

# 地铁行车荷载作用下粉质黏土累积塑性应变特性

解磊<sup>1</sup>,赵中华<sup>2</sup>,雷勇<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳城市建设学院土木工程系,辽宁 沈阳 110167)

**摘要** 目的 研究地铁行车荷载作用下隧道周围土体变形特性,为城市地下轨道交通工程设计、施工及运营期间的安全稳定评价提供参考.方法 通过室内动三轴试验,探索地铁行车荷载作用下粉质黏土累积塑性应变发展规律,在此基础上,利用数理统计知识计算各因素及因素之间的耦合作用对累积塑性应变的影响率.结果 在相同试验条件下,累积塑性应变随围压增大而减小,随固结比增大而减小,随动应力幅值增大而增大,随频率增大而减小,随振动次数增大而增大.结论 单因素中动应力幅值对累积塑性应变的影响最大,其次是围压和频率,最后是振动次数;围压与振动次数、频率与振动次数之间的耦合作用对累积塑性应变的影响可忽略不计;因素之间的耦合作用在一定条件下比单因素对累积塑性应变的影响效果要显著.

**关键词** 地铁行车荷载;累积塑性应变;耦合作用;影响率

中图分类号 TU411.8 文献标志码 A

## Accumulated Plastic Strain of Silty Clay under Subway Moving Loads

XIE Lei<sup>1</sup>, ZHAO Zhonghua<sup>2</sup>, LEI Yong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** In order to provide reference for the safety and stability evaluation during the design, construction and operation of underground railway traffic engineering, the deformation characteristics of the silty clay under subway moving loads are studied. Through the dynamic triaxial tests, this paper explores the development of accumulated plastic strain of silty clay under subway moving loads and uses mathematical statistics to calculate the influence of accumulated plastic strain between factors and their couplings. The results show that accumulated plastic strain increases with less pore pressure, less consolidation ratio, larger amplitude of dynamic stress, less frequency and larger vibration times under the same experimental conditions. The greatest influence on accumulated plastic strain is dynamic stress, the second is pore pressure and frequency, the last is vibration

收稿日期:2018-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51578348);辽宁省自然科学基金项目(2015020606)

作者简介:解磊(1964—),男,教授,主要从事岩土工程方面研究.

times. The interaction function to accumulated plastic strain of frequency and vibration times, pore pressure and vibration times can be ignored. The interaction function is remarkable to accumulated plastic strain than single factor under certain conditions.

**Key words:** subway moving loads; accumulated plastic strain; coupling; influence ratio

近几年,随着地铁工程的大量建设,地铁运营期间产生的工程问题也越来越多,例如隧道周围土体产生不均匀沉降导致隧道结构整体下沉等现象。

目前,国内外学者就地铁行车荷载作用下土体的变形特性进行了深入研究,国外学者 L. Auresch 等<sup>[1-3]</sup>通过对实测路段信号进行频谱分析,得到列车荷载的振源强度、组成成分以及分布规律;M. F. M. Hussein<sup>[4]</sup>和 S. Gupat<sup>[5]</sup>对实测数据进行分析发现,地铁运行过程中产生的高频荷载衰减速度较快,土体受到的影响以低频荷载为主;D. Clouteau 等<sup>[6-8]</sup>基于边界元数值计算方法,研究了地铁行车荷载对土体产生的振动影响特性;M. T. Yilmaz<sup>[9]</sup>基于静动三轴试验结果,得到加载方式等因素对土体累积应变的影响;J. C. Chai<sup>[10]</sup>在考虑土体类别和循环次数因素的基础上,对现有土体累积塑性变形的计算方法进行了改进。

国内学者赵书凯<sup>[11]</sup>基于实测数据,对上海饱和软黏土的变形特性进行了详细研究;唐益群<sup>[12]</sup>通过动三轴试验,研究了地铁荷载对隧道周围淤泥质黏土累积应变的影响;黄博<sup>[13]</sup>在室内试验模拟列车荷载时发现,列车实际运行产生的累积变形与半正弦波产生的效果较为一致;张柯<sup>[14]</sup>以西安地铁为背景,考虑初始固结围压、排水条件等因素,分析了地铁行车荷载对黄土残余应变的影响;来淑

娜<sup>[15]</sup>基于杭州地铁,研究了粉砂土累积塑性应变的发展规律;王婷婷<sup>[16]</sup>考虑土体埋深和实际含水量的因素,研究了南京软土地区动应变的特性;张涛<sup>[17]</sup>通过试验论证,得到地铁行车荷载对土体仅有压应力而没有拉应力的重要结论。

以上学者通过现场监测、室内试验和有限元模拟,仅研究了单因素对土体变形的影响,而未考虑因素之间存在耦合作用。国内虽然已有这方面的研究,但研究很少,尚且未形成一致的结论,关于多因素之间的耦合作用对土体的变形特性影响如何需要进一步研究与验证。基于此,笔者通过动三轴试验,探讨了沈阳地区地铁行车荷载作用下隧道周围粉质黏土累积塑性应变发展规律,并计算了各因素及因素之间的耦合作用对累积塑性应变的影响,以期分析该地区地下轨道交通工程设计、施工以及运营期间的安全稳定评价提供有益参考。

## 1 室内 GDS 试验

### 1.1 试验土样和试验方案

本试验土样选取沈阳地铁九号线沈阳建筑大学站附近某基坑坑内,为减小在取土过程中土体被扰动以及离散性所带来的试验误差,本次取土采用人工取土方式。土的基本物理指标如表 1 所示,动三轴试验方案如表 2 所示。

表 1 土的基本物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$
1.91	30.43	14.9	0.25	11.3	17.7	0.4	4.1

表2 试验方案

Table 2 Test plan

试样编号	围压 $\sigma_{3c}/\text{kPa}$	固结比 $K_c$	动应力幅值 $\sigma_d/\text{kPa}$	频率 $f/\text{Hz}$	振动次数 $n/\text{次}$	波形
A1	130	1	30	0.5	10 000	半正弦波
A2	180	1	30	0.5	10 000	半正弦波
A3	80	1	30	0.5	10 000	半正弦波
A4	180	1	30	1	10 000	半正弦波
A5	180	1	30	2	10 000	半正弦波
A6	180	1	20	1	10 000	半正弦波
A7	180	1	40	1	10 000	半正弦波
A8	130	1	40	1	10 000	半正弦波
A9	80	1	40	1	10 000	半正弦波
A10	80	1	30	1	10 000	半正弦波
A11	80	1	20	1	10 000	半正弦波
A12	80	1	30	2	10 000	半正弦波
A13	180	2	40	1	10 000	半正弦波
A14	80	2	40	1	10 000	半正弦波
A15	180	1	20	2	10 000	半正弦波

## 1.2 试验结果分析

图1为试样A9在加载过程中动应力与动应变关系曲线,考虑到显示效果的问题,笔者仅选取部分振动次数下滞回曲线进行描述.从图1可以看出,随着振动次数的增加,滞回曲线逐渐向右侧移动,在移动过程中速率先增大后减小.由此说明在地铁运营初期,地铁行车荷载对土体的变形影响较大,随着运营时间的增加,土体被压密,土体变形很难进一步发展.从图1还可以看出,在每一次振动过程中所形成的滞回曲线,其形状并没有

发生明显的变化,两端都以尖点的形式出现,而且每一次振动周期内曲线都不会闭合.这种现象说明了在地铁行车荷载作用下土体产生了不可恢复的塑性应变,滞回曲线不闭合程度越大,塑性应变也越大.

### 1.2.1 围压的影响

为研究不同围压试验条件下累积塑性应变的发展规律,笔者选取两组试验数据进行了整理,结果如图2所示.从图2可以看出,随着振动次数的增加,粉质黏土的累积塑性应变发展趋势由快速增长到缓慢增长最后到稳定增长.在相同试验条件下,高围压产生的累积塑性应变较小.笔者认为:在相同固结应力比条件下,围压越大,土体受到轴向压力越大,在固结过程中土体被压得较密实,土体的有效应力和模量较大,故产生的累积塑性应变较小.

从另一个角度说明:在地铁隧道垂直方向内,土体越深,即围压越大,地铁行车荷载对土体的影响越弱.由此可见,地铁运行过程中对隧道周围土体的影响存在一个临界范

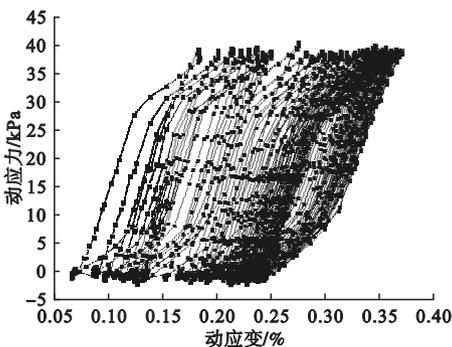


图1 动应力-动应变关系曲线

Fig. 1 Relationship between stress and strain

围,超过这个范围,土体受到的影响很小.因此,在地铁设计时,应该考虑围压因素,这对

于确定隧道周围土体的影响范围及加固范围具有重要意义.

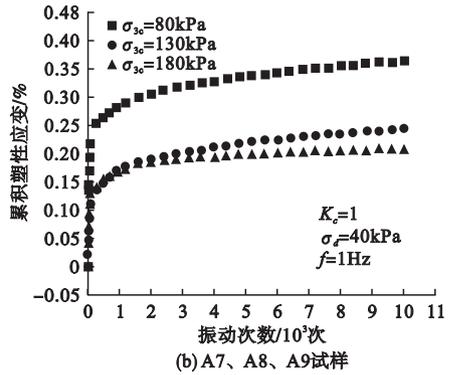
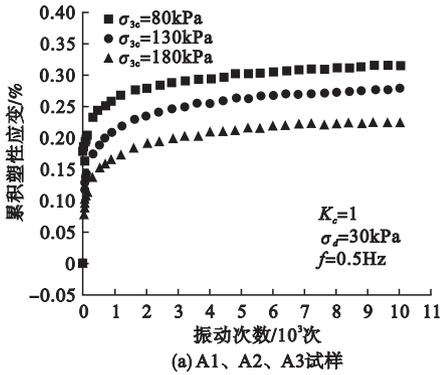


图2 不同围压下累积塑性应变与振动次数的关系曲线

Fig. 2 Relationship between accumulated plastic strain and cyclic numbers under different confining pressures

### 1.2.2 固结比的影响

图3为不同固结比试验条件下累积塑性应变与振动次数的关系曲线.从图3可以看出,累积塑性应变随固结比的增大而呈减小的趋势.在围压相同条件下,固结比越大,即

轴向应力越大,在固结过程中土体越容易被压密,土体的累积塑性应变就越难以开展;其次由于土体中存在初始剪应力,固结比越大初始剪应力越大,该剪应力会迫使土体骨架颗粒接触较紧密,导致土体的变形难以开展.

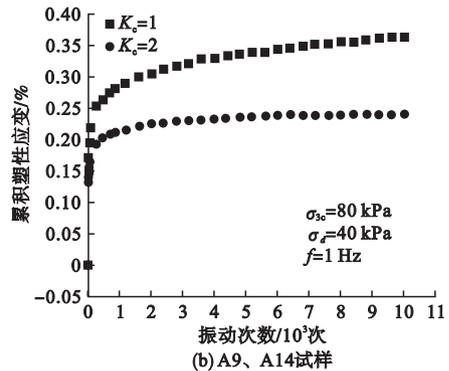
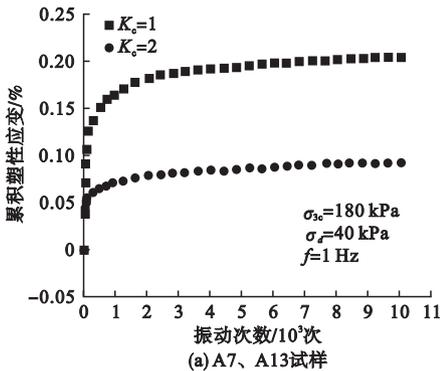


图3 不同固结比下累积塑性应变与振动次数的关系曲线

Fig. 3 Relationship between accumulated plastic strain and cyclic numbers under different consolidation ratio

### 1.2.3 动应力幅值的影响

图4为不同动应力幅值试验条件下累积塑性应变与振动次数的关系曲线.从图4可以看出,动应力幅值越大,粉质黏土的累积塑性应变越大.笔者分析认为:在相同试验条件下,动应力幅值越大,地铁行车荷载的能量越大,从而传递到土体的动能也就越多,在单位时间内,土体吸收的能量也就越多,所以粉质黏土产生的累积塑性应变就越大.

变的发展趋势图.从图5可以看出,在相同试验条件下,累积塑性应变随着频率的增加而减小.这可以从两个方面来说明:①地铁动力系统产生的能量,一部分用于自身的运行,另一部分会以动能的形式传递到土体中,而土体内部结构能会抵消这部分能量.在其他条件相同时,地铁振动频率越低,运行速度越慢,在一定距离内,地铁行车荷载作用的时间越长,转移到土体的内能也就越多,所以土体产生的累积塑性应变就越大;②由有效应力原理可知,土体的总应力等于有效应力与孔

### 1.2.4 频率的影响

图5为不同频率试验条件下累积塑性应

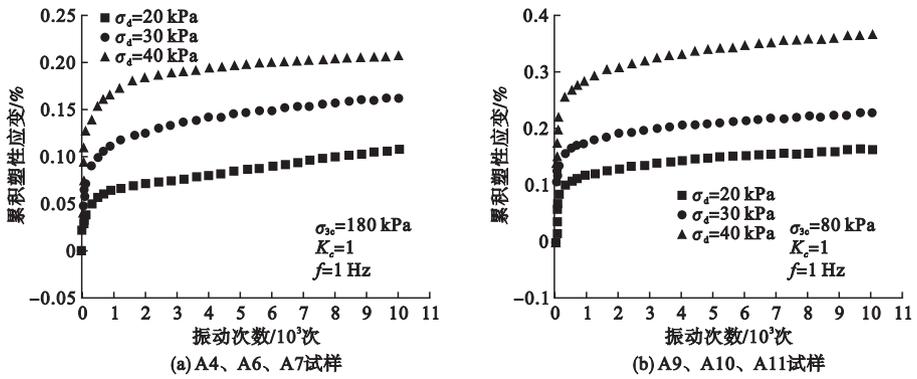


图 4 不同动应力幅值下累积塑性应变与振动次数的关系曲线

Fig. 4 Relationship between accumulated plastic strain and cyclic numbers under different cyclic loading amplitudes

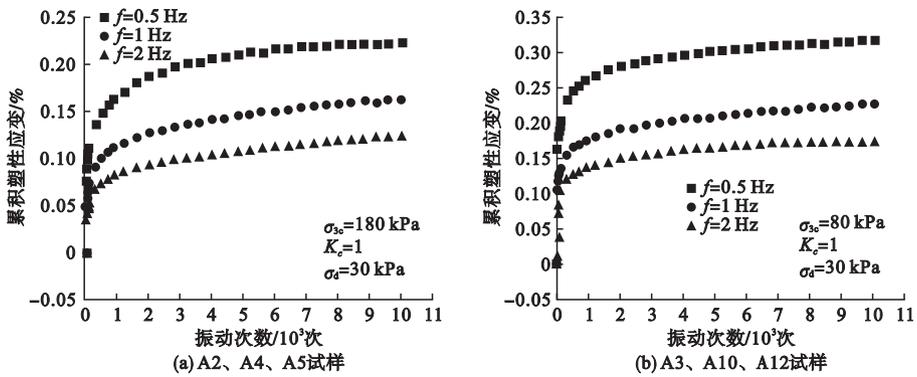


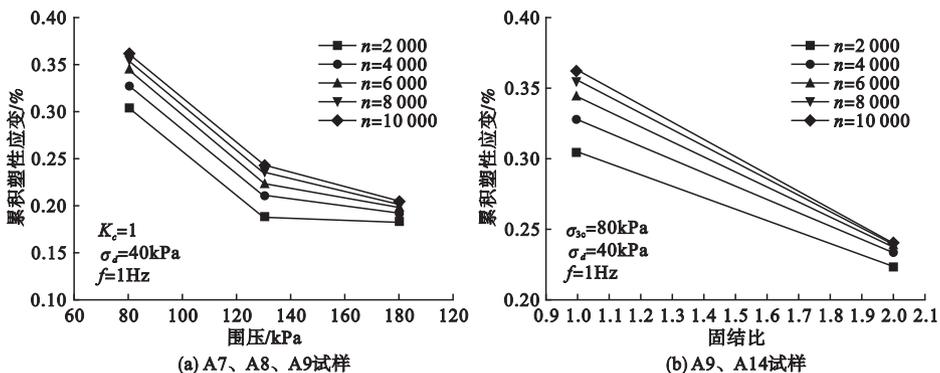
图 5 不同频率下累积塑性应变与振动次数的关系曲线

Fig. 5 Relationship between accumulated plastic strain and cyclic numbers under different frequencies

隙水压力之和,当地铁行车荷载作用的频率越快时,因粉质黏土具有很强的黏滞性,导致土体中孔隙水压力来不及上升,地铁行车荷载就进入卸载阶段,此时的孔隙水压力较小,土体骨架的有效应力相对较大,土颗粒接触相对较紧密,所以土体的累积塑性应变较小。

### 1.2.5 振动次数的影响

图 6 为不同试验条件下土体累积塑性应变与振动次数的关系曲线.从图 6 可以看出,在 4 种不同的试验条件下,土体的累积塑性应变曲线均随着振动次数的增加而逐渐密集,动应力幅值和围压影响效果最显著,而固结比和频率的影响相对较弱。



(a) A7、A8、A9 试样

(b) A9、A14 试样

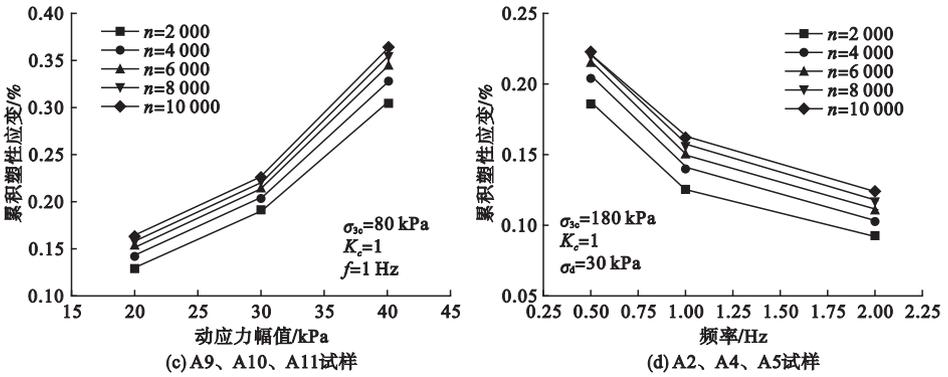


图6 不同振动次数下累积塑性应变变化曲线

Fig. 6 The variation curve of accumulated plastic strain under different cyclic numbers

从图6还可以看出,土体的累积塑性应变超过60%是来自于地铁运营初期,且围压、固结比以及振动频率越小,动应力幅值越大,该值越大.由此说明,在地铁运营初期,地铁行车荷载对隧道周围土体的变形影响较大,随着运营时间的增加,土体逐渐被压密,塑性应变的累积速率逐渐减小,土体的变形最终趋于稳定.可见,地铁运营初期,隧道周围土体的变形以及不均匀沉降等一些地质灾害现象应该是防治的重点.

## 2 各因素对累积塑性应变的影响

通过上述研究发现,围压、动应力幅值、频率以及振动次数等因素都会影响土体累积塑性应变的发展,而且这些因素之间存在着耦合作用,在一定程度上也影响累积塑性应变的发展.鉴于此,笔者将进一步研究多因素之间的耦合作用对土体累积塑性应变的影响.

### 2.1 正交试验设计

笔者在试验方案设计时采用正交试验设计,采用3因素2水平的正交表 $L_8(2^7)$ 进行表头设计,按下列步骤进行方差分析<sup>[18]</sup>.

#### 2.1.1 离差平方和

(1)总离差平方和

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (1)$$

式中: $n$ 为总试验次数; $y_i$ 为试验结果.

(2)各因素离差平方和

因素 $j$ 被安排在正交表的某一列,其离差平方和为

$$S_j = \frac{r}{n} \left( \sum_{i=1}^r K_i \right)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (2)$$

式中: $r$ 为因素水平数; $K_i$ 为任何一列上水平为 $i$ 时所对应的试验结果之和.

(3)试验误差离差平方和

所有空列所对应的离差平方和为试验误差离差平方和,即:

$$S_e = \sum_{i=1}^m S_{E_i} \quad (3)$$

式中: $m$ 为总空列数; $S_{E_i}$ 为空列离差平方和.

#### 2.1.2 自由度

试验总自由度为

$$d_t = n - 1 \quad (4)$$

各因素自由度为

$$d_j = r - 1 \quad (5)$$

误差自由度为

$$d_e = \sum_{i=1}^m d_{E_i} \quad (6)$$

式中: $d_{E_i}$ 为空列自由度.

#### 2.1.3 平均离差平方和

平均离差平方和包括因素平均离差平方和以及试验误差平均离差平方和,因素 $j$ 的平均离差平方和为

$$\bar{S}_j = S_j / d_j \quad (7)$$

试验误差平均离差平方和为

$$\bar{S}_e = S_e / d_e \quad (8)$$

### 2.1.4 $F$ 值

各因素的平均离差平方和与试验误差平均离差平方和的比值,即可得到  $F$  值:

$$F = \frac{S_j/d_j}{S_e/d_e} = \frac{\bar{S}_j}{\bar{S}_e} \quad (9)$$

### 2.1.5 显著性检验

在检验前,先设定检验水平  $\alpha$ ,然后从  $F$  分布表中查出临界值  $F_{1-\alpha}(d_j, d_e)$ ,按式(9)计算各因素的  $F(d_j, d_e)$  值,最后与临界值做比较.如果某因素的  $F$  值大于等于该临界值,说明该因素对试验结果有显著的影响,  $F$  值越大,影响效果越明显.影响率计算如下:

$$\delta = \frac{F(d_j, d_e)}{F_{1-\alpha}(d_j, d_e)} \quad (10)$$

考虑地铁工程的实际情况,笔者设定检验水平为 0.05,查得临界值为 4.46.若某影响因素对土体的累积塑性应变影响率大于等于 1,说明该因素对土体的累积塑性应变有显著影响.

## 2.2 试验方案及结果分析

### 2.2.1 动应力幅值、频率和振动次数

为计算动应力幅值、频率和振动次数三种影响因素以及因素之间的耦合作用对土体累积塑性应变的影响率,笔者结合正交表  $L_8(2^7)$  采用表 3 的正交试验因素和水平.正交试验方案(1)及试验结果如表 4 所示.其中,试验序号 1 这一行代表试样 A6 的试验结果;  $\sigma_d \times f$  代表动应力幅值  $\sigma_d$  与频率  $f$  之间的耦合作用影响因素;  $\sigma_d \times n$  代表动应力幅值  $\sigma_d$  与振动次数  $n$  之间的耦合作用影响因素;  $f \times n$  代表频率  $f$  与振动次数  $n$  之间的耦合作用影响因素;各因素所在列由正交表  $L_8(2^7)$  安排,数值 1 和 2 仅代表因素水平数.后续表中符号含义同理.

表 3 试验因素 ( $\delta_d, f, n$ ) 和水平

Table 3 Test factors ( $\delta_d, f, n$ ) and level

水平	因素		
	$\sigma_d/\text{kPa}$	$f/\text{Hz}$	$n/\text{次}$
1	20	1	4 000
2	30	2	9 999

表 4 试验方案(1)及试验结果

Table 4 Test plan (1) and the results

试验序号	因素所在列							试验结果/%
	$\sigma_d$	$f$	$\sigma_d \times f$	$n$	$\sigma_d \times n$	$f \times n$	空列	
1(A6)	1	1	1	1	1	1	1	0.080 132
2(A6)	1	1	1	2	2	2	2	0.107 799
3(A15)	1	2	2	1	1	2	2	0.060 301
4(A15)	1	2	2	2	2	1	1	0.092 345
5(A4)	2	1	2	1	2	1	2	0.140 608
6(A4)	2	1	2	2	1	2	1	0.161 979
7(A5)	2	2	1	1	2	2	1	0.102 380
8(A5)	2	2	1	2	1	1	2	0.124 130

通过方差分析计算得到 3 种因素对累积塑性应变的影响率如表 5 所示.从表 5 可以看出,单因素均比因素之间的耦合作用影响效果要明显,单因素影响率最大的是动应力幅值,其次是频率,最后是振动次数.因素之间的耦

合作用也会对累积塑性应变产生一定影响,动应力幅值与频率之间的耦合作用影响率最大,其次是动应力幅值与振动次数之间的耦合作用,而频率与振动次数之间的耦合作用影响率小于 1,可忽略不计.

表5 各因素( $\delta_d, f, n$ )对累积塑性应变影响率分析Table 5 Analysis of the influence ratio of every factor ( $\delta_d, f, n$ ) on the accumulated plastic strain

方差来源	$S$	$d$	$\bar{S}$	$F$	$\delta$
$\sigma_d$	0.004 442 458	1	0.004 442 458	2 224. 155 253	498. 689 519
$f$	0.001 550 196	1	0.001 550 196	776. 119 242	174. 017 768
$\sigma_d \times f$	0.000 207 995	1	0.000 207 995	104. 134 473	23. 348 537
$n$	0.001 321 818	1	0.001 321 818	661. 779 484	148. 381 050
$\sigma_d \times n$	0.000 034 406	1	0.000 034 406	17. 225 614	3. 862 245
$f \times n$	0.000 002 827	1	0.000 002 827	1. 415 211	0. 317 312
误差	0.000 001 997	1	0.000 001 997	—	—

## 2.2.2 围压、频率和振动次数

按照上述的设计方法,计算围压、频率和振动次数单因素及因素之间的耦合作用对累积塑性应变影响率,正交试验因素和水平的选择如表6所示,试验方案(2)及试验结果如表7所示,各因素的方差分析结果如表8所示。

表6 试验因素( $\delta_{3c}, f, n$ )及水平Table 6 Test factors ( $\delta_{3c}, f, n$ ) and level

水平	因素		
	$\sigma_{3c}/\text{kPa}$	$f/\text{Hz}$	$n/\text{次}$
1	80	1	4 000
2	180	2	9 999

表7 试验方案(2)及试验结果

Table 7 Test plan (2) and the results

试验序号	因素所在列							试验结果/%
	$\sigma_{3c}$	$f$	$\sigma_{3c} \times f$	$n$	$\sigma_{3c} \times n$	$f \times n$	空列	
1(A10)	1	1	1	1	1	1	1	0.204 545
2(A10)	1	1	1	2	2	2	2	0.225 808
3(A12)	1	2	2	1	1	2	2	0.159 274
4(A12)	1	2	2	2	2	1	1	0.170 760
5(A4)	2	1	2	1	2	1	2	0.140 608
6(A4)	2	1	2	2	1	2	1	0.161 979
7(A5)	2	2	1	1	2	2	1	0.102 379
8(A5)	2	2	1	2	1	1	2	0.123 014

表8 各因素( $\delta_{3c}, f, n$ )对累积塑性应变影响率分析Table 8 Analysis of the influence ratio of every factor ( $\delta_{3c}, f, n$ ) on the accumulated plastic strain

方差来源	$S$	$d$	$\bar{S}$	$F$	$\delta$
$\sigma_{3c}$	0.006 751 651	1	0.006 751 651	660. 862 252	148. 175 393
$f$	0.003 938 800	1	0.003 938 800	385. 535 923	86. 443 032
$\sigma_{3c} \times f$	0.000 066 848	1	0.000 066 848	6. 543 210	1. 467 087
$n$	0.000 698 519	1	0.000 698 519	68. 372 182	15. 330 086
$\sigma_{3c} \times n$	0.000 051 718	1	0.000 051 718	5. 062 227	1. 135 029
$f \times n$	0.000 013 816	1	0.000 013 816	1. 352 338	0. 303 215
误差	0.000 010 216	1	0.000 010 216	—	—

从表8可以看出,单因素对累积塑性应变影响效果均比因素之间的耦合作用要明显,单因素影响率最大的是围压,其次是频率,最后是振动次数.因素之间的耦合作用也会对累积

塑性应变产生影响,围压与频率之间的耦合作用影响最大,其次是围压与振动次数之间的耦合作用,而频率与振动次数之间的耦合作用影响率小于1,故可认为它对累积塑性应变的影

响较小,可忽略不计。

2.2.3 围压、动应力幅值和振动次数

同理,计算围压、动应力幅值和振动次数单因素及因素之间的耦合作用对累积塑性应变影响率,其正交试验因素和水平选择如表 9 所示,试验方案(3)及试验结果如表 10 所示,各因素的方差分析结果如表 11 所示。

表 10 试验方案(3)及试验结果

Table 10 Test plan (3) and the results

试验序号	因素所在列							试验结果/%
	$\sigma_{3c}$	$\sigma_d$	$\sigma_{3c} \times \sigma_d$	$n$	$\sigma_{3c} \times n$	$\sigma_d \times n$	空列	
1(A11)	1	1	1	1	1	1	1	0.142 853
2(A11)	1	1	1	2	2	2	2	0.162 815
3(A9)	1	2	2	1	1	2	2	0.327 054
4(A9)	1	2	2	2	2	1	1	0.362 334
5(A6)	2	1	2	1	2	1	2	0.080 132
6(A6)	2	1	2	2	1	2	1	0.107 799
7(A7)	2	2	1	1	2	2	1	0.192 084
8(A7)	2	2	1	2	1	1	2	0.204 696

表 11 各因素( $\sigma_{3c}, \sigma_d, n$ )对累积塑性应变影响率分析

Table 11 Analysis of the influence ratio of every factor ( $\sigma_{3c}, \sigma_d, n$ ) on the accumulated plastic strain

方差来源	$S$	$d$	$\bar{S}$	$F$	$\delta$
$\sigma_{3c}$	0.021 047 785	1	0.021 047 785	182.519 742	40.923 709
$\sigma_d$	0.043 892 100	1	0.043 892 100	380.618 435	85.340 456
$\sigma_{3c} \times \sigma_d$	0.003 822 464	1	0.003 822 464	33.147 203	7.432 108
$n$	0.001 140 559	1	0.001 140 559	9.890 570	2.217 617
$\sigma_{3c} \times n$	0.000 027 981	1	0.000 027 981	0.242 644	0.054 405
$\sigma_d \times n$	0.000 860 450	1	0.000 860 450	7.461 540	1.672 991
误差	0.000 115 318	1	0.000 115 318	—	—

从表 11 可以看出,单因素对累积塑性应变均有显著的影响,动应力幅值的影响率最大,其次是围压,最后是振动次数。因素之间的耦合作用也会对累积塑性应变产生一定影响,动应力幅值与围压之间的耦合作用影响最大,其次是动应力幅值与振动次数之间的耦合作用,而围压与振动次数之间的耦合作用影响率小于 1,故可认为它对累积塑性应变的影响较小,可忽略不计。从表 11 还可以看出,动应力幅值与围压之间的耦合作用对累积塑性应变的影响是振动次数的 3.4 倍。由此说明,因素之间的耦合作用在一定条件下比单因素对累积塑性应变的影响效果要显著。

表 9 试验因素( $\sigma_{3c}, \sigma_d, n$ )及水平

Table 9 Test factors ( $\sigma_{3c}, \sigma_d, n$ ) and level

水平	因素		
	$\sigma_{3c}/\text{kPa}$	$\sigma_d/\text{kPa}$	$n/\text{次}$
1	80	20	400 0
2	180	40	999 9

综上所述发现,地铁行车荷载作用下,围压、动应力幅值、频率和振动次数等因素对土体累积塑性应变均有一定的影响,单因素中影响率从大到小依次为: $\sigma_d, \sigma_{3c}, f, n$ ;因素之间的耦合作用影响率从大到小依次为: $\sigma_{3c} \times \sigma_d, \sigma_d \times f, \sigma_d \times n, \sigma_{3c} \times f, \sigma_{3c} \times n, f \times n$ 。

3 结 论

(1)在相同条件下,累积塑性应变随着围压的增大而减小,随着固结比的增大而减小,随着动应力幅值的增大而增大,随着频率的增大而减小,随着振动次数的增加而增大。

(2)单因素对累积塑性应变的影响较大,

影响率最大的是动应力幅值,其次是围压和频率,最后是振动次数。

(3)因素之间的耦合作用对累积塑性应变也有一定的影响,除频率与振动次数之间的耦合作用影响、围压与振动次数之间的耦合作用影响可以忽略不计以外,其他因素之间的耦合作用影响均不可忽略。

(4)因素之间的耦合作用在一定条件下比单因素对累积塑性应变的影响效果要显著,如动应力幅值与围压之间的耦合作用影响率是振动次数的3.4倍。

## 参考文献

- [1] AURESCH L. Ground vibration due to the railway traffic calculation of the effects of moving static loads and their experimental verification [J]. *Journal of sound and vibration*, 2006, 293: 599 – 610.
- [2] HECKL M, HAUKE G, WETTSCHURECK R. Structure-borne sound and vibration from rail traffic [J]. *Journal of sound and vibration*, 1996, 193(1): 175 – 184.
- [3] HILDEBRAND R. Countermeasures against railway ground and track vibrations [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2001.
- [4] HUSSEIN M F M, HUNT H E M. A power flow method for evaluating vibration from underground railways [J]. *Journal of sound and vibration*, 2006, 293(3 – 5): 667 – 679.
- [5] GUPTA S, HUSSEIN M F M, DEGRANDE G, et al. A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic [J]. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2007, 27(7): 608 – 624.
- [6] CLOUTEAU D, ARNST M, AL-HUSSAINI T M, et al. Freefield vibration due to dynamic loading on a tunnel embedded in a stratified medium [J]. *Journal of sound and vibration*, 2005, 283(1 – 2): 173 – 199.
- [7] YANG Y B, HUANG H, CHANG D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation [J]. *Soils dynamics and earthquake engineering*, 2003, 23(4): 263 – 278.
- [8] GUPTA S, LIU W F, DEGRANDE G, et al. Prediction of vibrations induced by underground railway traffic in Beijing [J]. *Journal of sound and vibration*, 2008, 310(3): 608 – 630.
- [9] YILMAZ M T, PEKCAN O, BAKIR B S, et al. Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt-clay mixtures of Adapazari, Turkey [J]. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2004, 24(7): 497 – 507.
- [10] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2002, 128(11): 907 – 916.
- [11] 赵书凯. 地铁行车荷载下软黏土微观结构变形破坏机制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006. (ZHAO Shukai. The study on the micro-structure distortion mechanics of soft clay under the subway-included loading [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.)
- [12] 唐益群. 地铁行车荷载作用下淤泥质黏土累积特性的试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 19(4): 460 – 466. (TANG Yiqun. Experimental study on the behavior of muddy clay under subway loading [J]. *Journal of engineering geology*, 2010, 19(4): 460 – 466.)
- [13] 黄博. 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. (HUANG Bo. Simulation of high-speed train load by dynamic triaxial tests [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2011, 33(2): 195 – 202.)
- [14] 张柯. 地铁行车荷载作用下黄土地层的振动响应和沉降 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. (ZHANG Ke. Vibration and settlement of loess due to subway moving loads [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2011.)
- [15] 来淑娜. 地铁荷载下杭州饱和粉砂土动力特性试验研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013. (LAI Shuna. Research on dynamic properties of Hangzhou's saturated silty sands under metro vibration loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.)
- [16] 王婷婷. 地铁动荷载作用下软土的动力特性与长期沉降研究 [D]. 南京: 东南大学, 2014. (WANG Tingting. Study on the dynamic characteristics of soft soil and the long-term settlement induced by the dynamic load [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.)
- [17] 张涛. 地铁列车荷载下不同固结度重塑粘土动力特性试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (ZHANG Tao. Experimental study on dynamic characteristics of remolded clay with different consolidation degree under subway loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [18] 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 characteristic of saturated soft clay under subway loading in Shanghai [J]. *Journal of tongji university (natural science)*, 2011, 39(7): 978 – 982.)