

文章编号:1006-2467(2022)04-0454-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.036

地铁变频荷载循环作用下饱和软黏土累积塑性变形

李泽垚¹, 周洁¹, 田万君², 裴万胜³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100054;
3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 地铁在地铁站附近的加减速运动会对地基土产生一定的影响. 土体经过倾斜削样后使用动三轴进行不排水动力测试以研究地铁进出站作用下进出站距离、加速度、动应力幅值及固结围压对饱和软黏土累积塑性变形的影响. 结果表明:进出站变频荷载循环作用下软黏土累积塑性应变曲线可大致划分为爆发增长-较快增长-逐渐稳定 3 个阶段. 距地铁站越近、动应力幅值越大、固结围压越小, 土体进入逐渐稳定阶段所需的进出站次数越少, 土体竖向变形越大, 剪切变形越小. 进出站加速度值越大, 土体竖向变形越小、剪切变形越大. 对于实际工程而言, 地铁运营初期, 进站区间土体的沉降变形、出站区间土体水平位移、较大加速度工况下的水平位移、较小加速度工况下的沉降、高动应力幅值的工况及低固结应力的土体区域是工程地质灾害防治的重点.

关键词: 地下工程; 变频循环荷载; 加速度; 累积变形; 不排水动三轴试验; 软黏土

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

Accumulative Plastic Deformation of Saturated Soft Clay Under Variable Frequency Cyclic Loading for Subway

LI Zeyao¹, ZHOU Jie¹, TIAN Wanjun², PEI Wansheng³

(1. Department of Geotechnical Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 100054, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The acceleration and deceleration movement of the metro near the metro station have a certain impact on the foundation soil. After the soil has been sloped and sampled, a dynamic three-axis undrained dynamic test is conducted to study the influence of the distance of the metro station, acceleration, dynamic stress amplitude, and consolidation confining pressure on the cumulative plastic deformation of saturated soft clay. The results show that the cumulative plastic strain curve of soft clay at variable frequency cyclic loading in and out of the station can be roughly divided into three stages: explosive growth, rapid growth, and gradual stability. The increase in the distance from the metro station, the increase in the amplitude of the dynamic stress, and the decrease in the consolidation confining pressure can reduce the number of entry and exit times required for the soil to enter the gradual stabilization phase, increase the vertical deformation of the soil, and reduce the shear deformation. As the acceleration value in and out of the

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(41702299), 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201916)

作者简介: 李泽垚(1994-), 男, 河北省石家庄市人, 博士生, 从事地铁隧道及联络通道施工等方面的研究工作.

通信作者: 周洁, 女, 副教授; E-mail: 15050@tongji.edu.cn.

station increases, the vertical deformation of the soil decreases but the shear deformation increases. For the actual project, the initial stage of metro operation, the settlement deformation of the soil in the inbound section, the horizontal displacement of the soil in the outbound section, the horizontal displacement under the larger acceleration condition, the settlement under the smaller acceleration condition, the high dynamic stress amplitude, and the soil area with a low consolidation stress are the focus of engineering geological disaster prevention.

Key words: underground engineering; variable frequency cyclic load; acceleration; cumulative deformation; undrained dynamic triaxial test; soft clay

地铁运行的线速度并非恒定不变,列车在车站附近具有一个减速-停站-加速的过程.地铁进出站时的变速运动不仅会产生水平应力,还会引起变频循环荷载,从而给地基土的变形产生一定的影响.

国内外针对地铁变速移动的振动问题的研究有:Michaltsos 理论^[1]分析了单双轴变速荷载作用下简支梁的动力响应.卢正等^[2]采用半解析方法求得变速移动荷载下黏弹性地基板的振动响应.张楠等^[3]采用车辆结构耦合的方法研究了制动力作用下的结构动力响应.张谦等^[4]对进站时引起的柱面纵向振动和振源特性进行解析分析,得到了列车在进站方向上振动响应的变化规律.He^[5]使用数值模拟的方式对不同加减速下移动地铁轨道振动进行了模拟.张谦等^[6]使用柱面波解析法研究出、进站两种情况的波动差异,并分析了地铁列车运行加速度和速度、土层模量、隧道尺寸及埋深等因素对振动反应的影响.陈文化等^[7]采用解析法分析了地铁进、出站时引起土层振动差异性和空间振动特性.可以看出,针

对地铁变速移动的振动问题大多采用解析或数值模拟的方法对轨道或地基动力响应进行研究,而对地铁站附近地基土累积应变的研究相对较少.

地铁站附近区域也是地铁工程防治的重点,研究地铁站附近的地基土的累积塑性变形特性有助于对该区域内轨道基础变形的控制,确保地铁运行安全^[8].为此,本文通过对土体进行倾斜削样并配合使用 GDS 动三轴(型号 DNYTTS, GDS 仪器设备有限公司)进行不排水动力测试的方法来模拟地铁进出站荷载,对不同进出站距离、进出站加速度、动应力幅值及固结围压对南京饱及软黏土累积塑性变形的影响进行研究.

1 荷载工况

以长江三角洲地区地铁运行研究对象,南京地铁 3# 线运行特征如图 1 所示.图中: a 为地铁列车进出站加速度; v 为地铁列车进出站速度; T 为地铁列车运行时间; L 为地铁运行里程.

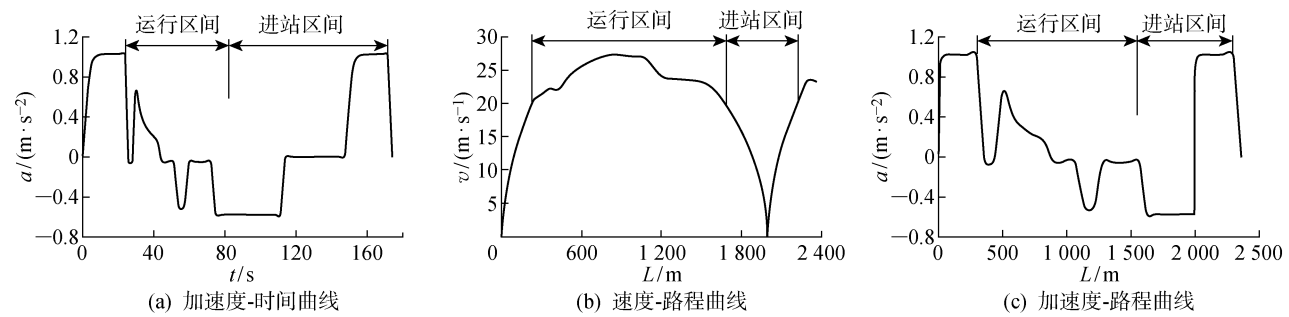


图1 南京地铁运行速度曲线

Fig.1 Operation speed curve of Nanjing Metro

地铁列车在一个站间的运行状态主要有“恒定加速-惰行-变力矩牵引-小级位制动-惰行-制动-停车”7个阶段.国内普遍地铁出站加速度为 $0.83 \sim 1.03 \text{ m/s}^2$,进站减速度为 $0.50 \sim 0.60 \text{ m/s}^2$ ^[6].列车在临近地铁站的区域,列车大致处于一个恒定的

加速或恒定减速的过程.可以将这个稳定加减速运行过程所影响到的区域称为地铁进出站区间.

国产地铁主要有3种型号,南京地铁以国产地铁C型车为主,6节车厢编成一趟班组,其列车尺寸如图2所示.地铁列车每次进出站时,不仅会因其自

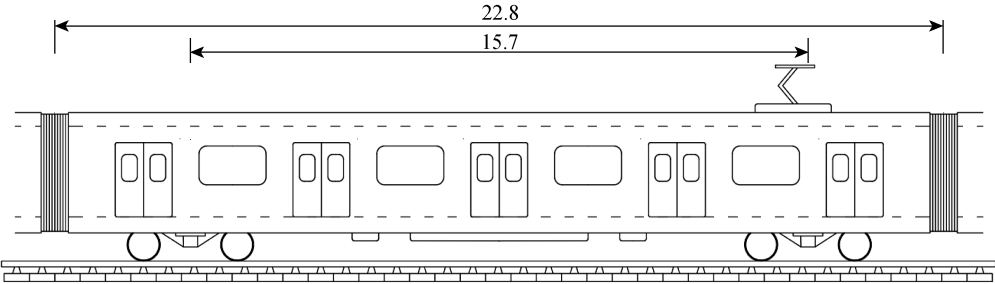


图 2 国产地铁 C 型车尺寸参数(m)
Fig. 2 Dimensional parameters of domestic metro type C (m)

身的 12 组车轮挤压枕木从而引发相同次数的变频竖向循环荷载,还会因其自身的加速度给土体施加水平切应力,将土体经历一趟列车进出站所产生的规律性的变频循环荷载定义为经历 1 次进出站振动循环.

2 试验

2.1 试验材料

使用南京市原状饱和粉质黏土进行试验,该土

层为河漫滩相沉积,是一种含水率高、压缩性高、孔隙率大、强度低、灵敏度高的饱和软黏土土层. 试验所用的原状软黏土取样于南京市鼓楼区上元门地铁站附近,取样深度为 10 m,采用钻孔取样的方式进行. 钻孔采用 XY-1 型百米油压钻机进行施工,110 mm 钻具钻进,软黏土层设置井管护壁,护臂管管径 110 mm,长度 3.0~5.0 m. 饱和软黏土使用直径 85 mm 的薄壁取土器通过静压的方法进行取样. 原状饱和软黏土的岩土工程性质如表 1 所示.

表 1 饱和软黏土的岩土工程性质
Tab. 1 Geotechnical properties of saturated soft clay

重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/ %	孔隙比	压缩系数/ MPa^{-1}	内摩擦 角/ $(^\circ)$	黏聚力/ kPa	渗透系数 $\times 10^6 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		液限/%	塑限/%	动泊 松比	波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
						水平	竖直				压缩	剪切
18.4	35.9	1.04	0.63	7.6	14.0	5.09	3.61	36.1	21.6	0.439	360	120

2.2 试验方案

动三轴的试验研究^[9]大多使土样在竖直方向上进行受荷振动,这种土体的受荷形式不能有效地模拟地铁进出站加速度产生的水平切应力. 根据荷载工况对土体进行倾斜切削制样,试验时可以通过对试样主应力的控制,以等效土体竖直方向上的压应力与水平方向上的切应力,从而有效地模拟土体在地铁进出站荷载下的应力状态. 试验通过对土体进行倾斜削样,并配合使用 GDS 动三轴系统进行不排水动力测试以模拟地铁进出站荷载工况. 地铁运动引发竖向应力幅值 σ_d 与水平切应力 τ_d 应满足:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_d} = \frac{a}{g} \tag{1}$$

式中: g 为重力加速度.

进出站时地铁的运动状态直接影响土体受荷形式. 根据现场监测数据和理论计算结果^[8-10],使用变频组合正弦波类型的曲线可有效模拟地铁进出站时

引发的地铁变频振动荷载. 由于进出站区间内地铁列车大致处于一个恒定的加速或恒定减速的运动状态,则进出站区间某时刻列车车头距停站点的距离为

$$x = \frac{1}{2}at^2 \tag{2}$$

式中: x 为列车车头距停站点的距离; t 为出站区间地铁开出运行时间或进站区间地铁距停站还需的时间差.

如图 2 所示,每一节车厢前后都对称分布着两个列车车轮组. 一趟列车的荷载曲线可分解为 3 种类型的正弦式荷载的重复叠加曲线:① 第 1 节/最后一节车厢不连续车轮组的荷载类型;② 同一节车厢前后两轮组之间的荷载类型;③ 前一节车厢后轮组与后一节车厢前轮组之间的荷载类型. 根据车厢的尺寸,可以计算得到该点在相应荷载区间内的相对位置 x' :

$$x' = \begin{cases} \text{mod}(x - x_0, l_m + l_b) + \frac{l_b}{2}, & \text{mod}(x - x_0, l_m + l_b) < \frac{l_b}{2} \\ \text{mod}(x - x_0, l_m + l_b) - l_b, & \frac{l_b}{2} \leq \text{mod}(x - x_0, l_m + l_b) < \frac{l_b}{2} + l_m \\ \text{mod}(x - x_0, l_m + l_b) - \frac{l_b}{2} - l_m, & \text{mod}(x - x_0, l_m + l_b) \geq \frac{l_b}{2} + l_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_0 为该点距停站点的距离; l_m 为同一节车厢前后两组车轮之间的间距, 对于国产 C 型车, $l_m = 15.7 \text{ m}$; l_b 为同一节车厢前后两组车轮之间的间距, 国产 C 型车 $l_b = 7.1 \text{ m}$ 。

倘若某时刻该点处于同一车厢前后 2 组车轮之间, 荷载曲线模拟为

$$\sigma = \sigma_d \cos(2\pi x'/l_m) + \sigma_c \quad (4)$$

式中: σ 为某时刻的列车荷载动应力值; σ_c 为地铁荷载的附加动应力基准值。

若某时刻该点处于前一节车厢后轮组与后一节车厢前车轮组之间时, 荷载曲线模拟为

$$\sigma = \sigma'_d \cos(2\pi x'/l_b) + \sigma_c + \sigma_d - \sigma'_d/2 \quad (5)$$

式中: σ'_d 为相邻车厢间振动荷载的附加动应力幅值, 实测表明 $\sigma'_d \approx \sigma_d/7^{[10]}$ 。

此外, 列车头节车厢与最后一节车厢不具有相邻节车厢, 荷载曲线模拟为

$$\sigma = (\sigma_d + \sigma_c) \sin\left(\frac{2\pi x'}{l_a}\right) \quad (6)$$

式中: l_a 为列车驶入或离开的影响区间长度, 本文近似采用 $l_a = l_m$ 来模拟。

动三轴试验控制地铁荷载影响的轴压增量 $\Delta\sigma_1$ 、围压增量 $\Delta\sigma_3$ 及试样的斜削角度 θ (见图 3) 应满足:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau_d^2} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau_d^2} \quad (8)$$

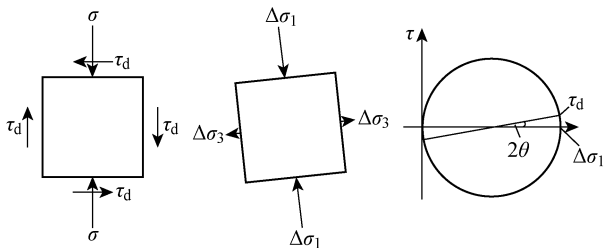


图3 进出站荷载下土体的应力状态

Fig. 3 Soil stress state at the load in and out the station

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{2\tau_d}{\sigma}\right) \quad (9)$$

制样时使用倾斜削样装置严格控制倾斜角度, 削样装置、削样操作示意如图 4 所示。

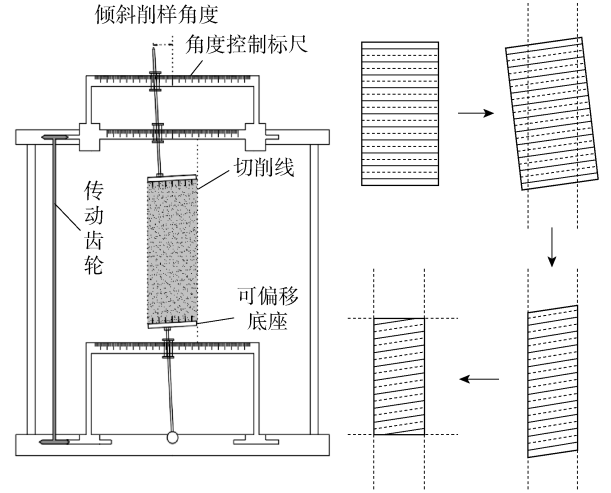


图4 制样示意图

Fig. 4 Diagram of sample preparation

南京市隧道的埋深为 10~15 m, 地下水的埋深为 0.5~1.2 m, 地铁荷载竖向应力基准值大约为 30 kPa, 竖向荷载的应力幅值为 10~20 kPa^[10]。由于进出站加速度相较于重力加速度要小得多, 这就使得地铁列车荷载引起附加应力的 $\Delta\sigma_3 < 1\% \Delta\sigma_1$ 。试验忽略对地铁列车荷载引起的附加围压应力 $\Delta\sigma_3$ 的控制, 采用单向激振等压固结的方式进行试验。本文选取围压 250 kPa、反压 125 kPa、列车荷载竖向应力基准值 30 kPa、列车荷载竖向应力幅值 15 kPa 的工况为基准试验组, 设计试验方案对距地铁站距离 x 、进出站加速度 a 、动应力幅值 σ_d 、固结围压 p' 等对软黏土累积变形特性的影响进行探究, 试验方案如表 2 所示, A 试验组设计为地铁进站荷载工况, B 试验组为地铁出站荷载工况。

以 B4~B6 为例, 其动三轴轴向附加应力时程曲线如图 5 所示。

最后采用差分的方法将一趟列车的模拟荷载差分成 0.01 s 间隔的数据集, 并将一趟列车的所有差分结果作为一组荷载振动输入动三轴的自定义荷载模块, 从而完成对变频荷载的控制。

表 2 软黏土累积变形试验方案
Tab. 2 Test plan of accumulated deformation of soft clay

试样编号	固结围压/kPa	进出站加速度/(m·s ⁻²)	列车竖向动应力/kPa	进出站距离/m	试验加载动应力/kPa	削样角度/(°)
A1	125	−0.50	30±15	+50	30.08±15.04	2.91
A2	125	−0.50	30±15	+150	30.08±15.04	2.91
A3	125	−0.50	30±15	+250	30.08±15.04	2.91
A4	125	−0.55	30±15	+50	30.09±15.05	3.20
A5	125	−0.55	30±15	+150	30.09±15.05	3.20
A6	125	−0.55	30±15	+250	30.09±15.05	3.20
A7	125	−0.60	30±15	+50	30.11±15.06	3.49
A8	125	−0.60	30±15	+150	30.11±15.06	3.49
A9	125	−0.60	30±15	+250	30.11±15.06	3.49
A10	100	−0.55	30±10	+50	30.09±10.03	3.20
A11	100	−0.55	30±10	+150	30.09±10.03	3.20
A12	100	−0.55	30±10	+250	30.09±10.03	3.20
A13	150	−0.55	30±20	+50	30.09±20.06	3.20
A14	150	−0.55	30±20	+150	30.09±20.06	3.20
A15	150	−0.55	30±20	+250	30.09±20.06	3.20
A16	100	−0.55	30±15	+50	30.09±15.05	3.20
A17	100	−0.55	30±15	+150	30.09±15.05	3.20
A18	100	−0.55	30±15	+250	30.09±15.05	3.20
A19	150	−0.55	30±15	+50	30.09±15.05	3.20
A20	150	−0.55	30±15	+150	30.09±15.05	3.20
A21	150	−0.55	30±15	+250	30.09±15.05	3.20
B1	125	+0.85	30±15	+50	30.22±15.11	4.92
B2	125	+0.85	30±15	+150	30.22±15.11	4.92
B3	125	+0.85	30±15	+250	30.22±15.11	4.92
B4	125	+0.90	30±15	+50	30.25±15.13	5.20
B5	125	+0.90	30±15	+150	30.25±15.13	5.20
B6	125	+0.90	30±15	+250	30.25±15.13	5.20
B7	125	+0.95	30±15	+50	30.28±15.14	5.49
B8	125	+0.95	30±15	+150	30.28±15.14	5.49
B9	125	+0.95	30±15	+250	30.28±15.14	5.49
B10	125	+1.00	30±15	+50	30.31±15.15	5.77
B11	125	+1.00	30±15	+150	30.31±15.15	5.77
B12	125	+1.00	30±15	+250	30.31±15.15	5.77
B13	100	+0.90	30±10	+50	30.25±10.08	5.20
B14	100	+0.90	30±10	+150	30.25±10.08	5.20
B15	100	+0.90	30±10	+250	30.25±10.08	5.20
B16	150	+0.90	30±20	+50	30.25±20.17	5.20
B17	150	+0.90	30±20	+150	30.25±20.17	5.20
B18	150	+0.90	30±20	+250	30.25±20.17	5.20
B19	100	+0.90	30±15	+50	30.25±15.13	5.20
B20	100	+0.90	30±15	+150	30.25±15.13	5.20
B21	100	+0.90	30±15	+250	30.25±15.13	5.20
B22	150	+0.90	30±15	+50	30.25±15.13	5.20
B23	150	+0.90	30±15	+150	30.25±15.13	5.20
B24	150	+0.90	30±15	+250	30.25±15.13	5.20

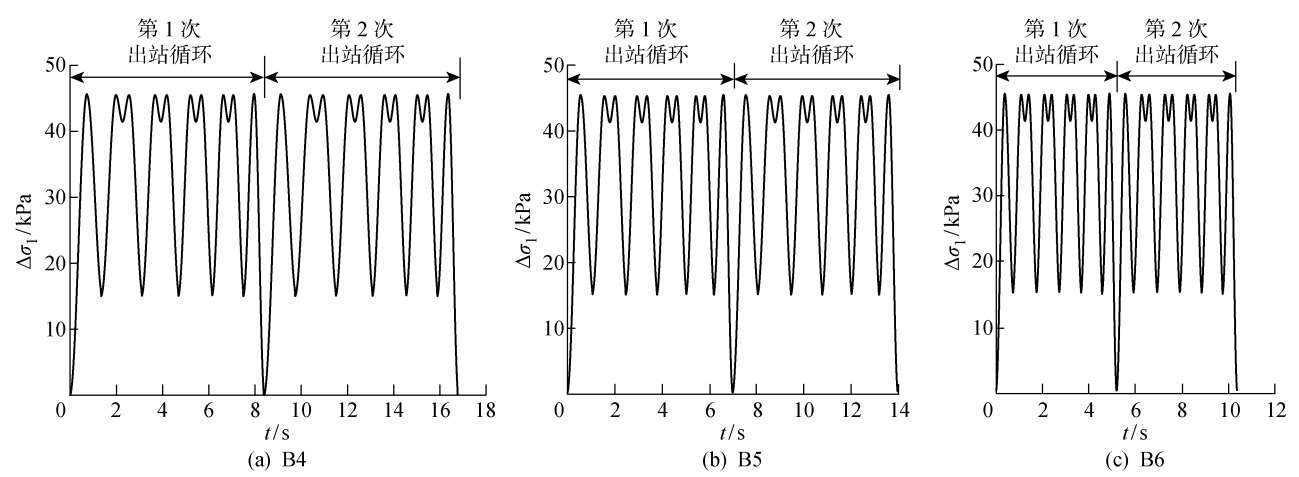


图 5 动三轴轴向附加应力时程曲线
Fig. 5 Time history curves of dynamic triaxial axial stress

2.3 试验过程

首先将土样倾斜削样,控制土体倾斜角度并制成直径 38 mm、高 72 mm 的三轴试样.然后将试样安装在三轴压力室内使用反压进行饱和,当孔隙水压力系数 B 达到 0.98 时,饱和完成^[11-12].试样等压固结 24 h 后,施加轴向动荷载,试样经历进出站循环 5 000 次或轴向应变达到 15%时认为试样破坏时,试验结束.

3 试验结果

3.1 进出站距离对累积塑性变形的影响

进出站区间内不同位置地铁运行速度不同,这使得软黏土受到的振动荷载形式不同,从而进一步影响土体的变形特性.通过动三轴试验结果,可以还原出地铁进出站荷载下引发的土体竖向应变和切应变示意图(见图 6,图中 ϵ_3 为最小应变; γ_d 为地铁进出站荷载下在水平面上的切应变):

$$\epsilon_d = \frac{\epsilon_1 - \nu\epsilon_1}{2} + \frac{\epsilon_1 + \nu\epsilon_1}{2}\cos 2\theta \tag{10}$$

$$\gamma = (\epsilon_1 + \nu\epsilon_1)\sin 2\theta \tag{11}$$

式中: ϵ_1 为动三轴测试时试样的轴向应变; ν 为土体的动泊松比,可以由工程场地波速测试得到.

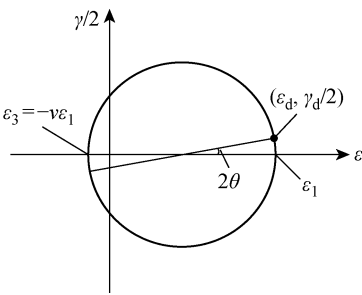


图 6 进出站荷载下土体的应变状态
Fig. 6 Soil strain state at the load in and out the station

图 7(a)所示为不同进出站距离下软黏土累积塑性竖向变形与进出站次数(N)的关系曲线,图 7(b)所示为不同进出站距离下软黏土累积塑性剪切变形与进出站次数的关系曲线.由图 7 可知,不同进出站距离,地铁进出站荷载下软黏土累积塑性应变

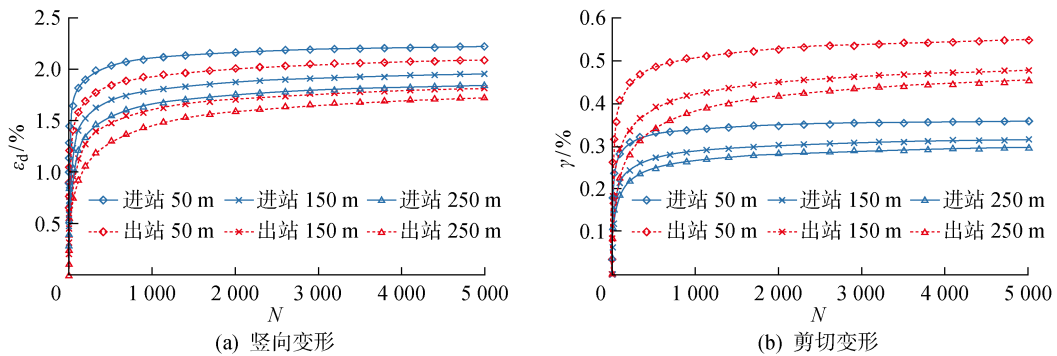


图 7 累积塑性应变时程曲线
Fig. 7 Time history curves of cumulative plastic strain

曲线特征都大致相同,应变曲线大致可划分为 3 个发展阶段:① 初始阶段.应变爆发式增长,在短时间内便产生了较多的塑性应变累积;② 中期阶段.塑性应变增长速率随进出站振动循环次数的增多而降低;③ 稳定阶段.当进出站振动循环次数到达 600~1 200 次时,土体进入应变稳定阶段,该阶段土体累积塑性应变变化较小.同时,距地铁站越近,土体进入逐渐稳定阶段所经历的进出站次数越少.进站区间的土体能更早进入逐渐稳定阶段,特别是切应变的发展.这说明,进出站区间内的土体,不论是竖向应变还是剪切变形在地铁运行初期增长速率最大.地铁运行初期是工程地质灾害防治的重点.随着振动荷载的不断施加,土体逐渐趋于密实,应变速率减小.

不同进出站距离,软黏土在 5 000 次地铁进出站变频荷载循环作用下的累积塑性应变 ϵ 如图 8 所示.由图 8 可知,进站区间的竖向应变普遍大于出站区间,而切应变普遍小于出站区间.距地铁站距离越近,土体累积塑性变形越大.对于实际工程而言,距

地铁站较远区域的土体变形重点防治阶段持续的时间长.距地铁站较近的区域土体最终变形量大.同时,工程应更加注重进站区间的灾害防治.

产生上述现象的原因是:距离地铁站越近,地铁平均运行速度越慢,运行速度慢的列车全车经过某点所需的时间更长.这就使得相同条件下距地铁站更近的列车荷载对土体产生的冲量更大.冲量大的工况土体应变速率更快,也就造成了土体前期变形发展地更迅猛.同时,对于软黏土这种黏塑性材料来说,冲量可以致使塑性变形增大.另外,地铁运行至距地铁站 40~70 m 时,其产生的低频振动恰巧与软黏土自身固有频率(1.3~1.4 Hz)相吻合^[12],列车荷载与土体会产生微小的共振.共振效应在一定程度上加剧了距地铁站 50 m 左右的土体变形.综合以上原因,最终产生了距地铁站近的土体累积塑性变形量较大的现象.

3.2 进出站加速度对累积塑性变形的影响

不同进出站加速度条件下,软黏土在 5 000 次进出站变频荷载循环作用下的累积塑性竖向应变值如图 9(a)所示.由图 9(a)可知,加速度大的工况产生的累积塑性竖向变形值更大.加速度越小,其对竖向变形的影响程度越明显.不同进出站加速度条件下,软黏土在 5 000 次进出站变频荷载循环作用下的累积塑性切应变如图 9(b)所示,易知,加速度越大,土体剪切变形越大.由于地铁进站“减速度值”大于出站“加速度值”,这也表明进站区间的竖向变形值大于出站区间,剪切变形值小于出站区间.

产生上述现象的原因是:地铁进出站加速度越大,相同位置地铁运行速度越快.高速运行的列车所产生的高频振动使得土体竖向变形更大.对于土体

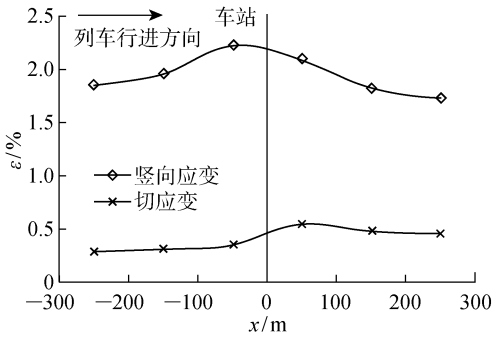


图 8 进出站距离对累积塑性变形的影响
Fig. 8 Influence of x on cumulative deformation

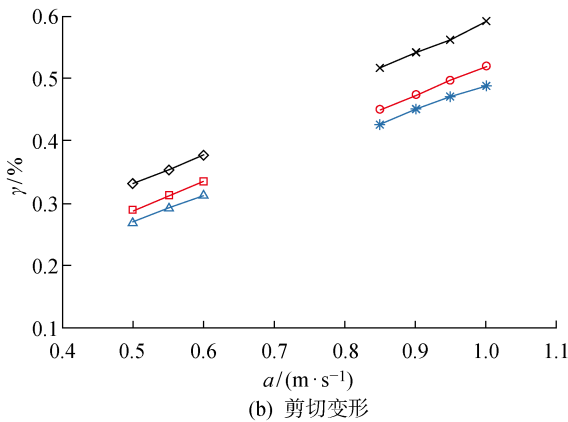
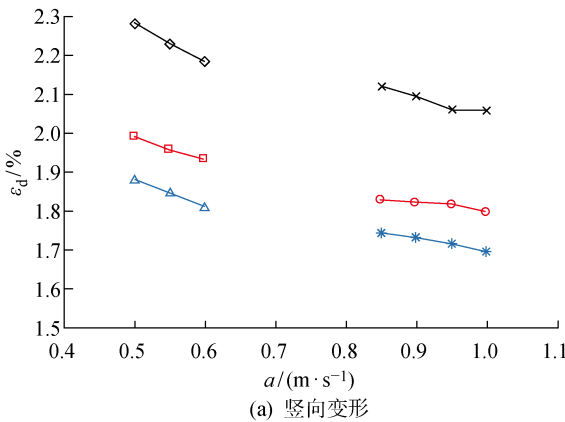


图 9 进出站加速度对累积塑性变形的影响
Fig. 9 Influence of a on accumulated deformation

剪切应变来说,地铁加减速所产生的切应力对其影响更直接、影响程度更深. 试验结果也表明土体的剪切变形与地铁加速度基本具有正相关关系.

3.3 动应力幅值对累积塑性变形的影响

不同动应力幅值条件下,软黏土在 5 000 次进

出站变频荷载循环作用下的累积塑性竖向应变值、切应变值如图 10 所示. 由图 10 可知,在进出站区间内,荷载的动应力幅值越大,土体的累积塑性竖向变形越大,累积塑性剪切变形也越大. 即较高的动应力幅值更易使土体发生更大的塑性变形.

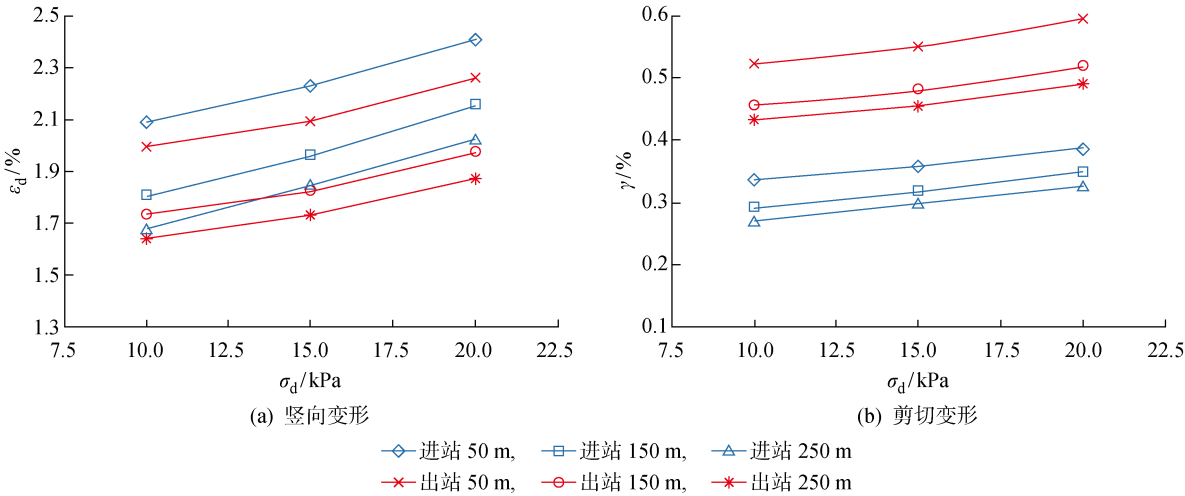


图 10 动应力幅值对累积塑性变形的影响
Fig. 10 Influence of σ_d on accumulated plastic deformation

3.4 围压对累积变形的影响

不同固结围压下软黏土在 5 000 次进出站变频荷载循环作用下的累积塑性竖向应变、切应变如图

11 所示. 结果表明,土体固结围压越大,土体的累积塑性竖向变形越小,剪切变形也越小. 固结应力大的土体抵抗变形的能力强.

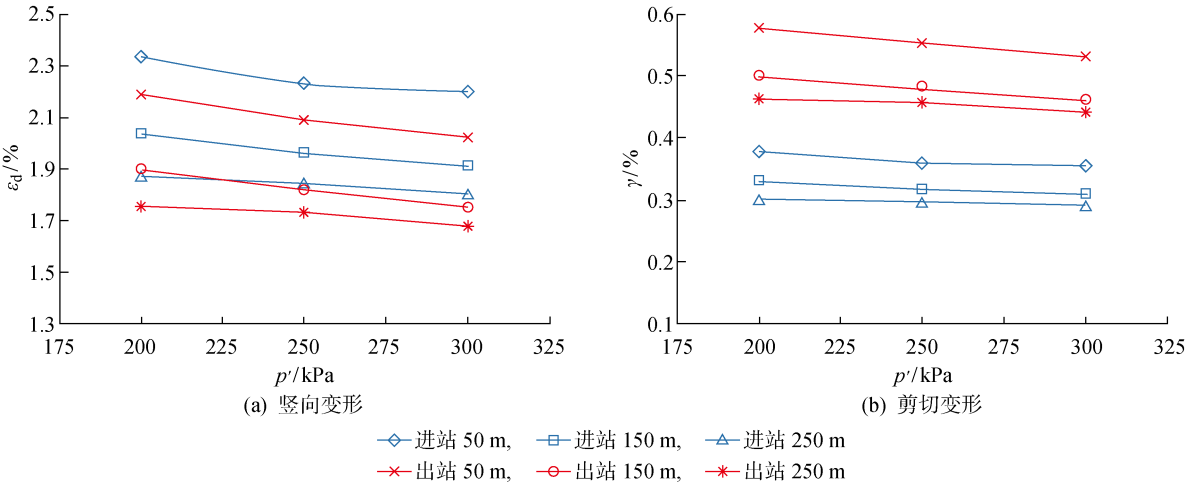


图 11 固结围压对累积塑性变形的影响
Fig. 11 Influence of p' on accumulated plastic deformation

4 累积塑性应变模型

双曲指数模型^[13]是一种针对长江三角洲地区软黏土在循环荷载下长期变形的预测模型,其累积塑性应变与循环次数的关系为

式中: ϵ_p 为累积塑性应变; n 为循环振动次数; a 、 b 、 c 分别为表征积累变形速率、第一次循环荷载作用后土体的变形量、土体最终变形量的试验参数.

$$\epsilon_p = \frac{n^c}{a + bn^c} \tag{12}$$

在进出站荷载工况下,将循环振动次数 n 替换为进出站次数 N ,使用双曲指数模型进行拟合,拟合结果如表 3 所示.由表 3 可知,拟合相关系数均在 0.985 以上,拟合效果良好,即双曲指数模型能有效地模拟进出站荷载下软黏土累积塑性变形的发展规律.

表 3 数据模型拟合结果
Tab.3 Fitting results of data model

试样编号	竖向应变				切应变			
	a	b	c	相关系数	a	b	c	相关系数
A2	1.729	0.462	0.441	0.996	17.739	3.252	0.491	0.990
A4	0.964	0.424	0.432	0.996	5.979	2.628	0.432	0.996
A5	2.026	0.467	0.452	0.990	12.566	2.897	0.452	0.996
A6	3.497	0.492	0.502	0.997	21.688	3.053	0.502	0.992
A8	2.606	0.478	0.491	0.997	9.848	2.631	0.441	0.988
A11	2.659	0.488	0.434	0.994	16.489	3.025	0.434	0.996
A14	1.551	0.436	0.472	0.992	10.024	2.754	0.496	0.989
A17	1.922	0.451	0.452	0.994	11.922	2.799	0.452	0.990
A20	2.543	0.482	0.484	0.997	15.775	2.987	0.484	0.992
B2	3.403	0.487	0.476	0.988	13.688	1.960	0.476	0.996
B4	1.307	0.434	0.400	0.995	4.970	1.651	0.400	0.988
B5	3.943	0.489	0.492	0.989	14.988	1.858	0.492	0.987
B6	8.131	0.502	0.551	0.987	30.898	1.908	0.550	0.987
B8	4.182	0.491	0.500	0.993	15.067	1.768	0.500	0.990
B11	5.312	0.493	0.520	0.990	18.194	1.689	0.520	0.990
B14	4.079	0.499	0.464	0.990	15.506	1.897	0.464	0.994
B17	3.327	0.468	0.520	0.993	12.647	1.780	0.520	0.989
B20	3.515	0.481	0.510	0.996	13.362	1.828	0.510	0.990
B23	3.764	0.496	0.461	0.987	14.307	1.886	0.461	0.989

5 结 论

本文通过倾斜制样并使用动三轴对进出站作用下软黏土的累积塑性变形特性进行研究,得到如下结论:

- (1) 进出站变频荷载循环作用下软黏土累积塑性应变曲线可大致划分为爆发增长-较快增长-逐渐稳定 3 个阶段.地铁运营初期土体形变速率较高,是工程地质灾害防治的重点.
- (2) 距地铁站越近,土体进入逐渐稳定阶段所需的进出站次数越少,土体竖向沉降越大,剪切变形越小.距地铁站远的区域土体快速增长阶段持续的时间长,距地铁站近的区域土体最终沉降量大.
- (3) 进出站区间内地铁加(减)速度值越大,土体竖向变形越小、剪切变形越大.进站区间土体沉降变形、出站区间土体水平位移更为明显.
- (4) 地铁荷载动应力幅值越大,土体的累积塑性变形越大.

(5) 进出站区间内土体的固结应力越大,其抵抗荷载变形的能力越强.

参考文献:

[1] MICHALTSOS G T. Dynamic behaviour of a single-span beam subjected to loads moving with variable speeds[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2002, 258(2): 359-372.

[2] 卢正,姚海林,吴莎,等.黏弹性地基板在矩形变速荷载作用下的振动分析[J]. **岩土力学**, 2010, 31(11): 3613-3618.
LU Zheng, YAO Hailin, WU Sha, *et al.* Vibration analysis of a plate on viscoelastic foundation under moving rectangular loads with variable speeds[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3613-3618.

[3] 张楠,夏禾,程潜,等.制动力作用下车辆-车站结构耦合系统分析[J]. **振动与冲击**, 2011, 30(2): 138-143.
ZHANG Nan, XIA He, CHENG Qian, *et al.* Anal-

- ysis method for a vehicle structure coupled system under braking force[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2011, 30(2): 138-143.
- [4] 张谦, 陈文化. 地铁列车进站引起场地柱面纵向振动[J]. **振动工程学报**, 2017, 30(3): 442-448.
- ZHANG Qian, CHEN Wenhua. Cylindrical longitudinal vibration while metro train arriving at station[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2017, 30(3): 442-448.
- [5] HE W. Vertical dynamics of a single-span beam subjected to moving mass-suspended payload system with variable speeds[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2018, 418: 36-54.
- [6] 张谦, 陈文化. 地铁列车出、进站加、减速的轴向激励引起出平面振动[J]. **振动与冲击**, 2016, 35(24): 96-101.
- ZHANG Qian, CHEN Wenhua. Out-of-plane vibration induced by axial excitation while a metro train arriving at or leaving a station[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2016, 35(24): 96-101.
- [7] 陈文化, 张谦. 地铁列车进出站时土层空间振动特性分析[J]. **岩土力学**, 2019, 40(9): 3656-3661.
- CHEN Wenhua, ZHANG Qian. Space vibration of subsoil during metro train arriving at or leaving station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3656-3661.
- [8] 吴威, 李明广, 史玉金, 等. 上海地层长期变形特性及其对基础设施的影响[J]. **上海交通大学学报**, 2018, 52(11): 1429-1436.
- WU Wei, LI Mingguang, SHI Yujin, *et al.* Long-term deformation characteristics of Shanghai soil layer and its influence on infrastructure[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2018, 52(11): 1429-1436.
- [9] 曾宇清, 于卫东, 丁勇, 等. 基于加速度响应的轨道监测研究[J]. **中国铁道科学**, 2004, 25(6): 42-47.
- ZENG Yuqing, YU Weidong, DING Yong, *et al.* Track monitoring based on locomotive acceleration response[J]. **China Railway Science**, 2004, 25(6): 42-47.
- [10] 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.
- [11] 唐益群, 李金章, 李珺. 冻融饱和粉砂动力性能试验[J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2019, 51(2): 76-83.
- TANG Yiqun, LI Jinzhang, LI Jun. Experimental study on dynamic cumulative axial strain performance of artificial frost-thawed saturated silty sand[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2019, 51(2): 76-83.
- [12] 闫春岭, 唐益群, 刘莎. 地铁荷载下饱和软黏土累积变形特性[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2011, 39(7): 978-982.
- YAN Chunling, TANG Yiqun, LIU Sha. Accumulative deformation characteristics of saturated soft clay under subway loading in Shanghai[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2011, 39(7): 978-982.
- [13] 徐杰. 轨道交通荷载作用下地层系统非线性固有频率及宏微观环境振动响应研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.
- XU Jie. Study on the nonlinear natural frequency and macro-micro environmental vibration response of the ground system under the load of rail transit[D]. Shanghai: Tongji University, 2018.

(本文编辑:陈晓燕)