

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.04.012

局部振动作用下地下软黏土流动特性试验

殷德顺¹, 颜庆梅¹, 马誉鑫²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 江西省建材科研设计院, 江西 南昌 330000)

摘要: 为研究引起隧道持续沉降的原因, 通过拖球试验从流体力学角度研究地下软黏土在不同含水率、不同振动频率、不同围压条件下流动特性的变化情况。试验结果表明: 软黏土的流动性随着含水率和振动频率的增加而增加, 随着围压的增大而减小; 增加含水率对软黏土流动性的促进作用, 在较低含水率时较明显, 随着土样含水率的逐渐升高而变得不再显著。围压和振动频率对软黏土的流动特性有交叉影响; 在高振动频率下, 围压的增加对软黏土的流动特性影响不大; 在高围压下, 只有当振动频率超过临界值时, 振动频率的增加才会影响软黏土的流动特性。

关键词: 拖球试验; 含水率; 局部振动; 围压; 软黏土; 流动特性; 试验研究

中图分类号: TU411.11 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2019)04-0366-08

Experimental study on flow characteristics of underground soft clay under localized vibration

YIN Deshun¹, YAN Qingmei¹, MA Yuxin²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangxi Building Materials Scientific Research & Design Institute, Nanchang 330000, China)

Abstract: Localized vibration caused by the metro operation changes the mechanical properties of underground soft clay, which can cause engineering geological problems, such as continuous subsidence of metro tunnels, but the mechanism is still unclear. In order to study the cause of tunnel's continuous settlement, this paper studies the flow characteristics of underground soft clay under different water contents, vibration frequencies and confining pressures by the pulling sphere experiment. The experimental results indicate that the flow characteristics of soft clay increase with the increasing water content and vibration frequency, and decrease with the increasing confining pressure. However, the effect of increasing water content on the fluidity of soft clay is more obvious at lower water content, and becomes no longer significant with the gradual increase of water content of soil sample. Confining pressure and vibration frequency have cross-effects on the flow characteristics of soft clay. Under high vibration frequency, the confining pressure has little effect on the flow characteristics of soft clay. At presence of high confining pressure, the increase of vibration frequency will affect the flow characteristics of soft clay only if the vibration frequency exceeds a critical value.

Key words: pulling sphere experiment; water content; localized vibration; confining pressure; soft clay; flow characteristics; experimental study

近年来, 位于我国东部沿江沿海地区的上海和南京等城市中, 建于软黏土地基的地铁隧道在运营期面临着持续沉降问题。上海地铁 1 号线自 1993 年投入运营以来, 最大累积沉降量已超过 200 mm, 年内最大沉降差超过 30 mm^[1-2], 超过了《地铁隧道保护条例》所规定的 20 mm 总位移量的标准。南京地铁 1 号线西延线部

基金项目: 国家自然科学基金(11872173)

作者简介: 殷德顺(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事软土力学及工程特性研究。E-mail: yindeshun@hhu.edu.cn

引用本文: 殷德顺, 颜庆梅, 马誉鑫. 局部振动作用下地下软黏土流动特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 366-373.

YIN Deshun, YAN Qingmei, MA Yuxin. Experimental study on flowing characteristics of underground soft clay under localized vibration [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(4): 366-373.

分区段也由于沉降过大而不得不进行额外的地基加固措施^[3]。隧道沉降严重影响乘坐舒适度以及地铁运营安全,因此迫切需要研究并解决软土地铁隧道持续沉降问题。

目前学界对软黏土地铁隧道持续沉降原因已有相关研究。薛阔等^[4]采用有限单元法,建立地铁隧道基底土体的动力响应的数值模型,揭示隧道基底土层的动力反应特性。周俭平等^[5]通过室内固结不排水三轴试验研究地铁列车荷载作用下的软黏土地基累积塑性变形。王铁生等^[6]建立时变参数灰序模型 TGM-AR 来进行隧道沉降的分析和预测。高广运等^[7]建立基于边界面本构的 ABAQUS 轨道-隧道-地基三维有限元模型,分析了首次加载后隧道地基的沉降随土层深度和距隧道中心水平距离的变化规律。郭林等^[8]利用振动三轴仪对温州原状饱和软黏土进行研究,探究循环荷载下软黏土回弹和累积变形特性。闫春岭等^[9]采用循环三轴试验研究饱和粉性黏土在地铁荷载作用下的累积塑性变形特征。冯斌^[10]通过 Geocomp 动单剪试验系统研究交通荷载的振动次数、频率等影响因素对宁波软黏土土体累积变形的影响规律。可以看出人们对隧道变形沉降的研究主要集中在各种影响因素的讨论与模拟上,且这些研究大多是从固体力学角度,通过动三轴试验和有限元模拟来计算土体的累积塑性变形,并不能很好地解释运行期地铁隧道持续沉降的问题。

软黏土在动荷载(如地震荷载)作用下其结构性强度和承载力会显著降低,甚至会由固体向流体演化,并表现出一种“类流体”的特性^[11],软黏土的这种触变性^[12]行为可能正是导致地铁运营期隧道持续沉降的重要原因,也表明仅从固体力学角度来研究软黏土在振动荷载下的力学性质是不够的。从流体力学角度研究土体的力学性质变化已在滑坡、泥石流、震陷等问题的研究中取得了丰硕的成果:Moriwaki 等^[13]测量和分析了与坡运动有关的动态过程。朱晓冬^[14]基于流体力学方法预测和分析砂土边坡的液化流滑机理;Johnson^[15]选用非牛顿流体模型中的宾汉黏性流模型,首次建立了泥石流运动方程,求解了泥石流最大流速;Wang 等^[16]在通过室内环剪试验对日本福岛的山体滑坡进行触发和滑动机理研究时发现,滑坡体在整个运动过程中都表现出很高的流动性;陈育民等^[17]利用振动台试验研究了砂土液化及液化后的流动特性。前人的大量研究工作表明,砂土在一定情况下能够表现出很强的流动性,而目前尚无地下软黏土在振动作用下力学性质演变的相关研究与定论。为了解释地铁隧道在运行期发生的持续沉降现象,亟需开展地下软黏土在振动荷载下流动性的相关研究。

地铁运行所引起的地下软黏土振动是一种在一定范围内的局部振动,地铁隧道附近土体颗粒的受振情况强于远处土体,如图 1 所示。张曦等^[18]通过现场监测,观察到隧道内的振动效应随距离逐渐衰减;Tang 等^[19]通过室内试验,发现土体内部的应力响应幅值随着深度的增大呈线性减小;严涛等^[20]利用三维有限元方法进行数值模拟也得到了类似的结论。传统的基于振动台试验的土性质研究,是通过整体振动的形式使土体单元处于相同的振动状态。Wang 等^[21]通过振动台试验对黏性土边坡在地震作用下的动力响应进行了研究。这种加载模式简化了振动波的传递形式,难以反映单一振源情况下振动强度随距离增加而产生的衰减效应。因此,采用中心振源的局部振动形式相较于给整个试样施加相同振动程度的振动台和三轴试验,更加符合地铁隧道周围软黏土受振的实际情况。

为了研究软黏土在振动情况下流动特性的变化,进而探究地铁隧道运营期持续沉降的原因,本文通过改进拖球试验,模拟不同含水率、不同深度地铁隧道周围软黏土受局部振动影响下的流动特性。本研究不仅有助于指导地铁工程实践,也将对未来软土动力特性的研究产生重要的引导意义,具有重要的科研价值。

1 拖球试验

1.1 试验原理

长久以来,学术界通常将土作为塑性体来研究。然而在一定作用(如振动作用)下,土体的变形特征会从弹塑性体转化为一种类流体状态,表现出一定的流动性。拖球试验最早由宫岛昌克提出^[22],根据低雷诺



图 1 地铁隧道周围软黏土振动示意图(局部振动)

Fig.1 Vibration diagram of soft clay around the subway tunnel (localized vibration)

数均匀流绕球流动理论得出的落球黏度计原理^[23]设计,是一种从流体力学角度来研究土体力学性质的方法。试验认为,光滑小球在拉力的作用下,在均匀无限宽广黏度的流体中匀速运动时,在流体中不会产生涡流的情况下可以认为小球受到的阻力为该流体发生变形的黏滞阻力,可以表示为

$$F = T = 6\pi\eta vr$$

(1)

式中: F ——黏滞阻力, N; T ——拉力, N; η ——流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; v ——匀速运动速度, m/s ; r ——小球半径, m 。

小球在运动过程中受到周围土体对其表面的黏滞作用,黏滞作用越大,土体流动性越小。黏滞作用对小球运动的阻碍程度可以通过小球运动过程中所受的平均应力定量体现:

$$\sigma = \frac{T}{4\pi r^2}$$

(2)

式中: σ ——小球所受平均应力, Pa 。

试验中,需要通过数据采集仪来实时测量记录拉线的拉力 T ,并以此为依据计算出应力 σ 作为分析软土流动性质演变的依据。

1.2 试验装置

试验装置由试验缸、步进电机系统、数据采集系统、局部振动系统和气压系统组成,如图 2 所示。试验缸的主体是一个直径 426 mm、高度 510 mm、厚度 10 mm 的不锈钢圆筒,主要用来放置试验土样、气囊和振动器。钢轨水平固定在距容器内底部 100 mm 的位置。小球直径为 30 mm,在试验过程中由尼龙绳拖动,在步进电机的控制下沿着钢轨匀速前进。容器上盖板直径 450 mm、厚度 20 mm,中央留有气阀孔,方便空气压缩机对气囊充气,灵活控制容器内的围压。局部振动器固定放置 在球上方 20 mm 处,可提供 0 ~ 50 Hz 的振动频率。尼龙绳通过固定在预留端口上方的滑轮连接小球和拉力传感器。数据采集系统与拉力传感器连接,记录试验过程中小球所受拉力值。

1.3 试验准备

试验土样取自南京秦淮河河床,天然含水率为 56.04%,液限为 31.49%,塑限为 20.78%。将原始土样依次进行干燥、除杂、粉碎和筛分处理后,得到粒径小于 0.5 mm 的试验干土样,其颗粒级配曲线如图 3 所示。干土样含水率为 1.61%。处理好的试验土样放置于密封容器中,保证其在试验前的均质和稳定。在上述处理过程中土性保持不变。

1.4 试验参数和步骤

已有的研究表明,运行速度为 30 ~ 80 km/h 的地铁引起的路基和环境振动频率在 15 ~ 50 Hz^[24]。而学界关于振动频率对软黏土力学性质影响的研究,往往只局限于零点几赫兹到几赫兹不等的低频振动,与实际情况下土体所受振动频率 15 ~ 50 Hz 相去甚远。且伴随着交通运输技术的不断发展,列车运行所产生的振动荷载频率也会随着运行速率的提升而不断增加^[25],其对隧道周围软土层可能造成的复杂影响应引起足够的重视。因此本文设计了 0 Hz、15 Hz、25 Hz、35 Hz、45 Hz 共 5 种不同频率来模拟隧道周围软黏土的不同受振情况。试验中利用加压装置设计了 0 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 共 4 种不同围压模拟不同埋深土体的受振情况。上海和南京两地地铁隧道所处深度的地质勘测数据^[3,26]表明,两地地铁隧道穿越的土层大多位于地下水位以下,土体含水率高于液限。因此,根据取得的试验土样的基本性质参数,本次试验的样品质量含水率 w 设置为 38%、43% 和 51%。

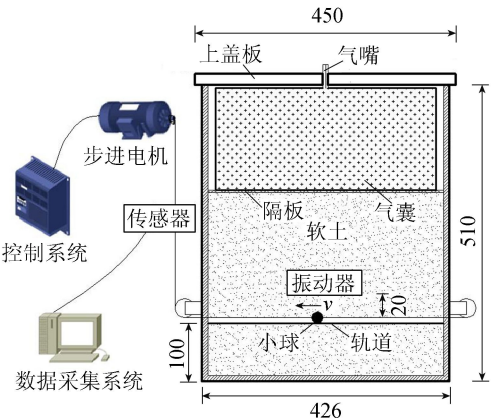


图 2 试验装置示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus (units: mm)

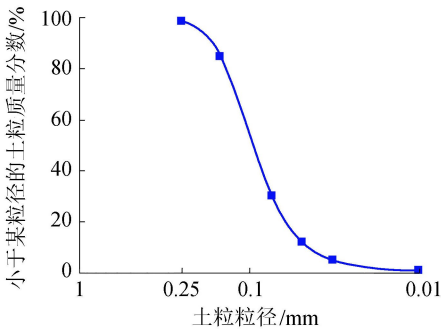


图 3 试验土样的颗粒级配曲线

Fig.3 Particle gradation curve of tested soil samples

为了保证小球球体周围施加的力来自软土的黏滞力,避免运动速度太快导致球体与软土发生挤压,本次试验采用等应变率加载,通过步进电机控制小球以 48 mm/min 的速率沿轨道匀速前进。试验过程中,拉力传感器测量的数据不仅包含小球实际受到的拉力,还有装置在试验过程中产生的系统摩擦力,比如小球与道轨之间的摩擦力、导线与滚轮之间的摩擦力等。所以试验中增加了一组在没有填充土体情况下空拉小球的试验,并且认为该组测得的摩擦力为固定值。通过多次试验取平均值得到试验装置的系统摩擦力为 0.8 N。

试验开始之前,将小球置于初始位置,气囊充气加压达到稳定压强后,启动局部振动器和步进电机,通过数据采集系统获得试验数据。试验过程中,小球在尼龙绳牵引下的运动距离 $l=100\text{ mm}$,远小于试验缸内径,且小球运动轨迹位于缸体内部中心,远离试验缸壁,因此可以忽略边界效应的影响。每组试验重复 2 次以保证试验结果的可靠性。通过改变含水率、振动频率以及围压,测试不同试验条件下软黏土流动特性的变化。

2 试验结果与分析

2.1 含水率的影响

图 4 显示不同围压下含水率对软黏土流动特性影响的应力-距离关系。从图 4 中可以看出,整个拖球过程中,小球所受的平均应力主要有 2 个变化阶段:(a)第一阶段为应力迅速增加的阶段,虽然小球在试验开始时就能达到设计速度,但是小球周围的土体并不能瞬间达到稳态,为了阻止拖球运动,周围土体会给小球施加一个不断增大的阻力。第一个阶段是持续时间较短的过渡阶段。(b)当小球周围土体变形趋于稳定之后,拖球应力虽然在不断增加,但是增加的幅度迅速减少,这就是拖球试验的第二个阶段:稳定阶段。此阶段是拖球试验的主要阶段,亦是研究土体流动特性的主要阶段。

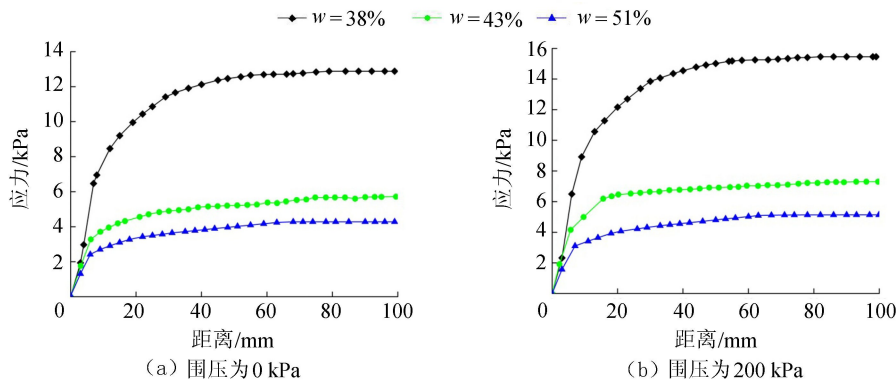


图 4 不同含水率条件下应力-距离关系 ($v=48\text{ mm/min}$, $f=25\text{ Hz}$)

Fig. 4 Relationship between stress and displacement under different moisture contents ($v=48\text{ mm/min}$, $f=25\text{ Hz}$)

如图 4(a) 所示,在无压条件下,含水率为 38% 时,小球所受平均应力最大,软黏土的力学特性更类似于固体。当含水率增加至 43% 时,拖球应力明显减小,应力值几乎只有 38% 含水率时的一半,说明含水率增加使土体的流动性显著增强。进一步增加含水率至 51%,小球所受应力较 43% 含水率时也有比较明显的减小,但是减小幅度远低于含水率从 38% 增至 43% 时的应力减小幅度。而增加围压至 200 kPa,亦能得到与无压时相似的试验现象(如图 4(b) 所示)。从上述应力-距离关系曲线可以看出,随着含水率的增加,小球运动时所受黏滞阻力越来越小,软黏土变得更容易流动,其力学性质经历了从固体状态向流体状态的转变。

可以得知,含水率是影响软黏土力学性质的一个重要因素。胡华^[27]通过室内试验研究,亦发现随着含水率的增加,软土的初始剪切力和塑性黏度均逐渐降低。从机理上讲,对于具有一定初始含水率的土体,在固相组成不变的情况下,质量含水率的增加会直接导致土中自由水增多,土颗粒间距增大,土颗粒间相互作用被削弱,土中原有的絮网状结构被破坏。这就使得软土的黏聚力下降,自由水充满孔隙起到明显的润滑作用,因此会出现如图 4 所示的拖球应力显著降低、土体流动性增强的试验现象。值得一提的是,含水率增加对软土流动性的增幅作用不是一成不变的,而是在初始含水率较低时明显,随着土样含水率的逐渐升高而变得不再显著。通过以上分析可以看出,高含水率软土确实具有一定的塑性黏度和流动特性,可以被认为是一种非牛顿流体,因此从流体角度对其开展相应研究具有充足的理论和试验基础。进一步地,在具有深厚软弱土层的地区开展地下工程建设,降低隧道周围土层含水率是一种可行的加固理论。因此在施工过程中应设置

排水系统,并根据实际工程需要选择换填、挤密桩、预加支护等手段进行处理,同时还应注意做好相关监测。

2.2 振动频率的影响

图5呈现了在0 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa这4种不同围压下,不同振动频率条件的应力-距离关系。从图5可以看出,在稳定阶段,小球所受应力随着局部振动频率的增加而减小,说明在相同围压下,振动频率越高,软黏土流动性越强。唐益群等^[28]通过现场试验研究发现,当地铁隧道穿过饱和软土层黏土时,列车运行产生的局部振动可以使隧道附近土体的孔隙水压力显著上升。蒲泰條等^[29]通过DBLEAVES计算程序进行地铁隧道周围软黏土研究,发现在列车振动荷载作用下超孔隙水压力会在隧道下方的黏土层内积聚。高含水率条件下,局部振动产生的能量能够带动振源附近土体一起振动并形成难以迅速消散的超孔隙水压力,从而导致土体内部原有的稳定结构破坏,土样的流动性增强。局部振动振源的能量和对土体的破坏程度随着振动频率的升高而增大,表现为拖球应力的减小,从而反映出软黏土流体性质的增强。

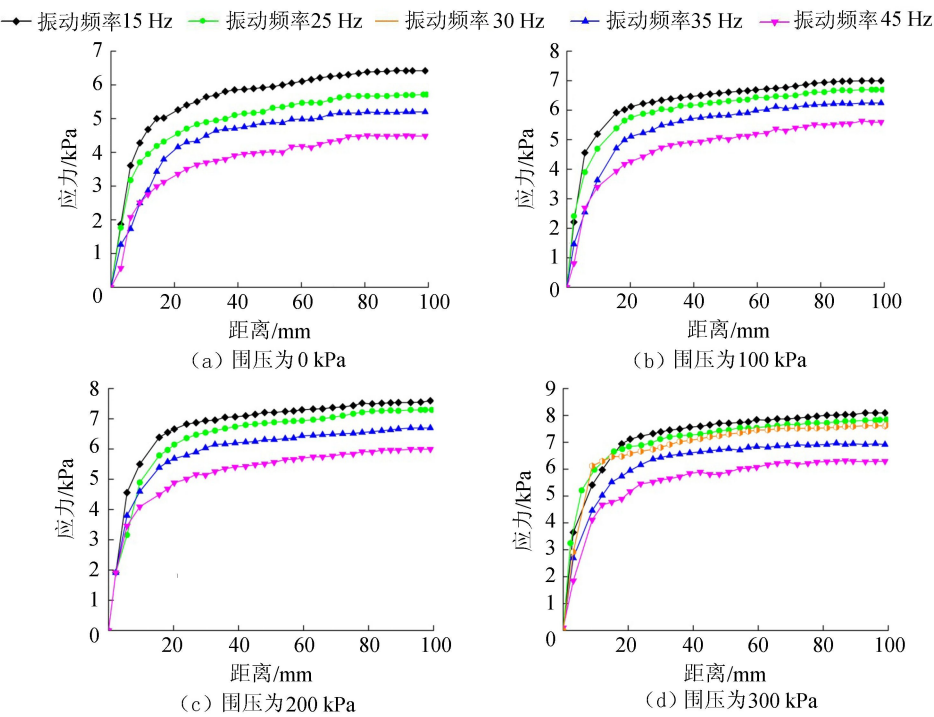


图5 不同振动频率下应力-距离关系 ($w=43\%$, $v=48\text{ mm/min}$)

Fig. 5 Relationship between stress and displacement under different vibration frequencies ($w=43\%$, $v=48\text{ mm/min}$)

观察图5(b)(c)(d)可以发现,在有压条件下,随着振动频率的增加,稳定阶段的拖球应力不再像0 kPa(如图5(a)所示)条件下的均匀减小。如图5(c)所示,在200 kPa围压条件下,振动频率为15 Hz、25 Hz时,应力-距离曲线几乎重合。当振动频率增加至35 Hz时,应力值明显低于25 Hz时的应力值。说明在振动频率处于较低水平(15 Hz、25 Hz)时,振动频率变化对拖球应力影响不大;当振动频率增加至某一数值时,应力发生突变。通过研究认为,在高围压条件下,当振动频率达到一定大小之后,由振动引起的孔隙水压力增加超过了破坏颗粒之间结构的临界应力,导致土壤颗粒结构迅速破坏,最终使软黏土力学性质发生突变。这说明在一定深度的地下,高频振动能够造成软黏土流动性迅速增加,当地下土达到力学性质突变条件时,会发生突然、剧烈的破坏事故。为了确定引起软黏土性质突变的临界振动频率,本文在围压为300 kPa情况增加了一组频率为30 Hz的试验,结果如图5(d)所示。从图5(d)中可以看到振动频率为30 Hz时的应力值与25 Hz时的应力值相当接近,而当振动频率增加5 Hz至35 Hz时,应力值发生突变,由此可以确定临界振动频率介于30 Hz与35 Hz之间。

2.3 围压的影响

由于建设地铁线路时的隧道埋深会因地形起伏和城市建筑规划而不断变化,因此,研究不同围压条件下振动频率对软黏土流动特性的影响显得尤为重要^[30-31]。图6给出了含水率为43%时不同埋深条件下的应力-距离关系曲线。

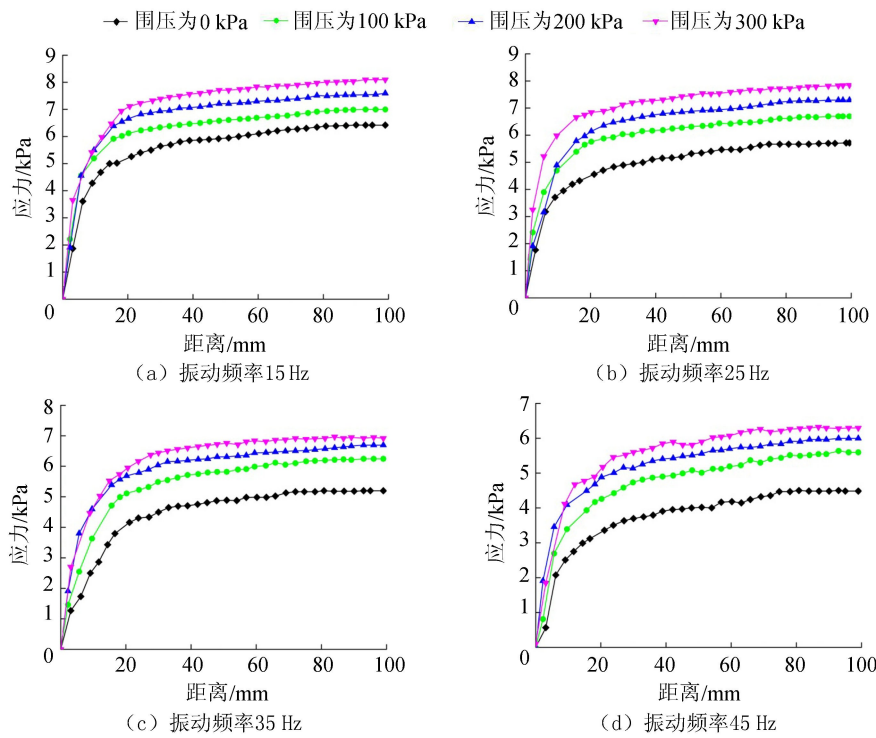


图 6 不同围压条件下应力-距离关系 ($w=43\%$, $v=48\text{ mm/min}$)

Fig. 6 Relationship between stress and displacement under different confining pressures ($w=43\%$, $v=48\text{ mm/min}$)

由图 6 可以看出,在含水率不变的情况下,拖球应力随着围压的增大而增大,说明围压存在会抑制局部振动所引起的软土流动性增幅。由图 6(a)可知,在 15 Hz 的振动频率下小球所受应力随着围压的增大呈均匀增加趋势。说明低频振动条件下,围压的增加对软黏土流动特性影响明显。当振动频率增加至 25 Hz 时(图 6(b)),应力随着围压的增加而均匀增加的趋势不再明显。从图 6(c)(d)应力-距离关系曲线可以看出,在高频振动条件下,随着围压的增加,拖球所受应力较 0 kPa 时有明显增加,但有压情况的应力曲线趋于重合,拖球所受应力趋于稳定。根据这种现象可以认为,围压的增加可以提高土体抵抗外界破坏的能力,抑制土体的流动性,但是在高频振动频率下,继续增加围压对土体流动性的抑制效果不明显。这说明,在高频振动条件下,地下软黏土的力学性质趋于稳定,隧道埋深变化对软黏土流体力学性质影响不大。但是否所有埋深的土都会表现出相似的现象,在 0 kPa 和 100 kPa 之间是否存在一个影响的围压临界值,还需做进一步的细化试验研究。

3 结 论

- a. 在试验测定范围内,软黏土的流动性随着含水率的增大而增大,但是当含水率达到一定程度,土体流动性的增幅随着含水率的继续升高变得不再显著。表明高含水率软土具有一定的类流体特性,从流体力学角度研究其力学性质变化具有可行性。
- b. 在含水率不变的情况下,软黏土流动性随着振动频率的升高而增强,随着围压的增大而减弱。围压和振动频率对土体流动性的综合作用效果主要表现在 2 个方面:在高振动频率条件下,围压的增加对软土的流动特性影响不大;在高围压条件下,只有当振动频率超过临界值时,其对软土流动性的促进作用才会继续显现。
- c. 地下水在地铁隧道周围聚集,隧道周围的软黏土表现出流体性质,隧道在这样的土体中不断变形进而导致事故。在实际工程建设中,应尽量避免让地铁隧道穿过含水率较高的软弱土层,对于无法避过的区段,应注意铺设排水设施。同时,还可采取浮置板道床以及安装轨道减振器等方式尽量减小列车运行所引起的环境振动,从而减少隧道沉降,保证行车安全。

参考文献:

- [1] 刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通荷载下路基土的动力学行为研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 248-255. (LIU Xuezhu, CHEN Guoxing. Advances in researches on mechanical behavior of subgrade soils under repeated-load of high-speed track vehicles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 248-255. (in Chinese))
- [2] NG C W W, LIU Guobin, LI Qing. Investigation of the long-term tunnel settlement mechanisms of the first metro line in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6): 674-684.
- [3] 狄宏规, 周顺华, 宫全美, 等. 软土地区地铁隧道不均匀沉降特征及分区控制[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊2): 74-79. (DI Honggui, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Differential settlement of metro tunnels and its zonal control in soft deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup2): 74-79. (in Chinese))
- [4] 薛阔, 王立娜, 翟翹飞, 等. 地铁列车荷载引起隧道基底长期沉降研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 47-51. (XUE Kuo, WANG Lina, ZHAI Chifei, et al. Analysis of long-term settlement of tunnel foundation induced by metro train load[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2018, 40(5): 47-51. (in Chinese))
- [5] 周检平, 陈页开, 匡月青, 等. 地铁列车移动荷载作用下饱和软黏土地基动力响应及长期累积变形[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(22): 137-143. (ZHOU Jianping, CHEN Yekai, KUANG Yueqing, et al. Dynamic response and long-term accumulation deformation of saturated soft clay under repeated load of subway trains[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(22): 137-143. (in Chinese))
- [6] 王铁生, 张利平, 华锡生, 等. 隧道地表沉降预测的时变参数灰序模型 TGM-AR[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 655-658. (WANG Tiesheng, ZHANG Liping, HUA Xisheng, et al. Time-dependent parameter gray model TGM-AR for prediction of surface settlement of tunnels[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(6): 655-658. (in Chinese))
- [7] 高广运, 陈娟, 梁婷. 地铁循环荷载作用下上海软土地基长期沉降计算[J]. 中国科技论文, 2018, 13(1): 6-11. (GAO Guangyun, CHEN Juan, LIANG Ting. Long-term settlement of soft soil foundation under metro cyclic loading in Shanghai[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(1): 6-11. (in Chinese))
- [8] 郭林, 蔡袁强, 谷川, 等. 循环荷载下软黏土回弹和累积变形特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(12): 2111-2117. (GUO Lin, CAI Yuanqiang, GU Chuan, et al. Resilient and permanent strain behavior of soft clay under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(12): 2111-2117. (in Chinese))
- [9] 闫春岭, 张书石, 李阳阳, 等. 地铁荷载下隧道周围粉性土变形的 2^2 因子设计[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 1012-1017. (YAN Chunling, ZHANG Shushi, LI Yangyang, et al. 2^2 factorial design for deformation of silty soil around tunnel under subway loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1012-1017. (in Chinese))
- [10] 冯斌. 循环荷载下宁波软黏土的动力特性及其微观结构研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [11] 黄雨, 毛无为. 液化后土体的流态化特性研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 501-506. (HUANG Yu, MAO Wuwei. State of art of fluidization behavior of post-liquefied soils[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(4): 501-506. (in Chinese))
- [12] ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, YANG Aiwu, et al. Thixotropic mechanism of clay: a microstructural investigation[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(1): 23-35.
- [13] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator[J]. Landslides, 2004, 1(4): 277-288.
- [14] 朱晓冬. 基于流体力学方法的边坡液化流滑特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [15] JOHNSON A M. Mobilization of debris flows[J]. Zeitschrift fur Geomorphologie (Annals of Geomorphology), 1970, 9(Sup): 168-186.
- [16] WANG Fawu, SASSA K, WANG Gonghui. Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan[J]. Engineering Geology, 2002, 63(1/2): 169-185.
- [17] 陈育民, 刘汉龙, 邵国建, 等. 砂土液化及液化后流动特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1408-1413. (CHEN Yumin, LIU Hanlong, SHAO Guojian, et al. Laboratory tests on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1408-1413. (in Chinese))
- [18] 张曦, 唐益群, 周念清, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 85-88. (ZHANG Xi, TANG Yiqun, ZHOU Nianqing, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 85-88. (in Chinese))

[19] TANG Yiqun, CUI Zhendong, ZHANG Xi, et al. Dynamic response and pore pressure model of the saturated soft clay around the tunnel under vibration loading of Shanghai subway[J]. Engineering Geology, 2008, 98(3/4): 126-132.

[20] 严涛, 肖新标, 金学松, 等. 地铁列车运行引起的环境振动三维数值分析[J]. 铁道建筑, 2010(7): 67-69, 112. (YAN Tao, XIAO Xinbiao, JIN Xuesong, et al. Three-dimensional numerical analysis of environment vibration induced by metro train operating[J]. Railway Engineering, 2010(7): 67-69, 112. (in Chinese))

[21] WANG Liping, ZHANG Ga. Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions[J]. Landslides, 2014, 11(2): 213-223.

[22] 陈育民, 周云东. 基于流体力学方法的砂土液化后研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 418-421. (CHEN Yumin, ZHOU Yundong. Advances in sand post-liquefaction research based on fluid machanics method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(4): 418-421. (in Chinese))

[23] CHO Y I, HARTNETT J P. The falling ball viscometer: a new instrument for viscoelastic fluids[J]. Letters in Heat and Mass Transfer, 1979, 6(4): 335-342.

[24] 毕伟, 张楠, 庞翠平, 等. 地铁运行引起邻近建筑物振动的预测与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(11): 29-33. (BI Wei, ZHANG Nan, PANG Cuiping, et al. Prediction and analysis of adjacent building vibration caused by metro operation [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(11): 29-33. (in Chinese))

[25] 张启乐, 刘林芽, 李纪阳. 地铁列车运行诱发地面振动的三维数值分析[J]. 铁道建筑, 2015(7): 61-64. (ZHANG Qile, LIU Linya, LI Jiyang. Three dimensional numerical analysis of ground surface vibration induced by metro train running [J]. Railway Engineering, 2015(7): 61-64. (in Chinese))

[26] 谭新根. 南京地铁软土地层盾构施工沉降控制[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(2): 98-102. (TAN Xingen. Control of shield tunneling subsidence in soft soil of Nanjing subway project [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(2): 98-102. (in Chinese))

[27] 胡华. 含水率对软土流变参数的影响特性及其机理分析[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(3): 134-136. (HU Hua. The influencing characteristics and mechanism of water content on rheological parameters of soft-soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(3): 134-136. (in Chinese))

[28] 唐益群, 张曦, 周念清, 等. 地铁振动荷载作用下饱和软黏土性状微观研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 626-630. (TANG Yiqun, ZHANG Xi, ZHOU Nianqing, et al. Microscopic study of saturated soft clay's behavior under cyclic loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(5): 626-630. (in Chinese))

[29] 蒲黍條, 叶斌, 王海诚, 等. 地铁循环荷载作用下隧道周边软黏土动力响应特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 19-26. (PU Shutao, YE Bin, WANG Haicheng, et al. Dynamic response characteristics of soft clay around tunnel under subway cyclic loads[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, 38(2): 19-26. (in Chinese))

[30] 喻军, 李元海, 王克忠. 深部隧道围岩分区破裂颗粒流模拟研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 759-766. (YU Jun, LI Yuanhai, WANG Kezhong. Particle flow simulation of zonal disintegration in deep tunnel surrounding rock[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 759-766. (in Chinese))

[31] 唐强森, 刘涛. 近距离上层隧道施工对下层隧道的扰动影响[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 591-596. (TANG Qiangsen, LIU Tao. Influence of construction disturbance from close upper tunnel on lower tunnel [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 591-596. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-18 编辑:高建群)