

动三轴试验中饱和软黏土的孔压特性及其对有效应力路径的影响

王 军¹, 谷 川^{1, 2}, 蔡袁强^{1, 2}, 杨 芳¹

(1. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 变围压动三轴试验能够同时施加循环变化的偏应力与循环变化的围压, 可以模拟地震荷载下动剪应力与动正应力的耦合。通过 GDS 双向动三轴设备进行一系列饱和软黏土的变围压动三轴试验, 系统研究循环偏应力和循环围压耦合对饱和软黏土孔压特性的影响。试验结果表明: 在单纯循环围压条件下, 饱和软黏土会产生相应的正的瞬时动孔压, 但是并没有产生明显的负的瞬时动孔压; 在循环偏应力与循环围压耦合情况下, 饱和软黏土的孔压时程曲线表现出与常规动三轴试验不同的特性, 即动孔压的振幅更大, 并且最大动孔压和最小动孔压表现出不同的发展规律: 最大动孔压持续增长, 而最小动孔压在加载一定周数后趋于稳定。此外, 对残余孔压的定义进行量化, 并对循环偏应力和循环围压耦合对有效应力路径的影响进行研究。

关键词: 土力学; 应力路径; 孔压; 动三轴试验; 有效应力路径

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)06 - 1290 - 07

BEHAVIOR OF PORE WATER PRESSURE IN DYNAMIC TRIAXIAL TESTS OF SATURATED SOFT CLAY AND ITS EFFECT ON EFFECTIVE STRESS PATH

WANG Jun¹, GU Chuan^{1, 2}, CAI Yuanqiang^{1, 2}, YANG Fang¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The dynamic triaxial test with cyclic confining pressure can apply cyclic confining pressure in addition to the cyclic deviatoric stress, and it can simulate the coupling of cyclic shear stress and cyclic normal stress in earthquakes. The influence of the coupling of cyclic deviatoric stress and cyclic confining pressure on the development of pore water pressure is studied using an advanced global digital systems(GDS) dynamic triaxial device. Test results show that: in pure cyclic confining pressure tests, the cyclic confining pressure can develop the corresponding positive pore water pressure, but cannot develop the corresponding negative pore water pressure; the coupling of cyclic confining pressure and cyclic deviatoric stress makes great influence on the behavior of pore water pressures, the amplitudes of pore water pressures increase greatly in comparison with the conventional dynamic triaxial tests; and the developments of maximum and minimum pore water pressure show different behaviors; and the maximum dynamic pore water pressure continues to grow, while the minimum dynamic pore water pressure stabilizes after a certain number of weeks under loading. Moreover, the residual pore water pressure is defined and the influence of the coupling of cyclic deviatoric stress and cyclic confining pressure on the behavior of effective stress paths is studied.

Key words: soil mechanics; stress path; pore water pressure; dynamic triaxial test; effective stress path

收稿日期: 2011 - 12 - 30; **修回日期:** 2012 - 03 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979096); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB411907); 浙江省自然科学基金项目(Y1110751)

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, 现任副教授, 主要从事土动力学、土工抗震方面的教学与研究工作。E-mail: wangjunx9s@163.com

1 引 言

在动力荷载作用下, 饱和土体的孔压逐渐上升, 有效应力逐渐减小, 孔压的发展规律是使用有效应力动力分析法分析问题的关键^[1]。对饱和土体尤其是饱和砂土的孔压发展规律, G. R. Martin 等^[2-8]通过大量的室内试验研究(主要为常规动三轴试验或者动单剪试验), 提出若干比较实用的经验模型(如 Seed 模型)。但是, 这些经验模型研究的对象一般是动力加载过程中的残余孔压或者最大孔压, 很少涉及动孔压的时程曲线(即瞬时动孔压发展规律)。这是因为: 一方面, 在动力分析中, 一般只需要计算饱和土体的残余孔压; 另一方面, 人们普遍认为瞬时动孔压的发展规律与最大或者残余孔压的发展规律基本一致^[9]。

实际上, 在动力加载过程中, 瞬时动孔压的发展规律颇为复杂, 不但与土体的种类、固结状态、应力历史、应力水平、频率等有关, 更与动应力的维数以及应力路径的形式联系紧密^[10-12]。而且, 瞬时动孔压的发展规律也不能完全通过残余孔压或者最大孔压来描述, 因为在有些情况下, 瞬时动孔压的幅值是逐渐改变甚至是出现突变的, 即最小与最大动孔压的发展并不一致。比如, 对饱和砂土, 当其趋近于液化时, 有效应力路径变为蝴蝶形, 而对饱和和软黏土, 在整个动力加载过程中, 其有效应力路径的形状都没有明显的变化, 这是由于两者瞬时动孔压变化规律的不同: 饱和砂土在趋近于液化时, 瞬时动孔压变化较为复杂, 从而引起有效应力路径的变化, 而饱和软黏土的瞬时动孔压发展自始至终比较一致, 因此有效应力路径变化不大; 再比如, 各向异性固结饱和土体的瞬时动孔压表现出与各向同性固结饱和土体不同的特性^[13-14]。

对常规的动三轴、动单剪试验, 由于其只能施加一个动应力分量(对动三轴为动偏应力, 对动单剪为动剪应力), 因此并不存在各种动应力分量的耦合, 应力路径较为简单, 但是, 当存在 2 个甚至 3 个不同的动应力分量时, 应力路径就会变得复杂。而且, 越来越多的试验结果表明, 不同动应力分量的耦合会对饱和土体的动力特性产生很大的影响。比如, 双向动单剪试验能够同时施加 2 个垂直方向的动剪应力, A. M. Kammerer 等^[15]研究了 2 个垂直方向的动剪应力组成的应力路径对饱和砂土孔压特

性的影响, 发现与常规单向动单剪试验相比, 2 个动剪应力的耦合对瞬时动孔压产生较大的影响, 体现为瞬时动孔压的变化幅度更大, 并且瞬时孔压的最大值与最小值表现出不同的发展规律; 动扭剪试验能够同时施加动扭矩和动偏应力, 虞海珍^[16]通过不同应力路径下饱和砂土的动扭剪试验发现, 循环偏应力与循环扭矩的耦合使得动孔压的循环效应更加明显, 变化幅值更大, 并且影响了最大孔压的极限值。

与常规的恒定围压动三轴试验不同, 变围压动三轴试验能够同时施加循环变化的偏应力与循环变化的围压。循环偏应力与循环围压的耦合能够模拟地震荷载下循环剪应力与循环正应力的耦合^[17-18], 因此, 能够更好地用于地震荷载等动荷载的室内试验研究中。但是, 据笔者所知, 目前对循环偏应力与循环围压耦合下饱和软黏土动力特性尤其是孔压特性等方面鲜见报道。因此, 本文在一系列变围压动三轴试验的基础上, 系统地研究了变围压动三轴应力路径对饱和和软黏土孔压及其有效应力路径特性的影响。试验结果表明, 变围压条件下饱和和软黏土的动孔压时程规律与常规动三轴下的动孔压时程规律有很大的不同, 并且, 在循环偏应力与循环围压的耦合作用下, 有效应力路径也发生较大的变化。

2 试验仪器及试验方案

本试验采用英国进口的 GDS 变围压动三轴系统(见图 1), 该设备通过电机伺服系统施加动轴向应力, 通过油压施加动围压, 不但能够单独控制动偏应力与动围压的幅值, 而且能够通过自定义波形改变动偏应力与动围压的相位差, 从而实现各种幅值及相位差条件下循环偏应力与循环围压的耦合。



图 1 GDS 变围压动三轴系统

Fig.1 GDS dynamic triaxial device with cyclic confining pressure

在动三轴试验中，施加幅值为 σ_1^{ampl} 的循环轴应力与幅值为 σ_3^{ampl} 的循环围压，这时循环平均主应力的幅值 p^{ampl} 为

$$p^{\text{ampl}} = (\sigma_1^{\text{ampl}} + 2\sigma_3^{\text{ampl}}) / 3 \quad (1)$$

循环偏应力 q^{ampl} 的幅值为

$$q^{\text{ampl}} = \sigma_1^{\text{ampl}} - \sigma_3^{\text{ampl}} \quad (2)$$

由式(1), (2)可得 p^{ampl} 与 q^{ampl} 的关系为

$$p^{\text{ampl}} = q^{\text{ampl}} / 3 + \sigma_3^{\text{ampl}} \quad (3)$$

定义 p^{ampl} 与 q^{ampl} 的比值为 RPD ，即

$$RPD = p^{\text{ampl}} / q^{\text{ampl}} \quad (4)$$

在常规恒定围压动三轴试验中，由于围压是恒定的，即 $\sigma_3^{\text{ampl}} = 0$ ，因此 p^{ampl} 与 q^{ampl} 的比值 RPD 为

$$RPD = p^{\text{ampl}} / q^{\text{ampl}} = (q^{\text{ampl}} / 3) / q^{\text{ampl}} = 1/3 \quad (5)$$

可见，在常规恒定围压动三轴试验中，平均主应力并不是恒定不变的，而是在以 $q^{\text{ampl}} / 3$ 的幅值循环振动。

在变围压动三轴试验中，由于围压不是恒定的，而是以 σ_3^{ampl} 为幅值循环振动，因此，当两者的相位差为 0° 时， p^{ampl} 与 q^{ampl} 的比值 RPD 为

$$RPD = (q^{\text{ampl}} / 3 + \sigma_3^{\text{ampl}}) / q^{\text{ampl}} = 1/3 + \sigma_3^{\text{ampl}} / q^{\text{ampl}} \quad (6)$$

当两者的相位差为 180° 时， p^{ampl} 与 q^{ampl} 的比值 RPD 为

$$RPD = (q^{\text{ampl}} / 3 - \sigma_3^{\text{ampl}}) / q^{\text{ampl}} = 1/3 - \sigma_3^{\text{ampl}} / q^{\text{ampl}} \quad (7)$$

式(7)表现在 p - q 空间中，如图 2 所示， RPD 正是 p - q 平面内各个应力路径的斜率。

由式(6), (7)及图 2 可知，在 p - q 空间中，随着循环偏应力与循环围压相位差及比值的不同，变围压动三轴应力路径可以表现出以下几种形式：(1) 当相位差为 0° 时，这时应力路径的斜率即 $RPD > 1/3$ ， RPD 随着循环围压与循环偏应力比值的增大而增大；(2) 当相位差为 180° 时，这时应力路径的斜率为 $RPD < 1/3$ ，并且当 $\sigma_3^{\text{ampl}} = (1/3)q^{\text{ampl}}$ 时， $RPD = 0$ ，即平均主应力为恒定的；(3) 当围压恒定时， $RPD = 1/3$ 。

本文共进行了 2 组试验，第 1 组试验保持偏应力为 0，只单纯施加一定幅值的循环围压，以研究单纯循环围压条件下饱和软黏土的孔压特性；第

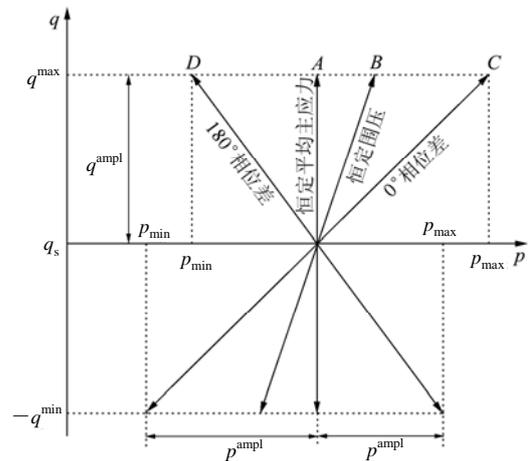


图 2 变围压动三轴应力路径

Fig.2 Stress paths in cyclic triaxial tests with cyclic confining pressure

2 组试验对各向同性固结条件下的饱和试样进行各种应力路径下的循环加载试验，以研究循环偏应力与循环围压耦合对饱和软黏土孔压特性的影响。具体的试验方案如表 1, 2 所示，其中表 1 为第 1 组

表 1 单纯循环围压试验方案

Table 1 Pure cyclic confining pressure test scheme

方案编号	频率/Hz	循环围压幅值/kPa	循环围压比
1-1	0.1	25	0.25
1-2	0.1	50	0.50
1-3	0.1	75	0.75
1-4	0.1	100	1.00

表 2 变围压动三轴试验方案

Table 2 Dynamic triaxial test scheme with cyclic confining pressure

方案编号	σ_1^{ampl} /kPa	σ_3^{ampl} /kPa	CSR	RPD	频率/Hz
2-1	53.0	0.0	0.265	+1/3	0.1
2-2	53.0	+35.3	0.265	+1.0	0.1
2-3	53.0	-97.2	0.265	-1.5	0.1
2-4	43.6	-14.5	0.218	+0.0	0.1
2-5	43.6	0.0	0.218	+1/3	0.1
2-6	43.6	+29.1	0.218	+1.0	0.1
2-7	43.6	+50.8	0.218	+1.5	0.1
2-8	43.6	+72.7	0.218	+2.0	0.1
2-9	43.6	-58.1	0.218	-1.0	0.1
2-10	43.6	-79.9	0.218	-1.5	0.1
2-11	43.6	-101.7	0.218	-2.0	0.1
2-12	38.0	0.0	0.190	+1/3	0.1
2-13	38.0	+25.3	0.190	+1.0	0.1
2-14	38.0	-44.3	0.190	-1.5	0.1

注：“+”表示相位差为 0° ；“-”表示相位差为 180° 。

试验方案，表 2 为第 2 组试验方案。每个试验所采用循环偏应力幅值、循环围压幅值都列于表中。表中的 CSR 为循环应力比，定义为 $CSR = q^{amp} / p'_0$ ，其中 p'_0 为初始有效围压，本文所有试验的初始有效围压均为 100 kPa。

本文使用重塑黏土试样，原土为典型的温州地区软黏土，土体的基本物理参数如下：密度 $\rho = 1.60 \sim 1.63 \text{ g/cm}^3$ ，相对密度 $G_s = 2.72$ ，含水量 $w = 56\% \sim 62\%$ ，液限为 $w_L = 76.5\%$ ，塑限 $w_p = 41.2\%$ ，塑性指数为 $I_p = 35.3$ ，黏粒含量为 54.6%，细粒含量为 92.4%。重塑土样通过下述方法制得：先将原土烘干过筛，然后使用无气水制成含水量为土体 1.5 倍液限的泥浆，使用大型固结仪在 35 kPa 的压力下对泥浆进行 2 周左右的固结，最后从固结土块中切取高 100 mm，直径为 50 mm 的土样制作三轴试样，并在三轴设备中使用反压方法进行饱和，测得孔压系数 B 值达到 0.97 之后进行下一步固结试验。

3 试验结果

3.1 单纯循环围压试验

本文进行单纯循环围压试验的试样全部为各向同性固结，固结完成之后不施加偏应力，只施加一定幅值的循环围压，在不排水条件下振动 1 000 圈。

一般认为，平均主应力 p 的变化仅仅产生瞬时孔压，而不会产生残余孔压，同时也不会产生残余应变。因此，本文单纯循环围压试验的目的有 2 个：一是验证这个假定，即单纯变围压不会产生残余孔压，而只产生瞬时孔压；二是研究 A. W. Skempton^[19] 提出的孔隙水压力理论是否同样适用于循环荷载试验，即循环变化的围压是不是产生与之成一定比例的循环孔压，即

$$\Delta u^p = B \Delta p \tag{8}$$

式中： Δu^p 为孔压增值， Δp 为平均主应力增值。

试验结果表明：在试验结束之后，每个试样会有 2.5~4.0 kPa 的残余孔压，并且几乎没有残余应变。考虑到试验仪器的误差以及试样不可能完全饱和，因此相对于 100 kPa 的有效围压，这种误差是可以接受的，证明在单纯的循环围压下，饱和软黏土几乎没有残余孔压与残余变形。

典型的瞬时动孔压时程曲线(当瞬时动孔压稳定之后，并且只选择其中若干圈)如图 3 所示，4 组

试验的最大和最小动孔压比的发展曲线如图 4 所示。其中动围压比和动孔压比分别定义为

$$\left. \begin{aligned} r_p &= \Delta p / p'_0 \\ r_u &= \Delta u / p'_0 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中： p'_0 为有效固结围压。

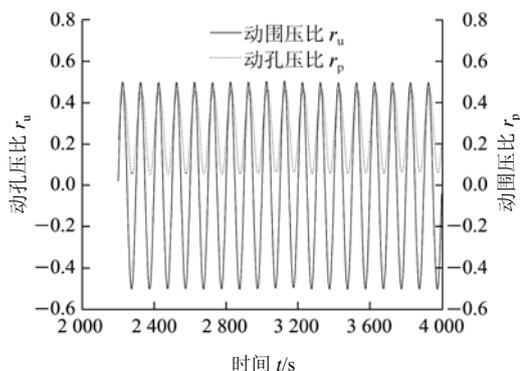


图 3 动孔压比与动围压比时程曲线的对比

Fig.3 Comparison between time-history curves of dynamic pore water pressure ratio and dynamic confining pressure

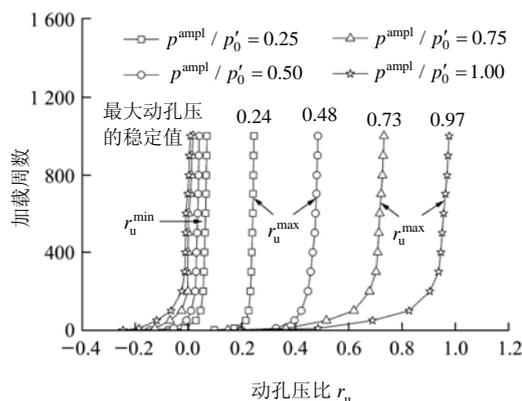


图 4 不同循环围压下动孔压最大值与最小值变化曲线

Fig.4 Curves of the maximum and minimum dynamic pore water pressures under different cyclic confining pressures

由图 3 和 4 可见，在单纯循环围压作用下，饱和软黏土的最大动孔压比 r_u^{max} 几乎完全符合式(8)，即围压的增大会引起瞬时动孔压的相应增大，而且瞬时动孔压与动围压的比值范围为 0.96~0.97，与试验测得的 B 值基本一致。但是，最小动孔压比 r_u^{min} 却表现出完全不同的特性，其几乎不会随着围压的减小而减小，而是稳定在 0 左右。

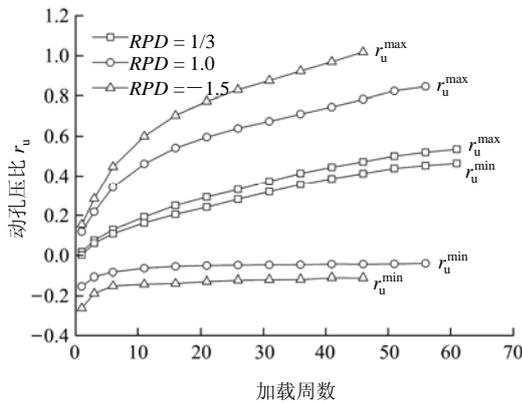
3.2 各向同性固结下的变围压动三轴试验

3.2.1 瞬时动孔压发展规律

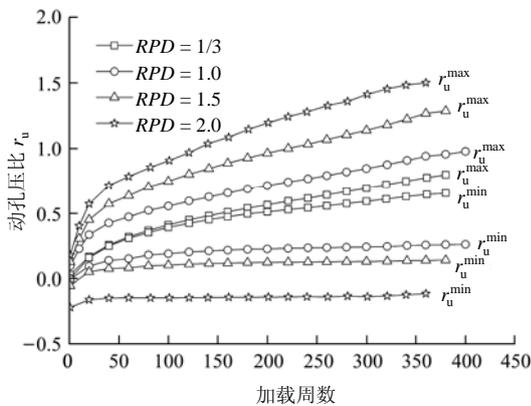
本文一共进行了 14 组各向同性固结条件下的变围压动三轴试验，包括 3 组 CSR 值(0.265, 0.218,

0.190)与8组 RPD 值(0, 1/3, 1.0, 1.5, 2.0, -1.0, -1.5, -2.0)。对每一个试样, 循环加载到 20% 双幅应变左右停止。这 14 组试验的最大、最小孔压比随时间变化曲线如图 5 所示。

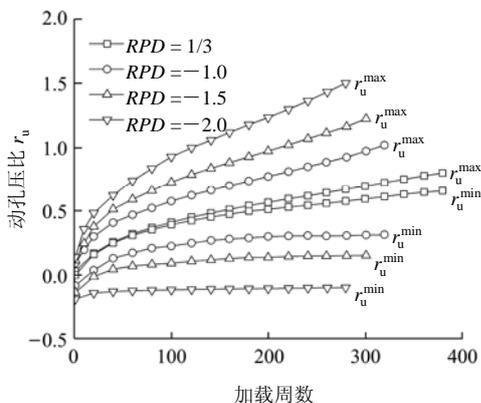
由图 5 可见, 对变围压动三轴试验, 不管相位差为 0° 还是 180°, 其瞬时动孔压的振幅(最大动孔压与最小动孔压的差值)更大, 而且随着 RPD 值的增大而增大。最大动孔压比 r_u^{max} 的值可以达到 1.5, 而最小动孔压比 r_u^{min} 的值仅为 -0.2。在恒定围压动三轴试验或者动单剪试验中, 这种情况是不可能发生的, 瞬时动孔压的振幅不可能如此大, 最大动孔



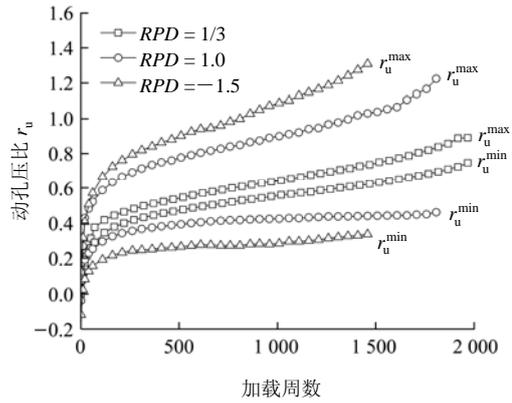
(a) CSR = 0.265(RPD=1.0 时相位差为 0°, RPD = -1.5 时相位差为 180°)



(b) CSR = 0.218(RPD = 1/3 时围压恒定, RPD=1.0, 1.5, 2.0 时相位差为 0°)



(c) CSR = 0.218(RPD = 1/3 时围压恒定, RPD = -1.0, -1.5, -2.0 时相位差为 180°)



(d) CSR = 0.190(RPD = 1.0 时相位差为 0°, RPD = -1.5 时相位差为 180°)

图 5 最大与最小动孔压比随时间变化曲线

Fig.5 Curves of the maximum and minimum dynamic pore water pressure ratio with time

压比更不可能超过 1.0(如果超过 1.0, 有效应力就会小于 0, 这是不可能出现的)。

显然, 在变围压动三轴试验中, 瞬时动孔压的变化是循环偏应力和循环平均主应力耦合的结果: 循环偏应力会引起土体的循环变形, 因此产生残余孔压; 循环平均主应力会产生瞬时动孔压。两者叠加之后, 因此会造成最大瞬时孔压的增大与最小瞬时动孔压的减小。

对最大动孔压比, 由图 5 可见, 其在试验开始阶段发展较快, 然后逐渐缓慢上升, 与常规动三轴试验中最大动孔压发展规律一致, 即由循环平均主应力的增大产生的正的瞬时动孔压在试验开始若干圈之后就保持稳定, 之后最大动孔压比的增长基本来自循环变形引起的残余孔压比的上升。因此结合式(8), 可以用下式表示最大动孔压比:

$$r_u^{max} = r_u^q + r_u^p = r_u^q + Bp^{ampl} / p_0' = r_u^q + B(RPDq^{ampl}) / p_0' \quad (10)$$

式中: r_u^q 为由循环变形产生的残余孔压比, r_u^p 为由循环平均主应力产生的瞬时动孔压比。

但是, 动孔压比的最小值却表现出与动孔压比最大值完全不同的特性。当加载一定周数之后, 动孔压比最小值不再上升, 而基本保持稳定, 与单纯循环围压试验得到的结果基本一致。

可见, 在变围压动三轴试验中, 瞬时动孔压的发展并不是简单的循环应变产生的残余孔压与循环平均主应力产生的瞬时动孔压的耦合, 而是表现的更加复杂: 与最大动孔压比相比, 最小动孔压比似乎受残余孔压比的影响更小, 而是受到单纯循环围

压下负动孔压发展的影响更大。

3.2.2 残余孔压比的定义

在室内动力试验中，残余孔压的测量并不是一件容易的事情，因此很多学者使用最大或者平均孔压作为残余孔压。在节 1 的分析中，笔者发现，在常规动三轴试验中，最大孔压比或者平均孔压比都不可作为残余孔压比，根据式(10)可知，残余孔压比可以通过下式求得

$$r_u^q = r_u^{\max} - r_u^p = r_u^{\max} - B(RPDq^{\text{ampl}}) / p'_0 \quad (11)$$

式(11)表明，残余孔压比与变围压动三轴试验中最大动孔压比的差值为 Bp^{ampl} / p'_0 ，与恒定围压动三轴试验中最大动孔压比的差值为 $q/3$ ，与 $RPD = 0$ (即恒定平均主应力)条件下的最大动孔压比一致。为了验证式(11)的正确性，本文进行实测残余孔压比、 $RPD = 0$ 和 $RPD = 1/3$ 的最大和最小动孔压比的对比(见图 6)。可知，实测残余孔压比与 $RPD = 0$ 应力路径下的最大动孔压比基本一致，与 $RPD = 1/3$ 应力路径下得最大动孔压比的差值基本为 $q/3$ ，即

$$r_u^q = r_u^{\max} - q^{\text{ampl}} / 3 \quad (12)$$

式(12)给出了一种在常规动三轴试验中确定残余孔压比的方法，相对使用最大或者平均孔压比，这种方法更加准确。同时，式(11)还给出了在变围压动三轴试验确定残余孔压比的方法，因为，在变围压动三轴试验中，由于动孔压比的变化幅度更大，残余孔压比更加难选取，因此使用一种方法来确定残余孔压比是十分有必要的。

3.2.3 变围压动三轴应力路径对有效应力路径的影响

有效应力路径在土体动力特性分析中作用很大，尤其在破坏标准选取、剪胀剪缩等特性的描述中或者在动力分析中。

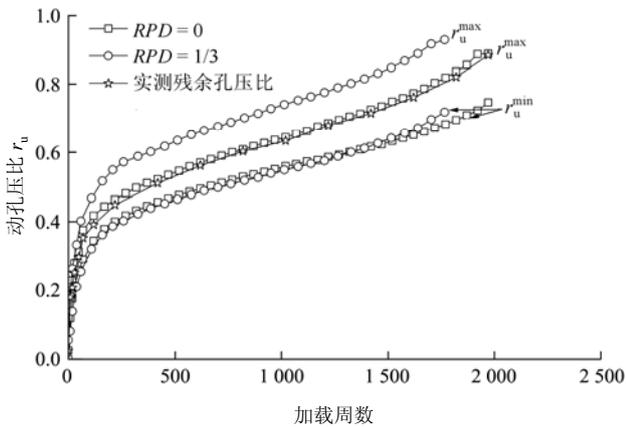
在有效应力路径中，有效平均主应力 p' 为

$$p' = p - u \quad (13)$$

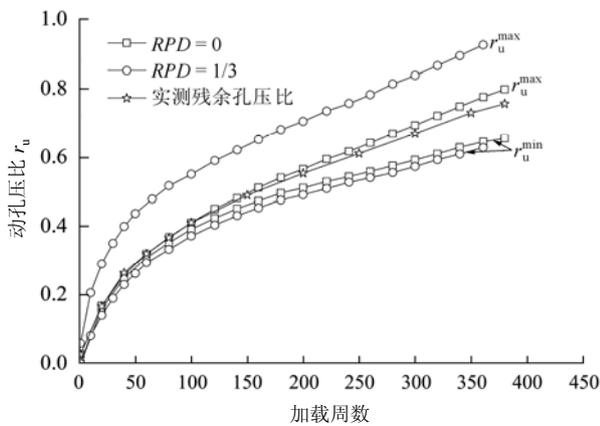
式中： p 为瞬时的平均主应力， u 为瞬时孔压。

在变围压动三轴试验中，由于平均主应力 p 是循环变化的，而且瞬时孔压的变化规律表现出与常规动三轴试验不同的特性，因此有必要研究其对有效应力路径的影响。

图 7 为 $CSR = 0.218$ 与 $RPD = 0, 1.5$ 和 -1.5 下得到的有效应力路径。可见，变围压动三轴应力路径下的有效应力路径发生了较大的变化：与 $RPD = 0$ 时相比，发生倾斜，并且每一圈所包含的面积变大，与 q 轴(偏应力轴)距离更近。



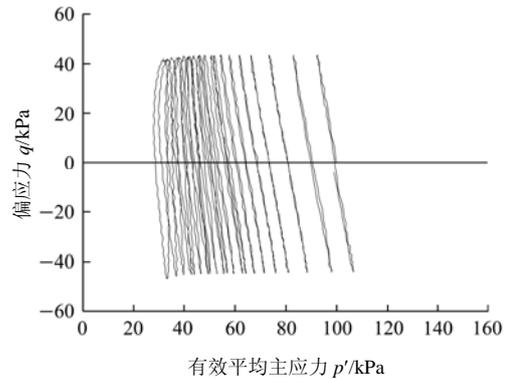
(a) $CSR = 0.190$



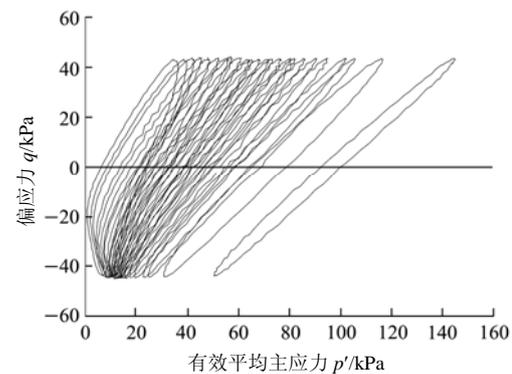
(b) $CSR = 0.218$

图 6 实测残余孔压比与最大、最小孔压比曲线的对比

Fig.6 Curves comparison between measured residual pore water pressure and maximum and minimum pore water pressure



(a) $RPD = 0$



(b) $RPD = 1.5$

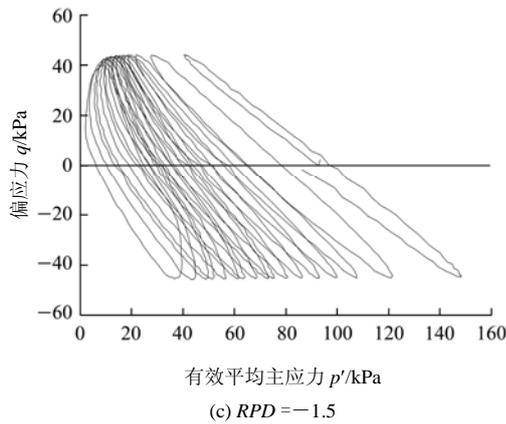


图7 有效应力路径($CSR = 0.218$)

Fig.7 The effective stress paths($CSR = 0.218$)

当相位差为 0° 时, 有效应力路径向 p' 轴(有效平均主应力轴)的负方向倾斜, 随着加载周数的增加, 有效应力路径的倾斜度逐渐减小, 并且在试验的最后阶段, 有效应力路径的下半段出现一个拐点。

当相位差为 180° 时, 有效应力路径向 p' 轴的正方向倾斜, 并且在试验的最后阶段, 其上半段出现一个拐点。

在变围压动三轴试验中, 有效应力路径的这种变化是平均主应力的循环变化和瞬时动孔压的循环振动共同引起的。由于变围压动三轴应力路径的最小动孔压很快地达到稳定值, 因此造成 0° 相位差下有效应力路径的下半段与 180° 相位差下有效应力路径下半段的有效应力值更小, 即距离 q 轴更近, 造成了有效应力路径的倾斜。

4 结 论

本文进行了一系列单纯变围压条件下和变围压动三轴应力路径下的不排水循环加载试验, 得到以下主要结论:

(1) 单纯循环振动的围压会引起饱和软黏土产生相应的正瞬时动孔压, 但是不会引起饱和软黏土产生负瞬时动孔压。

(2) 循环平均主应力和循环偏应力的耦合使得饱和软黏土的瞬时动孔压变化幅值更大, 而且使得最大动孔压与最小动孔压表现出不同的发展规律。并发现循环平均主应力和循环偏应力的耦合对有效应力路径产生了较大的影响。

(3) 本文分析了动三轴试验的残余孔压特性, 给出了求取包括恒定围压和变围压动三轴试验残余孔压的方法。

参考文献(References):

- [1] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 103 - 104.(WU Shiming. Soil dynamics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 103 - 104.(in Chinese))
- [2] MARTIN G R, FINN W D L, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(5): 423 - 438.
- [3] FINN W D L, LEE K W, MARTIN G R. An effective stress model for liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(6): 517 - 534.
- [4] 何广讷. 砂土振动孔隙水压力的研究[J]. 水利学报, 1983, (8): 49 - 54.(HE Guangna. Research of seismic pore water pressure of sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, (8): 49 - 54.(in Chinese))
- [5] 沈瑞福, 王洪瑾, 周克骥, 等. 动主应力旋转下砂土孔隙水压力发展及海床稳定性判断[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 70 - 78. (SHEN Ruifu, WANG Hongjin, ZHOU Keji, et al. Building-up of pore water pressure under cyclic rotation of principal stress and evaluation of stability of seabed deposit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 70 - 78.(in Chinese))
- [6] MATASOVIC N, VUCETIC M. A pore water pressure model for cyclic straining of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3): 156 - 173.
- [7] TOWHATA I, ISHIHARA K. Shear work and pore water pressure in undrained shear[J]. Soils and Foundations, 1985, 25(3): 73 - 84.
- [8] SEED H B, IDRIS I M. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102(4): 323 - 346.
- [9] INSIC T. A model for presentation of seismic pore water pressures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(2/4): 191 - 199.
- [10] ISHIHARA A S, YASUDA S. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(1): 45 - 59.
- [11] BOULANGER R W, SEED R B. Liquefaction of sand under bidirectional monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1995, 121(12): 870 - 878.
- [12] ISHIHARA K, YAMAZAKI F. Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(1): 45 - 59.
- [13] VUCETIC M, Normalized behavior of offshore clay under uniform cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(1): 33 - 41.
- [14] 奕茂田, 金丹, 许成顺, 等. 双向耦合剪切条件下饱和松砂的液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 790 - 794.(LUAN Maotian, JIN Dan, XU Chengshun, et al. Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 790 - 794.(in Chinese))
- [15] KAMMERER A M, SEED R B, WU J. et al. Pore water development in liquefiable soils under bi-directional loading conditions[C]// Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada: [s.n.], 2004: 697 - 704.
- [16] 虞海珍. 复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究[博士学位论文][D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.(YU Haizhen. Experimental research on dynamic behavior of saturated calcareous sand under complex stress conditions[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.(in Chinese))
- [17] WHICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLIDIS T. On the influence of the polarization and the shape of the strain loop on strain accumulation in sand under high-cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(1): 14 - 28.
- [18] RASCOL E. Cyclic properties of sand: dynamic behavior for seismic applications[Ph. D. Thesis][D]. Lausanne, Swiss: Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2009.
- [19] SKEMPTON A W. The pore pressure coefficients A and B [J]. Geotechnique, 1954, 4(4): 143 - 147.