

基于修正 Masing 准则的萧山软黏土 动应力 - 应变关系研究

王 军¹, 陈张林², 蔡袁强¹, 徐长节¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市钱江新城建设指挥部, 浙江 杭州 310016)

摘要: 地震、波浪、交通等不排水循环荷载的作用将引起土体孔隙水压力上升, 从而使土体的刚度、强度发生软化现象, 以往对软黏土动应力 - 应变关系的研究大都忽略循环软化的影响。采用 Masing 准则及其修正来描述软黏土的动应力 - 应变关系往往与实际偏差较大, 主要是因为该准则未能考虑软黏土的循环软化特性。通过对萧山软黏土进行应力控制的循环三轴试验, 研究循环次数、循环应力、偏应力对萧山软黏土的循环软化特性的影响。通过对每次循环中的刚度进行无量纲化得到量纲一的刚度 G_{sec}/G_{max} 与循环应变幅值 ε_s 的关系曲线。研究表明, 当循环应力较小时, $G_{sec}/G_{max} - \varepsilon_s$ 曲线由硬化及软化两部分组成; 当循环应力大于 58 kPa 时, 该曲线仅表现为软化特性。在试验基础上得到量纲一的刚度软化模型, 该模型可体现每次循环过程中的刚度软化规律。同时, 基于修正的 Masing 准则, 结合循环软化模型, 得到考虑循环软化特性的萧山软黏土动应力 - 应变关系曲线。

关键词: 土力学; 循环荷载; Masing 准则; 萧山软黏土

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)01 - 0108 - 07

STUDY ON DYNAMIC STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF XIAOSHAN SOFT CLAY BASED ON MODIFIED MASING RULES

WANG Jun¹, CHEN Zhanglin², CAI Yuanqiang¹, XU Changjie¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Hangzhou Qiangjiang New City Construction Headquarters, Hangzhou, Zhejiang 310016, China)

Abstract: Earthquakes, waves and traffic often induce severe undrained cyclic loading. Degradation of stiffness and strength will occur in soft clay under cyclic loading because of the generation of pore water pressure. Unfortunately, previous work rarely incorporated the effect of cyclic degradation behavior on dynamic stress-strain relationship of soft clay. The Masing rules, often used in modelling the behavior of soils under cyclic loading, are unreliable when there is significant cyclic degradation of the stress-strain curves. The cyclic degradation characteristics of normally consolidated Xiaoshan soft clay subjected to undrained cyclic triaxial loading are investigated at different numbers of cycles, cyclic stress level and initial deviator stress. The variation of normalized stiffness G_{sec}/G_{max} with variation amplitude of axial strain ε_s under different loading conditions in each unload-reload loop is presented. It can be observed that when the cyclic stress is smaller, the curves of $G_{sec}/G_{max} - \varepsilon_s$ are composed of two parts, one for hardening and the other for softening. There is only the decreasing part left to the curves when the cyclic stress is larger than 58 kPa. An empirical degradation model for Xiaoshan soft clay is also proposed by normalizing the secant shear modulus in each unload-reload loop. The model takes

收稿日期: 2006 - 02 - 28; **修回日期:** 2006 - 06 - 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478081)

作者简介: 王 军(1980 -), 男, 2002 年毕业于江西理工大学环境与建筑工程学院土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: sunnystar1980@163.com

account of the degradation behavior of soft clay inside a cycle. Based on the degradation model, concepts of Masing rules are modified to model the stress-strain behavior of Xiaoshan soft clay.

Key words: soil mechanics; cyclic loading; Masing rules; Xiaoshan soft clay

1 引言

土的动应力 - 应变关系或称动本构关系, 是表征土动态力学特性的基本关系, 也是分析土体动力失稳过程一系列特性的重要基础, 尤其在用有限元解决土体内的应力及强度 - 变形稳定问题时, 它是必不可少的基本关系^[1, 2]。循环荷载作用下软黏土的动应力 - 应变关系表现为非线性、滞后性及软化性, 而以往用于描述循环荷载作用下的软黏土本构关系模型, 例如: Hardin-Drnevich 模型、Ramberg-Osgood 模型、双曲线模型及其他一些组合曲线模型等大多不能准确地反映软黏土的应变软化这一重要特性。

目前, 用于描述软黏土动应力 - 应变关系的最简单表示方法是 Masing 二倍法, 即认为滞回曲线的形状与骨干曲线的形状一致, 只是其动应力 - 应变坐标的比例尺为骨干曲线的 2 倍。R. Pyke^[3]认为 Masing 第三、四准则与实际情况不符, 并提出了修正模型, 在该模型中相邻 2 次加载曲线与卸载曲线并不相交在同一点。S. Frydman 和 M. Talesnick^[4]通过扭剪试验对 Masing 第一、二准则的准确性进行了验证, 认为初始加载、卸载曲线采用 Masing 准则可以得到较好的预测结果, 而在接下来的加载、卸载循环中会有较大的偏差。R. J. Jardine^[5]发现只有当应变较小时采用 Masing 第二准则才是合理的, 并提出了该准则的适用性标准。A. Puzrin 等^[6]指出, 采用 Masing 准则来描述软黏土动应力 - 应变关系产生偏差的主要原因是软黏土存在循环软化特性。I. M. Idriss 等^[7]建立了软土的软化模型, 并得到了软化指数与循环次数之间的经验表达式; M. Vucetic^[8]应用 Masing 准则来描述初始加载曲线, 采用上述软化模型建立了骨干软化曲线, 进而对之后的卸载与再加载曲线进行描述。但该方法只能在每次卸载与再加载曲线的初始点可以得到与实测较吻合的结果。究其原因, 主要是 I. M. Idriss 等^[7]建立的软化模型只能反映骨干曲线上的刚度变化规律, 而不能体现具体到每次循环过程中软黏土的软化规律。基于此, 本文通过动三轴试验对每次卸载与再加载过程中的刚度变化规律进行分析, 从而建立了不同动应力、初

始偏应力下萧山软黏土的循环软化经验公式, 该公式可以反映任何一次循环过程中萧山软黏土的软化规律。同时, 基于修正的 Masing 准则, 并引入该循环软化模型, 对萧山软黏土的动应力 - 应变关系进行了描述。

2 试验内容和方法

试验在 GDS 双向振动三轴仪上进行, 采用应力控制加载方式, 加载波形由伺服系统生成, 选用正弦波。振动频率为 1 Hz, 土样直径为 3.91 cm, 高为 8.00 cm。所用黏土为萧山饱和软黏土, 液限为 44.5%, 塑性指数为 15.0, 相对密度为 2.72, 干密度为 1.41 g/cm³。土样制备完毕后首先进行真空饱和, 再装入三轴压力室进行反压饱和, 饱和度均达到 95% 以上。试样在围压 100 kPa 下完成主固结, 固结时间为 24 h, 然后在不排水条件下加初始偏应力, 最后加单向循环荷载。加载过程中, 加载次数、轴向压力、孔压、轴向变形(单向压缩)等数据由电脑采集处理。不排水循环三轴试验参数见表 1。

表 1 不排水循环三轴试验参数

Table 1 Parameters of the undrained cyclic testing program

土样编号	围压 p'_0 /kPa	振动频率 f /Hz	循环应力 q_{cyc} /kPa	初始偏应力 q_s /kPa
C-1	100	1	39	0
C-2	100	1	39	20
C-3	100	1	39	40
C-4	100	1	46	0
C-5	100	1	46	20
C-6	100	1	46	40
C-7	100	1	58	0
C-8	100	1	58	20
C-9	100	1	58	40

3 循环软化模型的建立

在静三轴试验中常用割线剪切模量 G_{sec} 的大小来描述软黏土的刚度。 G_{sec} 定义为 q - ε_a 曲线上某点与原点连线所得直线的斜率。其中, q 为偏应力, 且 $q = \sigma_1 - \sigma_3$; ε_a 为轴应变。在循环荷载作用下,

$q-\varepsilon_a$ 曲线表现为一系列封闭的滞回圈，并随着循环次数的增加，滞回圈逐渐向右移动，累计塑性应变逐渐增加^[9]。每一个滞回圈都由卸载曲线与再加载曲线 2 个部分组成，即

$$\left. \begin{aligned} G_{\text{sec}} &= \frac{q_{\text{max}} - q}{\varepsilon_{a\text{max}} - \varepsilon_a} = \frac{q_{\text{max}} - q}{\varepsilon_s} \quad (\text{卸载曲线}) \\ G'_{\text{sec}} &= \frac{q - q_{\text{min}}}{\varepsilon_a - \varepsilon_{a\text{min}}} = \frac{q - q_{\text{min}}}{\varepsilon_s} \quad (\text{再加载曲线}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_{a\text{max}}$ ， $\varepsilon_{a\text{min}}$ 分别为卸载曲线中应变的最大值与最小值； q_{max} ， q_{min} 分别为应变的最大值与最小值点所对应的偏应力值； ε_s 为循环应变幅值。

值得一提的是，由于本试验采用应力控制的加荷方式，一般偏应力要先于应变达到最大值或最小值，故 q_{max} ， q_{min} 不一定是实际偏应力的最大值与最小值。循环软化参数定义如图 1 所示。

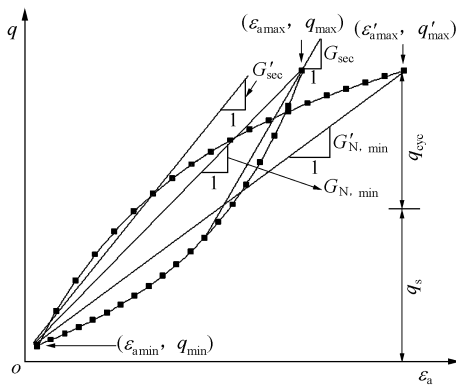


图 1 循环软化参数定义

Fig.1 Definition of cyclic degradation parameters

目前，对于软黏土循环软化特性的研究大多只考虑循环过程中割线剪切模量 $G_{N, \text{min}}$ 随循环次数变化规律，而对于每一次循环过程中割线模量的变化规律很少有学者提及。图 2 为当循环应力为 39 kPa，循环次数 N 分别为 10 和 205 时，卸载与再加载软化曲线。从图 2 中可以看出：无论是加载曲线还是卸载曲线，割线剪切模量变化规律大体相同，故本文仅以卸载曲线为例对 G_{sec} 的变化规律进行研究，图 2 也表明，每一次循环中软黏土都存在临界屈服应变 ε_p ，当 ε_s 小于该值时， G_{sec} 逐渐增加不发生软化现象；只有在 ε_s 大于该值的情况下才发生软化。循环次数、初始偏应力以及循环应力水平都将对 G_{sec} 的变化规律产生影响。试验结果表明，随着循环次数的增加， G_{sec} 逐渐减小；循环应力水平的提

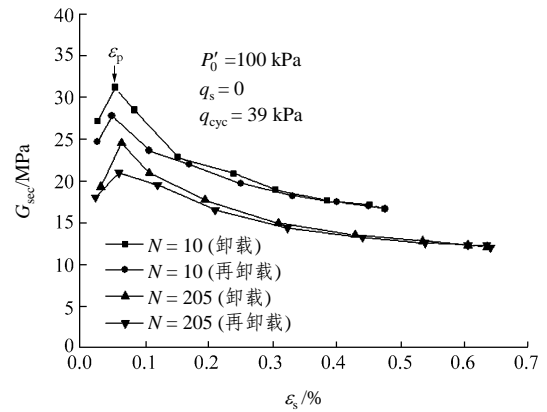


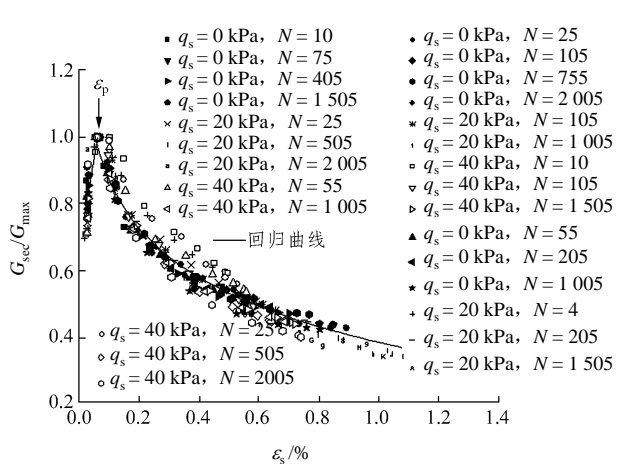
图 2 卸载与再加载软化曲线

Fig.2 Degradation curves under unloading and reloading

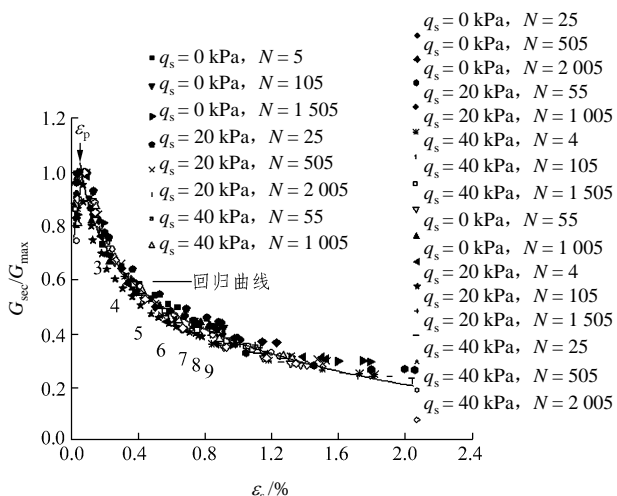
高，初始偏应力的施加将加快土体的软化^[10]。

图 3 为不同循环次数、循环应力、初始偏应力下量纲一的刚度 $G_{\text{sec}} / G_{\text{max}}$ 与循环应变幅值 ε_s 的关系曲线。图中， G_{max} 为临界屈服应变，即 ε_p 所对应的割线剪切模量； N 为循环次数。从图 3 中可以看出，除个别点比较离散外，大多数点都集中在一条曲线上。除此之外还可以发现，当循环应力为 39，46 kPa 时， $G_{\text{sec}} / G_{\text{max}} - \varepsilon_s$ 曲线明显由两部分组成，即：当 $\varepsilon_s < \varepsilon_p$ 时，近似为一单调增加的直线；而当 $\varepsilon_s > \varepsilon_p$ 时，则为一单调减少的曲线。当循环应力为 58 kPa 时，虽然也存在临界屈服应变但直线段并不明显。究其原因笔者认为，循环荷载作用下饱和软黏土存在临界循环应力比^[11]，当循环应力达到或超过临界循环应力时，土体的应变、孔隙水压力的发展模式将发生变化。当循环应力为 58 kPa，相应的循环应力比为 0.552 时，周建等^[12]通过大量试验对杭州软黏土的临界循环应力比进行研究，认为其值在 0.5 左右，这与本文结果相一致，从而说明临界循环应力对割线剪切模量的变化模式也有显著的影响。本文试验发现，当循环应力水平较小时，软黏土的滞回曲线为圆角曲线，随着循环应力水平的提高，圆角也变得越来不明显。T. Kokusho^[9]在研究 VNP 黏土在不规则循环荷载作用下的动应力 - 应变关系时，也发现了“圆角”现象。从上述分析可知，该现象主要是由于循环初期割线剪切模量增大所致；以往采用 Masing 准则及其修正对软黏土动应力 - 应变关系进行描述很难体现软黏土这一特性。

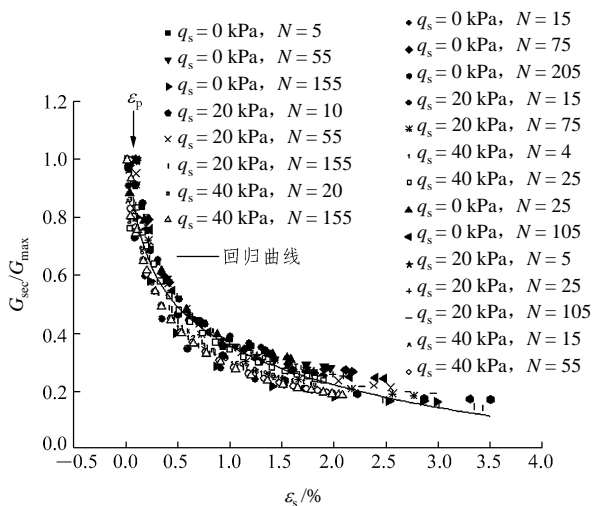
基于上述分析，当循环应力小于临界循环应力时，本文采用 1 条直线和 1 条曲线来描述软黏土的



(a) $q_{cyc} = 39 \text{ kPa}$



(b) $q_{cyc} = 46 \text{ kPa}$



(c) $q_{cyc} = 58 \text{ kPa}$

图 3 归一化后的循环软化曲线

Fig.3 Normalized degradation curves

循环软化特性, 而当循环应力大于临界循环应力时只采用一条曲线对其进行描述。经笔者研究发现, 可采用如下函数建立软黏土的循环软化模型:

$$\left. \begin{aligned} G_{sec} / G_{max} &= \alpha_1 + \beta_1 \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s < \varepsilon_p, q_{cyc} < q_p) \\ G_{sec} / G_{max} &= \alpha_2 + \beta_2 \ln \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s \geq \varepsilon_p) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 均为试验参数; q_p 为临界循环应力。图 3 中的实线即为采用式(2)回归的结果。通过对回归所得各循环应力水平下的参数值比较发现, 上述各直线、曲线函数参数值较为接近, 从而说明循环应力水平对 G_{sec} / G_{max} 值的大小影响甚小。通过对各参数取平均值就可得到各循环条件下软黏土的循环软化经验表达式:

$$\left. \begin{aligned} G_{sec} / G_{max} &= 0.67744 + 4.98999 \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s < \varepsilon_p, q_{cyc} < q_p) \\ G_{sec} / G_{max} &= 0.37094 + 0.21222 \ln \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s \geq \varepsilon_p) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

图 4 为 G_{max} 与循环次数 N 的关系曲线。经笔者研究发现, 同样可以用下式来描述 G_{max} 随循环次数的变化情况:

$$G_{max} = \alpha_3 + \beta_3 \ln N \quad (4)$$

式中: α_3, β_3 为与循环应力、初始偏应力相关的参数。

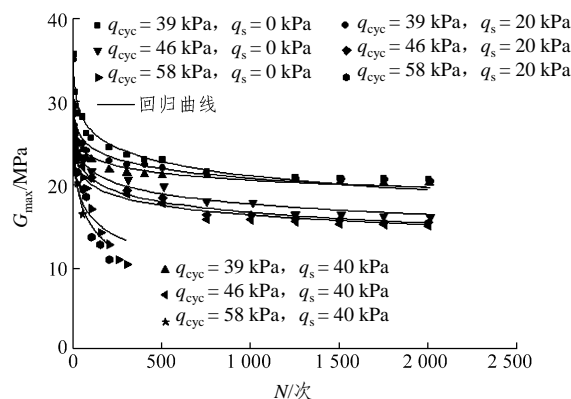


图 4 G_{max} 与循环次数 N 的关系曲线

Fig.4 Relation curves between G_{max} and cyclic number N

利用式(4)对图 4 中的曲线进行回归分析, 可得不同循环应力、偏应力下 α_3, β_3 值。为了更好地反映 α_3, β_3 的变化规律, 定义循环应力参数 S 如下:

$$S = \frac{q_{cyc}^2}{R_{max}(R_{max} - q_s)} \quad (5)$$

式中: R_{max} 为静力试验中土体的峰值偏应力, 本文通过静三轴试验得到其结果为 104.98 kPa。

图 5, 6 分别为参数 α_3, β_3 与 S 关系曲线。研究表明, 可以分别采用如下两式对其进行回归:

$$\alpha_3 = A_1 + B_1 / S + C_1 / S^2 \quad (6a)$$

$$\beta_3 = A_2 S^2 + B_2 S + C_2 \quad (6b)$$

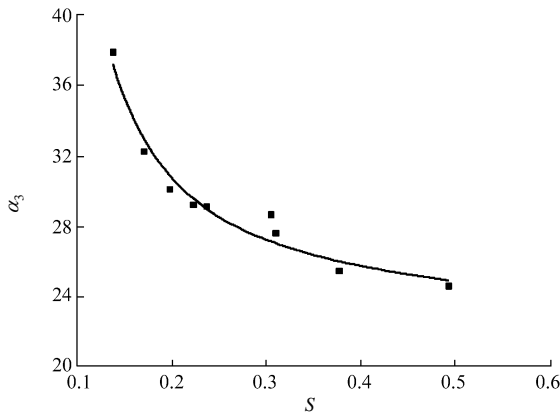


图 5 参数 α_3 与 S 关系曲线

Fig.5 Relation curve between parameters α_3 and S

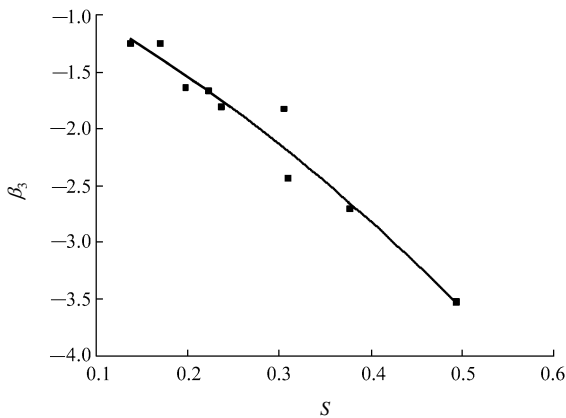


图 6 参数 β_3 与 S 关系曲线

Fig.6 Relation curve between parameters β_3 and S

式中: $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ 均为试验参数, 通过回归分析可得: $A_1 = 23.715\ 59, B_1 = 0.333\ 34, C_1 = 0.213\ 23, A_2 = -4.359\ 84, B_2 = -3.7763\ 2, C_2 = -0.606\ 3$ 。

将式(5)~(6b)代入式(4)即可得到最大动弹性模量经验公式如下:

$$G_{\max} = A_1 + B_1/S + C_1/S^2 + (A_2S^2 + B_2S + C_2)\ln N \quad (7)$$

将式(7)代入式(3)就可得到不同循环次数、循环应力、初始偏应力下割线剪切模量 G_{\max} 的经验公式如下:

$$\left. \begin{aligned} G_{\text{sec}} &= (0.677\ 44 + 4.989\ 99\varepsilon_s)[A_1 + B_1/S + \\ &\quad C_1/S^2 + (A_2S^2 + B_2S + C_2)\ln N] \\ &\quad (\varepsilon_s < \varepsilon_p, q_{\text{cyc}} < q_p) \\ G_{\text{sec}} &= (0.370\ 94 - 0.212\ 22\ln \varepsilon_s)[A_1 + B_1/S + \\ &\quad C_1/S^2 + (A_2S^2 + B_2S + C_2)\ln N] \\ &\quad (\varepsilon_s \geq \varepsilon_p) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

4 基于修正 Masing 准则的软黏土动应力 - 应变关系

采用 Masing 准则及其修正来描述土体动应力 - 应变关系, 首先要确定初始加载曲线的函数表达式, 然后根据 Masing 准则及其修正来描述之后的再加载与卸载曲线。用以描述初始加载曲线的模型很多, 大多采用的是简单的经验化模型, 只要能够合理地选择一个函数对土的动应力 - 应变关系进行描述就可以得到较好的结果。双曲线函数则是普遍选用的函数之一。M. Mohajeri 和 I. Towhata^[13]通过采用双曲线模型, 对 Pyke 的 Masing 公式进行了修正, 但该方法并没有考虑到每一次循环过程中割线剪切模量的变化规律, 与 Vucetic 方法类似只是在每一次加载与卸载的初始点可以得到理想的结果, 该方法也不能体现滞回圈的“圆角”问题。故此本文对 Mohajeri 方法进行了改进, 引入上文得到的软化经验公式。显然, 与前者相比, 本文方法更为准确, 能够反映出每一次循环过程中软黏土的刚度变化规律。

基于改进的 Mohajeri 方法来描述土的动应力 - 应变关系具体步骤如下:

(1) $0 \leq \varepsilon_a < \varepsilon_{a\max}$ 时(第一次加载), 有

$$q = \frac{G_0 \varepsilon_a}{1 + \frac{G_0 \varepsilon_a}{R'_{\max}}} \quad (9)$$

(2) 当 $\varepsilon_{a\min} \leq \varepsilon_a < \varepsilon_{a\max}$ (卸载)时, 有

$$q = q_{\max} + \frac{G_0 n_1 (\varepsilon_a - \varepsilon_{a\max})}{1 - \frac{n_1 G_0}{R'_{\max}} (\varepsilon_a - \varepsilon_{a\max})} \quad (10)$$

(3) 当 $\varepsilon_{a\min} < \varepsilon_a \leq \varepsilon'_{a\max}$ (再加载)时, 有

$$q = q_{\min} + \frac{G_0 n_2 (\varepsilon_a - \varepsilon_{a\min})}{1 - \frac{n_2 G_0}{R'_{\max}} (\varepsilon_a - \varepsilon_{a\min})} \quad (11)$$

式(9)~(11)中: G_0 为静力试验中土体的初始剪切模量, 本文通过静三轴试验可得 $G_0 = 101.95\ \text{MPa}$; R'_{\max} 为静力试验中土体的峰值强度, 即 $R'_{\max} = R_{\max}/2$; $\varepsilon'_{a\min}$ 均为再加载时应变最大值; n_1, n_2 均为参数, 通过反算可得

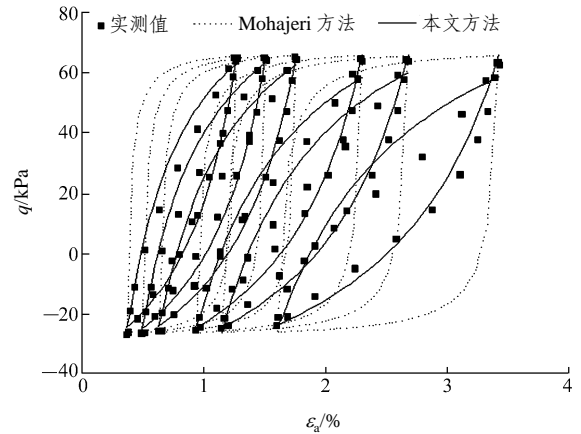
$$n_1 = \frac{R'_{\max}(q - q_{\max})}{G_0(\varepsilon_a - \varepsilon_{a\min})[R'_{\max} + (q - q_{\max})]} =$$

$$\frac{R'_{\max} G_{\text{sec}}}{G_0 (R'_{\max} + q - q_{\max})} = \frac{R'_{\max} G_{\text{sec}}}{G_0} \bigg/ \frac{[R'_{\max} - (q - q_{\max})] \varepsilon_s}{\varepsilon_s} = \frac{R'_{\max} G_{\text{sec}}}{G_0 (R'_{\max} - G_{\text{sec}} \varepsilon_s)} \quad (12)$$

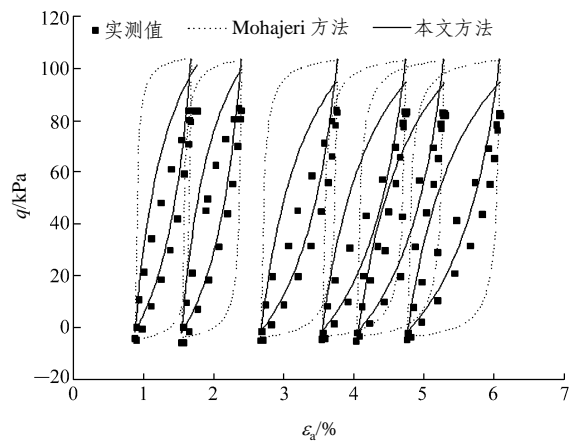
$$n_2 = \frac{R'_{\max} (q - q_{\min})}{G_0 (\varepsilon - \varepsilon_{\text{amin}}) [R'_{\max} - (q - q_{\min})]} = \frac{R'_{\max} G'_{\text{sec}}}{G_0 (R'_{\max} - G'_{\text{sec}} \varepsilon_s)} \quad (13)$$

将式(12), (13)中的 q 分别用 q_{\min} 与 q_{\max} 代替就退化到 Mohajeri 方法。由于 G_{sec} 与 G'_{sec} 值大体相等, 故将式(8)分别代入式(12), (13)就可以得到 n_1 , n_2 值。

利用式(9)~(13)即可得到每一次循环软黏土的动应力 - 应变关系, 据此本文编制了计算程序。图 7 给出了萧山软黏土动应力 - 应变关系曲线, 图中虚线、实线分别为采用 Mohajeri 方法和本文方法所得到的萧山软黏土循环过程中部分动应力 - 应变关系计算结果。从图 7 中可以看出, 对于 Mohajeri 方法只有在角点处才可得较好的结果, 而在其他点存在较大的偏差, 与其相比本文方法得到了更为



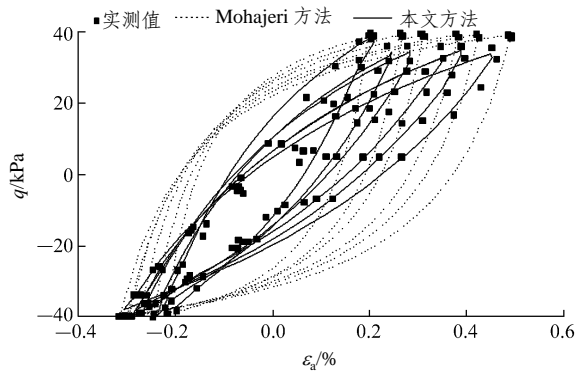
(c) $q_{\text{cyc}} = 46 \text{ kPa}$, $q_s = 20 \text{ kPa}$



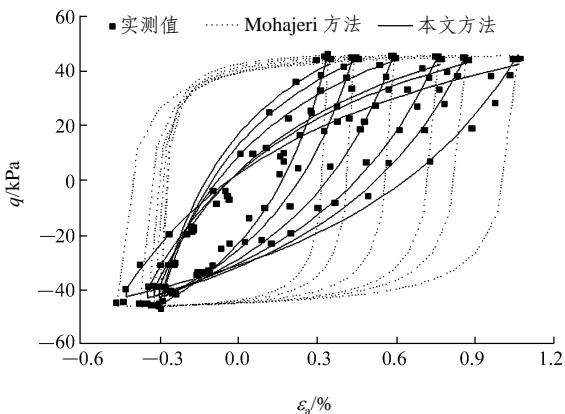
(d) $q_{\text{cyc}} = 46 \text{ kPa}$, $q_s = 40 \text{ kPa}$

图 7 萧山软黏土动应力 - 应变关系曲线

Fig.7 Dynamic stress-strain relationship curves of Xiaoshan soft clay



(a) $q_{\text{cyc}} = 39 \text{ kPa}$, $q_s = 0$



(b) $q_{\text{cyc}} = 46 \text{ kPa}$, $q_s = 0$

准确的结果。这说明基于修正的 Masing 准则, 并结合循环软化模型来描述萧山软黏土的动应力 - 应变是可行的。

5 结 论

本文通过不排水动三轴试验对萧山软黏土的软化现象进行了研究, 建立了循环软化模型, 并结合修正的 Masing 准则对萧山软黏土动应力 - 应变关系进行了描述, 得到如下结论:

(1) 采用 $G_{\text{sec}} / G_{\text{max}}$ 对软黏土的割线剪切模量进行归一化, 除个别点比较离散外, 大多数点集中在同一条曲线上。

(2) 当循环应力小于临界循环应力时, 可以采用 1 条直线和 1 条曲线来描述软黏土的循环软化特

性；当循环应力大于临界循环应力时，只采用 1 条曲线来对其进行描述。

(3) 通过引用循环应力参数 S 对割线剪切模量 G_{\max} 随循环次数的变化规律进行描述。该参数可以反映循环应力、初始偏应力的综合影响作用。回归结果表明，采用该方法可以较好地反映 G_{\max} 的变化规律。

(4) 基于修正的 Masing 准则，结合循环软化经验公式，对 Mohajeri 方法进行了改进。研究表明，采用该方法来描述萧山软黏土动应力 - 应变是可行的。该方法能够完全反映萧山软黏土的循环软化现象。

参考文献(References):

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.(XIE Dingyi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.(in Chinese))
- [2] 徐干成, 谢定义, 郑颖人. 饱和砂土循环动应力应变特性的弹塑性模拟研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 1 - 12.(XU Gancheng, XIE Dingyi, ZHENG Yingren. Elastoplastic modeling for cyclic stress strain behaviour of saturated sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 1 - 12.(in Chinese))
- [3] PYKE R. Nonlinear soil models for the application to simple shear to soil samples[J]. Proc. of ASCE, 1979, 105(GT6): 715 - 726.
- [4] FRYDMAN S, TALESNICK M. Development of strain during monotonic shear of soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(5): 704 - 725.
- [5] JARDINE R J. Some observations of the kinematical nature of soil stiffness[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(2): 111 - 124.
- [6] PUZRIN A, FRYDMAN S, TALESNICK M. Normalized nondegrading behavior of soft clay under cyclic simple shear loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(12): 836 - 843.
- [7] IDRIS I M, DOBRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. J. Soil Mech. and Found., 1978, 104(12): 1 427 - 1 447.
- [8] VUCETIC M. Normalized behavior of clay under irregular cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 29 - 46.
- [9] KOKUSHO T. Cyclic triaxial test on dynamic soil properties for wide strain range[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 45 - 60.
- [10] 王 军, 徐长节, 蔡袁强. 循环荷载作用下饱和软黏土刚度软化现象试验研究[J]. 岩土力学, 2007(待刊).(WANG Jun, XU Changjie, CAI Yuanqiang. Study on degradation of stiffness of saturated soft clay under undrained cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(to be published).(in Chinese))
- [11] SANGREY D A. Cyclic loading of sands, silts and clays[C]// Proc. Specialty Conf. on Earthquake Engrg. and Soil Dynamics. [S. l.]: ASCE, 1978: 836 - 851.
- [12] 周 建, 龚小南, 李 剑. 强循环荷载作用下饱和软黏土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 43 - 48.(ZHOU Jian, GONG Xiaonan, LI Jian. Experimental study of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Industrial Construction, 2000, 30(11): 43 - 48.(in Chinese))
- [13] MOHAJERI M, TOWHATA I. Stress-strain behavior of compacted sandy material under cyclic simple shear[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(6): 75 - 89.