

文章编号: 1000-7598(2009)06-1542-07

循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究

张 勇^{1,2}, 孔令伟¹, 郭爱国¹, 李雄威¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 杭州 310032)

摘 要: 通过以交通荷载为背景的饱和重塑软黏土室内不排水动三轴试验, 研究了循环荷载作用下饱和重塑软黏土的累积塑性应变发展形态, 可分为 3 种类型: 稳定型、破坏型和临界型。根据稳定型累积塑性应变发展曲线特点, 提出了饱和软黏土的稳定累积塑性应变方程, 并通过试验结果分析了该方程中各拟合参数与动应力幅值、固结围压和静偏应力的变化规律, 同时提出了求解无静偏应力条件下软黏土临界动应力的解析方法。通过动三轴试验结果, 提出了含动应力幅值、固结围压、静偏应力和循环周次等影响因素的累积塑性应变拟合模型。

关 键 词: 交通工程; 软土; 循环荷载; 动三轴试验; 累积塑性应变模型; 动应力; 静偏应力; 临界动应力

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading

ZHANG Yong^{1,2}, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹, LI Xiong-wei¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: To evaluate the influence factors of cumulative plastic strain of saturated soft clay, the cyclic triaxial tests with stress-controlled are conducted to investigate the behaviors of soft clay subjected to cyclic loading. The research results include four aspects. Firstly, there are three types of cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading, such as stable type, destructive type and critical type. Cumulative plastic strain of saturated soft clay increases with repeated load when dynamic stress is less than the critical dynamic stress. But the increasing rate slows down until it trends to a stable value. On the contrary, the strain increases quickly with repeated load until clay is destructive. Secondly, a new mathematical function, containing three parameters, is suggested to fit the curve of cumulative plastic strain of saturated soft clay versus repeated load under cyclic loading. The influence laws between parameters and dynamic stress are analyzed. Thirdly, based on the influence laws, a method for confirming the dynamic stress without static deviator stress is put forward. Finally, an empirical equation for cumulative plastic strain which derived from the mathematical function, containing dynamic stress, confining pressure, static deviator stress and repeated load is synthesized.

Key words: traffic engineering; soft clay; cyclic loading; dynamic triaxial test; cumulative plastic strain model; dynamic stress; static deviator stress; critical dynamic stress

1 前 言

软黏土在我国广泛分布, 与大型工程建设关系密切。随着我国经济建设的发展, 交通运输量大大幅度增加, 高速铁路和地下铁道工程方兴未艾, 交通循环荷载所引起的地基沉降破坏已日益突出, 如上海地铁一号线运营后某区段沉降超过 200 mm^[1]。因此, 路基工程的软黏土动力特性, 尤其是车辆荷载的循环往复作用引起的软土沉降和变形稳定性研究, 就具有非常重要的现实意义。

目前, 国内外学者对循环荷载作用下软黏土的长期沉降研究方法主要有两种^[2]: 一是建立较为复杂的软黏土本构模型, 来模拟每一个循环过程, 如王建华等^[3]采用运动硬化的套叠屈服面模型来模拟不排水循环荷载作用下, 软黏土的累积塑性变形。这种方法由于在计算过程中需要记忆每一循环过程所产生的屈服面, 计算量很大, 因而在工程中还难以普遍推广应用。二是经验拟合法, 其思想是通过室内外试验, 直接建立累积塑性应变与循环周次关系的拟合方程, 如 Monismith^[4]提出的简单指数模

收稿日期: 2008-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No:40772185); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No. SKLZ0803)

第一作者简介: 张勇, 男, 1981年生, 博士, 主要从事土动力学方面研究。E-mail: zy_giant@yahoo.com.cn

型。Li 和 Selig^[5]以及 Chai 和 Miura^[6]等学者则分别对上述的指数模型进行改造, 引入动静偏应力等影响因素。Hyodo 和 Yasuhara^[7]以及周健等^[8]通过对日本 Ariake 饱和软黏土的应力控制式低频循环荷载试验, 引入相对循环应力比, 提出了预测周期循环荷载作用下残余应变的计算模型。Stewart^[9]、蔡英^[10]则建议采用半对数方程来建立累积塑性应变与循环周数的关系。Parr^[11]提出可利用累积塑性应变速率和循环周次的关系来描述累积塑性应变。目前的累积塑性应变经验模型有很多, 由于其计算简便, 因而在实际工程中被广泛应用。

然而, 目前的许多经验拟合模型在计算应变值时, 尚存有动应力较小时, 随着循环周次的增加, 累积塑性应变仍会持续增大的缺陷。加上以往的研究主要是分析动应力大小对变形的影响, 而在实际工程中, 初始静偏应力对软黏土在循环加载下的动力特性影响较大^[12]。

基于以上考虑, 本文专门设计了软黏土室内不排水动三轴试验, 以研究不同动应力幅值、固结围压、静偏应力和循环周次等因素对软黏土累积塑性应变特性的影响, 并提出了一个能合理反映累积塑性应变变化规律的经验拟合模型。

2 试验方案

试验采用的仪器设备为从美国 GEOTEST 公司引进的双向振动三轴仪^[13]。该系统由液压伺服系统作为动力源, 采用应力控制加载方式, 在试验过程中全部由自带程序进行相关参数控制, 性能可靠。

为实现试样本身的均一性及对变形特性规律性认识的目的, 本试验采用饱和重塑土样。先把重塑土样制备在直径 $\phi=50$ mm, 高度 $h=100$ mm 的饱和容器中, 然后采用抽气饱和法对试样进行真空抽气饱和, 抽气缸内压力为 (2~3) kPa, 真空抽气 2 h 后, 缓慢放水, 直至淹没土样, 然后释放抽气缸的真空^[14]。真空抽气饱和后, 试验土样的饱和度可达 98% 以上, 含水率为 57.65%, 密度为 1.65 g/cm³, 塑限为 32.2%, 塑性指数为 36.9。

试验循环荷载选用正弦波形, 试验方案见表 1。为研究初始静偏应力对土体动力特性的影响规律, 特设计表 1 中第 4、5 组试验。需要指出的是, 施加静偏应力的试验方案主要有两种^[2]: 第一种方案是在试样等向固结完毕后, 先在完全不排水条件下施加静偏应力, 然后立刻施加动荷载^[12]; 第二种方案是在完全排水的条件下对试样施加静偏应力, 这样在循环加载前静偏应力已完全转化为有效应力, 相

当于地基土在静偏应力作用下的偏压固结情况。实际路基土的排水情况应是介于这两种排水条件之间。本文考虑到静偏应力的组成来源以及列车荷载的长期作用等因素, 采用的是第二种试验方案。

表 1 动三轴试验方案

| 组类 | 围压/kPa | 频率/Hz | 动应力/kPa | | | | 静偏应力/kPa | | |
|----|--------|-------|---------|----|----|----|----------|----|----|
| 1 | 50 | 4 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 0 |
| 2 | 100 | 4 | 10 | 15 | 20 | 40 | 60 | 0 | |
| 3 | 150 | 4 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 90 | 0 |
| 4 | 50 | 4 | 10 | 30 | | | | | 10 |
| 5 | 50 | 4 | 10 | 20 | 30 | 40 | | | 20 |

3 试验结果与分析

3.1 动应力幅值影响

为了论证动应力幅值的影响, 开展了表 1 中 1~3 组的动三轴对比试验。图 1 给出了饱和重塑软黏土在无静偏应力情况下的累积塑性应变 ε_p 随振动循环周次 N 变化的关系图 (试验停止的标准是双幅应变达到 5%, 或者循环周次为 3 000 次^[15])。

由图 1 可见, 在不同固结围压与不同幅值的循环动应力作用下, 随着循环周次的增加, 累积塑性应变总体呈增长的趋势。根据循环动应力幅值大小的不同, 累积塑性应变的发展形态可以分为以下 3 种典型情况^[10, 16], 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; 而在动应力幅值小于临界动应力时, 随着循环周次的增加, 土的累积塑性应变会逐步趋于稳定。在高速铁路和地铁工程等实际工程中, 路基土体所承受的动荷载循环次数很大, 动应力幅值应小于土体的临界动应力。为此, 本文主要只分析稳定型累积塑性应变曲线。

3.2 静偏应力影响

为分析静偏应力的影响, 开展了表 1 中 4、5 组的动三轴对比试验。图 2 为不同静偏应力条件下重塑软黏土的累积塑性应变 ε_p 与循环周次 N 之间的关系曲线。由图可看出, 有无静偏应力作用下的软土累积塑性应变发展规律较为相似, 在相同的动应力幅值下, 随着静偏应力的增加, 累积塑性应变逐渐变大, 变化速率也越快, 且累积塑性应变达到应变稳定的时间也越长, 这种影响趋势会随着静偏应力的增加而进一步加剧。因此, 静偏应力会诱发土体的结构破坏, 从而降低土的动强度。

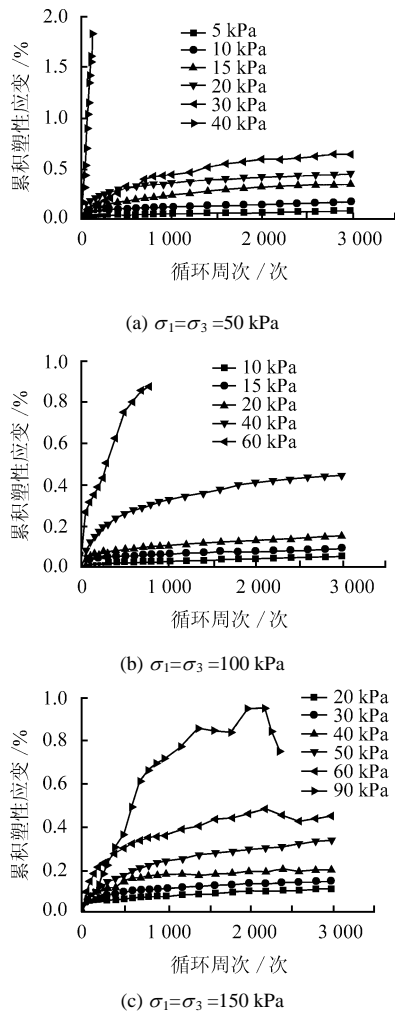


图1 无静偏应力下的 ϵ_p - N 关系曲线

Fig.1 ϵ_p - N curves without static deviator stress

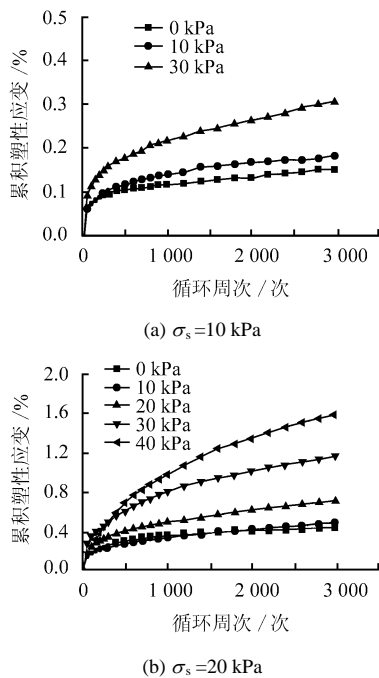


图2 不同静偏应力下的 ϵ_p - N 关系曲线

Fig.2 ϵ_p - N curves under different static deviator stresses

4 累积塑性应变模型建立及参数确定

4.1 累积塑性应变模型的提出

目前，最常用的累积塑性应变拟合模型是Monismith^[4]提出的指数模型：

$$\epsilon_p = aN^b \quad (1)$$

式中： a 、 b 是与动应力水平和土的性质有关的拟合参数； ϵ_p 为累积塑性应变； N 为循环周次。

可以看出，采用式(1)在计算累积塑性应变时，随着 N 的增大， ϵ_p 也会不断增大，这种累积塑性应变的发展趋势显然与“稳定型”的变形特征“一定循环周次后累积塑性应变趋于稳定”相违背，因而不合理的^[17]。为此，本文提出如下数学方程来拟合累积塑性应变与循环周次的关系曲线。

$$\epsilon_p = \frac{aN^b}{1+cN^b} \quad (2)$$

式中： N 为循环周次； a 、 b 、 c 是与应力条件和土的性质有关的参数。其中 a/c 具有累积塑性应变极限值的物理意义； b 可反映累积塑性应变曲线形状，并在一定情况下可定义为常数。

当 $c=0$ 时，式(2)就退化为式(1)，此时累积塑性应变不会趋于稳定。因此，对于稳定型累积塑性应变，式(2)中 c 应大于0。

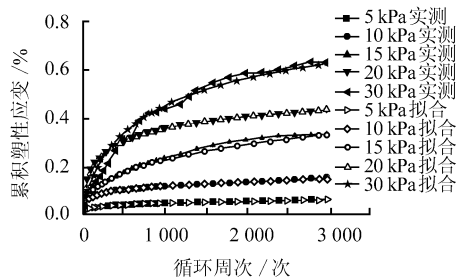
现从动应力幅值、固结围压和静偏应力等三方面面对式(2)中的拟合参数进行确定。

4.2 考虑动应力幅值影响

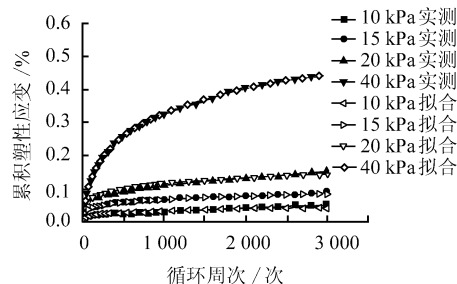
利用数理统计学知识和最优化理论^[18]，采用式(2)对图1中动荷载幅值较小时的累积塑性应变 ϵ_p - N 关系曲线进行拟合，可得到如表2所示的拟合参数，拟合效果见图3。

表2 无静偏应力下累积塑性应变拟合参数取值
Table 2 Fitting parameters of cumulative plastic strain model without static deviator stress

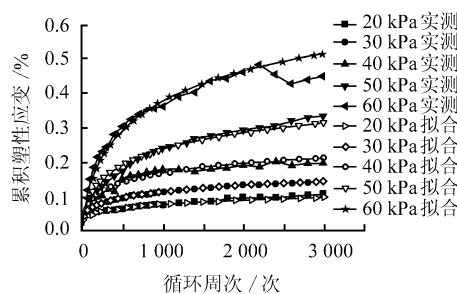
| 围压/kPa | 动应力/kPa | a | b | c | a/c |
|--------|---------|-----------|-------|-------|---------|
| 50 | 5 | 0.000 109 | 0.311 | 0.112 | 0.001 0 |
| | 10 | 0.000 161 | 0.422 | 0.080 | 0.002 0 |
| | 15 | 0.000 125 | 0.457 | 0.012 | 0.010 0 |
| | 20 | 0.000 266 | 0.515 | 0.046 | 0.005 8 |
| | 30 | 0.000 062 | 0.719 | 0.007 | 0.009 0 |
| | 40 | 0.000 087 | 0.280 | 0.110 | 0.000 8 |
| 100 | 15 | 0.000 135 | 0.322 | 0.093 | 0.001 5 |
| | 20 | 0.000 170 | 0.365 | 0.068 | 0.002 5 |
| | 40 | 0.000 093 | 0.607 | 0.014 | 0.006 9 |
| 150 | 20 | 0.000 144 | 0.349 | 0.093 | 0.001 5 |
| | 30 | 0.000 163 | 0.371 | 0.065 | 0.002 5 |
| | 40 | 0.000 159 | 0.450 | 0.050 | 0.003 2 |
| | 50 | 0.000 128 | 0.512 | 0.025 | 0.005 1 |
| | 60 | 0.000 097 | 0.621 | 0.012 | 0.008 0 |



(a) $\sigma_1 = \sigma_3 = 50$ kPa



(b) $\sigma_1 = \sigma_3 = 100$ kPa



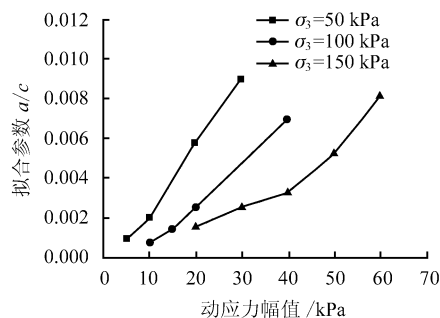
(c) $\sigma_1 = \sigma_3 = 150$ kPa

图 3 无静偏应力下 ϵ_p - N 关系曲线拟合与实测对比

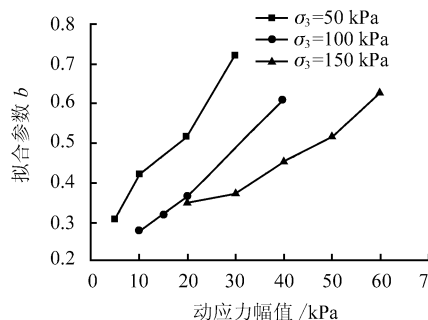
Fig.3 Fitting curves versus practical testing curves of ϵ_p - N without static deviator stress

由图 3 可看出，采用式 (2) 对 ϵ_p - N 关系曲线进行拟合，拟合效果比较理想，同时采用式 (2) 计算累积塑性应变时，可使累积塑性应变随着循环周次的增加而趋于稳定值，这比式 (1) 更加符合动应力幅值较小时所观测到的试验现象。

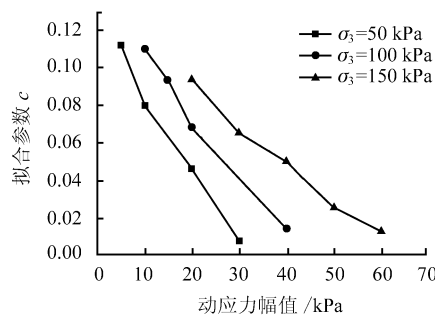
考虑到试验个体误差的存在，由表 2 可看出，在同一固结围压下，当动应力幅值小于临界动应力时，随着动应力幅值的增加，拟合参数 a/c 和 b 各自呈增大的趋势，拟合参数 c 则呈逐渐减小的趋势。根据式 (2) 分析可知，由于 a/c 等于试样的最终累积塑性应变，因此， a/c 值逐渐增大的规律正好符合动应力幅值越大，土样所产生的累积塑性应变越大的客观事实。通过上述分析，可判断第 1 组试验中 $\sigma_d = 15$ kPa 试验结果是个明显的试验误差，本文在后续研究中将不予考虑。



(a)



(b)



(c)

图 4 拟合参数与动应力幅值关系

Fig.4 Relations of fitting parameters versus dynamic stresses

图 4 为表 2 中拟合参数与动应力幅值之间的关系曲线，参数 a/c 随动应力幅值增加呈非线性增长，而参数 b 和 c 与动应力幅值间有较好的线性关系。采用相关曲线方程拟合 a/c 、 b 和 c 各参数与动应力幅值之间关系，可分别表示如下：

围压 $\sigma_3 = 50$ kPa:

$$\frac{a}{c} = \frac{\sigma_d}{4\,574 - 42\sigma_d}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.991 \quad (3)$$

$$b = 0.015\,4\sigma_d + 0.241, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.976 \quad (4)$$

$$c = -0.004\sigma_d + 0.127\,1, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.988 \quad (5)$$

围压 $\sigma_3 = 100$ kPa:

$$\frac{a}{c} = \frac{\sigma_d}{11\,678 - 147\sigma_d}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.996 \quad (6)$$

$$b = 0.0111\sigma_d + 0.1572, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.994 \quad (7)$$

$$c = -0.00318\sigma_d + 0.1387, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.987 \quad (8)$$

围压 $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$:

$$\frac{a}{c} = \frac{\sigma_d}{19\,484 - 199\sigma_d}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.991 \quad (9)$$

$$b = 0.0068\sigma_d + 0.1869, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.959 \quad (10)$$

$$c = -0.00203\sigma_d + 0.1303, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.986 \quad (11)$$

4.3 考虑固结围压的影响

由式(2)可知,对于稳定型累积塑性应变, c 应大于 0。当 $c=0$ 时,式(2)退化为式(1),累积塑性应变无法达到稳定值。结合图 4(c) 中 c 的变化规律,可认为式(5)、(8)和(11)中拟合参数 c 为 0 时所对应的动应力是循环临界动应力 σ_{cr} 。具体如下:

围压为 50 kPa 时, σ_{cr} 约为 31.8 kPa; 围压为 100 kPa 时, σ_{cr} 约为 43.6 kPa; 围压为 150 kPa 时, σ_{cr} 约为 64.2 kPa。

通过上述方法所获得的临界动应力值与常规通过图 1 中累积塑性应变曲线发展类型的判断法所获得的临界动应力值是较为吻合的。

上述各循环临界动应力随着围压的增加而增大。图 5 为各围压 σ_3 与对应的循环临界动应力值 σ_{cr} 关系曲线,可大致用线性方程来表示。

$$\sigma_{cr} = 0.324\sigma_3 + 14.133, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.976 \quad (12)$$

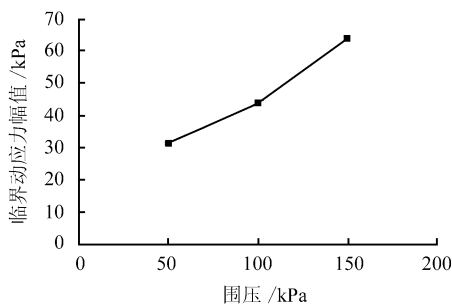
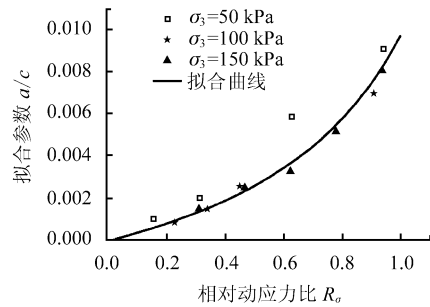


图 5 临界循环动应力与为围压关系
Fig.5 $\sigma_{cr}-\sigma_3$ curve

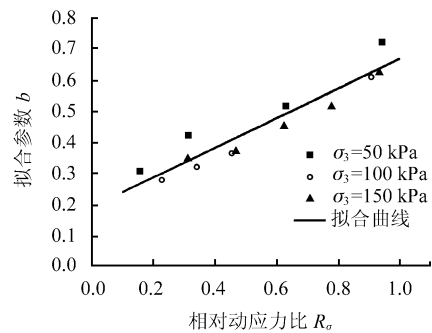
令 $R_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_{cr}}$, 其取值区间为 (0, 1), R_σ 称为“相

对动应力比”。绘制不同围压下的拟合参数 a/c 、 b 、 c 与相对动应力比 R_σ 之间的关系曲线,如图 6 所

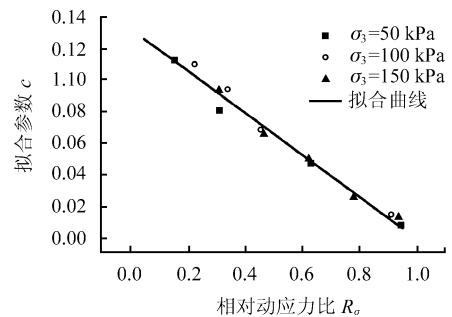
示。可以看出,采用临界动应力作为归一化因子对于各拟合参数均有较好的归一化效果。



(a)



(b)



(c)

图 6 拟合参数与相对动应力比关系
Fig.6 Relations of fitting parameters versus relative dynamic stress ratios

根据图 6,通过回归分析,可建立参数 a/c 、 b 、 c 与相对动应力比 R_σ 的线性相关方程,具体如下:

$$\frac{a}{c} = \frac{R_\sigma}{288.65 - 184.87R_\sigma}, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.979 \quad (13)$$

$$b = 0.469R_\sigma + 0.195, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.8722 \quad (14)$$

$$c = -0.135R_\sigma + 0.133, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.981 \quad (15)$$

4.4 考虑静偏应力的影响

用式(2)拟合图 2 不同静偏应力下 ϵ_p-N 关系曲线,可得表 3 拟合参数,拟合效果见图 7。

表 3 有静偏应力下累积塑性应变方程的拟合参数取值
Table 3 Fitting parameters of cumulative plastic strain model under different static deviator stresses

| 围压/kPa | σ_d /kPa | σ_s /kPa | a | b | c | a/c |
|--------|-----------------|-----------------|-----------|-------|-------|---------|
| | | 0 | 0.000 162 | 0.422 | 0.080 | 0.002 0 |
| 50 | 10 | 10 | 0.000 161 | 0.422 | 0.060 | 0.002 7 |
| | | 30 | 0.000 168 | 0.422 | 0.022 | 0.007 5 |
| | | 0 | 0.000 266 | 0.515 | 0.046 | 0.005 8 |
| 50 | 20 | 10 | 0.000 191 | 0.515 | 0.026 | 0.007 4 |
| | | 20 | 0.000 270 | 0.515 | 0.024 | 0.011 2 |
| | | 30 | 0.000 341 | 0.515 | 0.014 | 0.024 4 |
| | | 40 | 0.000 303 | 0.515 | 0.003 | 0.101 0 |

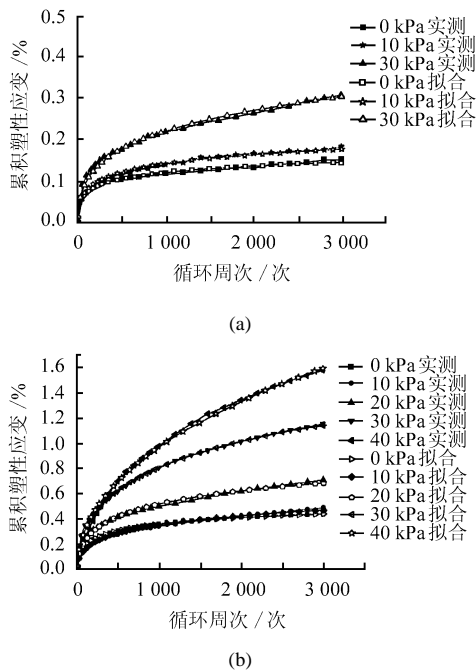


图 7 不同静偏应力下的 ε_p - N 关系曲线拟合与实测对比
Fig.7 Fitting curves versus practical testing curves of ε_p - N under different static deviator stresses

由图 7 可看出，式 (2) 也适合于拟合存在静偏应力时的重塑软黏土累积塑性应变增长曲线。需要说明的是，在拟合表 3 参数时发现，在相同动应力幅值情况下，静偏应力对参数 b 基本没有影响，可假设静偏应力对参数 b 无影响，并规定 b 在相同动应力幅值时取无静偏应力时的值。

在相同动应力幅值时，记无静偏应力时的拟合参数 a 为 a_0 ， c 为 c_0 ，有偏应力时的拟合参数 a/c 与 a_0/c_0 的比值 (ac_0/a_0c) 称为相对 a/c 值，拟合参数 c 与 c_0 的比值 (c/c_0) 称为相对 c 值。分别绘制不同静偏应力与动应力组合 ac_0/a_0c 和 c/c_0 与静偏应力比 σ_s/σ_3 的关系散点图，如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可看出，在不同的动应力幅值下， ac_0/a_0c 和 c/c_0 与静偏应力比 σ_s/σ_3 的变化规律较为一致。换句话说，建立 ac_0/a_0c 和 c/c_0 与静偏应力比 σ_s/σ_3 关系时可忽略动应力幅值的影响。

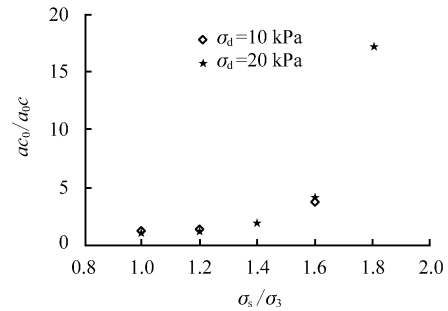


图 8 (ac_0/a_0c) - (σ_s/σ_3) 散点图
Fig.8 (ac_0/a_0c) - (σ_s/σ_3) relations

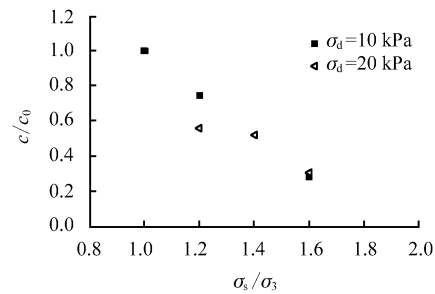


图 9 (c/c_0) - (σ_s/σ_3) 散点图
Fig.9 (c/c_0) - (σ_s/σ_3) relations

图 8 中 ac_0/a_0c 与 σ_s/σ_3 的关系可表示为

$$ac_0/a_0c = \frac{1}{1.041 - 1.672 \ln(\sigma_s/\sigma_3)} \quad (16)$$

图 9 中 c/c_0 与 σ_s/σ_3 的关系可表示为

$$c/c_0 = -1.169 \ln(\sigma_s/\sigma_3) + 2.162 \quad (17)$$

将式(3)~(11)、(16)、(17)代入式 (2)，便可得综合考虑动应力幅值 σ_d 、固结围压 σ_3 、静偏应力 σ_s 和循环周次 N 的稳定型累积塑性应变方程：

$$\varepsilon_p = \frac{R_\sigma}{(A_1 + A_2 R_\sigma)[A_3 + A_4 \ln(\sigma_s/\sigma_3)]} \cdot \frac{(C_1 R_\sigma + C_2)[C_3(\sigma_s/\sigma_3) + C_4] N^{(B_1 R_\sigma + B_2)}}{1 + (C_1 R_\sigma + C_2)[C_3(\sigma_s/\sigma_3) + C_4] N^{(B_1 R_\sigma + B_2)}} \quad (18)$$

式中： $R_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_{cr}}$ ； $\sigma_{cr} = 0.324\sigma_3 + 14.133$ ； $A_1 = 288.65$ ； $A_2 = -184.87$ ； $A_3 = 1.041$ ； $A_4 = -1.672$ ； $B_1 = 0.469$ ； $B_2 = 0.195$ ； $C_1 = -0.135$ ， $C_2 = 0.133$ ； $C_3 = -1.169$ ； $C_4 = 2.162$ 。

5 结 论

(1) 在不同固结围压与不同幅值的循环动应力作用下，随着循环周次的增加，饱和重塑软黏土的累积塑性应变总体呈增长的趋势。根据循环动应力幅值大小的不同，累积塑性应变的发展形态可以分为以下 3 种典型情况：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。

(2) 根据稳定型累积塑性应变发展曲线特点,提出了一个新的拟合软黏土累积塑性应变与循环周次关系的数学方程,并验证了其合理可行性。

(3) 通过软黏土动三轴试验结果可得出,在无静偏应力条件下,当动应力幅值小于临界动应力时,随着动应力幅值的增加,式(2)中拟合参数 a/c 和 b 逐渐增大,参数 c 则呈逐渐减小的趋势。当动应力幅值相同时,静偏应力对拟合参数 b 无影响。

(4) 在无静偏应力时,根据式(2)中拟合参数 c 的变化规律,提出了 $c=0$ 时所对应的动应力可视为临界动应力的求解方法。

(5) 不同围压下的软黏土累积塑性应变增长曲线可采用临界动应力作为归一化因子进行归一化处理。

参考文献

- [1] 叶耀东,朱合华,王如路.软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):157-160,166.
YE Yao-dong, ZHU He-hua, WANG Ru-lu. Analysis of the current status of metro operating tunnel damage in soft ground and its causes[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(1): 157-160, 166.
- [2] 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):891-895.
HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behavior of soft clay in cyclic undrained tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 891-895.
- [3] 王建华,要明伦.软黏土不排水循环特性的弹塑性模拟[J].岩土工程学报,1996,18(3):11-18.
WANG Jian-hua, YAO Ming-lun. Elastoplastic simulation of the cyclic undrained behavior of soft clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(3): 11-18.
- [4] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. **Transport Research Record**, 1975, 537: 1-17.
- [5] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122 (12): 1006-1013.
- [6] 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.
- [7] HYODO M, YASUHARA K, HIRAO K. Prediction of clay behaviour in undrained and partially drained cyclic tests[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(4): 117-127.
- [8] 周健,屠洪权,安原一哉.动力荷载作用下软黏土的残余变形计算模式[J].岩土力学,1996,17(1):54-60.
ZHOU Jian, TU Hong-quan, YASWHARA K. A model for predicting the cyclic behavior of soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(1): 54-60.
- [9] STEWART, HARRY E. Permanent strain from cyclic variable-amplitude loadings[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1986, 112(6): 646-660.
- [10] 蔡英,曹新文.重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J].西南交通大学学报,1996,31(1):1-5.
CAI Ying, CAO Xin-wen. Study of the critical dynamic stress and permanent strain of the subgrade-soil under the repeated load[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1996, 31(1): 1-5.
- [11] PARR G B. Some aspects of the behaviour of London clay under repeated loading[D]. UK: University of Nottingham, 1972.
- [12] 王常晶,陈云敏.交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(11):1742-1747.
WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(11): 1742-1747.
- [13] 陈伟.原状膨胀土非饱和强度特征与动力性能试验研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2007.
- [14] 张勇,孔令伟,孟庆山,等.武汉软土固结不排水应力-应变归一化特性分析[J].岩土力学,2006,27(9):1509-1513,1518.
ZHANG Yong, KONG Ling-wei, MENG Qing-shan, et al. Normalized stress-strain behavior of Wuhan soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1509-1513, 1518.
- [15] 张勇.武汉软黏土的变形特征与循环荷载动力响应研究[博士论文D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008.
- [16] 唐益群,黄雨,叶为民,等.地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1566-1570.
TANG Yi-qun, HUANG Yu, YE Wei-min, et al. Critical dynamic stress ratio and dynamic strain analysis of soils around the tunnel under subway train loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1566-1570.
- [17] 陈颖平.循环荷载作用下结构性软黏土特性的试验研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [18] 解可新,韩立兴,林友联.最优化方法[M].天津:天津大学出版社,1997.