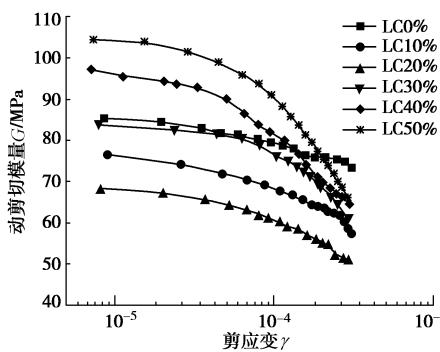


图4 不同黄土含量干试样动剪切模量与剪应变关系

Fig. 4 Evolution of dynamic shear modulus of dried samples of various LCs with shear strain

## 3 阻尼比

### 3.1 不同黄土含量对饱和试样的影响

100 kPa 有效围压下, 不同黄土含量饱和试样的阻尼比  $\lambda$  与剪应变  $\gamma$  的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 随着剪应变的增加, 不同黄土含量饱和试样的阻尼比均不断增大, 且增长速率逐渐增大。各试样间起始阻尼比差值较小, 随着剪应变的增加, 阻尼比差值逐渐增大。随着黄土含量的增加, 试样阻尼比并非线性变化, 而是呈现出先增大后减小的趋势。当黄土含量为 0 时, 此时试样的阻尼比最小。当黄土含量为 30% 时, 试样的阻尼比达到最大值。

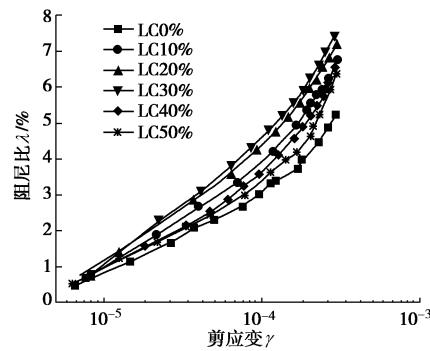


图5 不同黄土含量饱和试样阻尼比与剪应变关系

Fig. 5 Evolution of damping ratio of saturated samples of various LCs with shear strain

### 3.2 不同黄土含量对干试样的影响

100 kPa 围压下, 不同黄土含量干试样的阻尼比  $\lambda$  与剪应变  $\gamma$  的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 干试样的阻尼比随剪应变的变化规律与饱和试样类似, 但也有差异。当黄土含量为 50% 时, 此时试样阻尼比最小, 当黄土含量为 20% 时, 此时试样阻尼比最大。混合料与太原砂的阻尼比大小关系与黄土含量有关。另外, 相对于饱和试样, 干试样整体阻尼比较低。这是因为在饱和状态下, 试样由于黄土表现出塑性性质,

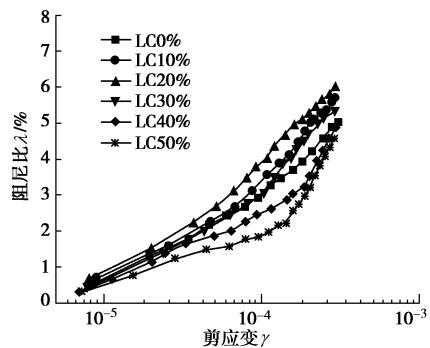


图6 不同黄土含量干试样阻尼比与剪应变关系

Fig. 6 Evolution of damping ratio of dried samples of various LCs with shear strain

内部颗粒间粘聚力增大，阻尼比增大。而试样在干状态下，塑性并不明显，颗粒间粘聚力很小，因此阻尼比较低。值得注意的是，饱和试样与干试样的阻尼比随黄土含量的增长，均呈现先增大后减小的趋势，这本质上是因为试样受力骨架逐渐由砂粒向土粒转变，颗粒间接触状态发生了变化。饱和状态下，混合料的阻尼比整体比太原砂大。干状态下，混合料与太原砂的阻尼比大小关系与黄土含量有关。

## 4 结 论

本文以太原地铁项目为依托，以现场原状土为基础，人工配制不同黄土含量的太原砂土混合料，从黄土含量、干湿状态等方面进行了一系列共振柱试验，对太原砂土混合料的动剪切模量和阻尼比进行试验研究，得到了以下 3 点结论。

(1) 随着黄土含量的增大，混合料受力骨架逐渐由砂粒向土粒转变，颗粒间接触状态发生了变化，这是导致不同黄土含量下混合料性质差异的主要原因。

(2) 黄土含量对砂土混合料动剪切模量影响显著。试样动剪切模量随黄土含量增大呈现先减小后增大的趋势。转变过程中存在明显阈值黄土含量。饱和状态与干状态下混合料的阈值黄土含量不同。干状态下，混合料与太原砂的动剪切模量大小关系与黄土含量有关。饱和状态下，由于黄土塑性，混合料的剪切模量整体比太原砂小。

(3) 黄土含量对砂土混合料阻尼比有影响。试样阻尼比随黄土含量增大呈现先增大后减小的趋势。饱和试样阻尼比高于干试样。干状态下，混合料与太原砂的阻尼比大小关系与黄土含量有关。饱和状态下，混合料的阻尼比整体比太原砂大。

## 参 考 文 献：

- [1] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min. Loess Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese))
- [2] AMINI F, QI G Z. Liquefaction testing of stratified silty sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, **126**(3): 208 – 217.
- [3] 顾晓强, 杨 峻, 黄茂松, 等. 砂土剪切模量测定的弯曲元、共振柱和循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 740 – 746. (GU Xiao-qiang, YANG Jun, HUANG Mao-song, et al. Combining bender element, resonant column and cyclic torsional shear tests to determine small strain shear modulus of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 740 – 746. (in Chinese))
- [4] 董全杨, 蔡袁强, 徐长节, 等. 干砂饱和砂小应变剪切模量共振柱弯曲元对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2283 – 2289. (DONG Quan-yang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Measurement of small-strain shear modulus  $G_{\max}$  of dry and saturated sands by bender element and resonant column tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2283 – 2289. (in Chinese))
- [5] THEVANAYAGAM S, MOHAN S. Intergranular state variables and stress-strain behavior of silty sands[J]. Géotechnique, 2000, **50**(1): 1 – 23.
- [6] RAHMAN M M, R LO S. Undrained behaviour of sand with fines[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **1**(1): 29 – 37.
- [7] 吴 琦, 陈国兴, 周正龙, 等. 细粒含量对细粒-砂粒-砾粒混合料动强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 1038 – 1047. (WU Qi, CHEN Guo-xing, ZHOU Zheng-long, et al. Influences of fines content on cyclic resistance ratio of fines-sand-gravel mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 1038 – 1047. (in Chinese))
- [8] 王 勇, 王艳丽. 细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2623 – 2628. (WANG Yong, WANG Yan-li. Study of effects of fines content on dynamic elastic modulus and damping ratio of saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2623 – 2628. (in Chinese))
- [9] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 粉粒含量对砂土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1647 – 1652. (ZHU Jian-qun, KONG Ling-wei, ZHONG Fang-jie. Effect of fines content on strength of silty sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1647 – 1652. (in Chinese))
- [10] ANDRUS R D, STOKOE K H II. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, **126**(11): 1015 – 1025.
- [11] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123—1999 Stand and for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))

(责编: 孙振远)