

文章编号:1000-1301(2005)06-0127-08

复杂应力条件下松砂振动孔隙水压力 与体变特性的试验研究

何杨^{1,2}, 栾茂田^{1,2,3}, 许成顺^{1,2}, 郭莹^{1,2}, 张振东^{1,2}, 李木国^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:利用新研制的土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪,在5种初始主应力方向角与5种中主应力系数相组合的初始固结条件下,对饱和松砂进行了不排水循环扭剪试验。讨论了初始固结条件对不排水条件下饱和松砂孔隙水压力变化规律及对剪胀、剪缩、卸荷体缩等体积变化过程的影响。试验研究表明:(1)分别以稳定残余孔隙水压力和破坏时循环次数归一化后的残余孔隙水压力比和循环次数比之间的关系可以用双曲线模式表达。其参数主要依赖于初始主应力方向,中主应力系数对参数的影响并不显著。归一化后的孔隙水压力比与广义剪应变之间的关系也可以用双曲线模式表达,其中的2个待定参数依赖于初始主应力方向,与中主应力系数无关;(2)在三向非均等固结条件下的不排水循环扭剪试验中,饱和松砂表现出卸荷体缩特性,不同初始主应力方向时,饱和松砂剪缩、剪胀、卸荷体缩呈现出不同的交替变化模式。

关键词:三向非均等固结;孔隙水压力;初始主应力方向角;中主应力系数;广义剪应变;卸荷体缩;剪胀;剪缩

中图分类号:P315.98

文献标识码:A

Experimental study on cyclic pore water pressure and volumetric changes of saturated loose sands under complex stress condition

He Yang^{1,2}, Luan Maotian^{1,2,3}, Xu Chengshun^{1,2}, Guo Ying^{1,2}, Zhang Zhendong^{1,2}, Li Mugu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus is employed to perform undrained cyclic torsional shear experimental tests of saturated loose sand with a relative density of 30% under three-directional anisotropic initial consolidation conditions with different initial orientations of principal stress and coefficient of intermediate principal stress. The effect of initial consolidation conditions on the development pattern of cyclic pore water pressure of undrained saturated loose sand and the complex volumetric changes behaviour including dilatancy, contraction and contraction during unloading is examined on the basis of comparative experimental tests. It is shown that the ratio of residual pore water pressure to the residual pore pressure at failure state can be expressed as an empirical hyperbola function with respect to either the ratio of the cyclic number to the cyclic number

收稿日期:2004-12-09; 修订日期:2005-03-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50179006, 50579006);教育部跨世纪优秀人才培养计划研究基金项目(教技函[1999]2号);中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基础研究基金项目

作者简介:何杨(1978-),男,博士研究生,主要从事海洋土力学、岩土工程基本理论与工程应用等方面研究。

required at the failure state or generalized shear strain. The two parameters involved in the hyperbola function to be defined by experimental tests are closely dependent on the initial orientation of principal stress and seem to be independent on the coefficient of intermediate principal stress. It is also shown the volume-contraction during unloading is a common phenomenon displayed commonly in undrained loose sands subjected to cyclic shearing under three-directional anisotropic consolidation condition. Furthermore the type of volumetric change behavior is closely associated with the initial orientation of principal stress.

Key words: three-directional anisotropic consolidation; pore water pressure; initial orientation of principal stress; coefficient of intermediate principal stress; generalized shear strain; volume-contraction during unloading; dilatancy; contraction

引言

在循环荷载作用下,饱和砂土中所产生的孔隙水压力直接关系到土的动力稳定性。土工有效应力动力反应分析需要利用不排水条件下振动孔隙水压力的增长模式。Seed等^[1]根据循环三轴试验所建立的孔隙水压力比与循环次数比的反正弦函数模式仅适用于各向均等固结条件,Finn^[2]将其推广至各向非均等固结情况,Chang^[3]虽进一步地进行了修正,但这些研究均未考虑初始主应力方向和中主应力系数等复杂初始应力状态的影响。沈瑞福等^[4]通过一定的主应力方向旋转的剪切试验和常规循环扭剪试验,建立了孔隙水压力与广义剪应变之间的关系,并修正了Chang所提出的孔隙水压力模式。

另外,部分试验表明:在循环荷载作用下,砂土在剪切卸载过程中会出现体积收缩,而传统的弹性或弹塑性理论对此均无法给出合理的解释。Shamoto等^[5]根据循环扭剪试验指出砂土的剪胀变形是部分可恢复的。张建民^[6]认为砂土的可逆剪应变取决于现时剪应变的大小,且与剪切过程中的相对滑移机制以及颗粒转动引起的砂粒平均定向率的可逆变化有关,而不可逆剪胀主要取决于剪切作用的历史,可能由剪切过程中颗粒破碎、平均孔隙率减小及大孔隙消失所导致。李广信等^[7]认为土的卸荷体缩与此前的体积剪胀具有一定的相关性,根源于剪胀变形的可恢复性。沈珠江^[8]从土体剪胀的微观机理出发,将土的剪胀区分为与等向硬化和最小势能原理相联系的不可恢复的普遍剪缩和与不等向硬化有关的可恢复剪胀2种机制。谢定义等^[9]、邵生俊^[10]分别根据循环三轴试验和循环扭剪试验,对反向剪缩问题进行了分析。

饱和砂土在循环荷载作用下的孔隙水压力的变化与土的剪胀及剪缩性密切相关。因此,在不排水条件下,孔隙水压力的变化能够反映土的剪缩、剪胀及弹性剪切特性。在空心圆柱试样的循环扭剪试验中,若保持总的球应力不变,则循环孔隙水压力的变化不受球应力变化的影响,从而可以直接探讨剪胀剪缩等体积变化特性。本文基于试验重点考察了饱和松砂剪胀、剪缩、卸荷体缩等体积变化过程。另外,郭莹等^[11]曾针对部分的初始主应力方向不同的各种固结条件,通过试验探讨了以峰值孔隙水压力和破坏时循环次数归一化后的峰值孔隙水压力比和循环次数比之间的依赖关系。本文针对5种初始主应力方向角和5种中主应力系数等不同组合的初始固结条件,对福建标准砂进行了不排水循环扭剪试验,系统地讨论了初始主应力方向和中主应力系数2个因素对饱和松砂孔隙水压力增长特性的影响,其中采用了以稳定残余孔隙水压力和破坏时循环次数归一化后得到的残余孔隙水压力比和循环次数比。

1 试验设备和试样方法

大连理工大学与日本诚研舍株式会社联合研制、并由诚研舍制造的土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪^[12],能够通过独立地控制竖向荷载 W 、扭矩 M 和空心圆柱试样内室压力 p_i 与外室压力 p_o 等大小及其组合可以控制与改变初始主应力方向及中主应力,从而可以实现任意组合的三向非均等固结条件。试验系统如图1所示。

分别针对初始主应力方向角为 $\alpha_0 = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 和中主应力系数为 $b = 0, 0.25, 0.5, 0.85, 1$,进行了包含25种初始应力状态组合的46个循环扭剪试验。试验所采用的空心圆柱状试样的外径与内径及高度分别为 $D = 100\text{mm}, d = 60\text{mm}, H = 150\text{mm}$ 。试验所采用的福建标准砂的物理指标为 $G_s = 2.643, e_{\max} =$

0.848, $e_{\min} = 0.519$ 。采用干装法成样,砂样的相对密度按照 $D_r = 30\%$ 控制,所有砂样均采用通 CO_2 与无气水和施加 200kPa 反压的方式进行联合饱和,孔隙水压力系数 B 均达到 0.98 以上。循环荷载的振动频率采用 0.1 Hz。

图 2 在 $q \sim p'$ 平面上给出了固结应力路径。固结时的平均主应力与偏差应力比分别为 $p' = 100\text{kPa}$, $\eta_0 = q/p' = 0.43$ 。在循环荷载施加过程中总的球应力保持不变。

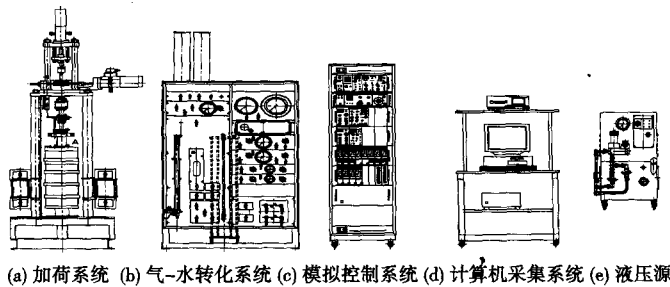


图 1 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪系统

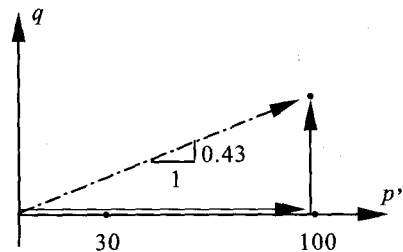


图 2 固结应力路径

2 不排水循环剪切条件下孔隙水压力增长模式

2.1 以循环次数表达的残余孔隙水压力模式

在循环扭剪应力的作用下,孔隙水压力在瞬时波动变化的同时呈现出逐渐累积上升的发展趋势,如图 3 所示。这里不考虑孔隙水压力的瞬时变化情况,采用残余孔隙水压力的发展过程反映振动过程中孔隙水压力的总体变化趋势。将试验所得到的残余孔隙水压力极限稳定值定义为稳定残余孔隙水压力 u_f ,并以广义剪应变达到 5% 作为破坏标准。值得指出的是,本文作者们曾基于部分试验,以峰值孔隙水压力和破坏时循环次数进行归一化处理建立了峰值孔隙水压力比和循环次数比之间的依赖关系^[11],而这里将残余孔隙水压力 u 与稳定残余孔隙水压力 u_f 之比定义为残余孔隙水压力比 u/u_f ,将循环次数用达到破坏时所需要的循环次数之比定义为循环次数比 N/N_f 。

广义剪应变定义为

$$\gamma_g = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (1)$$

式中 ε_1 , ε_2 与 ε_3 分别为大主应变、中主应变和小主应变。

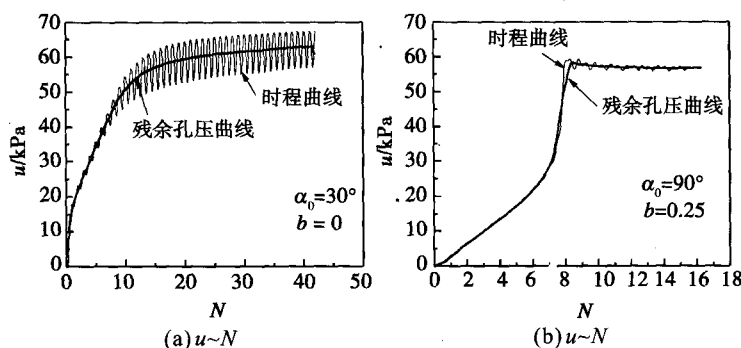


图 3 孔隙水压力时程曲线与残余孔隙水压力曲线

针对不同的固结条件,试验所得到的归一化孔隙水压力与循环次数之间的依赖关系如图 4 与图 5 所示。由图 4(a)~图 4(e)可见,当中主应力系数 b 一定时,初始主应力方向 α_0 对循环孔隙水压力的增长规律具有显著的影响。由图 5(a)~图 5(e)可见,当初始主应力方向 α_0 一定时,中主应力系数 b 对循环孔隙水压力的增长规律的影响一般不明显。但是在初始主应力方向角为 $\alpha_0 = 0$ (的情况下,三轴伸展(即 $b = 1$)的孔隙水

压力增长模式与其它中主应力系数情况差异较大,如图5(a)所示。这种归一化的孔隙水压力增长模式可以采用下列双曲线近似地拟合。

$$\frac{u}{u_f} = \frac{(N/N_f)}{a + b(N/N_f)} \tag{2}$$

式中待定参数 a, b 可通过试验确定,针对给定的初始主应力方向,对不同中主应力系数试验所得到的归一化孔隙水压力增长模式经平均后得到了平均经验关系曲线,表1列出了相应的拟合参数。经试验结果拟合所得到的经验关系曲线如图6所示。由图6可见,当初始主应力方向角 α_0 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 变化时,随着 α_0 的增大,孔隙水压力的初始增长速率加快。如当 $\alpha_0 = 60^\circ$ 时,在循环荷载作用的第1周内,残余孔隙水压力上升就可能接近于稳定的残余孔隙水压力。

2.2 以广义剪应变表达的残余孔隙水压力模式

在非均等固结条件下,对于不同的初始主应力方向角,图7给出了各种中主应力系数下的残余孔隙水压力比 u/u_f 与广义剪应变 γ_g 之间的变化关系。由图可见,这种关系也基本上符合双曲线形式

$$\frac{u}{u_f} = \frac{\gamma_g}{c + d\gamma_g} \tag{3}$$

式中待定参数 c, d 可通过试验确定,列于表1。

由图7和表1可见,残余孔隙水压力比 u/u_f 随广义剪应变 γ_g 变化的双曲线模式中的参数依赖于初始主应力方向,而似乎与中主应力系数无关。

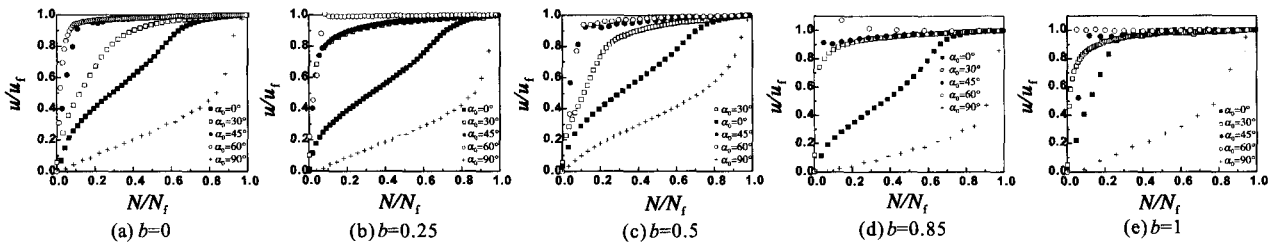


图4 初始主应力方向角对孔隙水压力模式的影响

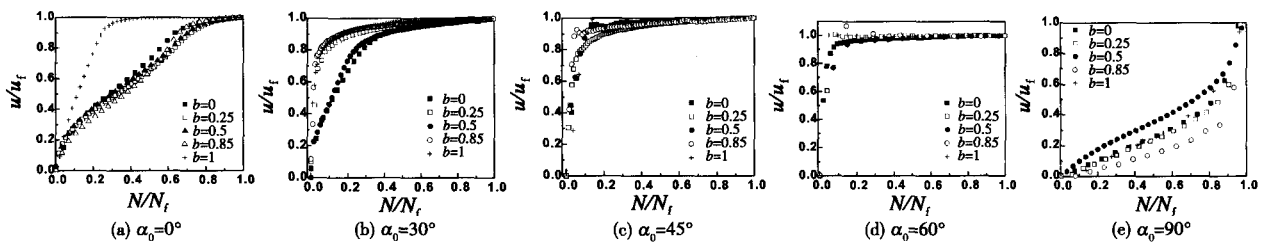


图5 中主应力系数对孔隙水压力模式的影响

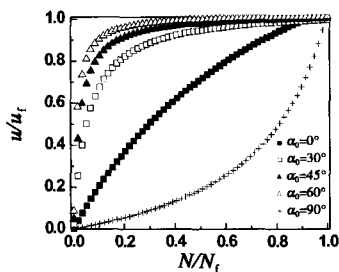


图6 不同初始主应力方向角下的平均拟合曲线

表1 孔隙水压力模式中的试验参数

$\alpha_0 / ^\circ$	0	30	45	60	90
a	0.44	0.05	0.02	0.01	4.40
b	0.52	0.95	0.97	0.97	-3.42
c	0.12	0.41	0.38	0.29	0.16
d	0.97	0.93	0.93	0.92	0.91

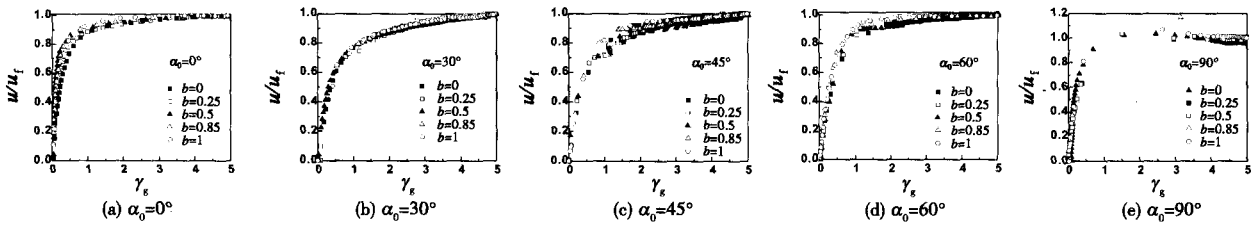


图7 各种固结条件下残余孔隙水压力比与广义剪应变的关系

3 不排水循环剪切条件下体积变化特性

通过针对不同主应力方向和中主应力系数所进行的循环扭剪试验,探讨了初始应力状态对于循环剪切过程中饱和松砂体积变化的一般特征。

3.1 初始主应力方向对剪胀和剪缩体积变化特性的影响

(1) 初始主应力角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 的情况

针对中主应力系数 $b = 0.85$ 和初始主应力方向角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 进行了循环扭剪试验。此时水平与竖直面上没有初始剪应力的预先作用,孔隙水压力随循环剪应力的变化过程及有效应力路径如图 8 所示。图 8 中(a)~(c)分别给出了循环扭剪过程中第 1~4 周内、第 5 周和第 17 周中孔隙水压力的具体变化情况,(d)为有效应力路径。由图 8(a)可见,在循环剪切初始阶段,随着剪应力的循环增大或减小,孔隙水压力均不断地增加。随着剪应力的增大,有效剪应力比与孔隙水压力均随之增加,这个过程称为剪缩;而若随着剪应力的减小,有效剪应力比减小而孔隙水压力却仍持续增加,这个过程称为卸荷体缩。在这一阶段,剪缩和卸荷体缩交替出现,称为累积体缩阶段。由图 8(b)可见,在 I→J 与 K→L 段,出现卸荷体缩,而在 H→I 与 J→K 段,随着剪应力的增加,孔隙水压力基本上维持不变,此时称为弹性剪切,在这一阶段中弹性剪切-卸荷体缩交替出现。此后,弹性剪切逐步消失。由图 8(c)可见,在 A→B 段发生了剪缩。随着剪应力的增加,有效剪应力比增加而孔隙水压力减小,这个过程称为剪胀。显然在 B→C 段出现了剪胀。此后在 C→G 段表现出剪缩-剪胀-卸荷体缩交替出现,这种前期累积体缩和后期的加载剪胀与卸荷体缩交替作用形成了饱和砂土在循环剪切作用下的循环活动性^[13]。这种循环活动性的出现可能是由于试样中的相对密度和含水量在不排水循环剪切作用下所发生的显著重新分布而具有不均匀性所导致,从宏观角度可看作为与试样在循环作用中的体缩和剪胀交替变化有关。

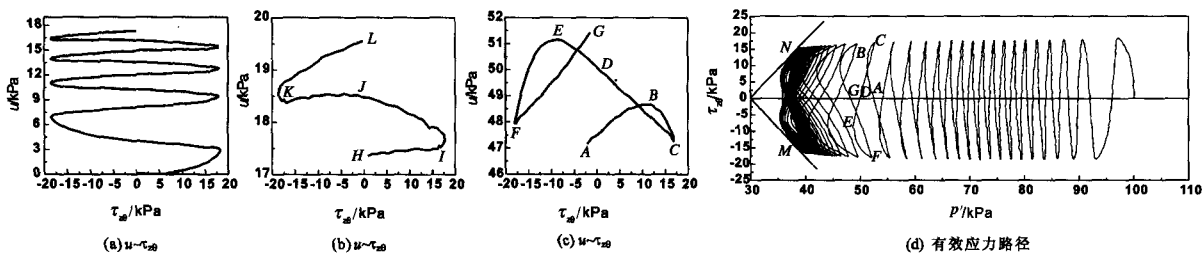


图8 初始主应力角为 0° 时松砂体积胀缩变化

(2) 初始主应力角 $\alpha_0 = 30^\circ$, $\alpha_0 = 45^\circ$ 和 $\alpha_0 = 60^\circ$ 的情况

在中主应力系数为 $b = 0.25$ 和初始主应力方向角分别为 $\alpha_0 = 30^\circ$, $\alpha_0 = 45^\circ$ 和 $\alpha_0 = 60^\circ$ 的初始固结状态下进行了循环扭剪试验。此时水平与竖直面上有初始剪应力的预先作用,循环过程中孔隙水压力的变化及有效应力路径如图 9 与图 11 所示。图 9 中(a)~(c)分别为循环扭剪过程中 1~5 个循环内、3.5~4.5 个循环内及整个过程中的孔隙水压力具体变化情况,(d)为有效应力路径。由图 9(a)可见,在 V→W 段,循环剪应力基本不变,孔隙水压力快速上升,称为瞬态剪缩,在循环剪应力接近峰值的瞬间,土的结构由于颗粒的重新排列与定向而发生剧烈变化,土体产生了不可逆的体缩,从而导致孔隙水压力迅速增大和有效应力急剧降低,如图 9(d)所示。图 10 分别给出了广义剪应变 γ_s 、径向应变 ϵ_r 和竖向应变 ϵ_z 随剪应力 τ_{20} 的变化关系。

由图可见,在第 1 个循环内剪应力接近于幅值的瞬间,土体进入了近乎于“无限度”的流动变形或“流滑”阶段^[13]。图 11 可见,在初始主应力角为 $\alpha_0 = 45^\circ$ 与 $\alpha_0 = 60^\circ$ 条件下松砂的体积变化表现出类似的特征,并且在 $\alpha_0 = 60^\circ$ 时表现得尤为显著。在这些情况下,在循环剪应力作用之前,由于初始剪应力的预先作用形成了某一预定的优势面,从而循环剪应力效应相对降低,初始剪应力与循环剪应力的联合作用导致了体积缩小,流滑现象明显。第 1 个循环内的体积变化表现出剪缩-瞬态剪缩-卸荷体缩的变化特点。由图 9(b) 可见, A→C 段为卸荷体缩, C→E 段为剪胀。这种体积的交替变化特性与初始主应力角为 $\alpha_0 = 0^\circ$ 的情况明显不同,但依然表现出了循环活动性。

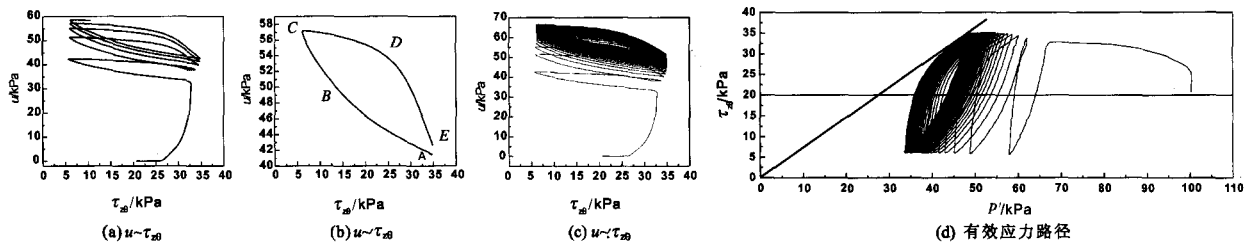


图 9 初始主应力角为 30° 时松砂体积胀缩变化

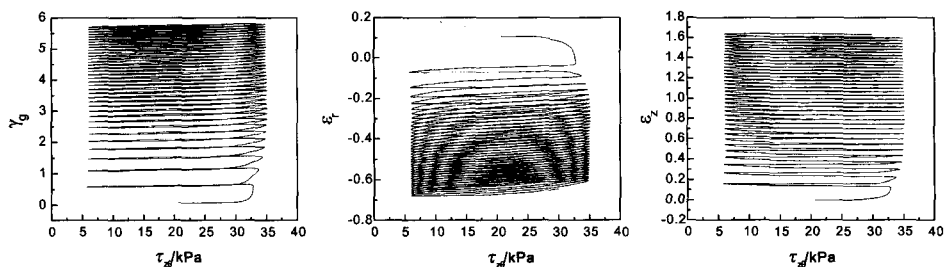


图 10 初始主应力角为 30° 时各种应力-应变关系

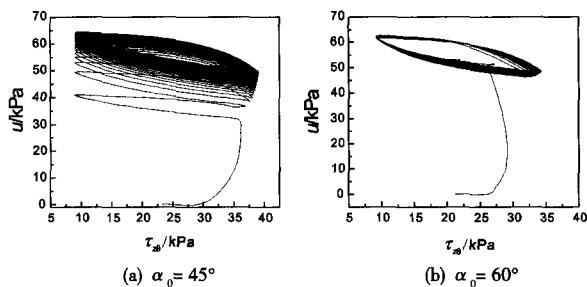


图 11 初始主应力角为 45° 和 60° 时松砂体积胀缩变化

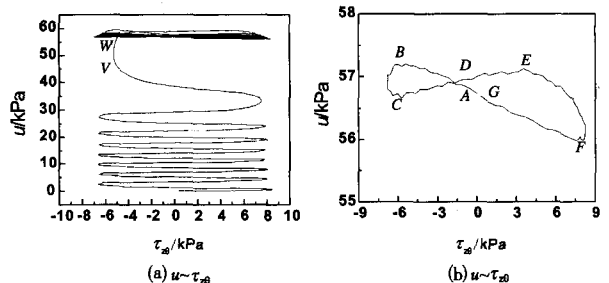


图 12 初始主应力角为 90° 时松砂体积胀缩变化

(3) 初始主应力角 $\alpha_0 = 90^\circ$ 的情况

在初始主应力系数 $b = 0.25$ 和初始主应力角 $\alpha_0 = 90^\circ$ 的固结条件下,由循环扭剪试验所得到的循环剪应力作用过程中孔隙水压力变化如图 12 所示。图 12 中的(a)与(b)分别为全程中和第 13 个循环内孔隙水压力的具体情况。由图 12(a) 可见,在前 7 个循环中,剪缩与卸荷体缩交替出现,进入累积体缩阶段。在第 8 个循环内的 V→W 段,与初始主应力角 $\alpha_0 = 30^\circ$ 情况下第 1 个循环内体积变化情况相似,体积变化出现了瞬态剪缩,进入流滑阶段。由图 12(b) 可见,在 A→G 段,与初始主应力角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 情况中最终稳定状态时体积变化特征相似,剪缩-剪胀-卸荷体缩交替发生,进入循环活动阶段。

参考图 8(d) 与图 9(d),可以发现,对于各种初始应力条件,在循环剪切的最终状态时砂土的有效应力不再降低,剪胀所导致的孔隙水压力降低与剪缩及卸荷体缩所导致的孔隙水压力增加基本上相当,呈现饱和和砂土在循环剪切作用下的循环活动性,达到了变形的稳定状态(图中自原点到 M 与 N 点的 2 条射线)。

当固结状态的初始主应力方向角不同时,循环孔隙水压力变化呈现不同的阶段与发展模式。当初始主

应力方向角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时,饱和松砂先后出现累积体缩和循环活动性模式;当初始主应力方向角 $\alpha_0 = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 情况,饱和松砂先后出现流滑和循环活动性模式;当初始主应力方向角 $\alpha_0 = 90^\circ$ 时,饱和松砂先后出现累积体缩、流滑和循环活动性模式。

3.2 初始中主应力对剪胀和剪缩体积变化特性的影响

为了单独考察中主应力系数对循环剪切中由剪胀与剪缩性所引起的体积变化特性的影响,针对初始主应力方向角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 和中主应力系数 $b = 0, 0.25, 0.5, 0.85, 1.0$ 的固结条件,进行了循环扭剪试验,由此对试验所得到的循环剪切过程中孔隙水压力变化特性进行了对比分析,如图 13 所示。可以看到,在初始主应力相同的条件下,各种中主应力系数情况下饱和松砂的体积变化模式基本上是一致的,中主应力系数对饱和松砂体积变化特性的影响似乎并不显著。

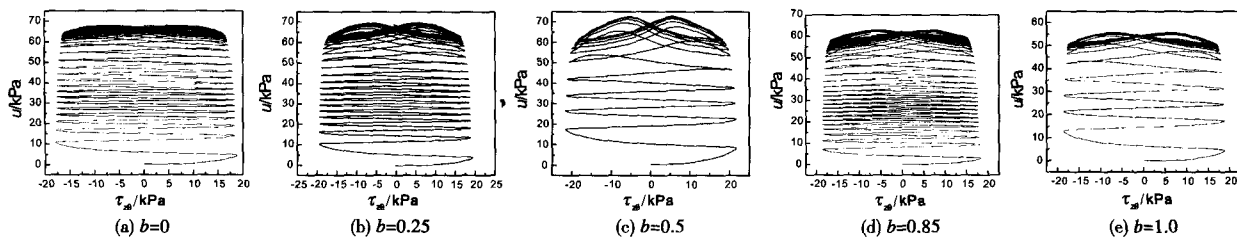


图 13 不同中主应力系数下松砂体积胀缩变化

4 结论

在各种初始主应力方向与中主应力系数组合的不同非均等固结条件下,对于饱和松砂进行了循环扭剪试验,试验结果的对比分析表明:

(1) 分别采用最终稳定状态时的残余孔隙水压力和破坏时所需要的循环次数,对于循环剪切过程中的残余孔隙水压力与循环次数进行归一化处理,由此所得到的残余孔隙水压力比和循环次数比之间的关系较好地符合双曲线关系,这种双曲线模式中的两个待定参数主要与初始主应力方向有关,而似乎不依赖于中主应力系数。

(2) 归一化后的孔隙水压力比与广义剪应变之间的关系也可以采用双曲线模式表达,其中的两个待定参数依赖于初始主应力方向,与中主应力系数无关。

(3) 在三向非均等的复杂固结条件下,饱和松砂经受不排水循环单向剪切作用时不仅会出现常规的剪胀与剪缩体积变化,而且还会表现出卸荷体缩等特征。

(4) 当固结状态的初始主应力方向角不同时,在循环荷载作用过程中的不同阶段,饱和松砂体积变化特性呈现出不同的交替变化模式。当初始主应力方向角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时,松砂表现出剪缩-卸荷体缩、弹性剪切-卸荷体缩、剪缩-剪胀-卸荷体缩 3 种体积变化模式;对于循环剪切前有初始剪应力作用如初始主应力方向角 $\alpha_0 = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 等情况,体积变化模式为剪缩-瞬态剪缩-卸荷体缩、卸荷体缩-剪胀 2 种形式,并且在循环剪切初始阶段孔隙水压力的上升较快。当初始主应力方向角 $\alpha_0 = 90^\circ$ 时,体积变化模式为剪缩-卸荷体缩、瞬态剪缩、剪缩-剪胀-卸荷体缩 3 种形式。

致谢:大连理工大学邱大洪院士对本项研究工作给予特别的关心与支持,在此作者们表示由衷的感谢。

参考文献:

- [1] Seed H B, Martin P P, Lysmer J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102 (GT4): 323 ~ 346.
- [2] Finn W D L, Lee K W, Maartman C H, et al. Cyclic pore pressures under anisotropic conditions earthquake engineering and soil dynamics[A]. Proc. ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference[C]. Pasadena, 1978. 451 ~ 471.
- [3] Chang C S, Kuo C L, Selig E T. Pore pressure development during cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1983, 109(1):103 ~ 107.
- [4] 沈瑞福,王洪瑾,周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996, (1):27 ~ 33.
- [5] Shamoto Y, Zhang J M, Goto S. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(2):

71 ~ 80.

- [6] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 12 ~ 17.
- [7] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 47 ~ 50.
- [8] 沈珠江. 复杂荷载条件下砂土液化变形的结构性模型[A]. 土动力学理论与实践. 第五届全国土动力学学术会议论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998. 1 ~ 10.
- [9] 谢定义, 张建民. 饱和砂土瞬态动力学特性与机理分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- [10] 邵生俊. 砂土的物态本构模型及应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001. 23 ~ 30.
- [11] 郭莹, 栾茂田, 何杨, 等. 复杂应力条件下饱和松砂孔隙水压力增长特性的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3): 139 ~ 144.
- [12] 栾茂田, 郭莹, 李木国, 等. 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪研发与应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(5): 670 ~ 675.
- [13] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997. 90 ~ 105.