

循环荷载作用下粘土应变速率试验研究

Study on the strain rate of clay under cyclic loading

蒋 军

(浙江大学土木系, 浙江 杭州 310027)

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0528-04

作者简介: 蒋 军(1967-), 男, 浙江诸暨人, 工学博士, 主要从事软粘土力学及地基处理、防灾工程等的教学与研究工作。

1 引言*

据有关资料, 建于 Ariake 粘土上的日本某低路堤高速公路, 在投入运行后发生了惊人的沉降, 5 a 达 1~2 m; 日本某铁路在开通运行 5 a 后的最大沉降近 1 m, 据分析这些异常的沉降均是由交通荷载引起^[1]。我国的公路等也有类似情况出现。

国内外一些学者对循环荷载作用下软粘土的特性曾做过试验研究工作, 建立了一些应力、应变、孔压等的经验关系^[2]。也有学者对影响粘土孔压和变形的因素做了较多研究^[3]。Andersen(1988)认为, 设计近海平台时也必须考虑粘土层在波浪荷载作用下的反应特性^[4]。

但至目前, 对循环荷载作用下粘土变形速率的试验研究还较缺乏。围绕这一课题, 本文通过室内循环三轴试验, 较系统地研究了不排水循环荷载作用下粘土变形速率的特性, 以加深对循环荷载作用下粘土性状的认识, 并为作进一步的理论研究奠定基础。

2 试验内容和方法

试验在 HX-100 伺服式多功能三轴仪上进行, 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。土样直径 3.91 cm, 高 8.00 cm。所用粘土为萧山的重塑饱和粘土, 液限为 45%, 塑性指数为 19.0, 比重 2.72, 干密度为 1.31 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。试样在某一周围压力下完成主固结, 然后在不排水条件下加单向循环荷载。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。试验方案见表 1。

3 试验结果与分析

图 1(a)~(d)所示的是具有不同超固结比粘土在循环荷载作用下应变速率(此指残余应变速率, 下同)与时间(时间 $t = N/f$, 其中 N 为循环次数, f 为循环荷

载频率)的关系。四个图的加载频率均为 1 Hz, 循环荷载应力比 r ($r = p_{\text{cyc}}/S_u$, 其中 p_{cyc} , S_u 分别为循环荷载应力幅和循环荷载作用前土样的不排水强度)分别为 0.55, 0.61, 0.60, 0.53, 超固结比(OCR)分别为 8, 4, 2 和 1, 四个图均用对数坐标表示。由四个图可知变形速率随时间的增大而减小, 且可看出变形速率对数与时间对数间均有较好的线性关系。图中实线为回归线, 其中 a 为直线的截距, 其意义表示单位时间 $t = 1$ s 时的应变速率, λ 为直线的斜率, 反映了应变速率随时间的衰减率, 在此命名为应变速率衰减率, R 为回归直线的相关系数, 由图中可知均接近于 -1。

表 1 不排水循环三轴试验试验方案

Table 1 Undrained cyclic triaxial tests

试验组	OCR	f / Hz	循环应力幅 p_{cyc} / kPa
TU1207	1	1	158
TU1175	1	1	132
TU1145	1	1	110
TU1110	1	1	85
TU170	1	1	54
TU0122	1	0.1	110
TU0123	1	0	110
TU31852	1	3	110
TU2142	2	1	110
TU273	2	1	51
TU2116	2	1	83
TU4116	4	1	92
TU41	4	1	84
TU8135	8	1	135
TU81	8	1	140

图 2(a), (b), (d), (c) 和(d)所示的是正常固结粘土在相同频率、不同循环应力比的循环荷载作用下, 应变速率对数与时间对数的关系。五幅图的加载频率均为 1 Hz, 循环荷载应力比 r 分别为 0.26, 0.41, 0.53, 0.63 和 0.76。从这些图可知, 无论循环应力比如何变化, 变形速率均随时间的增大而减小, 同样应变速率对数与时间对数间的关系可用直线描述。

* 收稿日期: 2001-08-29

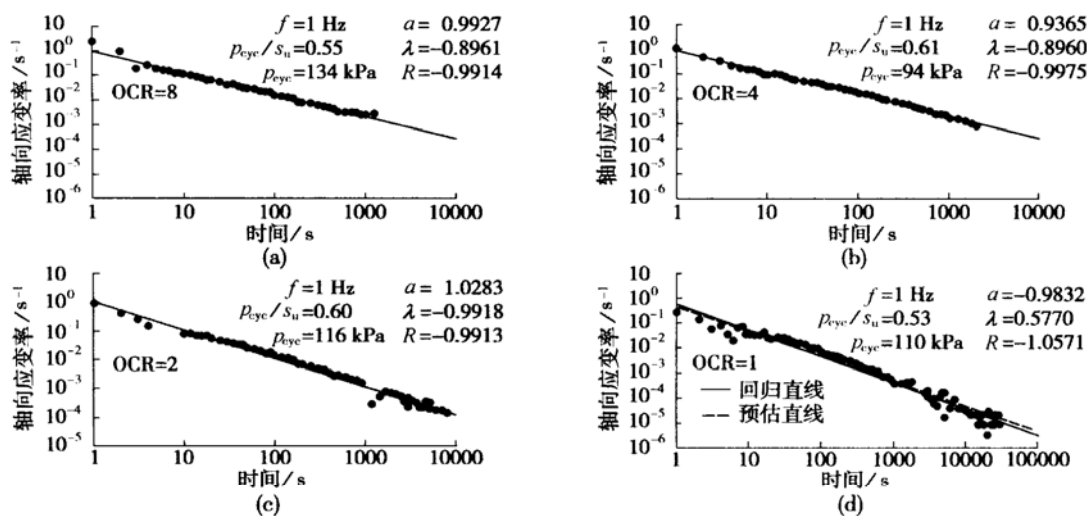


图1 不同超固结粘土轴向应变速率与时间的关系

Fig. 1 Relation between axial strain and time for clay with different OCR

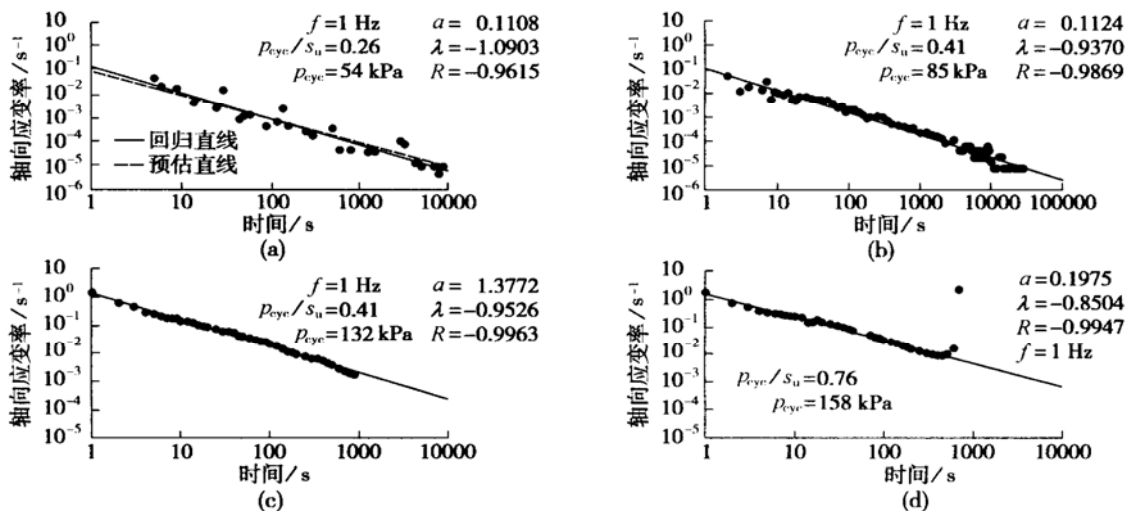


图2 不同循环应力比时轴向应变速率与时间的关系(OCR=1)

Fig. 2 Relation between axial strain ratio and time for clay with different cyclic stress ratio

图3(a), (b), (c)和图1(d)所示为正常固结粘土在相同循环应力比($r = p_{cyc}/S_u = 0.53$)、不同加载频率(加载频率分别为3, 1, 0.1, 0 Hz)的循环荷载作用下应变速率与时间的关系。从这些图可看出, 对应不同的加载频率, 应变速率随时间的增大而减小, 应变速率对数与时间对数间的关系也可用线性关系近似描述(图中实线为回归直线)。

把正常固结粘土在不同循环应力比、不同加载频率作用下的应变速率衰减率 λ 值列于表2中, 可看出 λ 与 f 或 r 间的关系无规律性, λ 值几乎不受 f 或 r 值的影响, 各 λ 值相差不大, 可设定 λ 是一恒定值(以 λ_0 表示)。

当OCR=1, 对应每一种频率, 把不同循环应力比下的应变速率与时间的关系进行归一化。归一化的方法是把所有相应的点都归一到循环应力比 r 为最小的关系线上, 即对应每个 r 时的各个 $\dot{\epsilon}$ 值, 减去某一差值 $\Delta\dot{\epsilon}$ (为方便, 这儿取 $N=100$ 时对应 r 的回归直线的

$\dot{\epsilon}_{N=100}$ 与 r 为最小时的回归直线 $\dot{\epsilon}_{\min, N=100}$ 的差值, 即 $\Delta\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{N=100} - \dot{\epsilon}_{\min, N=100}$)。归一化后对应不同频率的应变速率与时间的关系如图4(a), (b)和(c)所示($f=0.1$ Hz时的关系线见图3(b))。从这四张图可知, 对应

表2 不同条件下的应变速率衰减率

Table 2 The attenuation of strain rate under different condition

OCR	f / Hz	r	λ
1	3	0.53	-1.0046
1	3	0.73	-1.0210
1	3	0.35	-0.9805
1	0.1	0.53	-1.0470
1	0	0.73	-0.9112
1	0	0.53	-1.1070
1	1	0.53	-1.0571
1	1	0.76	-0.8504
1	1	0.70	-0.8953
1	1	0.64	-0.9920
1	1	0.41	-0.9370
1	1	0.26	-1.0953

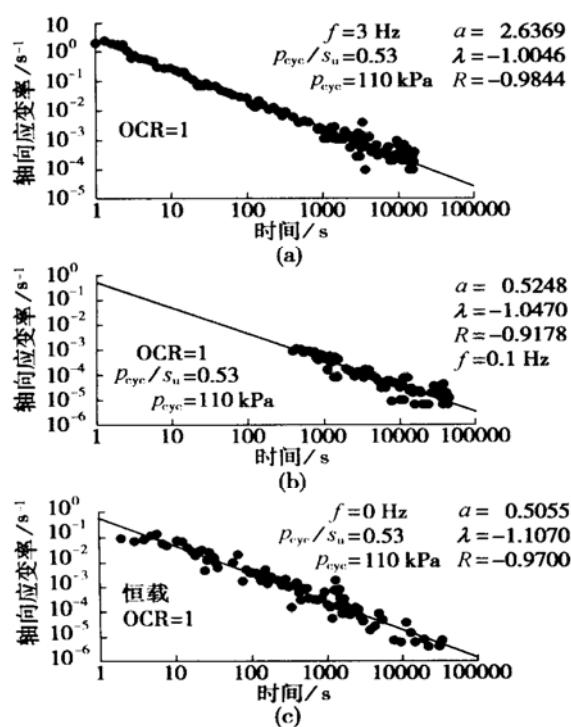


图3 对应不同加载频率时的轴向应变速率与时间的关系
Fig. 3 Relation between axial strain ratio and time for clay under cyclic loading with different frequency

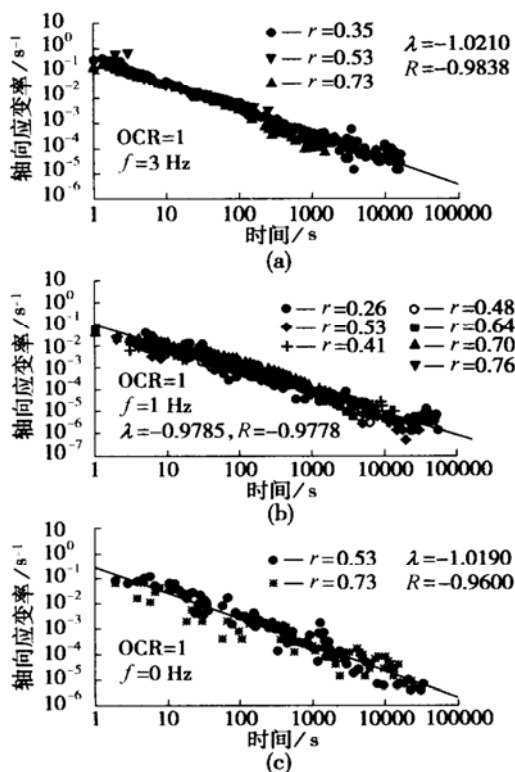


图4 归一化应变速率与时间的关系

Fig. 4 Relation between normalized axial strain ratio and time
四种频率, 对循环应力比归一化后的应变速率对数与时间对数间的关系都可由回归直线(图中实线)较好描述, 且应变速率衰减率 λ 与归一前几乎没有变化。这一结果意味着循环应力比对应应变速率衰减率 λ 无影响。

响。对循环应力比归一化后的应变速率衰减率 λ 如表3所示, 从表3可知对应不同的加载频率 f , λ 相差很小。

表3 不同加载频率时的应变速率衰减率

Table 3 The attenuation of strain rate under cyclic loading with different frequency

f / Hz	3	1	0.1	0
λ	-1.0210	-0.9785	-1.0470	-1.0190

组合图4(a), (b), (c)和图3(b), 即对加载频率再进行归一化可得图5, 归一的方法与前面对循环应力比进行归一相类似。从图5可看出, 对加载频率进行归一后, 应变速率对数与时间对数间的关系也仍然可由回归直线描述, 且应变速率衰减率 λ 在归一前后几乎保持不变。这一现象可反映加载频率对应应变速率衰减率没有影响, 从而可简单地通过加恒载试验来求得土样在不同加载频率下的应变速率衰减率。

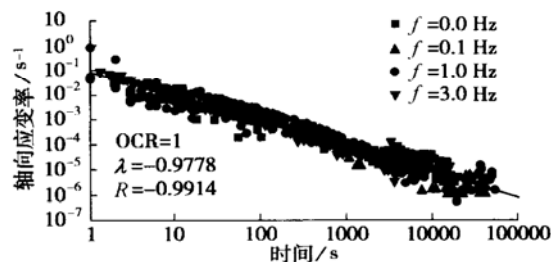


图5 归一化应变速率与时间的关系

Fig. 5 Relation between normalized axial strain ratio and time

综合以上分析可认为, 正常固结粘土在循环荷载作用下, 应变速率衰减率是一个恒定值, 与加载频率和循环荷载应力比无关。从图5可知, 正常固结的萧山重塑粘土的应变速率衰减率 $\lambda_0 = -0.9914 \approx -1.0$ 。

将 $\text{OCR} = 2, 4, 8$ 时各相应点回归综合在一起, 见图6(a), (b), (c), 回归直线的斜率 $\lambda = -0.9284, -0.9576$ 和 -0.9147 , 相关系数 R 分别为 $-0.9761, -0.9958$ 和 -0.9917 。由图6也可知, 对应不同的超固结粘土, 有相应的应变速率衰减率。从数量上看(绝对值), 超固结粘土的应变速率衰减率均比正常固结状态时要小, 即超固结粘土的应变速率衰减要比正常固结粘土慢。

图7所示的是循环应力比 $r = 0.53$, $\text{OCR} = 1$, 加载频率 f 分别为 3, 1, 0.1 和 0 Hz 时的应变速率与时间的关系线, 图中直线的应变速率衰减率均为归一化后的统一值 λ_0 。由图可知, 加载频率越大, 应变速率越大。当 $f = 0, 0.1$ 和 1 Hz 时, 三者相差不大, 其中后两条直线已几乎重合。 $f = 3$ Hz 时, 应变速率与前三项有一定差距。

图8所示的是 $\text{OCR} = 1$, 加载频率 $f = 1$ Hz, 具有不同循环应力比的应变速率与时间的关系线, 图中每条直线的应变速率衰减率均为恒定值 λ_0 。从图8可知, 循环应力比愈大, 应变速率愈大。

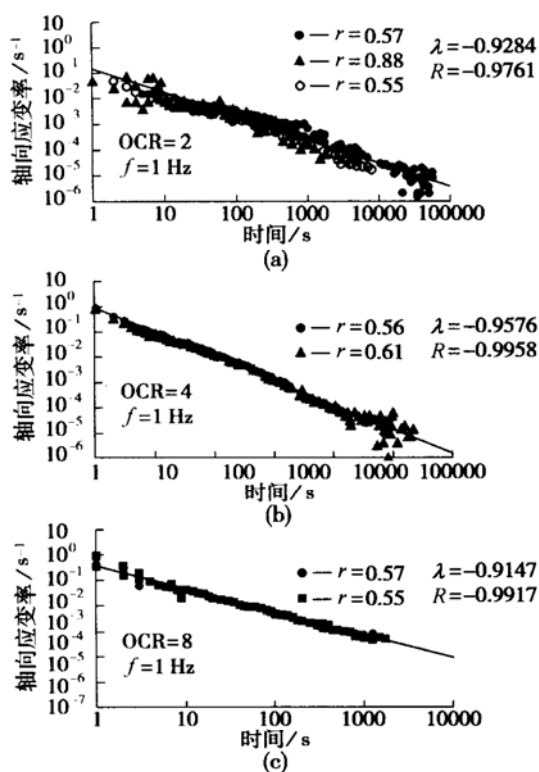


图6 超固结粘土归一化应变速率与时间的关系

Fig. 6 Relation between normalized axial strain ratio and time for over-consolidated clay

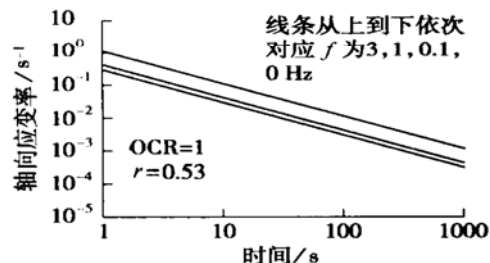


图7 应变速率与时间关系曲线

Fig. 7 Relation between normalized axial strain ratio and time

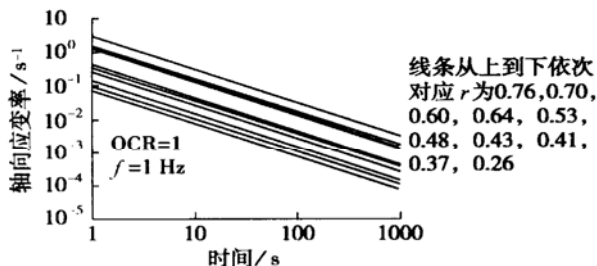


图8 不同循环应力比的应变速率与时间的关系

Fig. 8 Relation between normalized axial strain ratio and time

应变速率与循环应力比的关系(未破坏前)见图9。图中OCR=1, 加载频率 $f=1\text{ Hz}$, 图中三条线的荷载作用时间点 t 分别为1, 100和1000 s。由图9知, 应变速率随循环应力比的增大而增大, 应变速率对数与循环应力比的关系可用直线拟合, 其相关系数 R 分别为0.9876, 0.9866和0.9857。三直线的斜率为8.5204, 8.5944和8.6231, 相差较小, 可认为三直线具有相同的斜率。

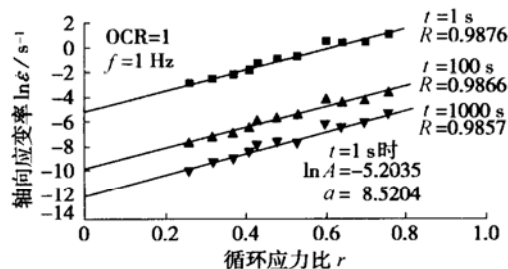


图9 应变速率与循环应力比的关系线

Fig. 9 Relation between normalized axial strain ratio and stress ratio

4 结 论

(1) 在循环荷载作用下, 粘土的应变速率随时间的增大而减小, 应变速率对数与时间对数间的关系可用直线描述。

(2) 在循环荷载作用下, 加载频率越大, 应变速率越大; 循环应力比愈大, 应变速率也愈大。应变速率对数与循环应力比间的关系可用直线描述(未破坏前)。

(3) 粘土的应变速率衰减率与加载频率、循环荷载应力比无关, 与超固结度有关。超固结粘土的应变速率衰减要比正常固结粘土慢。粘土的应变速率活化率不随时间而变。

感谢曾国熙教授和朱向荣教授的指导。

参考文献:

- [1] Tarumi N, Sunaga M. Behaviours of low embankments on soft grounds during train passage[J]. Proc JSCF, 1988, (400/ III-10): 1-11. (in Japanese)
- [2] France J W, Sangrey D A. Effects of drainage in repeated loading of clays[J]. ASCE, 1977, 103(7): 769-785.
- [3] Yasuhara K, Yamanouchi T, Hirao K. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 77-91.
- [4] Andersen K H, Lauritzsen R. Bearing capacity for foundations with cyclic loads[J]. ASCE, 1988, 114(5): 540-555.