

DOI: 10.11779/CJGE2014S2009

# 武汉深基坑施工动荷载诱发软土塑性应变研究

冯晓腊, 崔德山\*, 李翔, 易明, 刘文远

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 随着城市建设的高速发展, 武汉市深基坑机械施工振动荷载诱发软土层过大地面沉降和塑性变形已成为亟待解决的关键问题。针对施工过程中机械振动荷载和往复交通荷载引起的淤泥和淤泥质黏土地基长期沉降问题, 考虑到软土的结构特性、触变性和小应变特征, 采用室内三轴试验、共振柱试验, 现场剪切波速测试、地脉动测试和十字板剪切试验综合分析软土在机械振动荷载和往复交通荷载条件下的沉降、变形机理。论文得出如下结论: 高灵敏度淤泥和淤泥质黏土的不固结不排水剪切强度主要是黏聚强度, 在振动荷载下, 触变性增加; 共振柱试验中, 随着剪应变的增加, 淤泥的共振频率 $f$ 随之增大, 动剪切模量 $G$ 随之减小, 阻尼比 $\lambda$ 变化不明显; 而淤泥质黏土的共振频率 $f$ 和动剪切模量 $G$ 随之减小, 阻尼比 $\lambda$ 有增大的趋势; 场地的剪切波速随地层的结构、强度和土层分布而变化; 现场地脉动测试3个方向的共振频率均远小于共振柱测试的共振频率; 最后, 基于机械振动波在淤泥和淤泥质黏土中峰值加速度放大效应, 提出修正现有软土塑性应变计算公式的建议。

**关键词:** 淤泥; 淤泥质黏土; 共振频率; 剪切波速; 放大效应

中图分类号: TU44; O319.56 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0048-08

**作者简介:** 冯晓腊(1964-), 男, 教授, 主要从事水文地质与工程地质、岩土力学与工程等教学、科研及实际工程工作。E-mail: fxlfd@163.com。

## Plastic deformation of soft clay under dynamic loading of deep foundation construction in Wuhan

FENG Xiao-la, CUI De-shan, LI Xiang, YI Ming-ming, LIU Wen-yuan

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** With the rapid development of urban construction, the problems of ground subsidence and plastic deformation of soft clay under dynamic loading of deep foundation construction in Wuhan are urgent to be solved. Considering the issue of long-term ground settlement in the layers of silt and silty clay due to machinery vibration loading and repeated loading as well as the characteristics of structure, thixotropy and small strain of soft clay, the static triaxial test, resonant column test, field shear wave velocity test, ground micro-tremor test and vane shear test are taken to comprehensively analyze the mechanisms of ground subsidence and deformation under the machinery vibration loading and repeated loading. The test results show that the unconsolidated and undrained shear strengths are determined by the cohesive strengths of high-sensitivity silt and silty clay. The resonant frequency of the silt has a positive correlation with shear strain, but the dynamic shear modulus has a negative one. The resonant frequency and dynamic shear modulus of silty clay has a negative correlation with shear strain, but the damping ratio has a positive one. The filed shear wave velocity is determined by the structure, strength and distribution of soil stratum. The resonant frequency of three directions monitored by the ground micro-tremor test is much smaller than that of the resonant columns test. Based on the amplification effect of vibration wave peak acceleration in silt and silty clay, the formula for plastic strain of soft clay is suggested to be modified.

**Key words:** silt; silty clay; resonant frequency; shear wave velocity; amplification effect

## 0 引言

随着城市建设的高速发展, 武汉市市政工程、地铁工程及工民建超大深基坑工程日益增多。老城区存有大量的平房和多层建筑, 多采用天然地基作为持力层, 有些地基下卧软土层, 如淤泥和淤泥质黏土等。软土

地层对周边的交通往复荷载和深基坑施工机械振动荷

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002102); 武汉市城乡建设委员会科技计划项目(201226)

收稿日期: 2014-07-28

\*通讯作者

表 1 试样基本物理力学参数表

Table 1 Basic physical and mechanical properties of soil samples

地层 名称	天然 含水率 $w\%$	重度 $\gamma$ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	天然 孔隙 比 $e$	液限 $w_L$ %	塑限 $w_p$ %	塑性 指数 $I_p/\%$	液性 指数 $I_L$	压缩 系数 $a_{1-2}$ $/\text{MPa}^{-1}$	压缩 模量 $E_s$ $/\text{MPa}$	有机 质含量 $W_u$ %	垂直渗透 系数 $K_v$ $/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	无侧限 抗压强度 $q_u$ $\text{kPa}$	灵敏 度 $S_t$
淤泥	53.6	16.5	1.523	49.7	28.1	22.18	1.2	1.13	2.4	6.5	$3.3 \times 10^{-7}$	20	2.2
淤泥质黏土	42.4	17.4	1.214	40.9	24.7	19.4	1.0	0.69	3.2	4.2	$1.2 \times 10^{-7}$	32	1.9

载极其敏感, 当软土厚度、结构和所处环境合适时, 甚至可以对地震动产生放大效应<sup>[1]</sup>。而放大效应主要是由自由面或岩土层界面对 SH (水平剪切波) 波的反射、折射所引起。

淤泥和淤泥质黏土属于软土, 为第四纪沉积物, 大部分是在静水或缓慢的流水环境中沉积形成, 多为河湖相沉积, 含有大量黏土矿物以及较多有机质, 矿物定向排列较明显, 层理较发育, 多具薄层状构造, 偶含有粉砂夹层或泥炭透镜体。淤泥和淤泥质黏土具有高含水率、大孔隙比、高压缩性、低渗透性和低强度。基本上未经过地质运动, 未受过较大荷载及地震动力作用, 具有一定的胶结作用, 结构形式上常为蜂窝状或棉絮状, 被扰动后结构易被破坏而强度降低<sup>[2-4]</sup>。淤泥和淤泥质黏土具有较大的触变性和流变性, 其灵敏度一般在 3~4 之间, 个别可达 10 以上。因此, 深基坑在开挖、支护及降水过程中, 由于受到往复交通荷载、施工机械振动荷载作用, 淤泥和淤泥质黏土由于过大塑性变形易产生侧向滑动和地面沉降等地质灾害, 例如: 2005 年, 在长江隧道江南明挖段深基坑施工过程中, 位于武汉理工大学校园内的多栋六层民宅发生了较大沉降及不均匀沉降。2010 年 10 月, 汉口三眼桥中华城深基坑在开挖过程中, 导致周围方圆 1  $\text{km}^2$  范围内的房屋均有不同程度的沉降。2011 年, 汉口新华路与建设大道交汇处的广发大厦深基坑开挖至设计标高后, 周边 400 m 范围内均发现沉降, 最大达到 6 cm。这些基坑开挖均碰到软土地层。

显然, 振动荷载在淤泥和淤泥质黏土中形成的应力条件非常复杂, 振动产生的剪切波是使软土地基产生变形破坏的主要原因, 一般采用峰值加速度来衡量其破坏能力<sup>[5]</sup>。因此, 研究软土在振动作用下的应力 - 应变特性时, 主要研究其动剪应力和动剪应变的关系, 而反应这一特性最重要的 2 个指标是动剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$ 。所以在不同动力条件下, 分析软土的动剪切模量、阻尼比的动力特性, 是预测软土剪切应变、逆性变形的重要基础。Andreasson 等<sup>[6-7]</sup>通过现场剪切波速试验和室内共振柱试验研究了软土的动力学特征, 均得出随着剪切应变的增加动剪切模量减小, 当剪切应变达到 0.1%~0.2% 时, 由于孔隙水压力急剧增加, 从而导致试样破坏。Anderson 等<sup>[8]</sup>研究了

黏土的动剪切模量与剪应变的关系, 得出存在剪应变阈值, 当剪应变低于该值时, 动剪切模量不受剪应变的影响; 当剪应变超过该阈值时, 动剪切模量减小。

软土地基又具有强烈的应力 - 应变非线性特征, 为了能够进行软土地层的机械振动反应分析, 必须采用试验的方法研究小应变 ( $<10^{-4}$ ) 过程中动态的应力 - 应变关系。所以本论文分别采用室内三轴试验、共振柱试验, 现场单孔波速测试、地脉动测试和十字板剪切试验研究高灵敏度淤泥和淤泥质黏土在小应变条件下的动力学特性, 揭示武汉深基坑施工动荷载诱发软土塑性应变的机理。

## 1 试样与试验方案

### 1.1 试样

试样分别为淤泥和淤泥质黏土, 取自武汉市儿童医院深基坑底部, 位于地表以下 10 m 处 (图 1)。淤泥为灰黑色, 流塑, 饱和, 含腐植物及少量螺壳; 淤泥质黏土为灰—灰褐色, 流塑—软塑, 饱和, 含腐植物及云母片, 基本物理力学参数见表 1。由于淤泥和淤泥质黏土具有结构性和触变性, 在取样、包装和运输时需要十分小心。现场用钢丝锯和切土刀小心将试样装入自制的  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  薄壁取土器中, 并放入装有原地下水的水桶内维持饱和状态。取回实验室后, 放入饱和缸内抽真空饱和, 待用。



图 1 武汉市儿童医院深基坑现场

Fig. 1 Deep foundation pit of Wuhan Children's Hospital

### 1.2 试验仪器

#### (1) 三轴试验

采用中国地质大学 (武汉) 的英国 GDS 三轴仪对

饱和淤泥和淤泥质黏土进行 50, 100, 150 kPa 下不固结不排水三轴压缩试验, 试样直径 39.1 mm, 高 80 mm, 控制轴向应变速率为 0.005/min。然后分别绘制轴向应力 - 应变曲线和法向应力与抗剪强度曲线, 从而求得抗剪强度指标。

### (2) 十字板剪切试验

由于开挖深基坑的场地地层中含有较厚的淤泥和淤泥质黏土, 为了测试天然土层的不排水抗剪强度和灵敏度, 采用电测式十字板剪切仪进行原位试验。测试深度为地表以下 3~11 m, 测试间距为 1 m, 十字板插入试验深度后, 至少应静止 3 min 方可开始试验, 扭转剪切速率为  $1^\circ / 10 \text{ s}$ , 并在测得峰值强度后继续测记 1 min, 测定残余强度和重塑土的不排水抗剪强度, 从而计算其灵敏度。

### (3) 共振柱试验

采用中科院武汉岩土力学研究所的英国 GDS-RCA 型固定-自由型共振柱对淤泥和淤泥质黏土进行共振试验, 如图 2 所示。该仪器由一个驱动系统产生扭矩, 通过位于试样自由端顶盘上的加速度传感器, 获得试样受驱动后的响应。在试验过程中, 通过改变所施加振动力, 获得试样在某一固结压力下的共振频率。根据获得的频幅曲线, 计算试样的动剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$ 。

共振柱试验可以在不破坏试样情况下研究小应变范围内的动力学性能。以一维波动理论为基本原理, 试样下端固定, 上端自由, 通过驱动盘在试样上施加扭转激振力, 测出试样的共振频率后, 按照波动理论计算出试样的动剪切模量, 计算公式如下:

$$G = \rho \left( \frac{2\pi f}{\beta} \right)^2 \quad (1)$$

式中  $G$  为土样的动剪切模量 (kPa);  $\rho$  为土样的质量密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $f$  为扭转振动共振频率 (Hz);  $h$  为试样高度 (cm);  $\beta$  为扭转振动频率方程特征值。



图 2 GDS-RCA 型固定-自由型共振柱

Fig. 2 GDS-RCA resonant column

在共振柱试验过程中, 试样的阻尼比根据自由振动驱动盘的加速度计测得衰减曲线计算得出。在测得试样某一剪应变的共振频率后, 再施加一个频率的瞬时正弦波, 测量试样自由振动的曲线, 如图 3 所示。阻尼比的计算公式如下:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi n} \ln \left( \frac{u_1}{u_{n+1}} \right) \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为阻尼比;  $n$  为振动次数;  $u_1$  为停止激振后第 1 周振动的振幅 (mm);  $u_{n+1}$  为停止激振后第  $n+1$  周振动的振幅 (mm)。

将饱和试样装入 GDS RCA 上, 打开 GDS 的饱和模块, 输入试样在原位状态下的围压和反压, 控制围压增加速率为 100 kPa/h。当达到试验要求有效应力后, 保持 6 h。然后开始共振试验, 首先要对试样进行共振条件下的扫频, 在一次扫频完成后, 进行自由振动试验, 从而得到共振频率和阻尼比, 试验后的试样如图 4 所示。

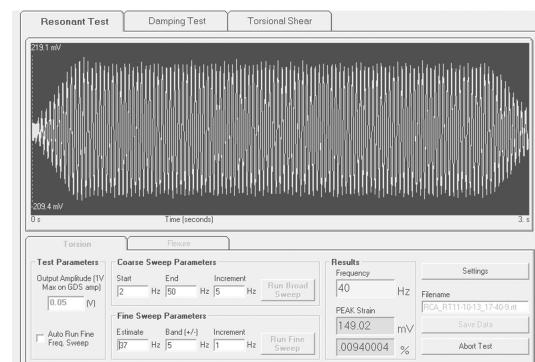


图 3 试样共振频率曲线

Fig. 3 Curves of resonant frequency of samples



图 4 共振柱试验前后土样

Fig. 4 Samples before and after resonant column test

### (4) 波速测试

为了研究场地的剪切波速及其与动剪切模量的关系, 2007 年 4 月对现场进行剪切波速测试。根据《地

基动力特性测试规范》标准(GB/T50269—97),采用单孔波速法进行测试。

孔中拾震器采用南京高旺电子仪器厂生产的CJ-84型充气贴壁式三分量井下地震检波器。该仪器外径为60 mm,自振频率为27 Hz,频率范围0~200 Hz。主机采用武汉岩海工程开发有限公司生产的RS-K1616P检测仪,触发传感器为CDJ-Z83振子。将三分向检波器放置井中不同位置,由采样器记录来自井中检波器接收到的信息。井中三分向检波器由下往上提,20 m以下2 m采集一次数据,20 m以内1 m采集一次数据。剪切波速按下式进行计算:

$$V_i = \frac{(1 - \frac{H_{i-1}}{H_i})\sqrt{S^2 + H_i^2}}{t_i - \frac{H_{i-1}}{H_i}\sqrt{(S^2 + H_i^2) \div (S^2 + H_{i-1}^2)}t_{i-1}} \quad (3)$$

式中  $V_i$  是第  $i-1$  点到第  $i$  点土层的剪切波速(m/s);  $H_i$  是第  $i$  点的深度(m);  $S$  是激振板到孔中心的距离(1.5 m);  $t_i$  为第  $i$  点的剪切波初至时间(s)。

#### (5) 地脉动测试

为了与室内共振柱试验测得的共振频率相比较,采用891型拾震器测试场地地面振动周期与频率,测试时保证人员不要在附近行走,车辆不要在附近通行。采取南北水平、东西水平及竖直地面3个方向里程记录,得出场地的固有周期与频率。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 三轴抗剪强度

由于深基坑的开挖速度较快,且深基坑周围淤泥和淤泥质黏土的渗透系数较小,所以其排水速度较慢。施工过程中,在机械振动和往复交通荷载作用下,淤泥和淤泥质黏土来不及固结,主要引起的是土层中孔隙水压力的变化,其强度为不排水抗剪强度,破坏时的应力圆直径几乎不变,典型的法向应力-抗剪强度曲线如图5所示。试验统计的淤泥的抗剪强度参数平均值分别为  $c=12$  kPa,  $\varphi=1^\circ$ ; 淤泥质黏土的抗剪强

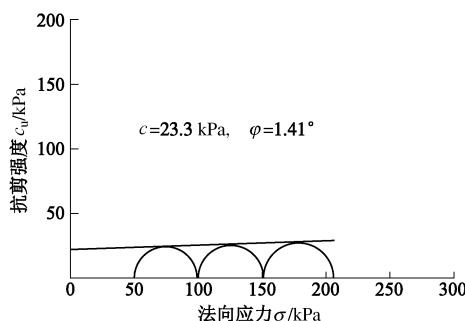


图5 典型淤泥质黏土抗剪强度(UU)

Fig. 5 Shear strength (UU) of typical silty clay

度参数平均值分别为  $c=19$  kPa,  $\varphi=1^\circ$ 。可见,由于淤泥和淤泥质黏土的摩擦强度非常小,在地表振动下,造成变形破坏的原因主要是其结构排列形式的变化和黏聚强度的降低。

### 2.2 十字板剪切强度与灵敏度

根据勘察钻孔柱状图,选取淤泥和淤泥质黏土层共测试55点次,统计时去掉部分异常点,选取其中39个测试结果进行统计,如图6所示。为了研究软土在振动荷载下的原位不排水抗剪强度规律,统计了深度在3.0~11.0 m之间,抗剪强度随埋深的计算公式:

$$C_u = 5.431 + 1.666H \quad (4)$$

式中  $C_u$  为不排水抗剪强度(kPa);  $H$  为试验深度, m。根据十字板剪切试验残余强度与峰值强度的结果,计算出淤泥和淤泥质黏土的灵敏度为4.83~16.9,属高灵敏度土层。深基坑施工过程中,在机械振动荷载和往复交通荷载作用下,易发生冲剪破坏,造成地面沉降。

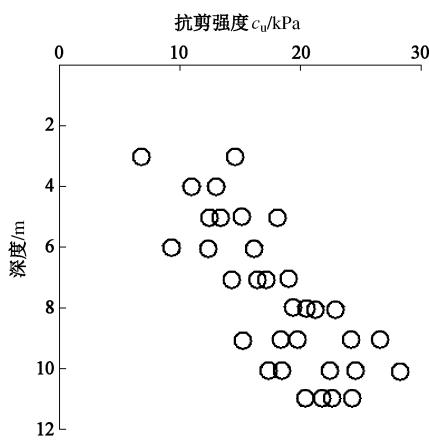


图6 现场十字板剪切试验深度统计图

Fig. 6 Statistics of depth of field vane shear strength test

### 2.3 共振频率、动剪切模量与阻尼比

深基坑周围软土的自振频率是控制场地工程动力学特性的重要因素之一。为了避免往复车辆振动,施工机械振动与场地软土层产生共振效应,机械振动的频率应避开软土的固有频率。而且,软土的共振频率与其形成年代、成因、结构、受力状态、地下水位等因素密切相关。

淤泥和淤泥质黏土的共振频率并不是固定值,而是随着有效应力和剪应变的变化而变化。在共振柱试验中,测出的是试样对应于某一固结压力和剪应变下的共振频率。由于试样取自地表以下10 m处,为了模拟试样在基坑开挖和支护过程中受到的自重应力和附加应力,给试样施加200 kPa围压,在不排水条件下对饱和试样进行固结,然后开始共振试验,试验结果见表2。可以看出,淤泥和淤泥质黏土的共振频率

表2 淤泥与淤泥质黏土的动力学参数

Table 2 Dynamic parameters of silt and silty clay

参数	土类							
	淤泥质黏土				淤泥			
剪应变/10 <sup>-4</sup>	0.297	0.503	0.685	1.106	8.095	12.829	0.664	1.297
共振频率/Hz	31	30.2	29	14	11	10.4	24	24
动剪切模量 MPa	80.82	76.70	70.73	16.48	10.18	9.10	48.44	48.44
阻尼比	0.129	0.073	0.103	0.111	0.155	0.284	0.083	0.083

在 11~33 Hz 之间。随着剪应变的增加, 淤泥的共振频率增加, 动剪切模量减小, 而阻尼比呈波动变化。随着剪应变的增加, 淤泥质黏土的共振频率和动剪切模量减小, 阻尼比呈现出增大的趋势。所以, 深基坑施工过程中, 在地表机械振动荷载和附加应力作用下, 软土地层产生小应变, 导致其动剪切模量降低, 压缩系数增大, 从而产生地面沉降。

## 2.4 剪切波速

由于剪切波速与软土的强度、变形特性等密切相关(例如标贯值 N、单轴抗压强度等), 因而在软土振动反应分析和软土结构变化研究<sup>[9]</sup>等方面都得到广泛的应用。剪切波速表征了软土在小应变下土体的剪切刚度, 是一个既能全面反应土体结构特征又易于测量的重要指标。周锡元等<sup>[10]</sup>研究了剪切波速在一般沉积环境下随深度的变化规律, 并将 283 个钻孔资料按式(5)进行回归分析:

$$V_s = 242.5 \frac{(1+l)^{0.291}}{H^{0.217}} \quad . \quad (5)$$

式中 H 为覆盖层厚(m); h 为相应波速 V<sub>s</sub> 的土层深度(m)。但是其统计相关系数只有 0.56, 标准差为 0.43。

现场各地层剪切波速测试结果见表 3。依据经验公式(5)可知, 淤泥和淤泥质黏土的剪切波速随深度

增加而增大, 但是由于粉细砂下面还有粉土与粉质黏土互层, 反而导致其平均剪切波速减小。因此, 关于剪切波速随深度的变化规律统计公式不可盲目应用, 尤其是像深基坑工程, 必须通过现场试验确定工程场地各类土的剪切波速与深度的关系。

根据剪切波速测试结果, 场区地面下 20.0 m 深度范围地基土的等效剪切波速 V<sub>se</sub>=120~126 m/s, 按《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) 第 4.1.3 条判定, 本场地属软弱场地土。通过本次钻探揭示, 并结合剪切波速测试结果, 拟建场区覆盖层厚度在 41.2~44.0 m 左右, 按《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) 第 4.1.6 条判定, 拟建场地属 III 类建筑场地。对 III 类建筑场地, 建议剪切波速与动剪切模量的关系为

$$\Delta v/v_0 = 4.41 \Delta G/G_0 - 6.28(\Delta G/G_0)^2, \quad (6)$$

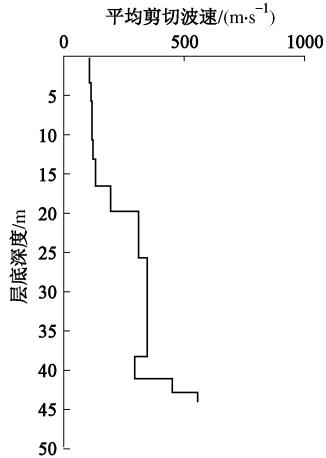
式中,  $\Delta G/G_0$  表示剪应变 10<sup>-4</sup> 时动剪切模量的相对变化量,  $\Delta v/v_0$  表示剪切波速的相对变化量。可以看到, 由于软土具有强烈的非线性, 这种对等关系受场地类别、场地振动强度和输入波型等因素的影响。而且, 动剪切模量非线性误差对地振动的敏感性要明显大于剪切波速, 敏感性程度相差范围在 3~5 倍<sup>[11]</sup>。

需要指出的是, 在深基坑开挖与支护过程中, 各地层的剪切波速并不固定, 而是随着软土的结构性、

表3 场地地层剪切波速测试结果

Table 3 Shear wave velocity of strata in site

层号	土层描述	厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )	平均剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )
1	杂填土	3.5	17.7	106	0
2	淤泥质黏土	2.3	14.0	112	500
3	淤泥	4.9	16.5	116	1000
4	淤泥质黏土	2.4	17.4	123	
5	粉质黏土夹黏土	3.5	18.0	134	
6	粉土与粉质黏土互层	3.2	17.8	194	
7	粉砂	5.8		312	
8	粉细砂	12.6		349	
9	粉土与粉质黏土互层	2.8	18.9	297	
10	粉细砂	1.8		451	
11	强风化砂砾岩	1.2	25.8	554	





有效应力和地层的分布而变化, 所以可利用剪切波速作为静力和动力作用下土体结构损伤演化与地面塑性应变的主要指标, 为揭示软土在振动荷载下沉降机理提供科学依据和定量参数。

## 2.5 固有周期和频率

根据地面脉动测试结果, 该建筑场区共振频率分别为东西方向 3.21 Hz, 南北方向 3.17 Hz, 垂直方向 3.08 Hz, 见表 4。可知, 场地地面测得的共振频率远低于下伏淤泥和淤泥质黏土层的共振频率。所以, 对于给定的机械振动, 下伏淤泥和淤泥质黏土更易受到振动而产生塑性变形。

对于给定的输入振动条件, 当场地的软弱土层厚度适当时, 会对地表加速度峰值产生明显的放大作用; 当软弱土层的厚度超过一定界限值时, 加速度放大系数会小于 1, 也即软弱土层可起到减震的作用。对于给定的输入振动和峰值加速度水平, 随着软弱夹层埋深的增加, 地表加速度峰值也会产生放大作用。

表 4 场地固有周期和频率

Table 4 Natural period and frequency of site

垂直方向		东西方向		南北方向	
频率 /Hz	周期/s	频率 /Hz	周期/s	频率 /Hz	周期/s
3.08	0.32	3.21	0.31	3.17	0.32

## 2.6 振动荷载下软土的累积塑性变形研究

武汉市深基坑在开挖和支护施工过程中, 由于挖掘机、搅拌车和混凝土泵车等长期对地下软土的机械振动荷载, 使地面产生较大的沉降与不均匀变形, 且其影响半径不易确定。如果不能意识到或不能控制这种沉降变形, 便会对深基坑本身及基坑周围的建筑物造成严重的经济损失和社会影响。目前, 计算循环荷载下软土累积变形的方法主要包括 3 种: 数值模拟法、等效静荷载法和经验公式法<sup>[12-14]</sup>。

在各种计算模型当中, 广泛使用的是 Monismith 提出的经验公式<sup>[15]</sup>, 该公式建立了软黏土在往复交通荷载作用下累计塑性应变与应力水平、应力作用次数的关系:

$$\varepsilon_p = A \times N^b \quad . \quad (7)$$

式中  $\varepsilon_p$  为累积塑性应变 (%);  $N$  为循环荷载作用次

表 5 参数  $a$ ,  $b$  和  $m$  的平均值 (取值范围)

Table 5 Average values of parameters  $a$ ,  $b$  and  $m$

土质类型	<0.075 mm/%	塑性图中位置	$a$	$b$	$m$
高液限黏性土(CH)		A 线以上, WL>40%	1.2(0.82~1.5)	0.18(0.12~0.27)	2.4(1.3~3.9)
低液限黏性土(CL)	75~100	A 线以上, WL<40%, IP>10	1.1(0.3~3.5)	0.16(0.08~0.34)	2.0(1.0~2.6)
低液限粉性土(MH)		A 线以下, WL<40%	0.84	0.13(0.08~0.19)	2.0(1.3~4.2)
低液限粉性土(ML)		A 线以下, WL<40%, IP<7	0.64	0.10(0.06~0.17)	1.7(1.4~2.0)

数;  $A$  和  $b$  为常数, 其值由软土的类型、性质和应力状态决定。显然该公式过分强调了循环荷载的次数对累积塑性应变的贡献, 且随着循环次数的增加, 其误差增大。对常数  $A$  和  $b$  的选取也缺乏定量化试验数据, 通过反演方法可得到参数  $A$  的取值范围 0.0005~6.3, 参数  $b$  的取值范围 0.21~0.29。实际上, 可以用更定量的参数比如软土的应力状态、软土的物理状态 (含水率和干密度) 和软土的类型等来代替经验参数  $A$  和  $b$ 。基于此, Li 等<sup>[16]</sup>建议了一个计算常数  $A$  的公式如下:

$$A = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m \quad . \quad (8)$$

式中  $\sigma_d$  为交通荷载产生的动偏应力;  $\sigma_s$  为静态失效强度;  $a$  和  $m$  为常数。代入式 (7) 可得

$$\varepsilon_p = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m \times N^b \quad . \quad (9)$$

式 (9) 中静态失效强度  $\sigma_s$  与软土的含水率、干密度和结构等有关。Li 等通过对 22 种软土的反演计算, 得出参数  $a$  的取值范围 0.3~3.5, 参数  $m$  的取值范围 1.0~4.2, 可见与 Monismith 提出的常数  $A$  相比, 其变化范围小得多。笔者综合 Li 等<sup>[16]</sup>、唐大雄<sup>[17]</sup>土质分类, 可将不同土质类型的  $a$ ,  $b$  和  $m$  的平均值 (取值范围) 整理为表 5。

式 (9) 虽然考虑了软土的静态失效强度, 但没有考虑软土的静偏应力条件, Chai 等<sup>[18]</sup>假设软土的动偏应力低于其动强度, 软土处在正常固结状态到微超固结状态, 并且考虑初始的静偏应力条件, 提出了一个在往复交通荷载作用下计算软土累计塑性变形的经验公式如下:

$$\varepsilon_p = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m \left( 1 + \frac{\sigma_t}{\sigma_s} \right) (N^b) \quad , \quad (10)$$

式中,  $\sigma_t$  为初始静偏应力,  $n$  为常数, 其余参数定义见式 (9)。从形式上看, 式 (10) 在考虑了软土初始偏应力条件时, 其计算得出的累积塑性应变就比式 (9) 计算的偏大, 那么其计算结果是否更接近实际了呢? 显然其适用性值得商榷, 因为软土中初始偏应力的大小会反映在软土的静态失效强度中。为了验证式 (10)

的适用性, Cui 等<sup>[14]</sup>采用原位试验的方法研究冲积粉土在循环交通荷载条件下的累积塑性变形, 试验结果与式(10)拟合的结果相似, 但是在交通循环初始阶段, 原位测试得到的沉降量要大于式(10)计算得到的沉降量。

所以笔者认为, 考虑黏土累积塑性应变和循环加载次数基础上, 将黏土剪切波速和共振频率等因素的影响考虑在循环加载塑性应变中, 具有一定的物理意义且易于确定。于是计算饱和软黏土轴向循环塑性累积应变公式可增加与剪切波速与频率相差的放大系数 $\lambda_m$ , 修正计算公式如下:

$$\varepsilon_p = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m \left( 1 + \frac{\sigma_t}{\sigma_s} \right)^n (N^b) \lambda_m \quad (11)$$

显然, 对 $\lambda_m$ 的取值需要进行大量的试验与统计工作, 其值根据地层剪切波速和共振频率共同确定。

## 2.7 软土对振动峰值加速度的放大系数

在开挖深基坑过程中, 由于机械的振动荷载或交通的往复荷载, 使覆盖深厚软土的场地地面沉降、变形破坏问题越来越突出。工程场地地表振动特性与场地土层条件有很大的关系, 且深厚软弱场地的地表振动具有长周期分量丰富的特点<sup>[19]</sup>。对于同一振源的机械振动, 其对不同深度、不同半径范围内土层振动反应不同, 其峰值加速度或是放大或是衰减。陈继华<sup>[20]</sup>研究了新近沉积软土在不同地震波下的地表加速度放大系数, 输入Taft地震波, El centro地震波和Northridge地震波, 将加速度峰值也依次调整为 $0.35 \text{ m/s}^{-2}$ ,  $0.70 \text{ m/s}^{-2}$ 和 $0.98 \text{ m/s}^{-2}$ , 探讨了软弱表层土的厚度和软弱夹层土的埋深及厚度对场地放大效应的影响规律。战吉艳等<sup>[21]</sup>研究了大地震远场地震波作用时深软场地的地表峰值加速度放大效应非常显著, 与常规的人工地震波作用时的地表峰值加速度放大效应相比, 相应于小震、中震和大震水平, 地表峰值加速度放大系数依次平均增大 $27.8\% \sim 81.0\%$ ,  $36.0\% \sim 83.1\%$  和 $50.6\% \sim 103.5\%$ 。

与大地震地震波作用时深软场地的地表峰值加速度放大效应相同, 这里可以用深基坑施工现场测得的振动波峰值加速度(亦可以用剪切波速, 剪切能量或速度来表征)来定义软土层放大系数 $\lambda_m$ :

$$\lambda_m = a_{nmax} / a_{smax}, \quad (12)$$

式中,  $a_{nmax}$  为土层内各点的加速度最大值,  $a_{smax}$  为地表振动加速度的最大值。为了研究深基坑周围软土层在机械振动荷载和往复交通荷载作用下淤泥和淤泥质黏土的过大变形, 可以采用加速度传感器或拾振器来监软土层中地振动的测峰值加速度, 从而判断软土是否具有放大、滤波和衰减作用, 并带入式(11)进行

累积塑性应变计算。

## 3 结论与建议

通过对淤泥和淤泥质软土的室内外试验、现场监测及理论分析, 得出如下结论:

(1) 淤泥和淤泥质黏土的摩擦强度非常小, 在地表振动波作用下, 其结构排列形式破坏和黏聚强度降低, 导致地表过大变形破坏。

(2) 十字板剪切强度随着上覆压力的增加而线性增加, 其灵敏度变化范围为 $4.83 \sim 16.9$ , 在地表振动波作用下, 易发生冲剪破坏而导致地面沉降。

(3) 随着剪应变的增加, 淤泥的共振频率随之增大, 动剪切模量随之减小, 阻尼比波动变化; 而淤泥质黏土的共振频率和动剪切模量随之减小, 阻尼比有增大的趋势。

(4) 淤泥和淤泥质黏土的剪切波速与其强度和结构密切相关, 通过监测施工过程中振动剪切波速在土层中的变化, 可以推断出软土的强度、变形特性。

(5) 在深基坑施工场地, 由于振动荷载的作用和土层分布特性, 淤泥和淤泥质黏土的累积塑性变形应当考虑振动波峰值加速度的放大与衰减作用。

## 参考文献:

- [1] 马淑芹, 熊里军, 王军, 等. 用上海强震土层垂直观测系统研究软土层对地震动的放大作用[J]. 中国地震, 2008, 23(3): 267 - 275. (MA Shu-qin, XIONG Li-jun, WANG Jun, et al. Studies on ground motion amplification induced by sediment layer via seismic vertical observatory system, caoyang park, Shanghai[J]. Earthquake Research in China, 2007, 23(3): 267 - 275. (in Chinese))
- [2] 冯晓腊. 论深圳淤泥类软土微观结构对工程性质的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(3): 34 - 39. (FENG Xiao-la. Study on the effect of mucky soil microstructure on engineering properties in Shenzhen[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(3): 34 - 39. (in Chinese))
- [3] 杨顺安, 冯晓腊, 张聪辰. 软土理论与工程[M]. 北京: 地质出版社, 2000. (YANG Shun-an, FENG Xiao-la, ZHANG Cong-chen. Theory and engineering of soft soil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [4] 王超. 内陆河湖相软土区划及鉴别指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. (WANG Chao. Study on the regionalization and identification index of the inland fluvial-lacustrine soft soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese))
- [5] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006. (HU

- Yu-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 2006. (in Chinese))
- [6] ANDREASSON B. Deformation characteristics of soft, high-plastic clays under dynamic loading conditions[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 1979.
- [7] WOODS R D. Measurement of dynamic soil properties[C]// From Volume I of Earthquake Engineering and Soil Dynamics-Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference. Pasadena, California, 1978.
- [8] ANDERSON D G, RICHART JR F E. Effects of stratining on shear modulus of clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1976, **102**(GT9): 975 - 987.
- [9] 周燕国. 土结构性的剪切波速表征及对动力特性的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (ZHOU Yan-guo. Shear wave velocity-based characterization of soil structure and its effects on dynamic behavior[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [10] 周锡元, 王广军, 苏经宇. 场地分类和平均反应谱[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(5): 59 - 68. (ZHOU Xi-yuan, WANG Guang-jun, SU Jing-yu. Site classification and average response spectra[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **6**(5): 59 - 68. (in Chinese))
- [11] 孙 锐, 袁晓铭, 刘晓键. 动剪切模量比与剪切波速对地震影响及等量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1267 - 1274. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming, LIU Xiao-jian. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1267 - 1274. (in Chinese))
- [12] 李进军, 黄茂松, 王育德. 交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J]. 中国公路学报, 2006, **19**(1): 1 - 5. (LI Jin-jun, HUANG Mao-song, WANG Yu-de. Analysis of cumulative plastic deformation of soft clay foundation under traffic loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, **19**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [13] 李西斌, 贾献林. 交通荷载作用下软土路基沉降有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, **36**(4): 604 - 609. (LI Xi-bin, JIA Xian-lin. Finite element analysis of the settlement of the soft roadbed under traffic load[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2008, **36**(4): 604 - 609. (in Chinese))
- [14] CUI X, ZHANG N, ZHANG J, et al. In situ tests simulating traffic-load-induced settlement of alluvial silt subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **58**: 10 - 20.
- [15] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975(537):1 - 17.
- [16] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(12): 1006 - 1013.
- [17] 唐大雄. 对我国统一土质分类的建议[J]. 长春地质学院学报, 1990, **20**(1): 79 - 88. (TANG Da-xiong. A proposal concerning unified classification system of soil in China[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1990, **20**(1): 79 - 88. (in Chinese))
- [18] CHAI J, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(11): 907 - 916.
- [19] 战吉艳, 陈国兴, 刘建达. 深软场地远场地震动反 应特性分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 507 - 514. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, LIU Jian-da. Seismic response characteristics analysis of deep soft site under far-field ground motion of great earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 507 - 514. (in Chinese))
- [20] 陈继华. 新近沉积土动力性能及深软场地地震效应研究 [D]. 南京:南京工业大学, 2004. (CHEN Ji-hua. Study on dynamic behaviors of recently deposited soils and characteristics of site seismic effect for deep soft sites[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [21] 战吉艳, 陈国兴, 刘建达, 等. 远场大地震作用下大尺度 深软场地的非线性地震效应分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(11): 3229 - 3238. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, LIU Jian-da, et al. Analysis of nonlinear seismic effects of large-scale deep soft site under far-field large earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11): 3229 - 3238. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)