饱和砂土液化后的剪切吸水效应*

Effect of water absorption in shear of post-liquefaction sand

张建民
(清华大学水利水电系, 北京, 100084)
时松孝次
(东京工业大学, 东京)
田屋裕司
(竹中技术研究所, 东京)

文 摘 饱和土在自然排水条件下随着剪切作用而发生的含水量增大的行为和过程被称为剪切吸水现象。本文发展了一种新的试验方法, 成功地再现了从较松到密实状态的饱和砂土在振动液化后的剪切吸水现象, 探讨了剪切吸水速率对饱和砂土液化后应力应变关系的影响。试验结果表明, 具有相同密度的饱和砂土, 其液化后的应力应变关系随剪切吸水速率的不同而呈现出硬化、理想塑性及软化的不同变化。文中给出了判定这些不同的液化后应力应变响应产生的条件。

关键词 饱和砂土, 剪切吸水, 液化后应力应变关系, 试验方法

中图法分类号 TU 435

作者简介 张建民, 1960 年 3 月出生, 工学博士(岩土工程)、建筑学博士(结构工程), 现任清华大学水利水电工程系教授, 博导, 岩土工程研究所所长。

Zhang Jianmin
(Tsinghua University, Beijing 100084)
Tokimatsu Kohji
(Tokyo Institute of Technology, Tokyo)
Taya Yuhji
(Technical Research Institute, Takenaka Corporation, Tokyo)

Abstract The phenomenon that water content redistribution occurs in a saturated sand due to the application of shear in naturally drained conditions is referred to as "water absorption in shear". A new test method was developed to reproduce the water absorption in shear for post-liquefaction sands over a wide range from looser to dense density. The test results showed strong dependency of the post-liquefaction stress-strain response on rates of the water absorption in shear, and the others gave out the conditions for judging whether large post-liquefaction deformation occurs.

Key words post-liquefaction, saturated sand, stress-strain response, new test method, water absorption in shear

1 前 言*

1971 年美国 San Fernado 地震结束以后, 由于大范围的砂性土液化引起 Lower San Fernando 土坝发生了严重的流滑破坏[1]。1975 年我国海城地震的主震过后大约数十分钟时, 石门岭土坝因液化导致其上游坡体约 30, 000m^3 发生了滑坡[2]。类似的震害也可见于有关的调查分析[3,4]。这些震害的共同特点是, 它们都是在一部分土体产生液化以后, 再在静剪应力的驱动下发生的。这些发生在地震结束以后的变形, 一般来说, 伴随着土体内部超孔隙水压力的消散和扩散, 亦即土中含水量在剪切作用的过程中发生着变化。尽管已有学者采用基于渗透固结理论的数值分析方法来模拟这种现象[2,5], 但仍缺乏对饱和土初始液化后静力剪切作用下的变形规律性的认识。所以, 有必要发展适当的室内试验方法来再现和揭示饱和土液化后变形的规律。

本文将饱和土在自然排水条件下随着剪切作用而发生的含水量增大的行为和过程定义为剪切吸水现象 (water absorption in shear), 并试图发展一种新的试验方法, 再现从较松到密实的饱和砂土在振动液化后的剪切吸水现象, 探讨剪切吸水速率对饱和砂土液化后应力应变关系的影响, 以便对澄清饱和砂土液化后的应力应变响应发生的物理机制和条件能有所裨益。

2 液化后常吸水率剪切试验的原理和方法

2.1 相对剪切吸水率

剪切过程中饱和砂土的含水量随着剪应变变化的速率称为剪切吸水率。它的大小可以用剪切吸水过程中体应变增量和剪应变增量之比来度量。为了便于描述, 我们引入一个新参数 α, 并定义如下,

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\gamma} = \alpha \times \left|\frac{d\varepsilon_v}{d\gamma}\right|_{drain} \tag{1}$$

式中右端的下标"drain"表示括号中的 $d\varepsilon_v/d\gamma$ 为完全排水条件下的体应变增量和剪应变增量的比值。$\alpha=0$ 时, $d\varepsilon_v/d\gamma=0$, 相应于完全不排水条件下的剪切; 当 $\alpha=1$ 时, $d\varepsilon_v/d\gamma=(d\varepsilon_v/d\gamma)_{drain}$, 相应于完全排水条件下的剪切; 剪切过程中随着剪切吸水率的绝对值从完全不排水条件下的零值开始不断的增大, α 的值也随之由 0 不断的增大到 1, 甚至大于 1。参数 α 表明了剪切吸水率的相对大小, 所以称之为"相对剪切吸水率"。显然, 如果能够控制参数 α 的大小, 我们便可能进行

* 教育部留学回国人员基金及国家自然科学基金(No. 59879008)资助项目
到稿日期: 1998

任意排水状态下的剪切试验。

为了考察振动液化以后的完全排水($\alpha=1$)单调剪切过程中$(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$的变化规律, 我们进行了饱和砂土的扭剪三轴试验。试验中, 首先使饱和砂样在 100 kPa 的均等压力作用下完全固结; 然后连续地施加不排水往返扭剪作用使试样达到液化状态; 最后再在完全排水条件下单调剪切, 直到试样破坏。试验采用丰浦砂(日本标准砂)。具体的试验条件和方法随后将予以说明。图 1 给出了具有三种不同起始相对密度的饱和砂

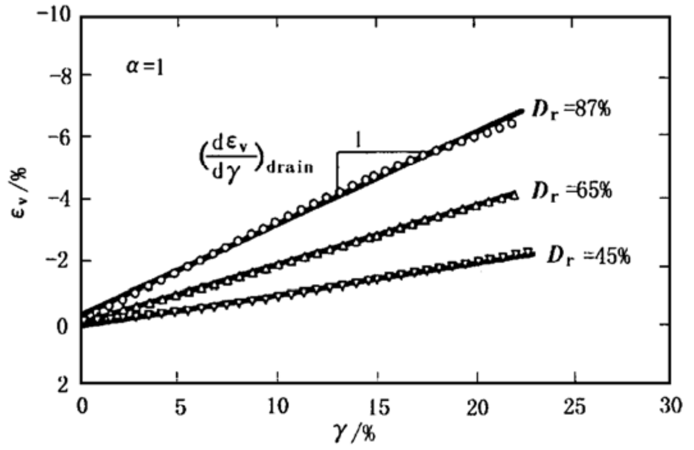

图 1　完全排水剪切试验中的剪应变和体应变之间的关系
Fig. 1　Stress-strain relations for $\alpha=1$

样在液化后完全排水单调剪切条件下的体应变 ε_v 和剪应变 γ 之间的关系。试验结果表明, ①液化后排水剪切过程中饱和砂样总是呈现出吸水剪胀而不是排水剪缩, 说明式(1)中$(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$总是小于零; ②饱和砂样液化后的 ε_v 和 γ 之间的关系几乎是线性的, 其斜率随着起始密度的增大而增大。说明对给定起始密度的砂样, 可以认为$(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$的值是常数。这样, 在 $\alpha=1$ 的剪切试验中, $(\varepsilon_v/\gamma)_{drain}=(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$。如果在 $\alpha\neq1$ 的剪切试验中能保持 α 值不变, 则该试验会满足下述条件(2)式。我们称这样的试验为常吸水率剪切试验。在该试验中, 相对剪切吸水率 α 被作为试验控制参数。通过控制 α 值为不同的常数, 能够进行不同的常吸水率剪切试验。

$$\varepsilon_v/\gamma=\alpha\times|\varepsilon_v/\gamma|_{drain}\qquad \varepsilon_v/\gamma=\mathrm{const}\qquad(2)$$

2.2　试验设备与原理

为了消除乳胶膜嵌入对饱和粒状土不排水剪切强度确定的不利影响, Tokimatsu 和 Nakamura(1986)发展了一个电气式闭环试验系统[6]。他们将该试验系统与一台常规循环三轴仪联接使用, 方便而有效地进行了常体积液化实验。在本文研究中, 将该试验系统与一台电气式循环扭剪三轴仪相配合来实现不同的常吸水率剪切试验。图 2, 3 分别给出了用该试验系统进行常吸水率剪切试验的原理图和一个被准备在扭剪试验容器里的饱和土样的示意图。试验系统的自动控制部分由两个量管以及安装在它们下部的一个差动压力传感器、一个附有两个 12bitAD 和 DA 转换器的 16bit 微机、以及一个 E/P 传感器组成的。如图 2, 3 所示, 饱和土样内的孔隙水与量管 1 相连通。这样, 在测试过程中可以通过控制量管 1 和 2 中的水位差来控制饱和土样的体积变化。试验中通过控制不同的水位差随剪应变的变化速率, 便可进行不同的常吸水率扭剪试验。例如, 当控制水位差始终为零时, 即为常体积($\alpha=0$)扭剪实验; 当允许孔隙水充分排出时, 即为完全排水($\alpha=1$)扭剪实验。

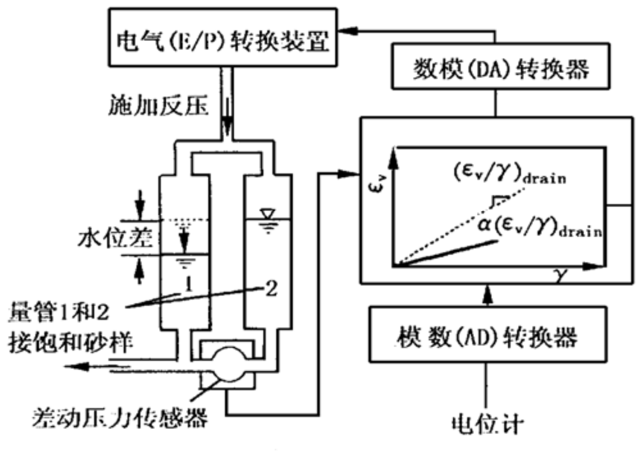

图 2　试验设备自动控制系统的原理图
Fig. 2　An automated test control system

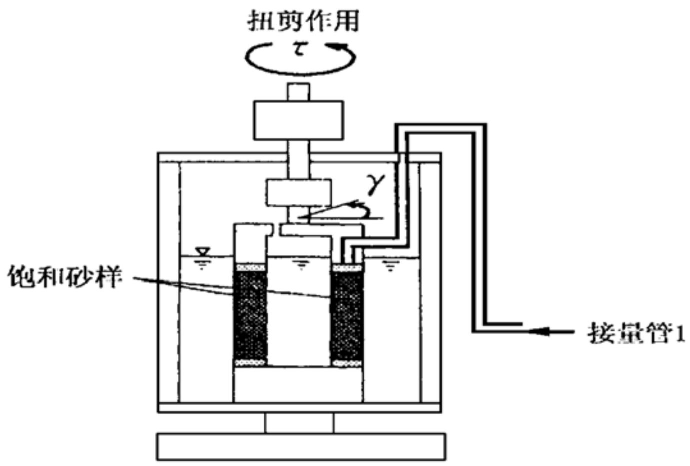

图 3　制备在空心扭剪三轴容器中的饱和砂样
Fig. 3　A specimen prepared in torsional shear cell

2.3　试验条件和方法

采用等落高砂雨法制备试样。采用 CO_2 循环后填充脱气水、然后再通过量管 1 施加 200 kPa 反压的方法使试样饱和。所有试样的 B 值经测定均等于或者大于 0.97。试样的起始相对密度被控制为 45%, 65% 或 85% 左右, 均为具有剪胀性的砂样。所有的试样都在 100 kPa 的有效均等压力作用下达到完全固结。

为了进行 $\alpha\neq1$ 和 0 以外的液化后常吸水率扭剪试验, 首先需要做液化后完全排水($\alpha=1$)扭剪实验来确定(2)式中$(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$的值。图 1 给出了三种不同起始相对密度的饱和砂样液化后完全排水扭剪实验结果。如前所述, 图中曲线的斜率便是所对应相对密度时的$(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$值。在确定了$(\mathrm{d}\varepsilon_v/\mathrm{d}\gamma)_{drain}$值以后, 接着选

定 α 值, 进行液化后相应 α 值下的常吸水率扭剪试验。试验分为前后两个阶段: 先进行常规不排水循环扭剪使试样达到初始液化, 其次再进行指定 α 值下的常吸水率单调扭剪试验。在前一阶段中, 控制并保持严格的初始液化时的零有效应力状态是非常困难的。所以, 试验中以 0.01 Hz 的很慢的速率施加循环扭剪作用, 当超孔隙水压力达到初始有效固结压力的 90% 左右时, 减小循环剪应力到一个较低的值后再继续在不排水条件下施加循环扭剪作用, 使残留的超孔隙水压力达到初始有效固结压力的 97% ~ 99% 时, 认为已达到初始液化, 并可进行后一阶段的常吸水率单调扭剪试验。后一阶段的试验分 A 和 B 两类。A 类试验中, 在控制 α 保持某一常值的条件下施加单调扭剪作用, 直到试样产生大的剪切变形而破坏。B 类试验中, 首先在不排水(α= 0) 条件下施加单调扭剪, 使作用在试样上的剪应力达到某一选定的值 τ_0 以后, 再在控制 α 保持某一常值的条件下继续施加单调扭剪作用, 使试样产生破坏。

3 液化后常吸水率剪切作用下应力应变响应的试验观察

图 4, 5, 6 分别给出了具有三种不同起始相对密度的饱和砂样在相对剪切吸水率 α 为 0, 1/3, 2/3 和 1 四种不同条件下的 A 类试验的结果。通过对比可以发现: ①在 α 值不等于零的液化后剪切过程中, 饱和砂样总是呈现出吸水剪胀而不是排水剪缩; ②液化后应力应变关系因 α 值的不同而呈现出明显不同的变化, 但相同 α 值条件下的关系曲线却具有基本上类似的形状, 与起始相对密度的大小无关; ③在相同剪应变条件下, 随着 α 值由 0 到 1 的增大, 平均有效应力 σ' 和所发挥出的剪切阻力急剧减小, 特别是从近乎液化状态开始的 α= 1 的剪切作用下, 饱和砂样维持一个近乎零的剪切阻力。上述试验事实表明了相对剪切吸水率对饱和砂土液化后应力应变性态有着决定性的影响。

图 7 对比了具有三种不同的起始相对密度, 但近乎相同的绝对剪切吸水率 $d\varepsilon_v/d\gamma$ 的 A 类试验的结果。尽管剪切作用过程中维持着近乎相同的绝对剪切吸水率, 但液化后应力应变关系呈现出不同的变化状态。对图 4 到图 7 的进一步对比分析, 可以得出这样的结论: 对具有剪胀性的饱和砂土, 其液化后应力应变关系曲线的形态, 取决于相对剪切吸水率 α, 而不是绝对剪切吸水率的大小。

图 8 示出了起始剪力 τ_0 约为 100 kPa 的 B 类试验的结果。可以看出: ①在 τ_0 为非零值、α= 1 的完全排水剪切作用下, 饱和砂土的应力应变关系呈现出完全

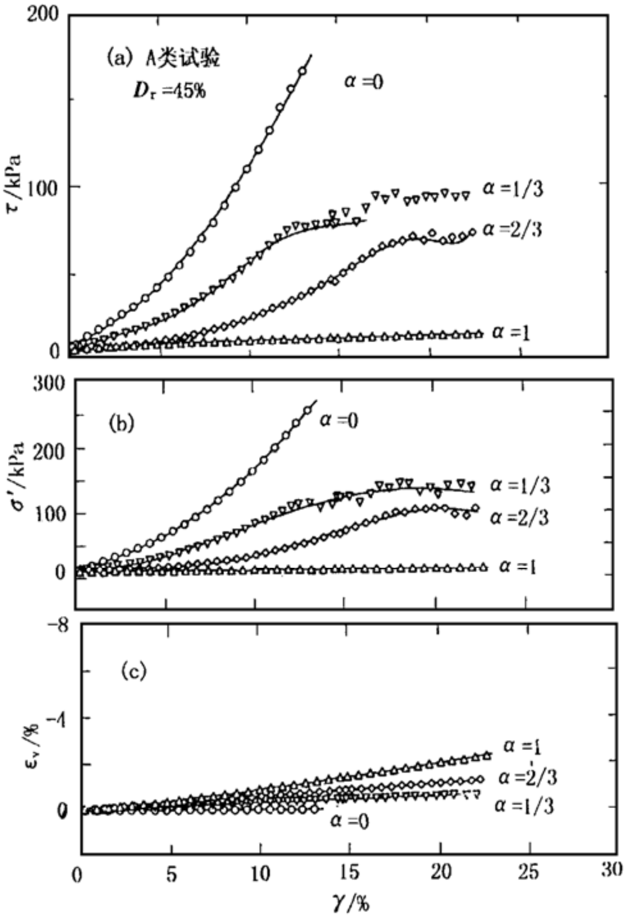

图 4 初始相对密度为 45% 的液化后应力应变关系
Fig. 4 Post-liquefaction stress-strain relations for D_r= 45%

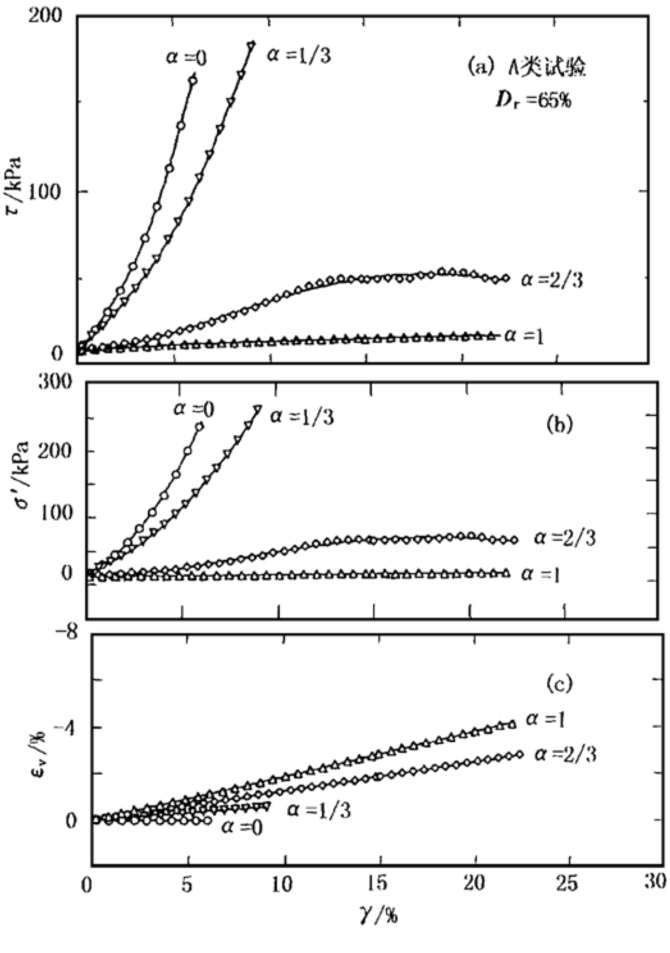

图 5 初始相对密度为 65% 的液化后应力应变关系
Fig. 5 Post-liquefaction stress-strain relations for D_r= 65%

塑性的趋势。在整个剪切过程中,砂土被起动的剪切阻力几乎没有变化; ②在 τ_0 为非零值、$\alpha > 1$ 的常吸水率剪切过程中,剪应力随剪应变的变化始终是趋于减小,直至完全丧失,表现出显著的软化性态。在这一过程中,土的剪切阻力迅速减小,其减小的速率随 α 值的增大而增大; ③在 τ_0 为非零值、$0 < \alpha < 1$ 的常吸水率剪切作用下,应力应变关系呈现出先硬化后软化的变化趋势。试验事实进一步表明了饱和砂土液化后的应力应变性态不仅取决于相对剪切吸水率 α,而且取决于剪切吸水开始出现时的应力状态(σ_0', τ_0)。这里 σ_0' 为剪切吸水开始时的平均有效应力。

4　液化后不同应力应变响应产生的物理机制和条件

基于上述试验观察,控制饱和砂土液化后应力应变响应的主要因素有三个,即相对剪切吸水率 α,起始相对密度 D_r 和剪切吸水开始时的起始应力状态(σ_0', τ_0)。随着这三个因素的不同,可发现有如下规律:

(1) 为了说明液化后剪切过程中饱和砂土的物态变化,图 9(a) 和 9(b) 分别示出了 A 和 B 类试验条件下饱和砂土的平均有效应力 σ' 和孔隙比 e 之间的关系。图中状态点 a 为初始平均有效压力 σ_i' 作用下饱和砂样达到的完全固结状态,此时所对应的孔隙比为 e_i; 状态点 b 为初始液化状态。如前所述,试验中通过施加不排水的往返扭剪作用使已经完全固结的饱和砂样从状态点 a 变化到状态点 b。对图 9(a) 所示的 A 类试验,液化后的常吸水率单调扭剪试验是从状态点 b 开始的,剪切吸水开始出现时的平均有效应力 σ_0' 为零。对图 9(b) 所示的 B 类试验,先在不排水条件下施加单调扭剪使饱和砂样从状态点 b 变化到状态点 c,再从状态点 c 开始进行常吸水率单调扭剪试验,剪切吸水开始出现时的平均有效应力 σ_0' 大于零。无论是 A 类试验,还是 B 类试验,具有剪胀性的饱和砂土在液化后的整个剪切过程中其孔隙比 e 始终大于或等于初始孔隙比 e_i,不会产生剪缩。图 9(a) 和(b) 表明,$e-\sigma'$ 关系因相对剪切吸水率 α 的不同而有明显不同的变化趋势。我们可将剪切吸水划分为三种类型,并分别定义如下:

部分剪切吸水: $0 < \alpha < 1$　　(3a)

自由剪切吸水: $\alpha = 1$　　(3b)

强制剪切吸水: $\alpha > 1$ 且 $\sigma_0' > 0$　　(3c)

图 10 表明了三种不同类型的剪切吸水过程中平均有效应力 σ' 和孔隙比 e 变化的可能范围及规律性,其中强制剪切吸水只能出现在 σ_0' 大于零的场合。

(2) 仅当满足自由剪切吸水条件(3b) 时,饱和砂土才会处于具有流动特征的完全塑性变形状态。仅当满足强制剪切吸水条件(3c) 时,饱和砂土才会处于具有非稳定特征的流动变形状态。

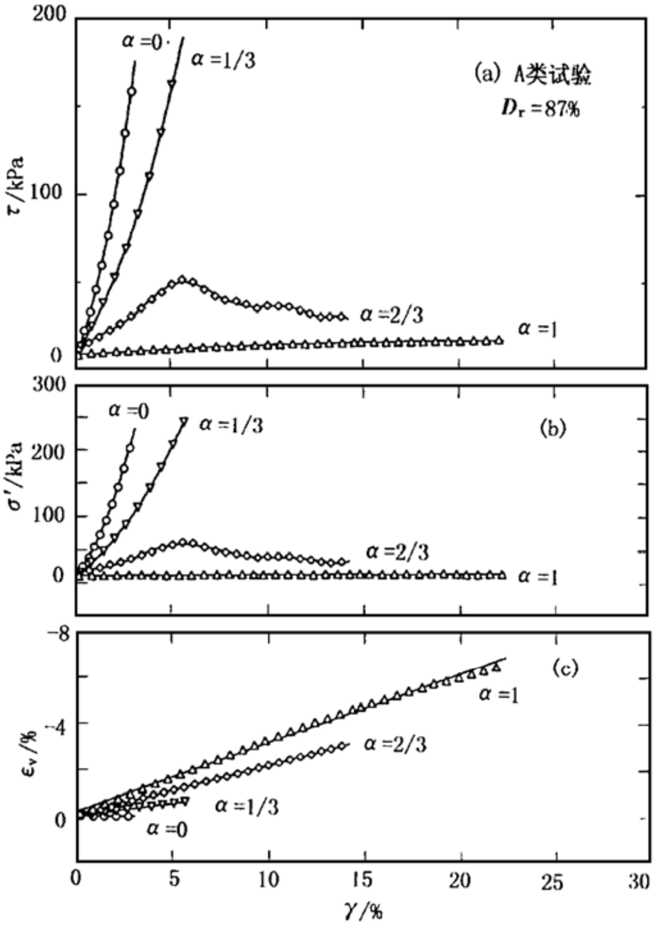

图 6　初始相对密度为 87% 的液化后应力应变关系

Fig. 6　Post-liquefaction stress-strain relations for D_r = 87%

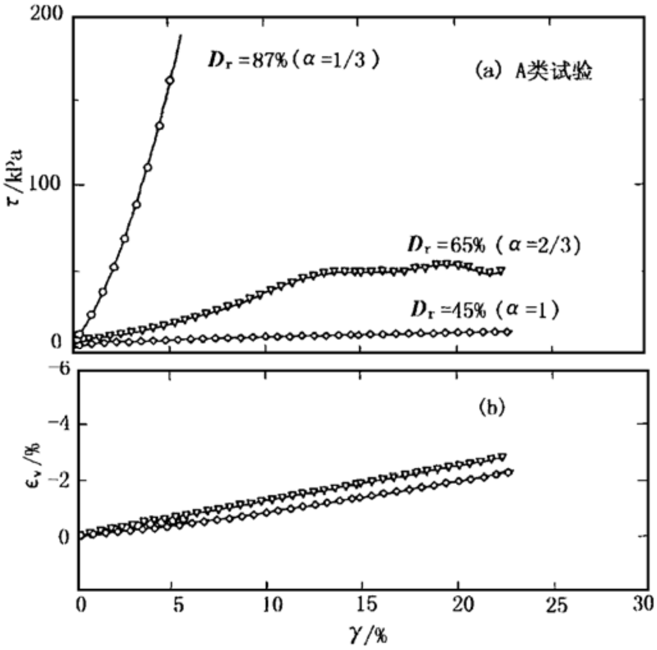

图 7　起始密度不同,绝对剪切吸水率相同条件下的试验结果

Fig. 7　Shear tests with the nearly same absolute water absorption rates for specimens with different initial densities

(3) 由方程式(2) 和图 1 可知,相对剪切吸水率 α

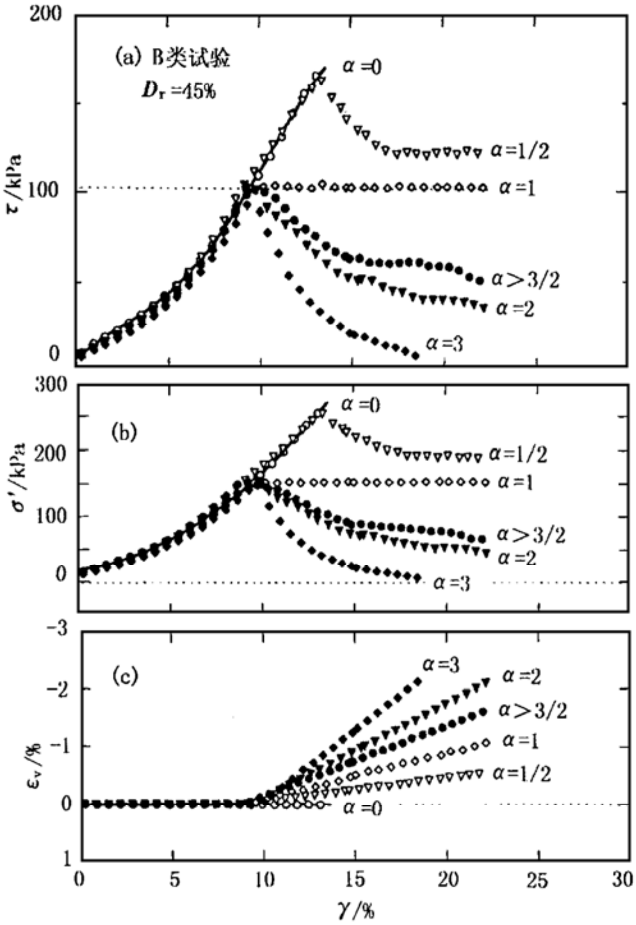

图 8 起始应力状态对液化后应力应变关系的影响
Fig. 8 Influence of initial stress state on post-liquefaction stress-strain response

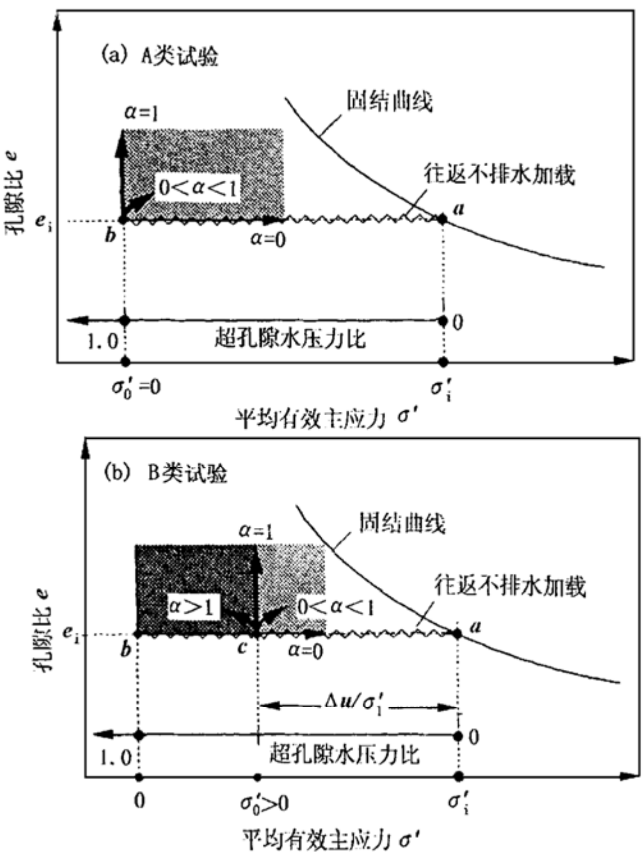

图 9 不同吸水率的液化后剪切时饱和砂土的物态变化
Fig. 9 Physical state of sand in post-liquefaction shear tests

的大小取决于土的初始相对密度和绝对剪切吸水率($d\varepsilon_v/d\gamma$)。对一定的绝对剪切吸水率, 初始相对密度越小, 则相对剪切吸水率 α 就越大, 土产生流动性大变形的可能性就越大。

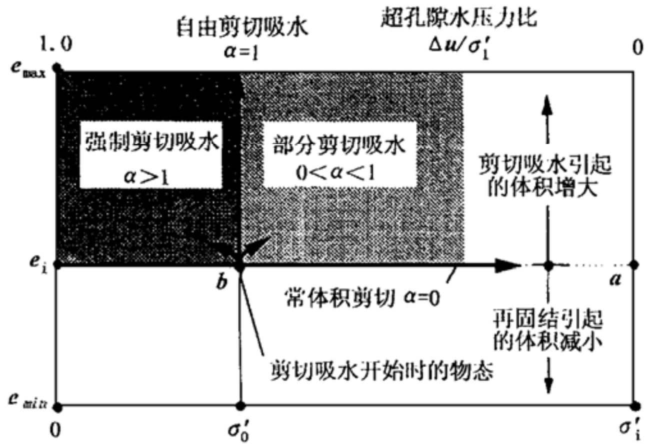

图 10 液化后剪切吸水时砂土物态变化的可能范围
Fig. 10 Possible range of post-liquefaction physical state of sand

5 结 语

本文发展了一种新的试验方法, 首次成功地再现了较松到密实状态的、具有剪胀性的饱和砂土在振动液化后的剪切吸水现象。试验结果表明, 在液化后的整个剪切过程中, 饱和砂土不会产生剪缩, 其应力应变关系随相对剪切吸水率的不同而呈现出硬化、理想塑性及软化的不同变化; 仅当满足自由剪切吸水或强制剪切吸水条件时, 饱和砂土才会产生具有流动特征的大变形。

参 考 文 献

1 Seed H B, Idriss I M, Makdisi F I, Chang C Y. Dynamic analysis of the slide in the Lower San Fernando Dam during earthquake due to soil liquefaction, J of Geotech Engrg, ASCE, 1975, **10**(19): 889~912

2 Shen Z J. Dynamically coupled percolation and deformation analysis of eath dams, Proc, 1st Inter Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri, USA, 1981, 1: 389~394

3 Seed H B. Landslides during earthquake due to soil liquefaction, J of the Soil Mech and Found Div, ASCE, 1968, **94**(5): 1055~1122

4 Japanese Geotechnical Society. Geotechnical aspects of January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, A Special Issue of Soils and Foundations, 1996: 356

5 Seed H B, Martin P P, Lymser J. Pore-pressure changes during soil liquefaction, J of Geotech Engrg Div, ASCE, 1976, **102**(4): 323~346

6 Tokimatsu K, Nakamura K. A liquefaction test without membrane penetration effects, Soils and Foundations, 1986, **26**(4): 127~138