

Experimental Study on Dynamic Strength of Marine Soft Soil with Different Consolidation Degree

Shubin Li, Jinliang Song

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong
Email: 616499863@qq.com

Received: Feb. 17th, 2017; accepted: Mar. 11th, 2017; published: Mar. 14th, 2017

Abstract

In order to clarify the effects of cyclic stress ratio and frequency on dynamic strength of soft marine soil, a series of dynamic triaxial tests are performed. The test results show that: 1) the total strain decreases along with the increase of the frequency and over-consolidation ratio, but increases along with the increase of the cyclic stress ratio; 2) the softening index decreases along with the increase of vibration times and cyclic loading, but increases along with the increase of the frequency; 3) by conducting regression analysis on the softening curve and dynamic strength curve, we have obtained the softening coefficient on over-consolidation ratio and the empirical equation of dynamic strength.

Keywords

Marine Soft Soil, Over-Consolidation, Dynamic Strength, Dynamic Triaxial Test

不同固结程度海洋软土动强度试验研究

李树斌, 宋金良

广州大学土木工程学院, 广东 广州
Email: 616499863@qq.com

收稿日期: 2017年2月17日; 录用日期: 2017年3月11日; 发布日期: 2017年3月14日

摘要

为研究循环应力比和频率对不同超固结比的海洋软土动强度的影响, 本文对珠江海洋软土进行室内动三

轴试验, 并对试验结果进行拟合分析。试验结果表明: 总应变随着频率和超固结比的增大而减小, 随着循环应力比的增大而增大; 软化指数随着振次、循环荷载的增大而减小, 随着频率的增大而增大; 对软化曲线和动强度曲线进行回归分析, 分别得到关于超固结比的软化系数和动强度经验公式。

关键词

海洋软土, 超固结, 动强度, 动三轴

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国家对海洋的不断开发, 修建在海洋的建筑物或构筑物越来越多, 例如港口、灯塔和机场等。修建在海洋的建(构)筑物的地基除了要承受自重荷载外, 还要会受到波浪的作用, 波浪荷载是一种循环荷载, 在此循环荷载作用下, 土颗粒会发生位移及重新排列, 从而造成土的软化及地基的失稳。部分海洋土在循环荷载下并不是处于正常固结状态, 而是以微超固结或超固结为主[1]。

目前, 国内外的学者针对超固结土和动强度做出了以下的研究: 孙磊[2]通过对恒定围压与变围压的对比, 分析了循环围压与循环偏应力耦合下超固结软土的动力特性; Mayne 等[3]通过对 116 组不同地区土样三轴剪切试验和直剪试验的数据进行分析总结, 提出利用土体强度试验确定超固结比的计算公式; Azzouz, AS [4]给出了正常固结和超固结土在双向对称不排水循环剪切下的试验结果; Imai G [5]提出了超固结土在循环荷载下的本构关系; M Jiang [6]研究了循环加载频率对饱和海相软土动力特性的影响研究, 结果发现, 循环频率对累积轴向应变和孔隙水压力有明显的影响, 而频率对累积轴向应变的归一化平均孔隙压力影响不显著, 频率是影响退化指数的一个重要因素。

以往的研究基本是针对海洋软土在正常固结状态下的动强度, 对超固结土的动强度的研究较少, 因此本文通过室内动三轴试验研究循环应力比和频率对不同超固结比的海洋软土动强度的影响。

2. 试验设备及方案

DDS-700 微机控制电磁式振动三轴仪是完成本次试验的主要设备, 是水利行业规范《土工试验规程》(SL237-2009)中振动三轴试验选定的设备, 可用于测定各种土的动力特性指标。

本试验采用土样为重塑土样, 试验制备根据《土工试验规程》(SL237-2009)具体规定执行, 其基本物理性质指标见表 1。取样深度为 10~12 m, 通过施加围压模拟其固结程度。正常固结时, 土样在围压为 100 kPa 下等压固结 24 h; 超固结时让土样在大于 100 kPa 的围压下等压固结 24 h, 固结完毕后先卸载至 100 kPa, 再进行不排水分级加载动弹性模量试验, 试验的波形采用正弦波。表 2 为本试验的分组情况。

3. 动应变-振次曲线分析

3.1. 循环应力比的影响

图 1 为不同循环应力比下动应变与振次的关系曲线。图中 τ_c 为循环应力比, 本文定义 $\tau_c = \tau_d/S_u$, $\tau_d = \sigma_d/2$, 其中 S_u 为对应超固结比下土体不排水抗剪强度。本文中不排水抗剪强度定义为总应变达到 5% 时的抗剪强度。从图 1 中可以看出, 不论是正常固结土还是超固结土, 随着循环次数的增加, 动应变

不断增大, 相同循环次数下, 循环应力比越大, 动应变越大。同时也能看出, 振次-动应变曲线随循环应力比的不同有较大的差异。当循环应力比小于 0.5 时, 在加载初期, 动应变增长较慢, 随着循环次数的增加, 当到达某一振次后, 曲线出现转折点, 此时动应变迅速增大, 当动应变增长到某一值后趋于稳定, 此时土样已经破坏; 当循环应力比大于 0.5 时, 即使在循环初期, 动应变也呈较大幅度增长, 在较小的循环次数下曲线就达到转折点, 稳定后动应变值也较大。循环应力比越大, 达到转折点所需的振次越小, 即在较小的振次下土样就发生破坏且破坏时的动应变越大。这是因为, Larew 和 Leonards [7]认为饱和软土存在临界循环应力比, 其定义为土体破坏的最大循环应力比。通过图 1 可以看出, 循环应力比大于 0.5

Table 1. Physical-mechanical properties of soft soil

表 1. 土样基本物理性质指标

风干密度 ρ (g/cm ³)	饱和含水率(%)	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	内摩擦角 φ (°)
1.47	29.2	21.5	30.2	21.7

Table 2. Test group condition

表 2. 试验分组情况

土样编号	振动频率(Hz)	超固结比	循环应力比
Q1-1	1	1	0.3
Q1-2	1	1	0.5
Q1-3	1	1	0.7
Q1-4	1	1	0.9
Q1-5	1	2	0.3
Q1-6	1	2	0.5
Q1-7	1	2	0.7
Q1-8	1	2	0.9
Q1-9	1	4	0.3
Q1-10	1	4	0.5
Q1-11	1	4	0.7
Q1-12	1	4	0.9
Q1-13	1	8	0.3
Q1-14	1	8	0.5
Q1-15	1	8	0.7
Q1-16	1	8	0.9
Q2-1	2	1	0.5
Q2-2	3	1	0.5
Q2-3	2	2	0.5
Q2-4	3	2	0.5
Q2-5	2	4	0.5
Q2-6	3	4	0.5
Q3-1	2	8	0.5

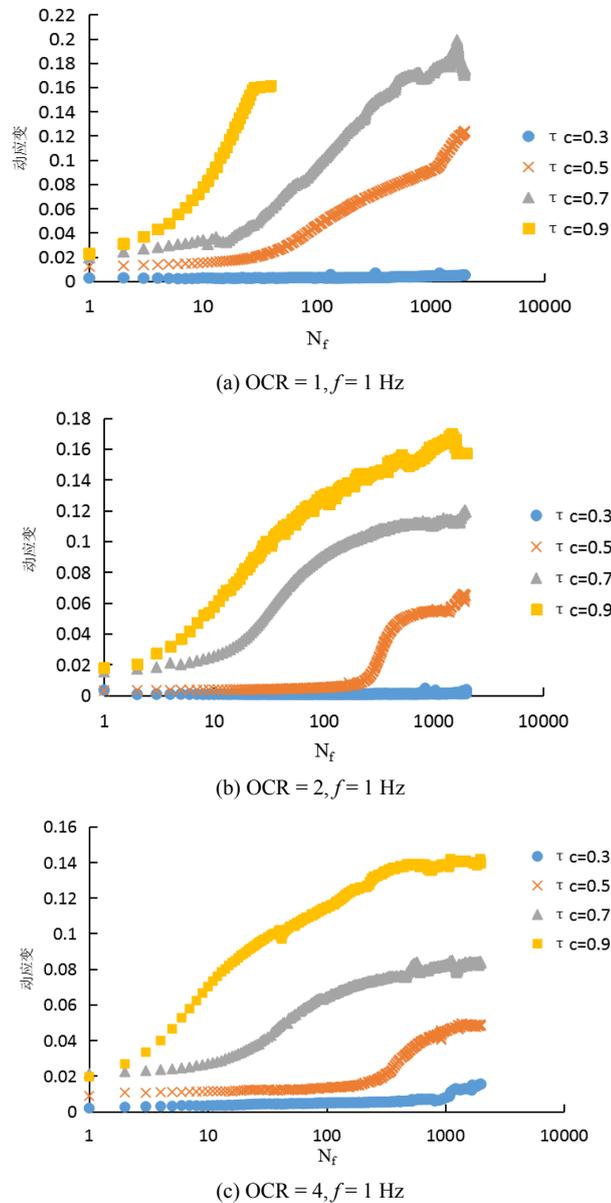


Figure 1. Relationship curves between dynamic strain and cyclic number at different cyclic stress ratio

图 1. 不同循环应力比下动应变与振动周次关系曲线

和小于 0.5 的曲线有较大的不同, 可以认为珠江海洋土的临界循环应力比在 0.5 左右。

3.2. 频率的影响

图 2 所示为 $\tau_c = 0.5$ 时, 不同频率比下振动周次与动变关系曲线。从图中可以看出, 曲线可以分为三个阶段, 三个阶段的分隔点在两个应变转折处。第一个阶段, 在振动初期, 随着振次的增加, 三条曲线的应变均有增长, 但增长比较缓慢, 三条曲线几乎重叠在一起, 这表明循环荷载初期, 频率对动应变影响不大。第二阶段, 当应变到达第一个转折点时, 三条曲线的应变开始快速增加, 并开始出现明显的不同, 主要表现在: 相同振次下, 频率越大, 动应变越小, 即频率越小的土样应变发展越大。这是因为频率越大, 应力作用在试样上的时间越短, 饱和软土的孔压来不及上升, 应力还来不及传递给土颗粒就进

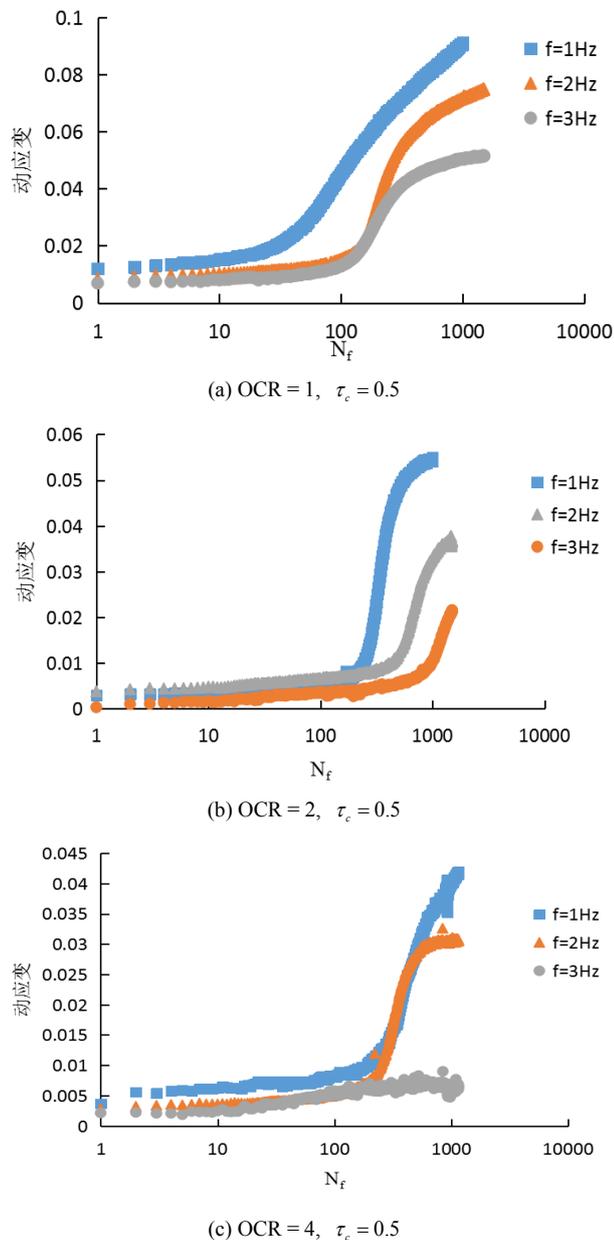


Figure 2. Relationship curves between dynamic strain and cyclic number at different frequency

图 2. 不同频率比下动应变与振动周次关系曲线

入下一轮加载，这会导致试样变形不完全，从而表现为动应变越小，土样在较大的循环次数下才发生破坏。第三阶段，当应变达到第二个转折点时，此时三条曲线趋于平缓，应变不再随着振次的增加而增加，土样已经破坏，且频率越大，破坏时的应变越大。

3.3. 超固结比的影响

图 3 为循环应力比为 0.5 时，不同超固结比下振动周次与动变关系曲线。从图中可以看出，不同超固结比的曲线有明显差异。当超固结比 8 时，动应变增长速度较慢，基本呈线性增长，且没有明显转折点，土样没有破坏；当超固结比为 4 和 2 时，土样的应变随循环次数的增加略大于超固结为 8 的土样，

并且出现明显的转折点, 且 $OCR = 2$ 的曲线转折点后的动应变增长速度大于 $OCR = 4$ 的曲线; 当超固结比为 1 时, 土样在初始阶段应变就最大, 其随振次增长速度也最快, 其破坏所需的振次也越少。相同振次下, 超固结比越大, 动应变越小, 并且其达到破坏所需的振次越多, 这是因为初期固结压力越大的土样越密实, 颗粒间的空隙越小, 变形所需轴力越大, 即弹性模量越大。

4. 最大动应变分析

图 4 为相同频率下, 试样在不同循环应力比下循环加载至 1500 次时的动应变随超固结比的变化曲线, 从图中可以看出, 在相同的频率和振次下, 试样在不同循环应力比下产生的最大动应变随超固结比的增大而下降, 采用幂函数拟合, 公式如下:

$$\varepsilon_d^p = a_1 OCR^{a_2} \quad (1)$$

表 3 为参数 a_1 和 a_2 的拟合结果。

从表中可以看出, 参数 a_1 和 a_2 随着循环应力比的不同有很大差异。图 5 为参数 a_1 与循环应力比关系曲线, 图中可以看出, 参数 a_1 与循环应力比呈线性关系, 可以用线性函数来表示, 图 6 为参数 a_2 与循环

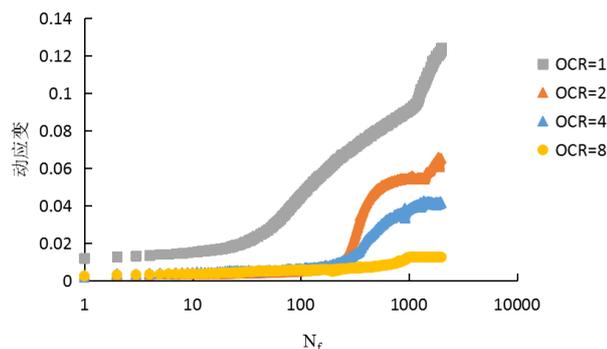


Figure 3. Relationship curves between dynamic strain and cyclic number at different over consolidation ratio ($f = 1$ Hz, $\tau_c = 0.5$)

图 3. 不同超固结比下动应变与振动周次关系曲线($f = 1$ Hz, $\tau_c = 0.5$)

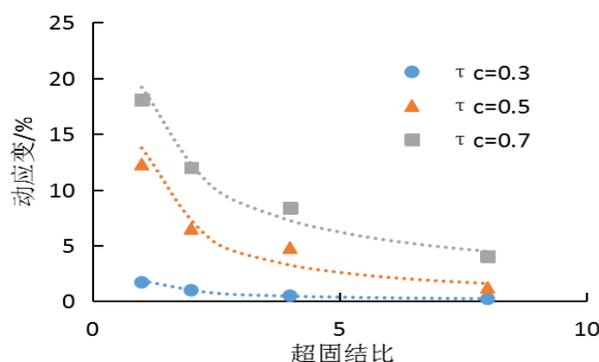


Figure 4. Relationship curves between dynamic axial strain (the 1500 th) and over-consolidation ratio at different cyclic stress ratio

图 4. 不同循环应力比下第 1500 圈轴向动应变与超固结比关系曲线

Table 3. Parameter a_1 and a_2 fitting results
表 3. 参数 a_1 、 a_2 拟合结果

循环应力比	频率(Hz)	a_1	a_2	R^2
0.3	1	1.8334	-0.9971	0.99004
0.5	1	13.746	-1.037	0.91974
0.7	1	19.189	-0.80104	0.97204

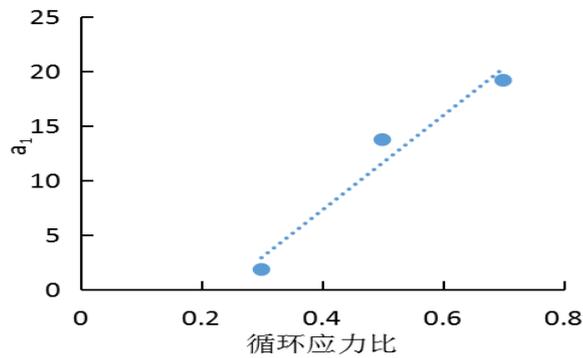


Figure 5. Relationship curves of a_1 vs. cyclic stress ratio
图 5. 参数 a_1 与循环应力比关系曲线

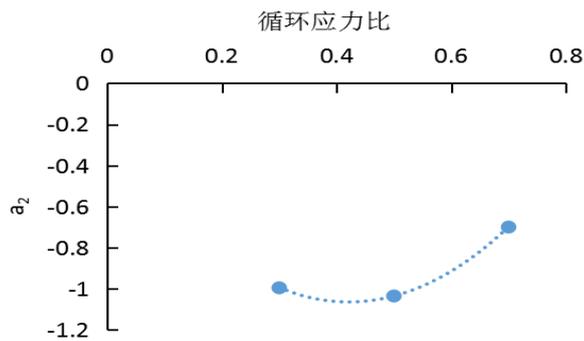


Figure 6. Relationship curves of a_2 vs. cyclic stress ratio
图 6. 参数 a_2 与循环应力比关系曲线

应力比关系曲线，其关系可以用二次函数表示：

$$a_1 = 43.389\tau_c - 10.015 \quad (2)$$

$$a_2 = -0.23251 - 3.9581\tau_c + 4.6982\tau_c^2 \quad (3)$$

把式(2)和式(3)代入公式(1)可以得出最大动应力和超固结公式：

$$\varepsilon_d^p = (43.389\tau_c - 10.015)OCR^{-0.23251 - 3.9581\tau_c + 4.6982\tau_c^2} \quad (4)$$

5. 振次-动应变模型建立与参数分析

为了明确珠江海洋土的振次与动应变的规律，通过观察图 1~图 3，即不同循环应力比、频率和超固结比下振次-动应变关系曲线，可以发现在第二个转折点前，振次-动应变曲线可以采用指数函数来表示：

$$\varepsilon_d = ae^{b \lg N_f} \quad (5)$$

表 4 为参数 a 和 b 的拟合结果。

从上表中可以看出, 基本各 R^2 参数均在 0.9 以上, 表明拟合度较高, 该公式能较好的表示振次与动应变的关系。但是循环应力比为 0.3 和频率为 3 Hz 的曲线的 R^2 较低, 为了找出其原因, 观察其曲线发现这些曲线都近似呈线性关系, 因而不适用对数函数来表示, 可以用线性函数来表示。

通过观察表 4 可以发现, 参数 a 和 b 的值随循环应力比、超固结比和频率的不同而改变, 对参数 a 和 b 进行数学分析, 可得到相应的回归公式。

(1) 关于频率的回归公式

$$a = -0.00114f + 0.00893, R^2 = 0.99264 \quad (6)$$

$$b = -0.11616f + 0.95645, R^2 = 0.90947 \quad (7)$$

将上式代入式(5), 得到关于频率的振次-动应变关系方程:

Table 4. Parameter a and b fitting results

表 4. 参数 a 、 b 拟合结果

频率(Hz)	超固结比	循环应力比	a	b	R^2
1	1	0.3	0.00144	0.32036	0.72173
1	1	0.5	0.00773	0.75521	0.94061
1	1	0.7	0.01601	0.86561	0.96806
1	1	0.9	0.02567	1.2716	0.98844
1	2	0.3	0.00046	0.2367	0.44964
1	2	0.5	0.00391	0.7234	0.90483
1	2	0.7	0.00853	0.82551	0.9729
1	2	0.9	0.02237	0.92846	0.94156
1	4	0.3	0.00024	0.19435	0.64068
1	4	0.5	0.00201	0.7047	0.96283
1	4	0.7	0.00759	0.8247	0.96283
1	4	0.9	0.01991	0.85782	0.90287
1	8	0.3	0.00015	0.10971	0.4046
1	8	0.5	0.00106	0.49345	0.8937
1	8	0.7	0.00587	0.69563	0.9341
1	8	0.9	0.00639	0.75581	0.95642
2	1	0.5	0.00676	0.8245	0.9801
3	1	0.5	0.00545	0.7924	0.9823
2	2	0.5	0.00304	0.6943	0.90565
3	2	0.5	0.00284	0.6229	0.59721
2	4	0.5	0.00219	0.68491	0.90965
3	4	0.5	0.00194	0.6613	0.50204
2	8	0.5	0.00084	0.41453	0.9312
3	8	0.5	0.00079	0.40253	0.47831

$$\varepsilon_d = (-0.00114f + 0.00893)e^{(-0.11616f + 0.95645)\lg N_f} \quad (8)$$

(2)关于超固结比的回归公式

$$a = 0.00765OCR^{-0.95592}, R^2 = 0.99351 \quad (9)$$

$$b = 0.8757OCR^{-0.24179}, R^2 = 0.87478 \quad (10)$$

将上式代入式(5), 得到关于超固结比的振次-动应变关系方程:

$$\varepsilon_d = 0.00765OCR^{-0.95592}e^{0.8757OCR^{-0.24179}\lg N_f} \quad (11)$$

(3)关于循环应力比的回归公式

$$a = 0.00333\tau_c + 0.00024, R^2 = 0.96162 \quad (12)$$

$$b = 0.11889\tau_c + 0.35736, R^2 = 0.89587 \quad (13)$$

将上式代入式 5), 得到关于频率的振次-动应变关系方程:

$$\varepsilon_d = (0.00333\tau_c + 0.00024)e^{(0.11889\tau_c + 0.35736)\lg N_f} \quad (14)$$

6. 软化特性分析

动三轴试验中常用软化指数来表示试样动弹模的衰减规律。图 7 所示为应力控制的循环动三轴仪试验得到的珠江海洋土第 1 次与第 N 次循环的滞回曲线。根据 Idriss [8] 的研究, 定义软化指数 δ , 其定义为第 N 次循环的土动弹性模量与第 1 次循环的土动弹性模量比值, 考虑初始固结剪应力的影响, 重新定义软化指数 δ 如下:

$$\delta = \frac{E_n}{E_1} = \frac{\frac{q_{N,\max} - q_{N,\min}}{\varepsilon_{N,\max} - \varepsilon_{N,\min}}}{\frac{q_{1,\max} - q_{1,\min}}{\varepsilon_{1,\max} - \varepsilon_{1,\min}}} = \frac{\varepsilon_{1,\max} - \varepsilon_{1,\min}}{\varepsilon_{N,\max} - \varepsilon_{N,\min}} \quad (15)$$

上式中: $q_{N,\max}$ 和 $q_{N,\min}$ 分别为第 N 次循环最大与最小偏应力; $\varepsilon_{N,\max}$ 和 $\varepsilon_{N,\min}$ 分别为第 N 次循环最大与最小动应变; $q_{1,\max}$ 和 $q_{1,\min}$ 分别为第 1 次循环最大与最小偏应力; $\varepsilon_{1,\max}$ 和 $\varepsilon_{1,\min}$ 分别为第 1 次循环最大与最小动应变。

6.1. 循环应力比的影响

因为循环应力比为 0.3 时, 应变缓慢增长, 试样基本处于弹性状态, 软化不明显, 因此采用循环应力比大于 0.3 试样来研究。图 8 为不同循环应力比时软化指数与振次关系曲线。从图中可以发现, 软化指数随着振次的增加而降低, 这是因为随着振次的增加, 应变累积不断增加, 导致动弹性模量不断降低, 从而使土体出现软化。在振动初期, 软化指数随振次的增加明显降低, 当软化指数降低到某一值后趋于稳定, 此时土体动弹模不再降低, 土样处于破坏状态。相同振次下, 循环应力比越大, 软化指数越低, 即动弹模衰减越快, 这是因为循环荷载越大, 土体颗粒破坏越严重, 土体破坏加剧。

6.2. 频率的影响

图 9 为不同频率时软化指数与振次关系曲线。从图中可以看出, 无论是正常固结土还是超固结土, 频率对软化指数的降低影响较小。但仍可看出, 在相同振次下, 频率越大, 软化指数越大, 即动弹性模量衰减越小, 这是因为, 这是因为频率越大, 应力作用在试样上的时间越短, 应力还来不及传递给土颗

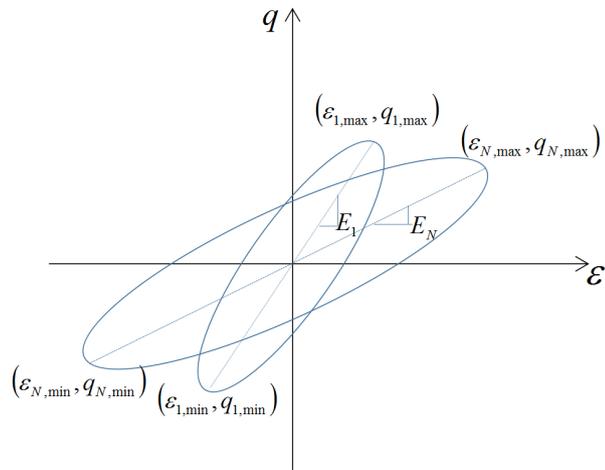
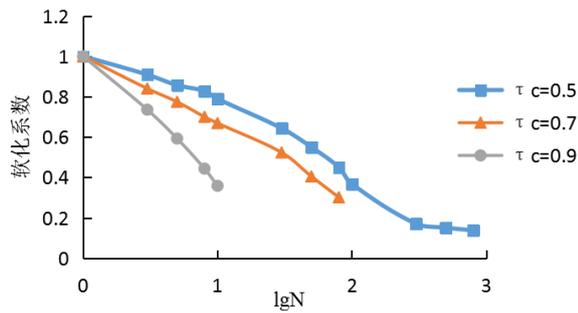
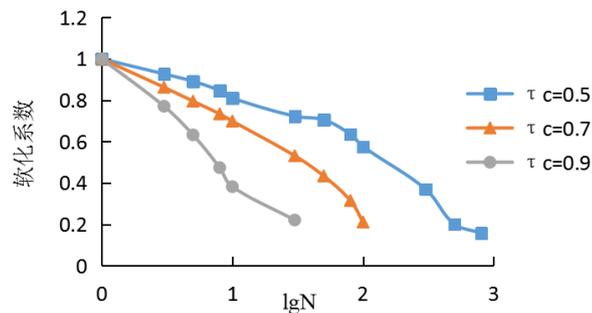


Figure 7. Relationship curves between stresses and strains (the first and nth) under cyclic loading

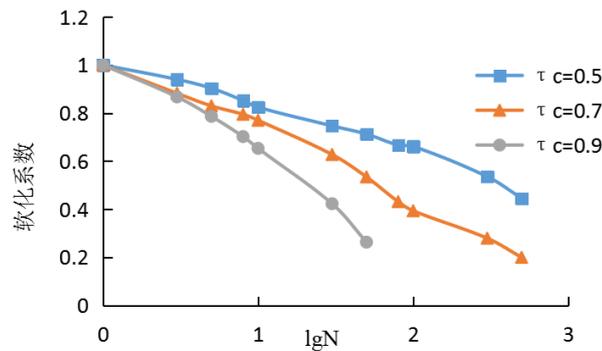
图 7. 循环荷载下第 1 次与第 N 次应力-应变曲线



(a) OCR = 1, f = 1 Hz



(b) OCR = 2, f = 1 Hz



(c) OCR = 4, f = 1 Hz

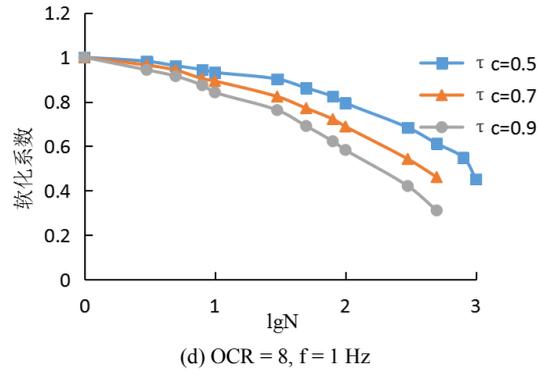


Figure 8. Relationship curves between softening index and cyclic number at different cyclic stress ratio
图 8. 不同循环应力比时软化指数与振次关系曲线

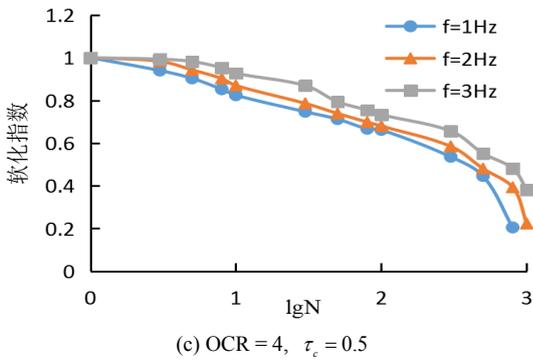
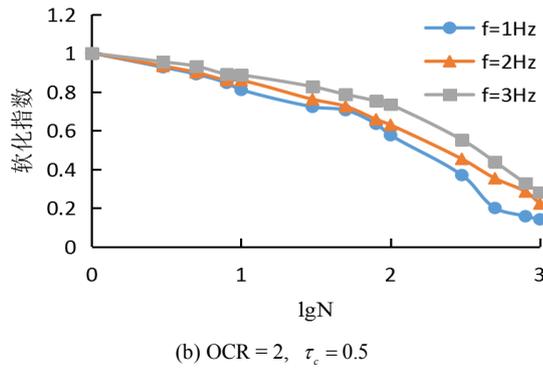
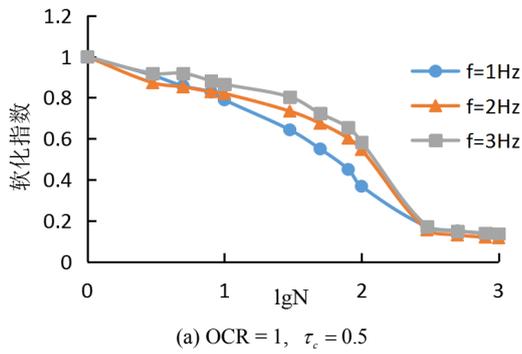


Figure 9. Relationship curves between softening index and cyclic number at different frequency
图 9. 不同频率时软化指数与振次关系曲线

粒就进入下一轮加载, 这会导致试样变形不完全, 从而提高土的刚度。

图中还可看出, 在振动初期, 三条曲线间隔较小, 此时频率对软化指数影响较小, 随着振次的增加, 三条曲线间隔逐渐增大, 表明频率的影响逐渐增强, 当振次达到一定数值时, 三条曲线间隔逐渐减小, 最后趋于相同, 此时软化指数不再随着振次的增加而降低, 趋于稳定。在循环振次达到 1000 次时, 频率 1、2 和 3 的曲线软化指数都在 0.2 左右, 此时试样动弹模衰减为原来的 20%。

6.3. 超固结比的影响

图 10 为不同超固结比时软化指数与振次关系曲线。图中可以看出, 相同振次下, 超固结比越大, 软化指数越高, 一方面说明了超固结减缓了试样的软化; 另一方面说明了超固结比越大的土样强度越高。这是因为初期固结压力越大的土样越密实, 颗粒间的空隙越小, 前期同样轴向压力下的变形越小, 所以动模量越大。

7. 软化模型建立及参数分析

目前主要有两种经验软化模型, Idriss [8]提出的指数表达式 $\delta = N^{-d}$ 以及 Kazuya Yasuhara [9]的半对数表达式 $\delta = 1 - D \lg N$, 其中 d, D 均为软化参数, 但是通过观察图 8~图 10 可以发现, 珠江海洋土的软化指数与 $\lg N$ 呈曲线关系, 难以用这两种经验模型来描述其关系。因此, 本文通过研究发现可以采用王军等[10]提出的二次修正曲线描述软化指数与循环次数的关系:

$$\delta = 1 - A \lg N - B (\lg N)^2 \quad (16)$$

其中 A, B 为软化参数, 通过对试验结果得出的曲线进行回归分析得出。表 5 为参数 A, B 拟合结果。由于频率影响不大, 忽略其作用。

由上表可以发现参数 A, B 随循环应力比的变化而变化, 图 11 和图 12 分别为不同超固结比下循环应力比与参数 A, B 的变化曲线。从图中看出, 参数 A, B 与循环应力比可以用二次曲线来描述其关系:

$$A = A_1 + A_2 \tau_c + A_3 \tau_c^2 \quad (17)$$

$$B = B_1 + B_2 \tau_c + B_3 \tau_c^2 \quad (18)$$

其中: $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ 为曲线参数, 通过试验来获得。表 6 为不同超固结比下试验参数拟合结果。

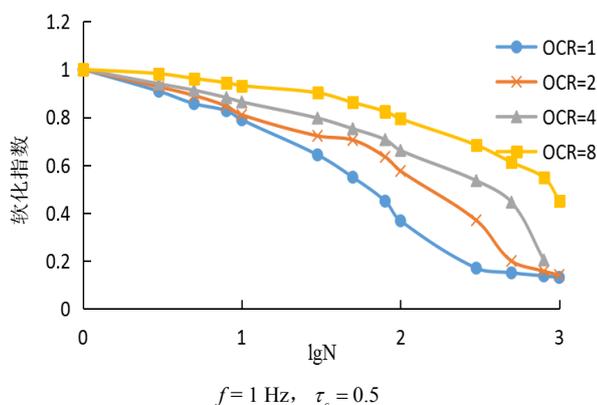


Figure 10. Relationship curves between softening index and cyclic number at over consolidation ratio

图 10. 不同超固结比时软化指数与振次关系曲线

Table 5. Parameter *A* and *B* fitting results
表 5. 参数 *A*、*B* 拟合结果

超固结比	循环应力比	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> ²
1	0.5	0.23313	0.07635	0.98299
1	0.7	0.27927	0.08558	0.99623
1	0.9	0.4627	0.08573	0.99906
2	0.5	0.03243	0.06074	0.9884
2	0.7	0.19324	0.06598	0.99362
2	0.9	0.33738	0.06765	0.99636
4	0.5	0.1043	0.03406	0.99397
4	0.7	0.13434	0.03957	0.99299
4	0.9	0.2149	0.0379	0.99913
8	0.5	0.02806	0.02692	0.98896
8	0.7	0.03073	0.0266	0.99855
8	0.9	0.06705	0.02516	0.99837

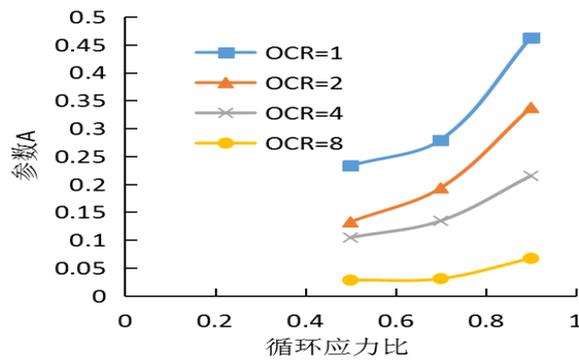


Figure 11. Relationship curves of *A* vs. cyclic stress ratio
图 11. 参数 *A* 与循环应力比关系曲线

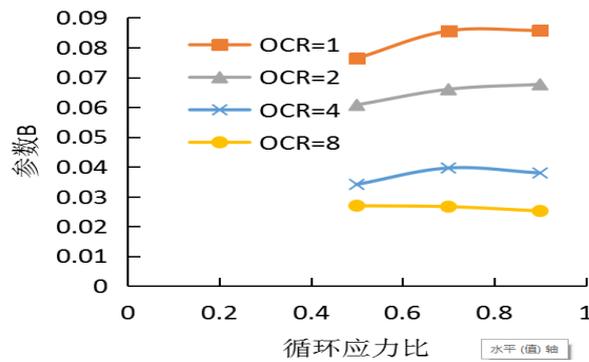


Figure 12. Relationship curves of *B* vs. cyclic stress ratio
图 12. 参数 *B* 与循环应力比关系曲线

将公式(17)和(18)带入式(16), 得到不同超固结比的珠江海洋土在循环荷载下的软化模型:

$$\delta = 1 - (A_1 + A_2\tau_c + A_3\tau_c^2) \lg N - (B_1 + B_2\tau_c + B_3\tau_c^2) (\lg N)^2 \quad (19)$$

Table 6. Parameter A_1, A_2, A_3, B_1, B_2 and B_3 fitting results
表 6. 参数 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ 拟合结果

超固结比	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3
1	0.71842	-1.8287	1.7161	0.01355	0.18235	-0.1135
2	0.34497	-0.9459	1.0416	0.03202	0.07975	-0.04463
4	0.25022	-0.6076	0.6315	-0.01113	0.13525	-0.08975
8	0.1686	-0.4914	0.42062	0.02282	0.0152	-0.014

8. 动强度分析

动强度是指在一定动荷载往返作用次数 N 下土产生某一指定破坏应变 ε_f 或满足某一破坏标准所需的动应力。如果破坏标准不同, 相应的动强度就会不同, 其数值会根据破坏标准的不同而不同, 一般情况下取 5% 或 10% 应变。

8.1. 破坏准则分析

由前文振次-动应变曲线可以发现, 当振次达到一定数值后, 曲线会出现明显的转折点, 此时的应变增幅急剧增大, 并且在不同循环应力比下到达转折点所需的振次也不同, 针对这种情况, 选取 5% 应变和该应变转折点作为土样破坏标准, 绘出其动强度曲线进行分析。

图 13 为不同频率下超固结珠江海洋土采用转折点和 5% 应变为破坏标准的动强度曲线。从图中可以看出, 不论采用哪一种破坏标准, 破坏振次越大, 动强度越低。当破坏振次较小时, 两条曲线比较接近, 此时两种标准下的动强度相同, 随着破坏振次的增加, 两条曲线间隔逐渐增大, 此时相同破坏振次下, 5% 标准的动强度明显大于转折点的动强度。此时若采用 5% 应变为破坏标准的话, 得到的动强度大于采用转折点的动强度, 是不安全的, 在此之前土体已经出现破坏。因此在岩土工程设计中, 采用转折点为破坏标准是偏于安全的。

8.2. 超固结比的影响

图 14 为不同超固结比的动强度曲线。图中可以看出, 超固结比越大, 相同破坏振次下动强度越大。这是因为超固结比越大, 土样越密实, 土体强度越大, 越不容易破坏, 达到相同破坏振次所需的动强度越大。超固结比越大, 曲线越平滑。 $f=1$ 时, 三条曲线的斜率基本相同, 动强度以同样的速率降低; $f=2$ 时, 破坏振次较低时, 三条曲线间隔较大, 此时超固结比对动强度的影响比较明显, 随着破坏振次的增加, 三条曲线间隔逐渐减小。

8.3. 频率的影响

图 15 为不同频率的动强度曲线。从图中可以看出频率越大, 相同振次下动强度越大, 这是因为频率越大, 应力作用在试样上的时间越短, 导致土样变形不完全, 从而提高土体强度。但从图中也能看出, 不论是正常固结土还是超固结土, 三条曲线间隔都不大, 表明频率对动强度有一定的影响, 但影响不大。

9. 动强度模型的建立及参数分析

观察图 13 和图 14 可以发现, 动强度-振次曲线呈线性关系, 可以采用线性公式来表示其内在联系:

$$\sigma_d = a \ln N_f + b \quad (20)$$

式中 a 和 b 为拟合参数。

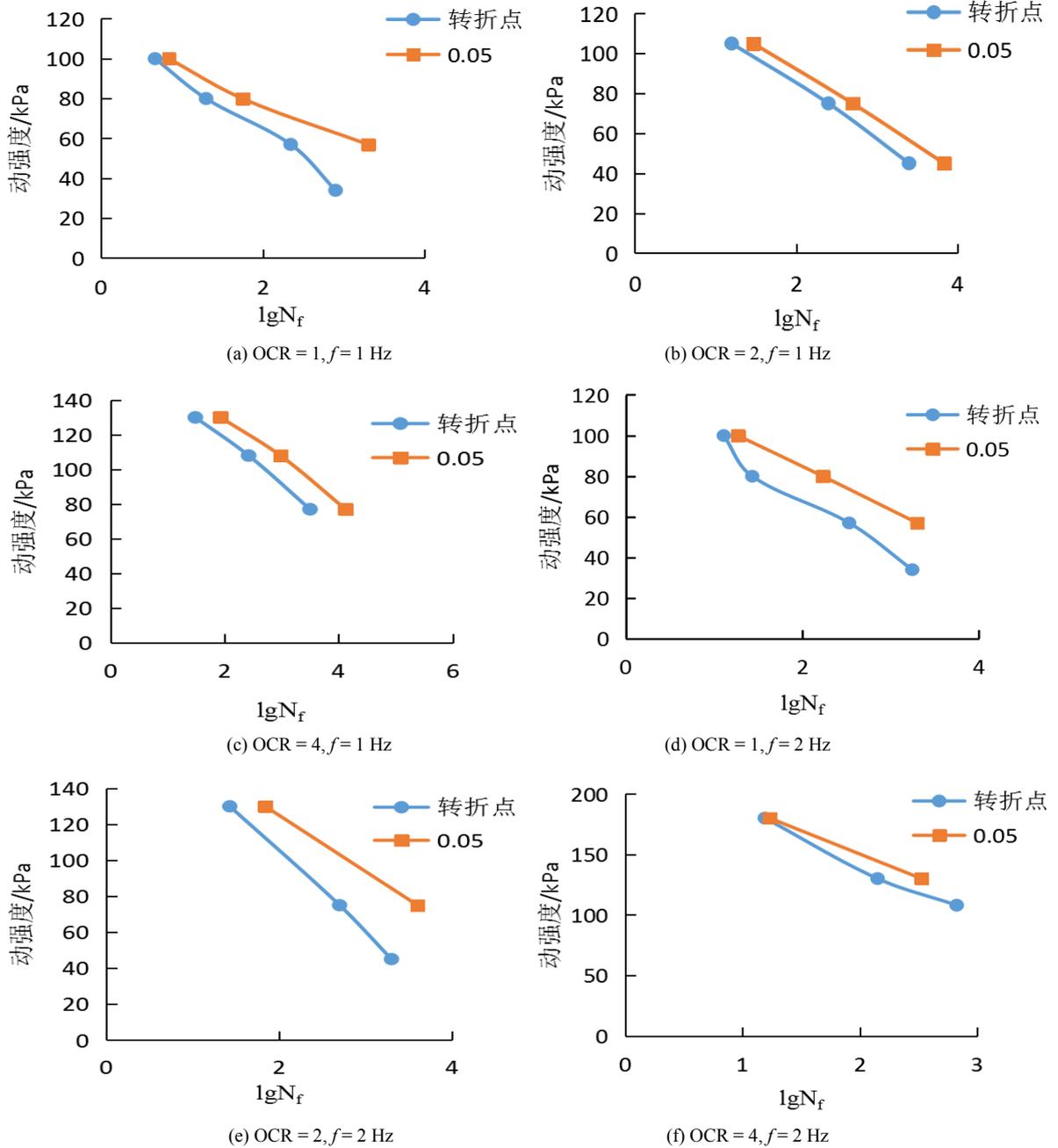


Figure 13. Dynamic strength curve under two different strain failure criteria
图 13. 两种不同应变破坏标准下的动强度曲线

表 7 所示为 a 和 b 参数拟合结果。表中可以发现, 参数 a 和 b 与超固结比有关, 与频率影响关系不大, 可以忽略。

图 16 和图 17 分别为参数 a 和 b 与超固结比关系曲线。观察图可以发现, 其参数与超固结比可以用二次线性描述其关系:

$$a = a_1 + a_2OCR + a_3OCR^2 \quad (21)$$

$$b = b_1 + b_2OCR + b_3OCR^2 \quad (22)$$

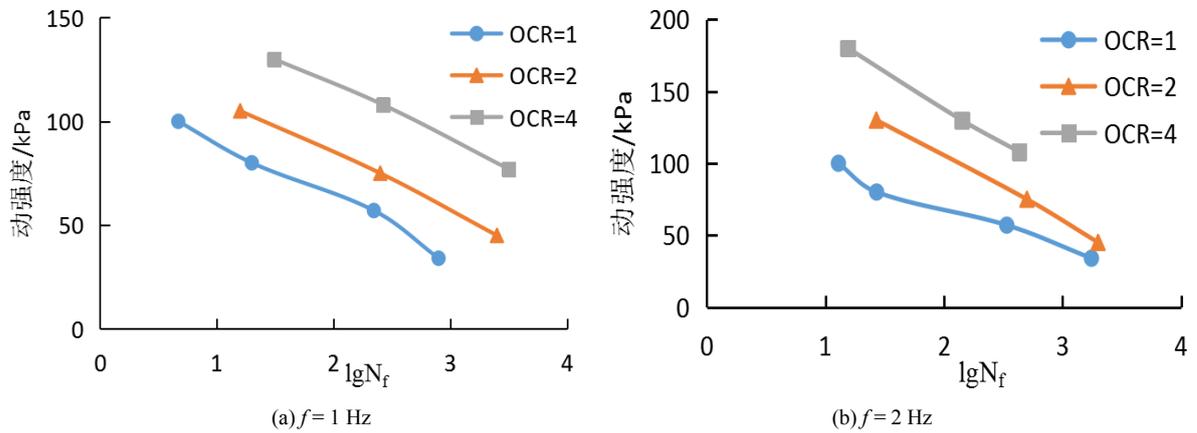


Figure 14. Dynamic strength curve at different over consolidation ratio
图 14. 不同超固结比的动强度曲线

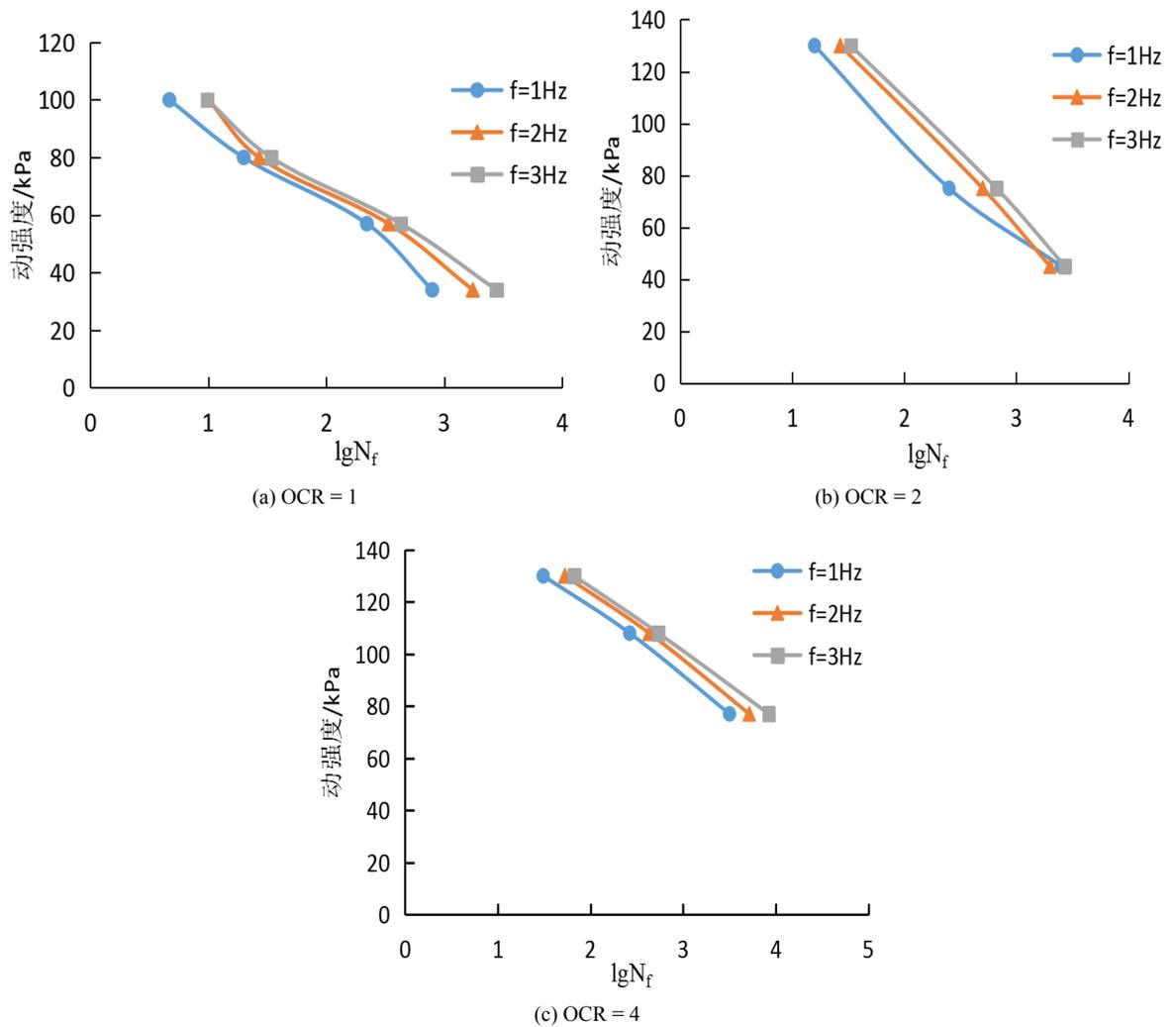


Figure 15. Dynamic strength curve at different frequency
图 15. 不同频率的动强度曲线

得出参数 $a_1 = -6.254$ 、 $a_2 = -27.576$ 、 $a_3 = 5.633$ 、 $b_1 = 24.983$ 、 $b_2 = 112.72$ 和 $b_3 = -19.098$ 。将这

Table 7. Parameter a and b fitting results
表 7. 参数 a 和 b 拟合结果

超固结比	频率	a	b
1	1	-28.197	118.61
1	2	-27.668	124.51
1	3	-25.835	123.31
2	1	-38.874	184.04
2	2	-45.12	195.08
2	3	-44.174	197.88
4	1	-26.43	170.31
4	2	-26.709	176.86
4	3	-25.267	176.42

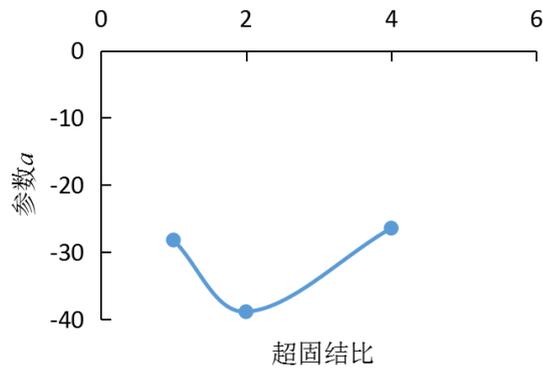


Figure 16. Relationship curves of a vs. over consolidation ratio
图 16. 参数 a 和超固结比关系曲线

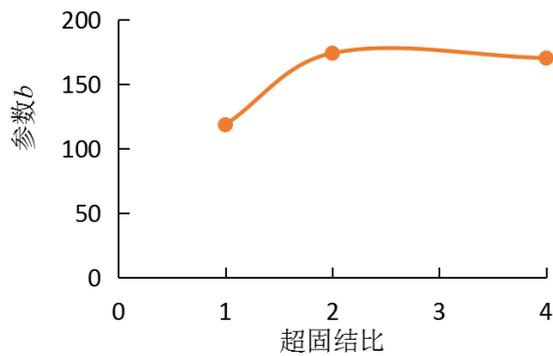


Figure 17. Relationship curves of b vs. over consolidation ratio
图 17. 参数 b 和超固结比关系曲线

些参数带入式(20)得出:

$$\sigma_d = (-6.254 - 27.576OCR + 5.633OCR^2) \ln N_f + 24.983 + 112.72OCR - 19.098OCR^2 \quad (23)$$

10. 结论

对不同超固结比的珠江海洋软土进行不同循环应力比和不同频率的动强度试验, 可得到以下的结论:

(1) 在循环荷载作用下, 随着振动次数的增加, 土体动应变不断增大, 同时变化曲线存在两个应变转折点, 加载初期, 动应变缓慢增大, 达到第一个转折点之后, 总应变迅速增大, 达到第二个转折点, 动应变增长速度减缓, 最后趋于稳定。第二个转折点前的曲线可以用指数函数进行拟合。

(2) 在同一振次下, 循环应力比越大、动应变越大; 超固结比越大、动应变越小; 频率越大、动应变也越小。在相同的频率下, 试样在不同循环应力比下产生的最大动应变随超固结比的增大而降低, 且下降规律相同, 可以采用幂函数进行拟合。

(3) 分析软化特性, 发现软化指数随着振次的增加而降低, 循环应力比越大, 软化越快, 超固结比越大, 软化越慢, 但频率对软化指数影响不大。建立软化模型并分析其参数, 即可得到其关于振次的公式。

(4) 以第一个应变转折点和总应变 5% 为破坏标准进行分析, 发现用转折点作为破坏标准更安全。以转折点应变作为破坏强度标准, 通过绘出不同超固结比和频率的动强度曲线, 可以发现, 破坏振次越大, 动强度越低, 超固结比越大, 动强度越大, 频率越大, 动强度也越大, 但不明显。建立动强度模型并分析其参数, 即可以得到关于超固结比的动强度经验公式。

参考文献 (References)

- [1] 聂影, 栾茂田, 唐小微, 等. 超固结黏土单调和耦合循环的剪切特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2616-2622.
- [2] 孙磊, 王军, 孙宏磊, 等. 循环围压对超固结黏土变形特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(3): 594-600.
- [3] Mayne, P.W. (1988) Determining OCR in Clays from Laboratory Strength. *Journal of Geotechnical*, **114**, 22-31.
- [4] Azzouz, A.S., Malek, A.M. and Baligh, M.M. (1989) Cyclic Behavior of Clays in Undrained Simple Shear. *American Society of Civil Engineers*, **115**, 637-657. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1989\)115:5\(637\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1989)115:5(637))
- [5] Imai, G. and Xie, C. (1991) Endochronic Modeling for Cyclic Behavior of Overconsolidated Clays. *Soils & Foundations*, **31**, 103-114. https://doi.org/10.3208/sandf1972.31.4_103
- [6] Jiang, M.M., Cai, Z.Y., Cao, P., et al. (2010) Effect of Cyclic Loading Frequency on Dynamic Properties of Marine Clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering (GSP 201)*. *Proceedings of the 2010 Geo Shanghai International Conference*, 340-346. [https://doi.org/10.1061/41102\(375\)29](https://doi.org/10.1061/41102(375)29)
- [7] Larew, H.G. and Leonards, G.A. (1962) A Repeated Load Strength Criterion. Highway Research Board Proceedings.
- [8] Idriss, I.M., Dobry, R. and Singh, R.D. (1978) Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **104**, 1427-1447.
- [9] Yasuhara, Y., Hyde, A.F.L., Toyata, N., et al. (1998) Cyclic Stiffness of Plastic Silt with an Initial Drained Shear Stress. *Proceedings of Geotechnique Symposium in Print (SIP) on Prefailure Deformation Behavior of Geomaterials*, London, 371-382.
- [10] 王军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1713-1719.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org