

地铁荷载下隧道周围加固软黏土应变累积特性

唐益群^{1,2}, 赵 化^{1,2}, 王元东^{1,2,3}, 李仁杰^{1,2}

(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. 上海机场(集团)建设开发公司, 上海 201207)

摘要: 通过对上海地铁四号线海伦路站附近隧道周围加固软黏土进行应力控制的循环三轴试验, 研究了列车循环荷载作用下加固软黏土的累积变形特性. 充分考虑土体围压、固结比、轴向循环压力的大小及频率的影响, 得到了加固软黏土在各个因素综合影响下的残余应变的变化规律. 通过研究发现, 可以用对数关系曲线来描述加固软黏土残余应变随振动次数的变化情况. 通过回归分析, 确定了各影响因素对预测模型参数的影响.

关键词: 地铁振动荷载; 加固软黏土; 动态循环三轴试验; 残余应变; 对数关系曲线

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

Characteristics of Strain Accumulation of Reinforced Soft Clay Around Tunnel Under Subway Vibration Loading

TANG Yiqun^{1,2}, ZHAO Hua^{1,2}, WANG Yuandong^{1,2,3}, LI Renjie^{1,2}

(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. Shanghai Airport Construction Development (Groups) Corporation, Shanghai 201207, China)

Abstract: Based on the dynamic triaxial tests of the reinforced soft clay around the tunnel nearby the Hailun Road station of Shanghai Metro Line 4, the characteristics of strain accumulation caused by subway vibration loading are explored by taking into account the influence of confining pressure, consolidation ratio, cyclic loading amplitudes and vibration frequency, and the change law of residual strain influenced by each factor is obtained. The logarithmic function form is adopted to describe the relationship between the residual strain and the vibration number. Besides, the model parameters are determined with the regression analysis. The

research results are not only of great importance to the reinforcement of the soil around subway tunnels, but also of great theoretical value and practical meaning to the long-term settlement prediction of soft clay around tunnel under subway vibration loading.

Key words: subway vibrational loading; reinforced soft clay; dynamic triaxial test; residual strain; logarithmic relationship curve

随着我国经济建设的发展和改革开放的深入, 对连接全国各大城市的高速交通网和大城市内部的地下轨道交通网的需求日益增长. 现在, 高速公路、地铁和轻轨等已经成为解决我国交通拥挤和促进经济发展的重要途径. 但是, 对于类似地铁列车振动荷载之类的具有作用时间长、有一定作用周期的循环荷载可能产生的沉降破坏也不容忽视^[1-2]. 例如, 一些软土路基上修建的高速公路, 经过一段时间的运营后, 发生路面开裂和倾斜, 影响道路的正常运营. 再如, 上海地铁建成投入使用以后, 发现隧道中行驶列车的振动对隧道周围土体强度和变形有较大影响, 而且这种影响与列车运行状态有很大的相关性. 上海地铁一号线运营后在某区段轴线沉降量已超过 10 cm^[3], 本文研究区域(上海轨道交通四号线海伦路站附近)内最大沉降量已达 16 cm. 考虑到研究区域属于轨道交叉部位, 为安全起见此处采用劈裂注浆加固方式, 但加固后的土体在地铁振动荷载的作用下也会产生残余变形, 加固软黏土的强度降低、应变软化, 以及微观结构的变形和破坏都会影响到注浆加固效果, 危及到地铁后期的正常运营.

各国学者对循环荷载作用下软黏土的特性进行

收稿日期: 2010-04-12

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: 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: tangyiqunz@tongji.edu.cn

了不少研究,但主要是分析不排水条件下软黏土的动应力大小与循环次数对残余变形、孔压、应变软化现象的影响,对循环荷载作用下软黏土特别是加固软黏土累积应变特性的研究还较缺乏.对于后者,C. L. Monismith 等^[4]提出软黏土的塑性应变与循环次数的指数模型

$$\epsilon_p = A_0 N^b \tag{1}$$

式中: ϵ_p 为累积塑性应变; N 为循环次数; A_0, b 均为相关试验参数.式(1)主要说明了循环加载次数的影响,对于其他各种影响因素的描述包含在系数 A_0, b 中. G. B. Parr ^[5]通过对伦敦土循环三轴试验,考虑了累积塑性应变速率和循环加载次数的关系,得到了如下残余应变模型:

$$\lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_N}{\dot{\epsilon}_1}\right) = \lg C_0 + \zeta \lg N \tag{2}$$

式中: $\dot{\epsilon}_N$ 为第 N 次循环的塑性应变率; $\dot{\epsilon}_1$ 为第 1 次循环加载的塑性应变率; C_0, ζ 均为试验常数.当 $N=1$ 时,可以得出 $C_0=1$. 蒋军^[6]进行了循环荷载作用下软黏土沉降、应变速率的试验研究,考虑了加载速率、动应力比、超固结比对残余应变速率的影响,但研究成果也没有考虑静偏应力与动偏应力的不同组合对应变速率的影响.黄茂松等^[7]基于临界状态土力学理论,通过对式(2)进行修正,引入了相对偏应力水平参数,考虑初始静应力、循环应力和不排水极限强度的相互影响,研究了静、循环应力组合下饱和软黏土的不排水循环累积变形特性.

本文参考国内外专家学者的研究方法 with 成果,以室内动态循环三轴试验(global digital systems, GDS)为基础,在循环荷载作用下,考虑频率、荷载幅值、围压、固结比等影响因素,对地铁隧道周围加固软黏土的累积应变进行研究,分析其影响因素,建立能反应这些影响因素的累积应变模型,并确定模型参数.研究结果不仅对地铁隧道软黏土加固设计具有重要的参考价值,而且对地铁振动荷载作用下隧道周围土体的长期沉降预测具有重要的理论价值和实际意义.

1 室内 GDS 试验设计

1.1 试验土样

所用加固软黏土取自上海轨道交通四号线海伦路站周围试验场地.软黏土的加固首先是通过钻孔,然后采取高压注浆的方式进行加固的.本次取样是

通过贯入(锤击)式薄壁取土器进行取样,所取试样为高 30 cm、直径 11 cm 的圆柱形土样,由于相关人员通过各种方法确定后续工程施工两注浆孔之间的间距为 1.5 m,因此取样孔与注浆孔之间的间距定为 0.8 m.加固软黏土的基本物理力学参数见表 1.

表 1 加固软黏土的基本物理力学指标
Tab.1 Physical and mechanical properties of reinforced clay

含水量 $w/\%$	天然重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	液性指 数 I_L	塑性指 数 I_P	相对密 度 G_s	黏聚 力/ kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
50	17.6	1.28	21.6	2.75	31.3	11.33

1.2 试验设计

室内试验采用英国进口多功能动态循环三轴试验系统 GDS,它可以实时监控整个试验过程,高速采集并储存数据,具有精度高、操作简易、结果可靠等优点,是一套数字化试验设备.

原状饱和软黏土在天然应力条件下,应力状态处于 K_0 固结应力条件.在遭受地铁行车荷载作用时,幅值的大小及频率很少有人做过相关研究.唐益群,张曦等^[8]通过现场连续监测,采集到了大量的钻孔实测数据.通过对钻孔实测数据的汇总、分析、整理,得到地铁列车经过监测点时引起土体的响应频率有两个,高频 f_H 一般为 2.4~2.6 Hz,低频 f_L 一般为 0.4~0.6 Hz.考虑到加固后土体响应频率有可能发生变化,因此室内试验采用 3 个频率,分别为 0.5,1.5,2.5 Hz.

在循环试验中,加固软黏土圆柱形土样首先进行反压饱和(saturated under back pressure),反压的作用是促使土样在固结过程中尽快达到饱和,取值 100 kPa.围压 σ_h 是根据实际天然土层计算所得,即 $\sigma_h = K_0 \sigma_v$,其中 K_0 为静止侧压力系数; σ_v 为天然土层竖向应力, $\sigma_v = \sum \gamma_i h_i$, γ_i, h_i 分别为实际各土层天然重度与厚度.固结完成后开始循环三轴试验.循环应力 σ_d 的施加应能最大限度模拟土体可能承受的动荷载,考虑到列车及隧道体系施加给隧道底部的附加应力在 20~40 kPa 之间^[9],本次试验采用的荷载幅值分别为 20,30,40 kPa,此循环荷载是以半波峰幅值施加于土样上.

相关资料显示^[8],地铁通过时,地铁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,因此试验时采用应力控制式循环加载模块.试

验方案如表 2 所示.

表 2 不排水动态循环三轴试验方案及控制参数
Tab.2 Scheme and control parameters of undrained dynamic cyclic triaxial test

试样编号	频率/Hz	循环荷载幅值/kPa	围压/kPa	反压/kPa	荷载振动次数 N	固结比
1	0.5	20	200	100	5 000	1.40
2	0.5	30	200	100	5 000	1.40
3	0.5	40	200	100	5 000	1.40
4	1.5	30	200	100	5 000	1.40
5	2.5	30	200	100	5 000	1.40
6	0.5	30	200	100	5 000	1.00
7	0.5	30	200	100	5 000	1.20
8	0.5	30	200	100	5 000	1.60
9	0.5	30	200	100	5 000	1.80
10	0.5	30	170	100	5 000	1.40
11	0.5	30	230	100	5 000	1.40

2 试验结果和分析

加固软黏土在循环荷载作用下的变形主要包括弹性变形和塑性变形(也叫残余变形,是指动应力卸除后土体残留的应变值,在动三轴试验中表现为动应力作用前后试样的高度差与动应力作用前试件的高度之比,残余应变是动应力卸除后土样的不可恢复应变),如图 1 所示,其中弹性变形是可逆的,塑性变形是不可逆的,具有累积性.并且在加载初期,弹性变形较小,塑性变形较大,随着振动次数增加,弹性变形越来越大,累积塑性变形也越来越大,但是变形增大的速率减小.下面将分别讨论各因素对残余应变的影响.

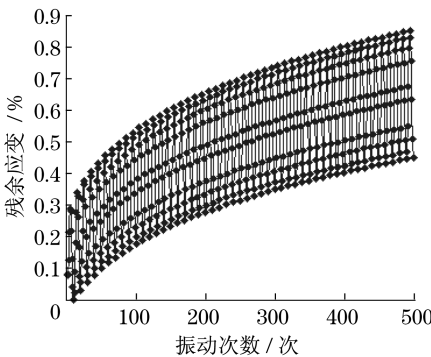


图 1 加固软黏土的变形特性

Fig.1 Deformation properties of reinforced clays

2.1 荷载频率的影响

将不同频率的加固软黏土的残余应变与振动次

数 N 的关系进行整理,如图 2 所示.从图 2 可以看出,随着振动次数的增加,加固软黏土的残余应变随之增大.相同振动次数下,低频(0.5 Hz)的残余应变较大,高频(2.5 Hz)的残余应变较小.这是因为随着振动次数的增加,土结构单元有压密的趋势,相邻且相互重叠的两个或多个单元之间逐渐靠近、压密,孔隙变得有定向性和规律性.

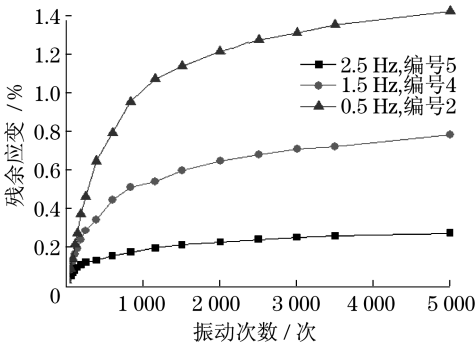


图 2 不同频率下残余应变与振动次数关系

Fig.2 Relationship between residual strain and vibration number under different frequencies

国内外很多专家学者得到了相似的结论,如 Matsui^[10]采用 $f = 0.02 \sim 0.50$ Hz,对 $I_p = 55$ 的黏土进行动三轴试验,结果表明,孔压和轴向应变均随循环次数的增加而增加,对于给定的循环次数,低频荷载产生较大的孔隙水压力和轴向应变.章克凌等^[11]基于 $I_p = 21.6$ 的饱和软黏土的循环三轴试验结果认为,对于给定的循环次数,频率愈低,动孔隙水压力愈高,轴向应变越大.张茹等^[12]对某土石坝心墙防渗黏性土饱和试样进行动三轴试验,研究了振动频率对土样动力特性的影响,得到的结论是振动频率愈低,试样动变形开展愈充分,动模量和阻尼比随振动频率的增长而增加.

与传统意义上的理解似乎不符的是低频产生较大的变形量,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下,低频荷载作用时间长,更有利于土体的压密.在地铁行车荷载作用下隧道周围土体变形的过程中,地铁运行时的动能一部分通过铁轨及隧道结构转移到土体上,这部分动能被消耗于抵消土体内部的等量颗粒骨架结构能,这样,土体内部的内能平衡被打破,继而产生形变.转移的地铁行车动能越多,隧道周围土体产生的形变就越大.而在相同振动次数作用下,荷载振动频率越低意味着荷载变化越慢,荷载作用在土体上的总时间也越多,因此土体能够产生更大的形变.将图 2 中残余应变与振次的变化关系转变成残余应变与时间的变

化关系,见图3。从图3可以看出,相同时间内,基本还是低频振动产生残余变形大。

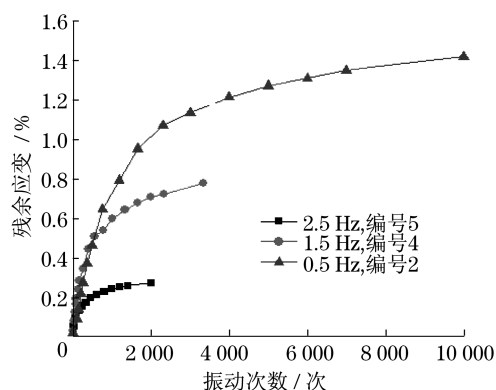


图3 不同频率下残余应变与振动时间关系

Fig.3 Relationship between residual strain and vibration time under different frequencies

2.2 荷载幅值的影响

以往的研究大多针对循环应力比进行^[2-8]。循环应力比大多定义为振动荷载幅值与土体不排水抗剪强度的比值。

根据循环应力比大小的不同,残余应变的发展形态可以分为3种典型情况,即稳定型、破坏型和临界型。临界型曲线所对应的动应力为临界动应力。因此,试样的累积塑性应变发展规律与动应力幅值大小有直接的关系。当动应力幅值大于临界动应力时,在有限的循环周次内,土样就会产生振动破坏;而当动应力幅值小于临界动应力时,随着循环周次的增加,土的残余应变会逐步趋于稳定。在地铁工程中,路基土体所承受的动应力幅值应小于土体的临界动应力,且动荷载循环次数很大。因此,本文主要分析稳定型残余应变的发展。从图4中可以看出,对应荷载幅值20,30,40 kPa达到稳定时的残余应变分别

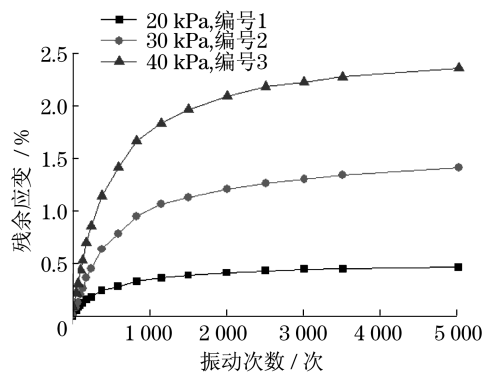


图4 不同荷载幅值下残余应变与振动次数关系

Fig.4 Relationship between residual strain and vibration number under different cyclic loading amplitudes

为0.47,1.42,2.36,稳定时对应的残余应变基本和荷载幅值是成线性关系的。

2.3 固结比的影响

为了分析固结比的影响,开展了固结比 K_c 分别为1.0,1.2,1.4,1.6,1.8的动三轴试验进行对比(本文中固结比 K_c 定义为循环三轴实验过程中轴压和围压的比值,即 $K_c = \sigma_1 / \sigma_3$, σ_1 和 σ_3 按有效应力计)。从图5可以看出,在相同的动应力幅值下,当 $K_c = 1.0$ 时,残余应变为负值(这是因为土体处在各向同性固结状态,不存在初始剪应力的作用,即 σ_1 和 σ_3 相等的情况,在动载作用下产生拉应变,其性状与砂土的剪胀性相似,文献[13]中也得到了相似的结论,并将其原因解释为加载初期有效主应力的急剧降低导致土骨架发生弹性释放),并且随着振动次数的增大而逐渐增大,达到一定的振动次数(约为2 000次)之后,逐渐达到了稳定。当 $K_c = 1.2$ 时,残余应变随着振动次数的增大先是快速增加,然后存在一个渐渐变稳的过程;当 $K_c = 1.4$ 时,在相同的动应力条件下,振动次数相同,它的残余应变值最大; $K_c = 1.6$ 时对应相同振动次数的残余应变要大于 $K_c = 1.8$ 时对应的残余应变,说明固结比对加固软黏土的影响存在一个先增大后减小的过程。原因是随着固结比的增大,超过某个临界值,初始剪应力也增大,该剪应力使土粒骨架变形更加趋于稳定,在相同的动载作用下,产生较小的变形。张茹等^[14]使用动三轴对某土石坝坝基饱和砂砾石料进行的动强度的试验中也得到了相似的结论。他们得到的结论是所有土料都存在一个转折点 K'_c ,在该转折点动强度、动孔压和动变形会发生转变,土料的不同可能对应的转折点 K'_c 不同。

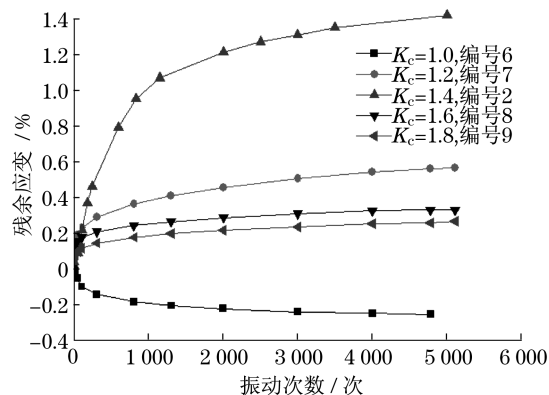


图5 不同固结比下残余应变与振动次数关系

Fig.5 Relationship between residual strain and vibration number under different consolidation ratios

2.4 围压的影响

关于土层深度对土体残余变形的影响鲜有研究,本次实验中土层深度的不同将通过不同的围压来体现.为研究循环荷载作用下围压 σ_3 对土体残余变形的影响,首先将加固土分别在170,200,230 kPa的围压下等压固结,然后进行偏压固结,固结完成后在幅值为30 kPa的情况下分别施加0.5 Hz循环荷载.

相同的振动频率、循环荷载幅值、固结比条件下的实验结果表明(图6),加固软黏土体在相同振动次数下的累积应变随围压的增加而降低.原因是在相同的固结比的条件下,围压越大,对应的轴压也越大,土体越密实,并且对应的动弹性模量也越大,在相同的动载作用下产生较小的应变.从图6中不同围压相同振动次数下对应的残余应变可以发现,残余应变基本随围压的增大线性减小.这同时也表明地铁振动对隧道周围土体的影响有一个临界深度,超过了这个深度,振动对土体累积变形影响较小.围压的大小,对于确定临界深度和隧道周围土体的加固范围具有非常重要的意义.

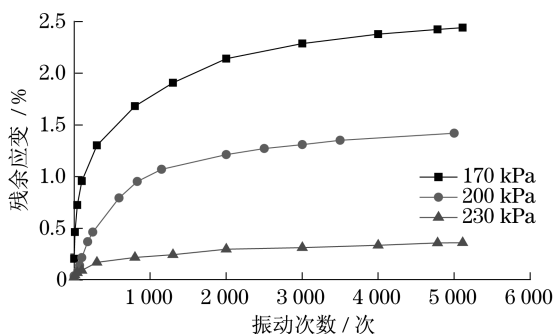


图6 不同围压下残余应变与振动次数关系

Fig.6 Relationship between residual strain and vibration number under different confining pressures

3 累积变形模型的建立

目前,最常用的累积塑性应变拟合模型^[4,15]是指数模型: $\epsilon_p = aN^b$, a, b 为与动应力水平和土体性质相关的参数, N 为振动次数.但是通过对试验数据分析发现,所有的数据存在一个共同特点:加载初期,试样变形较快,随加载(振动)次数的增加,试样逐渐压密,应变增量逐渐减小,直至动应变值基本趋于稳定,但累积塑性应变拟合模型却并不能趋于稳定.研究发现,利用对数关系曲线拟和能很好地反映其发展趋势,其特点在这种情况下, ϵ_p 和 N 成对数

关系,即

$$\epsilon_p = A \ln N + B \quad (3)$$

式中: A, B 为与动应力幅值、固结比、围压和土体性质相关的参数; N 为振动次数.

对图2中数据利用对数关系进行拟合,结果见图7.

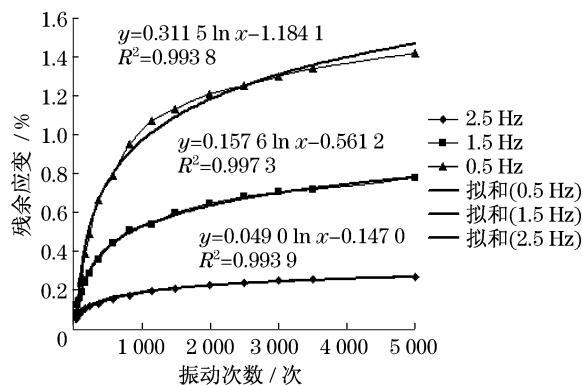


图7 不同频率下残余应变与振动次数关系拟合曲线

Fig.7 Fitting curve relationship between residual strain and vibration number under different frequencies

由此可以得到频率 f 对参数 A, B 的影响:

$$A = 0.0227 f^2 - 0.1992 f + 0.4054$$

$$B = -0.1044 f^2 + 0.8316 f - 1.5738$$

荷载幅值 σ_d 对参数 A, B 的影响:

$$A = 0.0210 \sigma_d - 0.3202$$

$$B = -0.0783 \sigma_d + 1.2097$$

固结比 K_c 对参数 A, B 的影响:

$$A = \begin{cases} 1.610K_c^2 - 2.983K_c + 1.332 & K_c < 1.4 \\ 3.213K_c^2 - 11.030K_c + 9.453 & K_c \geq 1.4 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} -11.910K_c^2 + 25.400K_c - 13.400 & K_c < 1.4 \\ -14.220K_c^2 + 48.400K_c - 41.100 & K_c \geq 1.4 \end{cases}$$

围压 σ_3 对参数 A, B 的影响:

$$A = -0.0001 \sigma_3^2 + 0.0459 \sigma_3 - 3.805$$

$$B = 0.0010 \sigma_3^2 - 0.3818 \sigma_3 + 36.370$$

4 结论

通过对前期的现场监测资料进行分析,根据室内GDS试验,研究了振动频率、循环动应力幅值、固结比、围压等对加固软黏土残余应变发展规律的影响,建立了相应的累积变形模型.结论如下:

(1) 相同振动次数下,低频(0.5 Hz)的残余应变较大,高频(2.5 Hz)的残余应变较小;相同时间内,基本还是低频振动产生残余变形大.

(2) 地铁振动荷载作用下加固软黏土残余应变的发展形态表现为稳定型,残余应变随着振动次数的增大而增大,但是增大的速率逐渐减小,最后趋于一个稳定值,且循环动应力幅值越大,残余应变越大.在某个荷载幅值范围内(20~40 kPa),残余应变的稳定值基本和荷载幅值成线性关系.

(3) 固结比对残余应变的发展影响较为显著,表现为:当 $K_c = 1.0$ 时,残余应变为负值,达到一定的振动次数后达到稳定;当 $K_c > 1.0$ 时,固结比对加固软黏土的影响存在一个先增大后减小的过程.

(4) 其他条件相同时,残余应变随围压的增大而减小.研究结果对确定隧道周围土体的加固范围具有非常重要的意义.

(5) 通过研究认为,可以用对数关系曲线来较好地描述加固软黏土残余应变随振动次数的变化情况.并且通过回归分析,确定了各影响因素对残余应变发展预测模型影响的参数.

参考文献:

- [1] 潘昌实,谢正光.地铁区间隧道列车振动测试与分析[J].土木工程学报,1990,23(2):21.
PAN Changshi, XIE Zhengguang. Measurement and analysis of vibrations caused by passing trains in subway running tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23(2): 21.
- [2] 曹新文,蔡英.铁路路基动态特性的模型试验研究[J].西南交通大学学报,1996,31(1):36.
CAO Xinwen, CAI Ying. A model test study of the dynamic performance of subgrades [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 36.
- [3] 刘明,黄茂松,李进军.地铁荷载作用下饱和软黏土的长期沉降分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(5):813.
LIU Ming, HUANG Maosong, LI Jinjun. Long-term settlement of saturated soft clay under subway loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 81.
- [4] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [R]. Washington, D C: Transportation Research Board, 1975.
- [5] Parr G B. Some aspects of the behavior of London clay under repeated loading [D]. Nottingham: University of Nottingham, 1972.
- [6] 蒋军.循环荷载作用下黏土及砂芯复合试件性状试验研究[D].杭州:浙江大学土木工程系,2000.
JIANG Jun. Analysis for the behaviour of clay and sand cored composite specimens under cycle loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University. Department of Civil Engineering, 2000.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘莎.地铁行车荷载作用下隧道周围饱和软黏土流变效应研究[D].上海:同济大学地下建筑与工程系,2007.
LIU Sha. The study on the rheological properties of saturated soft clay around the tunnel under subway loading [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Geotechnical Engineering, 2007.
- [10] Matsui T, Ohara H, Ito T. Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay [J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1980, 106(10): 1101.
- [11] 章克凌,陶振宇.饱和黏土在循环荷载作用下的孔压预测[J].岩土力学,1994,15(1):9.
ZHANG Keling, TAO Zhenyu. The prediction of pore pressure of saturated clay under cyclic loading [J]. Rock and soil mechanics, 1994, 15(1): 9.
- [12] 张茹,涂扬举,费文平,等.振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J].岩土力学,2006,27(5):699.
ZHANG Ru, TU Yangju, FEI Wenping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 699.
- [13] 张曦.地铁振动对隧道周围软黏土微结构影响及动力特性研究[D].上海:同济大学地下建筑与工程系,2007.
ZHANG Xi. The study on the micro-structure and dynamic characteristic of soft clay around the tunnel under the subway-included loading [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Geotechnical Engineering, 2007.
- [14] 张茹,何昌荣,费文平,等.固结应力比对土样动强度和动孔压发展规律的影响[J].岩土工程学报,2006,28(1):101.
ZHANG Ru, HE Changrong, FEI Wenping, et al. Effect of consolidation stress ratio on dynamic strength and dynamic pore water pressure of soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 101.
- [15] 张勇,孔令伟,郭爱国,等.循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J].岩土力学,2009,30(6):1542.
ZHANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1542.