

地铁荷载下饱和软黏土累积变形特性

闫春岭^{1,2}, 唐益群^{1,2}, 刘莎³

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 针对地铁循环荷载作用下饱和软黏土的变形特性, 对上海地铁2号线静安寺站附近的饱和淤泥质黏土进行GDS(global digital systems)循环三轴试验. 试验结果表明, 振动次数一定时, 累积塑性应变随动应力幅值的增大而增大, 随荷载频率的增大而减小; 采用正交设计法安排试验, 充分考虑了振动次数、荷载频率、动应力幅值以及其两两交互作用等因素对土体累积变形的影响, 结合数理统计分析法建立了影响土体变形的影响率及评价方法. 研究结果显示, 影响地铁隧道轴线变形的主要因素是动应力幅值, 而荷载频率与振动次数的交互作用可以忽略, 此研究成果对地铁隧道设计具有重要的参考价值.

关键词: 地铁荷载; 变形特性; 土动力试验; 饱和软黏土

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

Accumulative Deformation Characteristics of Saturated Soft Clay Under Subway Loading in Shanghai

YAN Chunling^{1,2}, TANG Yiqun^{1,2}, LIU Sha³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Co. Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Through the dynamic triaxial tests for the saturated silt soil around the tunnel of the Jing'an Temple Station, the deformation analysis is made on the saturated soft clay under the subway train loading. The results show accumulative plastic strain increases with larger amplitude of dynamic stress and less loading frequency with the same vibration times. Orthogonal design is used to arrange the experiment by taking a full consideration of the factors which have effect on the accumulative deformation, such as vibration

times, the loading frequency, the amplitude of dynamic stress, and the interaction between one factor and the other. The mathematical statistics approach is established and is used to analyze the influence rate of the deformation. It also shows that main factor which affects axial deformation of subway tunnel is the dynamic stress amplitude and the interaction function on vibration frequency and vibration times can be ignored. The study offers a valuable reference to the design of subway tunnel.

Key words: subway loading; deformation characteristics; soil dynamic test; saturated soft clay

近年来,我国地铁运输系统发展迅猛,但同时引起的工程环境问题也越发明显,其中,以地铁运行诱发的振动对环境的影响尤为显著. 早期关于列车振动引起地下结构体系的动力响应研究主要是通过现场振动测量,进行数学处理后给出经验公式^[1]. 20世纪70年代, Kurzweil^[2]给出了振级与距离有关的简单预测公式,随后, Peter等^[3]又通过给定不同列车、轨道、隧道及建筑物类型的修正参数,来预测不同的地点由于地铁列车运营而引起的环境振动影响. 潘昌实等^[4]采用简单而又能够反映列车振动荷载特点的类似激振荷载形式的函数表达列车荷载. 夏禾等^[5]采用列车模型、轨道模型及轮轨间的耦合关系组成的列车-轨道系统动力分析模型,并采用数值仿真方法,在计算机上进行模拟分析.

模拟地铁循环荷载一般采用动三轴仪,因其结构简单、操作方便而被广泛应用^[6]. Seed等^[7]进行饱和软土的动强度试验时,发现在一定压力下固结稳定的试件经动荷载作用后产生附加变形,并指出在动应力频率和持续时间不变的情况下,该附加变形

收稿日期: 2010-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(40872178); 上海市重点学科建设项目(B308)

第一作者: 闫春岭(1975—),男,讲师,工学博士,主要研究方向为工程地质与土木工程. E-mail: yanchunling2003@163.com

通讯作者: 唐益群(1952—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为工程地质与环境地质. E-mail: tangyiqun2@tongji.edu.cn

由固结压力大小、动应力大小以及循环次数等3个因素决定. 后来 Castro^[8], Gaskin^[9], Kazuya 等^[10], 也相继进行了这项研究. Atilla 和 Ayfer^[11]的循环荷载作用下正常固结黏土和重塑土在不同剪应力和不同加载速率下的试验, 得出了重塑土能抵抗较大的循环剪应力, 重塑土产生的循环剪应变比原状土要小得多的结论. 周健等^[12]通过对杭州市正常固结饱和软黏土进行应力控制的循环三轴试验, 从应变的角度研究了循环荷载作用下土体的软化情况. 黄茂松等^[13]从影响软黏土塑性累积变形的主要因素着手, 引入了相对偏应力水平参数, 在动三轴试验基础上, 研究了饱和软黏土的不排水循环累积变形特性.

目前, 有关地铁荷载作用下对隧道周围饱和软黏土累积塑性变形起主要作用的因素, 以及这些因素间交互作用是否也对其有影响的研究不多. 本文利用动三轴试验, 揭示动应力幅值大小、振动次数、荷载频率及两两交互作用对地铁隧道土体变形的影响程度, 以期分析软土地区地铁运营引起的地基沉降提供有益的参考.

1 室内试验

1.1 循环三轴试验

试验采用英国进口多功能动态循环三轴系统 GDS (geotechnical digital systems) 进行. 地铁通过时, 行车振动荷载传至隧道周围土体引起的动力响应是周而复始的循环响应, 因此采用应力控制式循环加载模块.

试验土样取自上海地铁2号线静安寺站附近埋深13.5 m的第④层淤泥质黏土, 该土层为 Q_4^2 的滨海—浅海相沉积, 厚约10 m, 含云母及贝壳碎屑, 夹

薄层粉性土, 属于天然含水量高、孔隙比大、高压缩性、低强度及高灵敏度的软黏性土层, 土样基本物理力学指标如表1所示.

表1 土样的基本物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical properties of soft clay

含水量 $w/\%$	孔隙比 e	液性指数 I_L	塑性指数 I_P	土粒相对密度 G_s	渗透系数/ $(m \cdot s^{-1})$
50.8	1.44	1.28	21.6	2.75	3.00×10^{-7}

唐益群等^[14]通过对上海地铁二号线静安寺站—江苏路站之间施打钻孔埋设仪器进行现场监测, 得到地铁列车经过时引起隧道轴线方向土体响应频率有高频区段 $[2.4 \sim 2.6]$ Hz 和低频区段 $[0.4 \sim 0.6]$ Hz. 综合现场及土体的各种因素, 试验过程中采用的频率为0.5, 1.5, 2.5 Hz; 列车及隧道体系施加给隧道土体的附加应力取10, 20, 30 kPa; 为了最大限度地模拟现场条件, 在施加振动荷载之前试样先在 K_0 条件下固结, 以恢复到现场应力状态. 根据土样本身的物理力学指标及工程实际经验, 试验中 K_0 取0.7.

1.2 试验结果分析

(1) 图1为频率一定时, 不同循环应力水平下, 饱和淤泥质黏土的累积塑性应变随振次增加而变化的情况. 曲线的总体趋势表明, 在长期循环荷载作用下, 土体累积应变经历了快速增长→匀速增加→衰减稳定3个阶段的变化. 说明地铁行车荷载作用下, 地铁运营初期隧道周围土体的累积变形比较大, 但随着运营时间的增长, 土体逐渐趋于密实, 其变形速率逐渐减小, 累积变形最终趋向稳定, 因此, 地铁运营初期应该是隧道周围土体形变及隧道轴线沉降等工程地质灾害防治的重点.

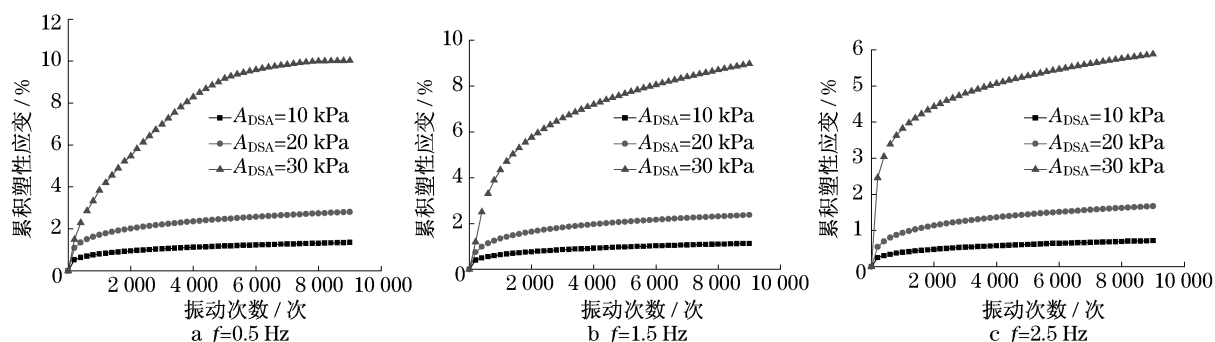


图1 土体累积应变与应力水平关系曲线

Fig.1 Relationship curve of accumulative deformation and stress level on soft clay

(2) 试验结果说明, 土体累积塑性应变与振动次数 N 、动载幅值 A_{DSA} 及荷载频率 f 有关, 即振次一

定时, 累积塑性应变随动载幅值的增大而增大; 随荷载频率的增大而减小. 如果找到三者中哪一个因素

在累积形变中起决定作用,则将对控制软土地区地铁运营引起的地基沉降提供有益的帮助.

2 正交试验方案设计及试验结果

2.1 正交试验设计法简介

正交试验设计是一种科学安排与分析多因素试验的方法,它利用正交表科学地挑选试验条件,合理地安排试验,并能通过这些条件下的试验结果推断出各因素的重要性程度.因此,正交设计极适于通过

较少的试验次数得到各因素对所考察指标的影响率的信息.

2.2 试验方案设计及试验结果

考查的因素虽然只有3个,但考虑它们相互之间的交互作用因素就变得较多,因此,采用13因素3水平的正交表 $L_{27}(3^{13})$ 进行表头设计.而荷载频率、动载幅值及振动次数两两间的搭配可能对变形有影响,所以还需要根据正交表 $L_{27}(3^{13})$ 的二列间的交互作用列表将各因素排入正交表.最终的模拟方案及模拟结果见表2.

表2 试验方案及结果

Tab.2 Test plans and the results

试验序号	因素所在列													应变/%
	f	A_{DSA}	$f \times A_{\text{DSA}}$		N	$f \times N$		$A_{\text{DSA}} \times N$						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.05
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.23
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1.36
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2.21
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2.58
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2.81
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	6.99
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	9.59
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	10.03
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0.85
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1.02
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1.13
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	1.83
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2.16
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	2.37
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	6.60
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	8.06
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	8.97
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	0.53
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	0.64
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	0.72
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	1.27
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	1.51
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	1.67
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	4.79
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	5.46
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	5.88

3 试验结果的方差分析

采用数理统计方法,建立地铁荷载下动应力幅值、荷载频率及振动次数等参数对隧道轴线饱和软黏土变形的影响率的概念及其计算方法,并根据上述试验结果研究各参数对变形的影响率.

不失一般性,设用正交表 $L_n(r^m)$ 来安排试验,则因素的水平数为 r ,正交表的列数为 m ,总试验次数为 n ,设试验结果为 $y_i (i=1,2,\dots,n)$,则方差分析按下述步骤进行^[15].

3.1 计算离差的平方和

3.1.1 总离差的平方和

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

式中: $Q = \sum_{i=1}^n y_i^2$; $P = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 = \frac{T^2}{n}$.

3.1.2 各因素离差平方和

设某因素 j 被安排在正交表的某列, 现求它的离差的平方和.

$$S_j = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r (k_i - \bar{y})^2 = \frac{r}{n} (\sum_{i=1}^r K_i^2) - P \quad (2)$$

式中: k_i 为任一列上因素取水平 i 时所得试验结果的算术平均值; \bar{y} 为试验值的算术平均值; K_i 为任一列上水平号为 i 时所对应的试验结果之和.

用相同的方法可计算其他因素的离差平方和.

3.1.3 试验误差的离差平方和

误差的离差平方和 S_e 为所有空列所对应离差平方和 S_E , 即

$$S_e = \sum S_E \quad (3)$$

式中: S_E 为空列所对应的离差平方和.

3.2 计算自由度

试验总自由度为

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

各因素的自由度为

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

误差自由度为

$$d_e = \sum d_E \quad (6)$$

式中: d_E 为空列自由度.

3.3 计算平均离差平方和

平均离差的平方和既有因素的, 也有误差的. 以 m 因素为例, 因素的平均离差的平方和为

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

试验误差的平均离差的平方和为

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

3.4 计算 F 值

将各因素的平均离差的平方和与误差的平均离差的平方和分别相比, 得到 F 值

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

3.5 显著性检验

给出检验水平 α , 从 F 分布表中查出临界值 $F_{1-\alpha}(d_j, d_e)$, 将按式(9)计算出的各因素的 $F(d_j, d_e)$ 值与该临界值比较. 若对于某因素有 $F(d_j, d_e) \geq F_{1-\alpha}(d_j, d_e)$ 成立, 则该因素对试验结果的影响显著; $F(d_j, d_e)$ 越大, 该因素的影响就越

显著. 同时, 将影响率定义如下:

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

3.6 地铁荷载下各因素对土体轴线变形的影响率

根据上述步骤, 对表2的数据进行计算, 结果列于表3. 考虑工程中的实用性, 给出检验水平 $\alpha = 0.05$. 从 F 分布表中查得 $F_{1-0.05}(2, 8) = 4.46$. 若某参数对轴线变形的影响率 ≥ 1.00 , 则说明该参数对轴线的变形有显著影响. 从表3中可以看出, A_{DSA} , f 及 N 对轴线变形均有显著影响, A_{DSA} 影响最大; 交互作用的影响顺序为 $f \times A_{\text{DSA}} > A_{\text{DSA}} \times N$, $f \times N$ 的影响可以忽略.

表3 各参数对轴线变形影响率分析

Tab.3 Analysis of the influence rate of every parameter on axial deformation

方差来源	S	d	\bar{S}	F	δ
A_{DSA}	212.72	2	106.36	1 063.6	238.48
$f \times A_{\text{DSA}}$	7.91	4	1.98	19.8	4.44
f	13.74	2	6.87	68.7	15.40
$A_{\text{DSA}} \times N$	3.49	4	0.87	8.7	1.95
N	4.54	2	2.27	22.7	5.09
$f \times N$	0.58	4	0.15	1.5	0.34
误差	0.79	8	0.10		
总和	243.77	26			

3.7 地铁荷载下各因素对土体轴线变形的分析

本次试验采用的频率分别为 0.5, 1.5 和 2.5 Hz, 动应力幅值分别为 10, 20 和 30 kPa. 从图2中可以看出, 其他条件相同时, 土体轴向累积塑性应变随动应力幅值的增大而增大. 这是因为相同频率相同振动次数下, 循环应力幅值越大, 循环荷载能量越大, 转移到土体上的动能也就越多, 因此土体产生较大的变形.

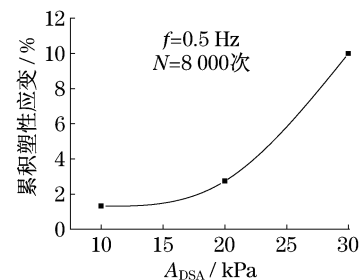


图2 累积塑性应变与动应力幅值关系

Fig.2 Relationship between accumulative plastic strain and amplitude of dynamic stress

图3为土体累积塑性应变随荷载频率变化曲线.由图3可以看出,在相同条件下,频率低的产生的变形值较大,频率高的产生的变形量较小.这是因为频率越低,意味着荷载变化越慢,相同的荷载作用次数及动应力幅值下,低频荷载作用的时间长,总能量越大,因此对土体产生的变形也大.

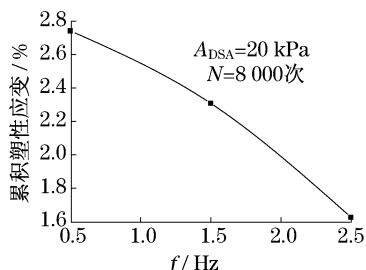


图3 累积塑性应变与荷载频率关系

Fig.3 Relationship between accumulative plastic strain and loading frequency

4 结论

(1) 长期循环荷载作用下,土体累积应变历经快速增长→匀速增加→衰减稳定3个阶段,因此,地铁运营的初期应该是隧道周围土体形变及隧道轴线沉降等工程地质灾害防治的重点.

(2) 提出了循环荷载下土体轴向变形的影响率的概念及计算方法,根据某参数对轴向变形的影响率是否大于或等于1.00,可以判定参数对变形有无显著影响.

(3) 通过正交试验和方差分析得出影响地铁隧道轴线变形的主要因素是动应力幅值,而荷载频率与振动次数的交互影响可以忽略.

参考文献:

- [1] 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): 126.
- [2] Kurzweil L. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1971, 66(3): 363.
- [3] Peter S. The prediction of railway noise profiles [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1974, 32(1): 87.
- [4] 潘昌实, Pande G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究 [J]. *土木工程学报*, 1984, 17(4): 19.
PAN Changshi, Pande G N. Preliminary deterministic finite element study on a tunnel driven in loess subjected to train loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1984, 17(4): 19.
- [5] 夏禾, 陈英俊, 张焱. 列车提速情况下铁路双线简支钢桁梁动力响应分析 [J]. *铁道学报*, 1996, 18(5): 75.
XIA He, CHEN Yingjun, ZHANG Duan. Dynamic analysis of steel truss bridges under increased train speeds [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(5): 75.
- [6] Flener E B, Karoumi R. Dynamic testing of a soil-steel composite railway bridge [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(12): 2803.
- [7] Seed H B, Chan C K. Effect of duration of stress application on soil deformation under repeated loading [C] // *Proceedings 5th international Congress on Soil Mechanics and Foundations*. Paris: Dunod Press, 1968: 341 - 345.
- [8] Castro G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1975, 101(6): 551.
- [9] Gaskin P N, Raymond G P, Addo-Abedi F Y. Repeated compressive loading fo a sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(2): 798.
- [10] Kazuya Y, Toyotoshi Y, Kazutoshi H. Cyclic strength and deformation of normally consolidation clay [J]. *Soils and Foundations*, 1982, 22(3): 77.
- [11] Atilla, Ausai, Ayfer Erken. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses [J]. *Engineering, ASCE*, 1989, 115(7): 968.
- [12] 周健, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究 [J]. *土木工程学报*, 2000, 33(5): 75.
ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(5): 75.
- [13] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7): 891.
HUANG Maosong, LI Jinjun, LI Xingzhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 891.
- [14] 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.
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.
- [15] 丁德馨, 杨仕教, 孙钧. 岩体弹塑性模型力学参数对位移的影响度研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 697.
DING Dexin, YANG Shijiao, SUN Jun. Studies of influence degree of mechanical parameters on displacements in elasto-plastic model for rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 697.