各向异性砂土渐近状态试验研究

宋 飞[1, 2]，张建民[2]
（1．长安大学公路学院，陕西 西安 710064；2．清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084）

摘 要：砂土的渐近力学行为是土的本构关系的重要研究内容之一。通过系列三轴排水剪切试验、三轴等向压缩试验和等应变增量比试验研究了砂土的各向异性及其对于渐近状态的影响。研究结果表明：在剪切变形较小时，砂土主要表现出压缩变形的各向异性，在剪切变形较大的条件下则表现为强度的各向异性；当沿着等应变增量比路径加载时，应力比最终趋于一个常数，即渐近状态的应力比；相对于沉积面水平的试样而言，沉积面铅直的渐近状态应力比稍大；在剪切变形较小时，各向异性砂土的渐近状态应力比与各向同性准则预测结果相差较大，当剪切变形较大时二者较接近。通过比较不同各向异性材料的等应变增量比试验结果研究了各向异性的程度对于渐近状态应力比的影响。在揭示各向异性砂土渐近状态的物理机制的基础上给出了定量描述渐近状态应力比随应变增量比变化的数学表达式。

关键词：各向异性；砂土；等应变增量比试验；渐近状态
中图分类号：TU441.4；X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2010)04－0551－11

作者简介：宋 飞(1980－)，男，陕西汉中人，博士，讲师，主要从事岩土工程的研究。E-mail: songfei05@tsinghua.org.cn。

Experimental study on asymptotic behaviour of anisotropic sand

SONG Fei[1, 2]，ZHANG Jian-min[2]
(1. School of Highway Engineering, Chang’an University, Xi’an 710064, China; 2. State Key Lab of Hydrosciences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Asymptotic behavior is one of the important mechanical characteristics of sand. Anisotropy and its effect on the asymptotic behavior of sand are investigated by use of a series of triaxial drained shear tests and strain paths tests. Studies show that when the ratio of lateral to axial strain increment is one, the axial stress isn’t equal to the lateral one, which can be called anisotropy of compression deformation. And anisotropic shear strength due to anisotropic alignment of particles can be seen clearly in the strain paths tests where the strain increment ratio is small enough to cause the soil failure. When the sand is loaded along the constant strain increment ratio paths, the ratio of lateral to axial stress will eventually approach a constant value, i.e. the asymptotic stress ratio. And the asymptotic stress ratio is a little larger for the specimens with vertical bedding plane than that with horizontal one. When the shear deformation of soil is small, the difference between the measured asymptotic stress ratio and that predicted by the isotropic asymptotic state criterion is large, but it gradually decreases with the increase of the shear deformation. The effect of anisotropy on the asymptotic stress ratio is investigated on the basis of strain paths tests on different anisotropic materials. Furthermore, the asymptotic behavior of anisotropic sand is discussed and an equation is formulated to quantitively determine the relationship between the asymptotic stress ratio and the strain increment ratio for anisotropic sand.

Key words: anisotropy; sand; constant strain increment ratio path test; asymptotic state

0 引 言

砂土的渐近力学行为是土的本构关系的重要研究内容之一。Gudehus 等许多学者均通过应变路径试验研究了砂土的渐近力学行为[1-6]。他们的研究结果表明，当砂土沿着应变增量比为常数的路径加载时，存在着一个应力比为常数的稳定应力状态，即渐近状态；渐近状态应力比随应变增量比的变化而变化；临界状态是剪切过程中渐近状态在体应变增量为零时的特殊情况。

张建民等（1997，2008）揭示了渐近状态随应变增量比的变化而变化的物理机制，是加载过程中的压缩变形与剪切变形的所占比例不断调整的结果，并将压缩变形与剪切变形耦合变化的力学行为及其对土的

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金项目（20070003086）；973 项目课题（2007CB714108）
收稿日期：2009－01－06

应力应变响应的影响定义为压剪耦合效应（简称压剪效应）。在此基础上提出了定量描述渐近状态应力比与应变增量比之间关系的渐近状态准则[5, 7]。

然而，以往的研究均未考虑砂土的各向异性对于渐近力学行为的影响。EI-Sohby 等（1973），Haruyama（1985）通过等向压缩试验研究了砂土的压缩变形各向异性[8-9]。其研究结果表明，砂土在等向压力的作用下，水平方向的压缩量大于铅直方向（沉积方向）。Arthur 等（1972），Oda 等（1972），Haruyama（1984）通过加载方向和沉积面夹角不同的三轴试验研究了颗粒的定向排列对于砂土的强度和变形的影响[10-12]。Arthur 等（1977），Oda 等（1978）通过不同角度加载的平面应变试验研究了加载方向和沉积方向对于砂土的强度和变形的影响[13-14]。Yamada 和 Ishihara（1979），Haruyama（1985）用真三轴仪对水中沉积的松砂进行了一系列径向剪切试验，研究了各向异性和中主应力系数对于砂土的应力－应变关系的影响[9, 15]。他们的研究结果均表明，在上述应力条件下，当加载方向和沉积面的夹角不同时，砂土表现出的应力－应变特性不同。Haruyama（1981）针对玻璃珠这种理想粒状材料进行了等向压缩试验和径向剪切试验[16]。他的研究结果表明，即使对于理想的球形颗粒，也存在压缩变形与强度各向异性。因此，研究各向异性对于渐近状态的影响具有重要的意义。

本文采用特殊的模具制备了沉积面水平和铅直的砂土试样，在改进的应变路径试验设备的基础上针对各向异性异性砂土进行了一系列三轴排水剪切试验、三轴等向压缩试验和控制不同常应变增量比条件下的应变路径试验（称之为等应变增量比试验）。通过三轴排水剪切试验和三轴等向压缩试验分别确定了砂土的强度各向异性和压缩变形各向异性；通过比较不同沉积方向的试样的等应变增量比试验结果探索了沉积方向对于砂土渐近状态的影响；通过分析不同各向异性材料的等应变增量比试验结果研究了各向异性的程度对于渐近状态的影响；通过对比各向异性砂土的渐近状态应力比与各向同性渐近状态准则预测结果揭示了二者的差异及各向异性砂土渐近状态的物理机制。在此基础上给出定量描述各向异性砂土渐近状态应力比与应变增量比之间关系的数学表达式，并且通过与试验结果的对比验证了其有效性。

1 试样制备及试验方案

本文的应变路径试验设备能够通过调整围压室围压的大小来控制试样加载过程中的应变增量比（侧向应变增量与轴向应变增量的比值，记为 $R_\varepsilon = \Delta e_r / \Delta e_a$）为常数，使试样沿着等应变增量比路径加载。试验仪器的研制开发、应变路径控制及其实现方法详见文献[17]。为了探索不同沉积方向对于渐近状态的影响，本文利用特殊的制样模具按照图 1 所示的制样方法，采用水中砂雨法制样制备了沉积面水平和铅直的试样。试样的高度为 160 mm，直径 79.8 mm。将制好的试样放入冰箱里冷冻约 12 h，冻结后的试样取出后装入橡皮膜中，等试样解冻后可开始试验。

为了研究各向异性砂土的渐近状态，本文针对 3 种各向异性程度不同的材料进行了三轴排水剪切试验、三轴等向压缩试验和等应变增量比试验 3 类系列试验。试验用的基本材料为南京云母砂（$G_s = 2.7$，$D_{50} = 0.195$，$e_{max} = 1.12$，$e_{min} = 0.72$）。该砂云母含量丰富，扁平颗粒含量较高，容易形成各向异性的结构。通过试验发现刚取回的南京云母砂和做过一次试验的砂土压缩各向异性和强度各向异性均不同，本文将其分别称为南京云母砂 1 和南京云母砂 2 以示区别。另外一种材料是在南京云母砂 2 中掺入 8%的云母（原砂土在总重中占 92%）制成的。本文通过南京云母砂 1 的系列试验研究沉积方向对于渐近状态的影响。通过 3 种各向异性材料的系列试验研究不同的各向异性程度对于渐近状态的影响。

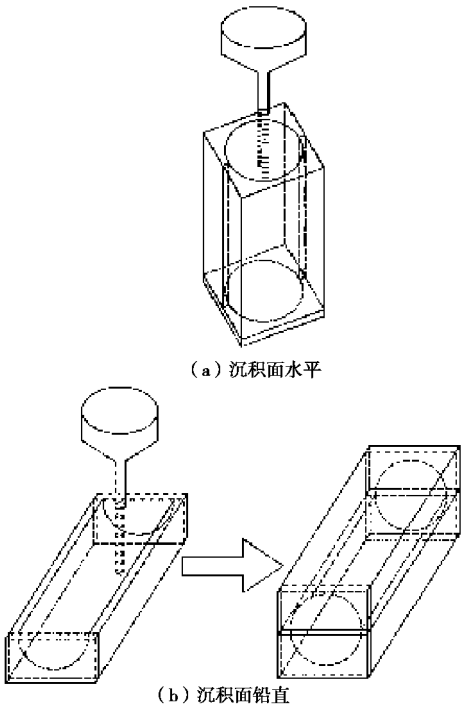


图 1 制样方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample preparation

2 试验结果及规律分析

2.1 不同沉积方向对于渐近状态的影响

本文中的试验均为饱和砂土的排水试验。轴向加

载方式为应变控制，加载的应变速率为 0.01%/min。如图 2 所示，在三轴试验的轴对称应力状态下，对于沉积面水平和铅直的试样，大主应力分别垂直和平行于沉积面。首先通过三轴排水剪试验和三轴等向压缩试验分别研究了南京云母砂 1 的强度各向异性以及压缩变形各向异性。

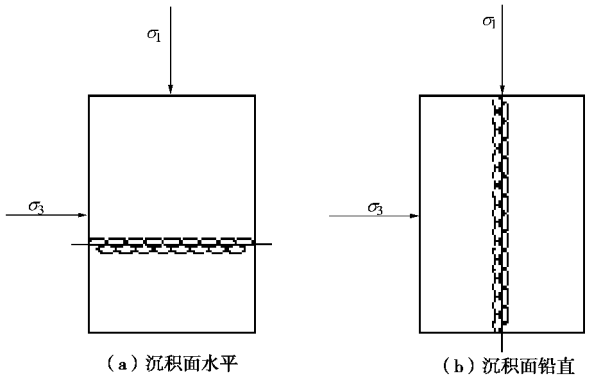


图 2 沉积面水平和铅直试样的示意图

Fig. 2 Specimens with horizontal and vertical bedding planes

图 3 给出了沉积面水平和铅直的砂土试样在三轴排水剪切试验中的应力－应变响应。

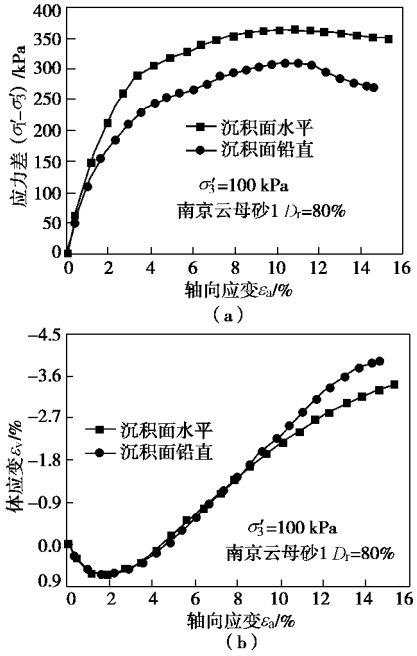


图 3 三轴排水剪切试验中南京云母砂 1 的应力－应变关系

Fig. 3 Relationship between stress and strain of Nanjing mica sand 1 in triaxial drained tests

如图 3 所示，沉积面水平的试样的变形模量及峰值强度均大于沉积面铅直的试样。随着轴向应变的增大，二者应力差的差异逐渐增大，各向异性逐渐明显。该砂土的剪切变形及强度各向异性比较明显。

图 4 给出了沉积面水平的砂土试样的三轴等向压缩试验结果。试验中试样在 100 kPa 的有效围压下均压固结之后沿着常应变增量比为 1 的路径加载，即加载过程中试样的侧向变形与轴向变形相等。图中归一化轴向有效应力是指试验中每一点的轴向有效应力与达到的最大轴向有效应力的比值。由图 4 可以看出，当试样的侧向变形等于轴向变形时，砂土的应力比值（侧向应力与轴向应力的比值）小于 1。在这种试验条件下虽然试样的剪切变形为零，但是剪应力不为零。这是由于轴向和侧向的压缩性不同造成的，即砂土的压缩变形各向异性。$R_\varepsilon=1$ 时的应力比值与 1 偏差越大，则材料的压缩各向异性越明显。由图 4 可知，南京云母砂 1 具有一定程度的压缩变形各向异性。$R_\varepsilon=1$ 时试样的变形量很小，当 s_r' 达到 800 kPa 时，轴向应变仅为 0.75%。

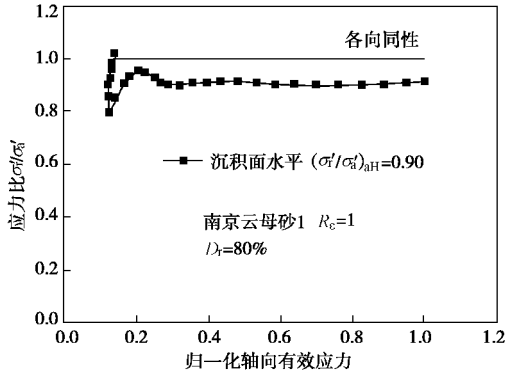
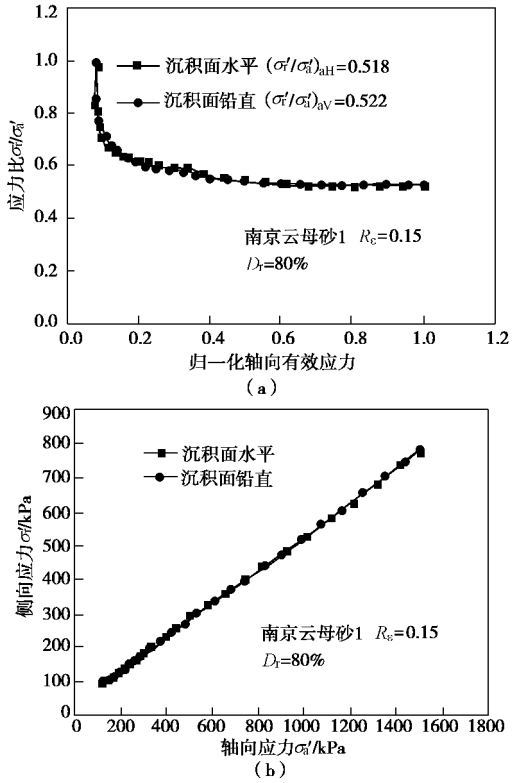


图 4 南京云母砂 1 的压缩变形各向异性

Fig. 4 Anisotropy of compression deformation of Nanjing mica sand 1

图 5～7 分别给出了应变增量比为 0.15，0，-0.3 时沉积面水平和铅直的试验结果。图中 $q=s_1'-s_3'$，$p'=(s_1'+2s_3')/3$，$g=2(e_1-e_3)/3$。



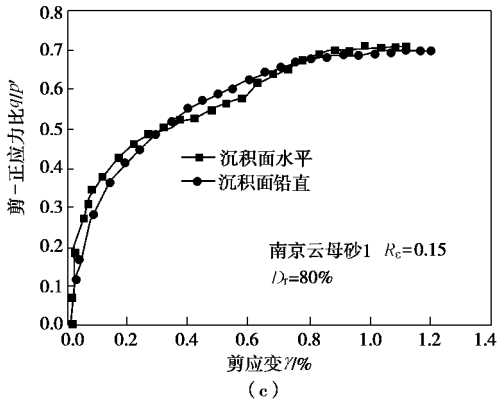


图 5 应变增量比为 0.15 的试验结果（南京云母砂 1）

Fig. 5 Test results for Nanjing mica sand 1 when strain increment ratio =0.15

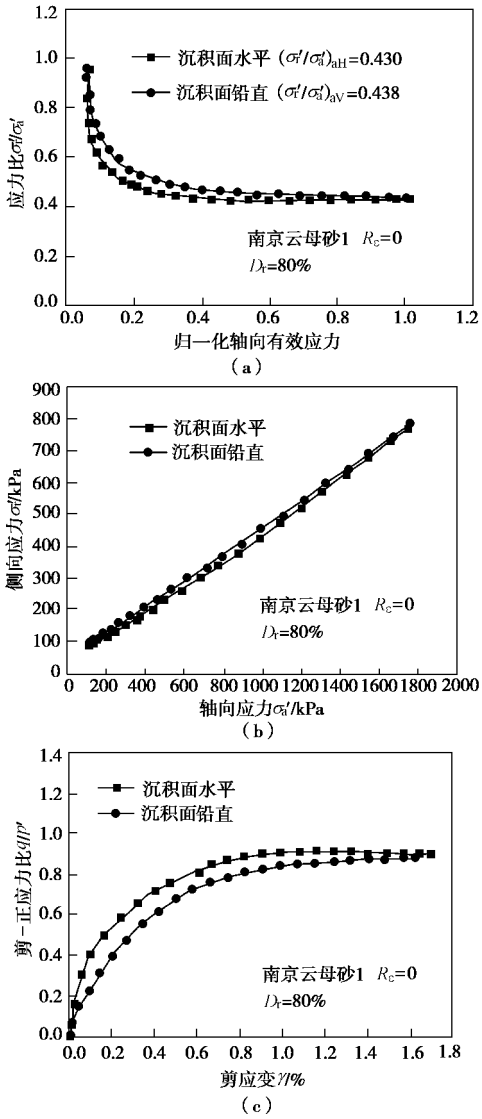


图 6 应变增量比为 0 的试验结果（南京云母砂 1）

Fig. 6 Test results for Nanjing mica sand 1 when strain increment ratio =0

从图中可以看出，当应变增量比保持为一个常数时，应力比最终也趋于一个常数，即渐近状态的应力比 $(s_r'/s_a')_{asy}$。渐近状态的应力比随应变增量比的减小而减小，这与 Gudehus 等（1977），Topollnicki 等（1990），Chu 和 Lo（1993，1994），张建民等（1997），Asaka 等（2003）的研究结果是一致的[1-7]。此外，在剪切变形较小的条件下，不同沉积方向试样的渐近状态应力比的差异较小。相对于沉积面水平的试样而言，沉积面铅直的砂土试样的渐近状态应力比 $(s_r'/s_a')_{asy}$ 稍大，起动的剪－正应力比和发挥的摩擦强度稍小。

图 8 给出了 $R_\varepsilon=-0.65$ 时砂土的应力－应变响应。在这种试验条件下试样强制吸水，剪胀量很大，最终达到剪切破坏状态，相当于三轴排水剪切试验。由图 8（d）可知，当轴向应变达到 11%时试样由于吸水发生了剪胀软化，轴向和侧向有效应力在达到峰值之后均有所降低。沉积面水平的试样起动的偏差应力明显大于沉积面铅直的试样，这是由强度各向异性所致。与小变形条件下的试验结果相比，当试样的剪切变形较大，达到剪切破坏时，沉积面水平和铅直的试样的渐近状态应力比差别最为明显，就是其峰值强度的差异。由图 8（a）和（b）可知，当试样破坏之后，若在试验中仍控制同样的应变增量比，则应力比值也保持与破坏前相同的常数。

图 9 是 $R_\varepsilon=-0.65$ 时的应变路径试验结果和三轴排水剪切试验的对比，可以看出当试样达到剪切破坏时，即试样只具有剪切效应时，在应变路径试验中的渐近状态应力比等于三轴排水剪切试验中试样破坏时的应力比，两种试验的规律是一致的。

图 10 给出了南京云母砂 1 制成的沉积面水平的试样在不同应变增量比条件下的应力比变化和应力路径。由图可知，当应变增量比较大时，砂土的剪－正应力比较小，压缩效应占优势，随着应变增量比的减小，起动的剪－正应力比逐渐增大，砂土的强度逐渐发挥，剪切效应逐渐占优势。渐近状态的应力比随应变增量比的变化而变化是由砂土的压剪耦合效应决定的，相关机理的讨论详见文献[7]。

在等应变增量比试验中可以发现，当应变增量比为正值时，围压增加很快，试样的轴向和侧向均为压缩变形，压缩效应占优势，轴应变和剪应变均较小。而当应变增量比为负值时，围压增加较慢，试样轴向压缩侧向膨胀，剪切效应占优势，轴应变和剪应变均较大。图 11 给出了 R_ε = 1, 0.5,0.15,0 和-0.3 时 s_3' 达到 750 kPa 时试样的剪应变。

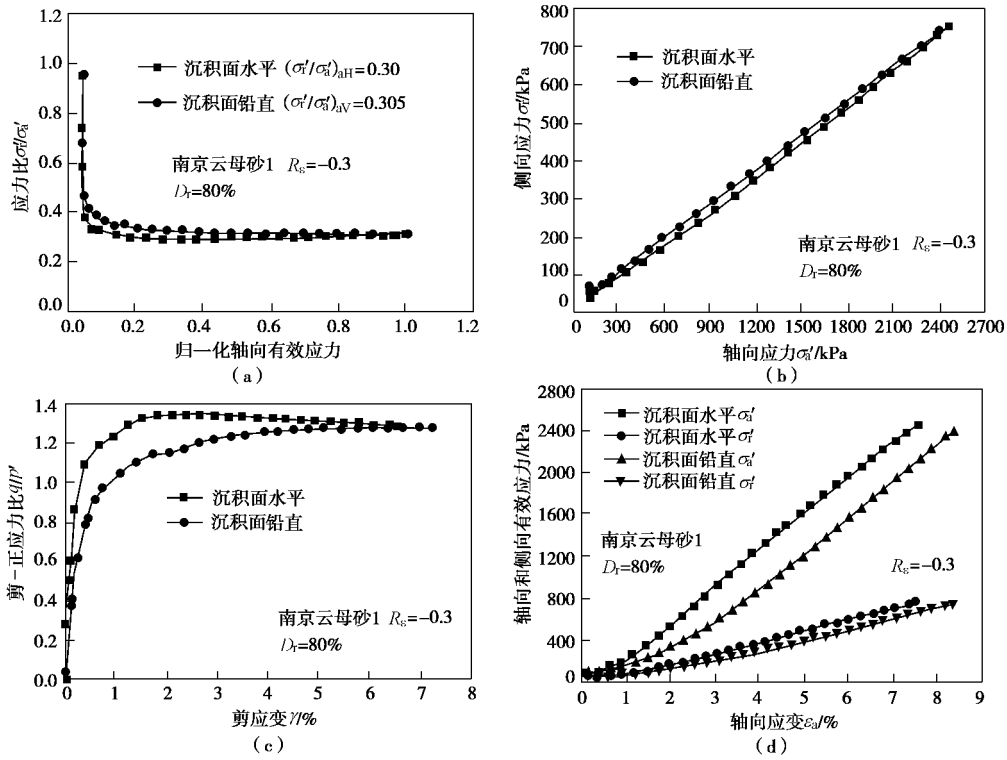


图 7 应变增量比为-0.3 的试验结果（南京云母砂 1）

Fig. 7 Test results for Nanjing mica sand 1 when strain increment ratio =-0.3

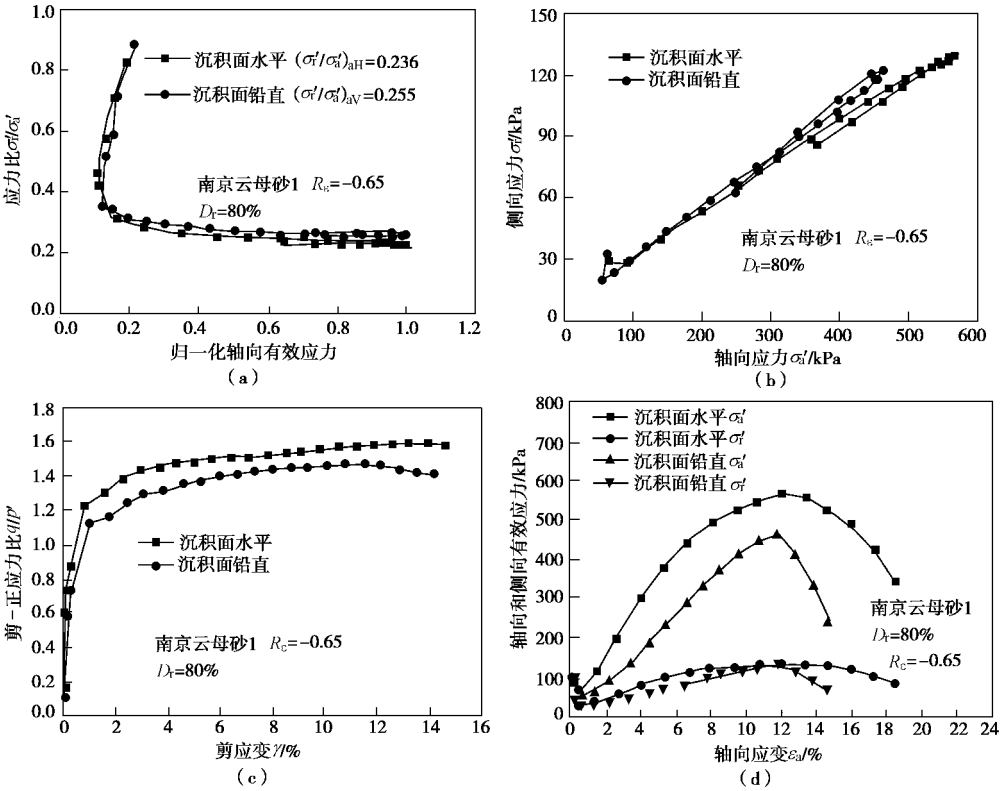


图 8 应变增量比为-0.65 的试验结果（南京云母砂 1）

Fig. 8 Test results for Nanjing mica sand 1 when strain increment ratio =-0.65

从图 11 可以看出，随着应变增量比的减小，由于剪－正应力比逐渐增大，砂土的剪应变也随之增大，压缩效应逐渐减弱，剪切效应逐渐增强。当应变增量比从 1 减小到 0 时，砂土的剪切变形随应变增量比减

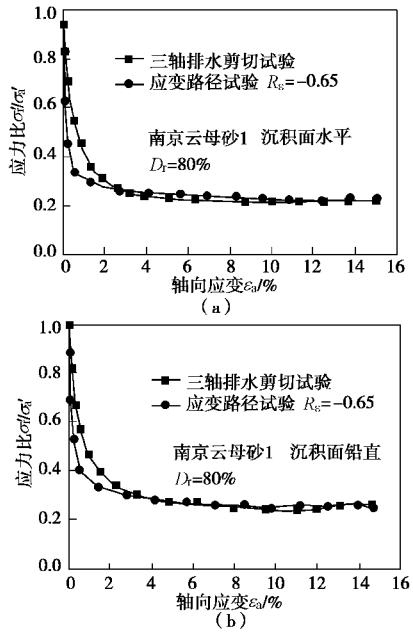


图 9 应变路径试验（R_ε =-0.65）与三轴排水剪切试验的比较

Fig. 9 Comparison between strain path tests (R_ε = -0.65) and triaxial compression tests

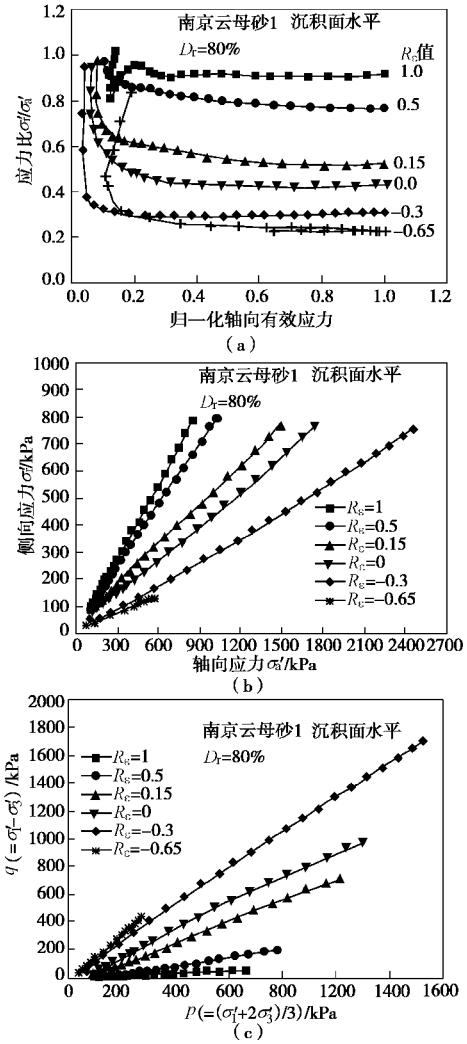


图 10 不同应变增量比时的应力比和应力路径（南京云母砂 1）

Fig. 10 Stress ratio and stress paths of Nanjing mica sand 1 under different strain increment ratios

小和剪－正应力比增大而增大的幅度较小；当应变增量比小于零之后，随着应变增量比的减小和剪－正应力比的增加，剪切变形急剧增大。对于不同应变增量比对应的渐近状态，K_0 状态是个分界点，从等向压缩状态到 K_0 状态，试样的体变主要是压缩引起的体缩分量和剪切引起的体缩分量，剪应变较小，压缩效应占优势；从 K_0 状态到剪切破坏状态，剪切引起的体胀分量产生并迅速增大，试样的体变以剪切引起的体胀分量为主，剪应变较大，剪切效应占优势。对于不同渐近状态而言，K_0 是剪切变形由小到大的一个转折点，也是从压缩效应占优势转化到剪切效应占优势的一个转折点。

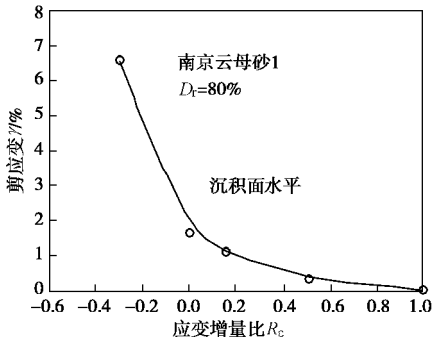


图 11 不同应变增量比对应的剪应变（南京云母砂 1）

Fig. 11 Deviator strain of Nanjing mica sand 1 under different strain increment ratios

2.2 不同各向异性程度对于渐近状态的影响

为了研究不同的各向异性程度对于渐近状态的影响，本文针对另外两种各向异性材料，即南京云母砂 2 和掺入 8%云母的云母砂进行了三轴排水剪切试验、三轴等向压缩试验和等应变增量比试验。图 12，13，

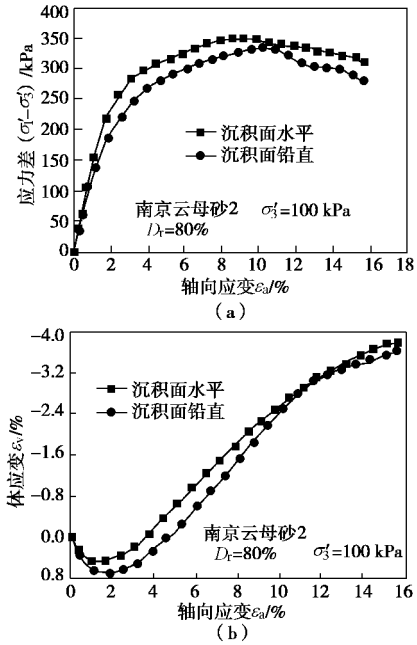


图 12 南京云母砂 2 的强度各向异性

Fig. 12 Strength anisotropy of Nanjing mica sand 2

14 和 15 分别给出了南京云母砂 2 和掺入云母 8%的云母砂的三轴排水剪切试验和三轴等向压缩试验的试验结果。

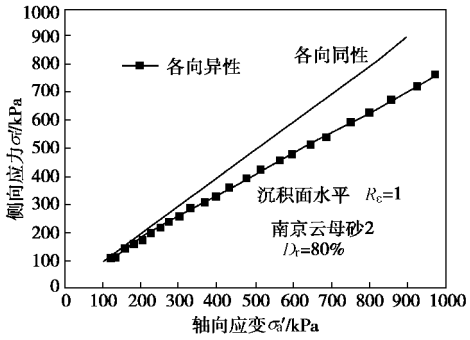


图 13 南京云母砂 2 的压缩变形各向异性

Fig. 13 Anisotropy of compression of Nanjing mica sand 2

通过对比可知，与南京云母砂 1 相比，南京云母砂 2 的强度各向异性较弱，而压缩变形各向异性较强。而在南京云母砂 2 中掺入 8%云母之后，其强度各向异性进一步减弱，而压缩各向异性和南京云母砂 1 相当。

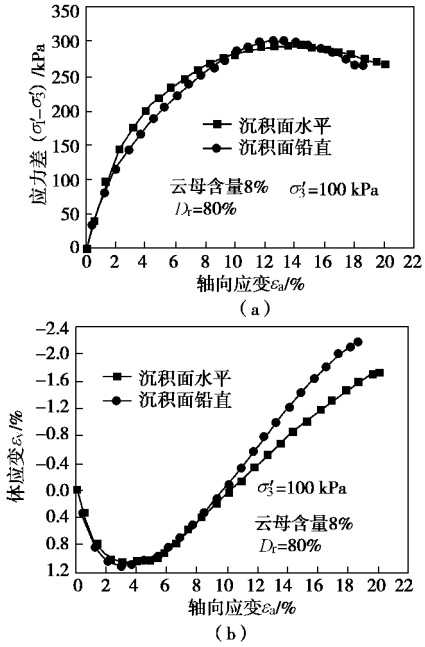


图 14 掺入 8%云母的砂土的强度各向异性

Fig. 14 Strength anisotropy of mica sand with admixture of mica of 8%

图 16 和图 17 分别给出了南京云母砂 2 和掺入云母含量 8%的云母砂在不同应变增量比条件下的应力比以及应力路径，由图可知，随着应变增量比的减小，这两种材料的剪－正应力比逐渐增大，压缩效应逐渐减弱，剪切效应逐渐增强，具有与南京云母砂 1 相同的规律。

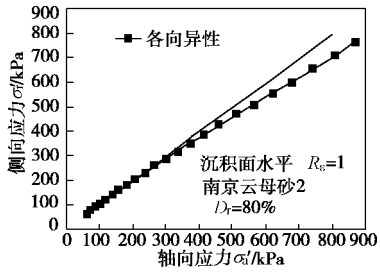


图 15 掺入云母 8%时云母砂的压缩变形各向异性

Fig. 15 Anisotropy of compression deformation of mica sand with admixture of mica of 8%

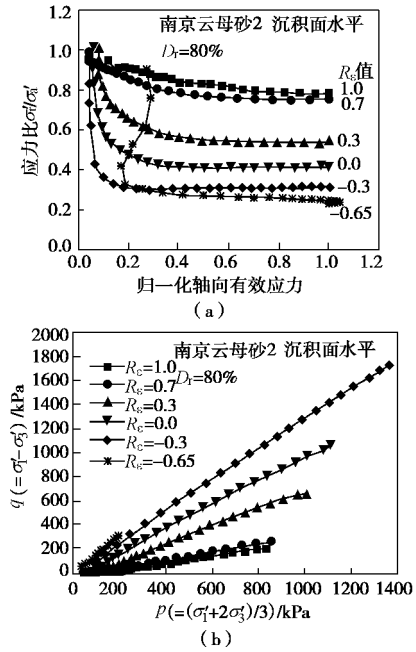


图 16 不同应变增量比时的应力比和应力路径（南京云母砂 2）

Fig. 16 Stress ratio and stress paths of Nanjing mica sand 2 under different strain increment ratios

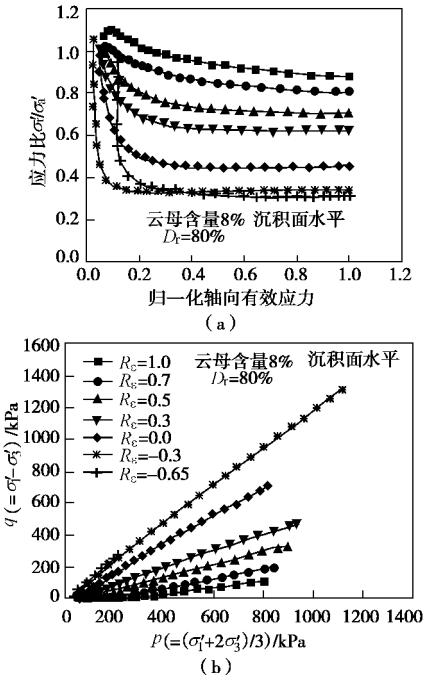


图 17 不同应变增量比时的应力比和应力路径（云母含量 8%）

Fig. 17 Stress ratio and stress paths of sand with admixture of mica of 8% under different strain increment ratios

图 18 和 19 给出了南京云母砂 2 和掺入 8%云母的砂土在不同应变增量比时 s_3' 达到 750 kPa 时的剪应变。可以看出，两种材料在应变增量比大于零时，剪切变形较小，而当应变增量比小于零时，剪切变形急剧增大。这与南京云母砂 1 是相同的。

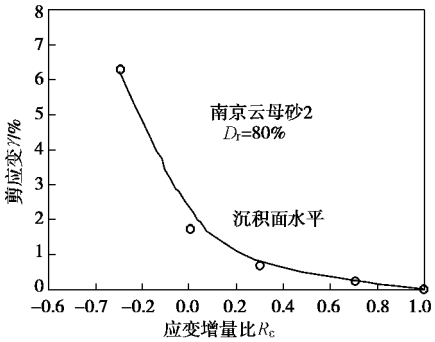


图 18 不同应变增量比对应的剪应变（南京云母砂 2）

Fig. 18 Deviator strain of Nanjing mica sand 2 under different strain increment ratios

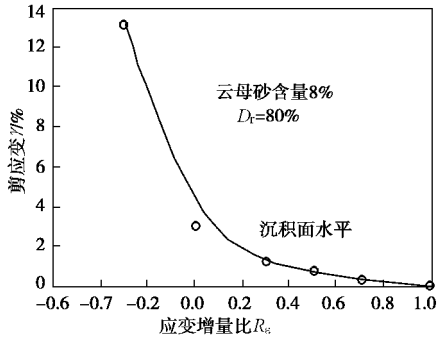


图 19 不同应变增量比对应的剪应变（云母含量 8%）

Fig. 19 Deviator strain of sand with admixture of mica of 8% under different strain increment ratios

图20给出了4种不同各向异性材料的渐近状态应力比随应变增量比的变化而变化的关系曲线。其中丰浦砂的试验结果引自 Asaka 等（2003）的试验结果[6]。从图中可以看出，对于这几种不同的砂土，渐近状态应力比随应变增量比具有相似的变化规律。通过对比可知，压缩变形的各向异性对于渐近状态应力比影响较大，而强度各向异性对于渐近状态应力比影响较小。云母含量为 8%时的强度各向异性明显弱于南京云母砂 1，但二者的压缩各向异性很接近，R_ε 为正值时两段曲线基本重合，在 R_ε 为负值的阶段，南京云母砂 1 的曲线略低于掺入云母 8%的云母砂，这是由于南京云母砂 1 的峰值强度相对较大的缘故。而南京云母砂 2 的压缩变形的各向异性强于南京云母砂 1，其在 $R_\varepsilon>0$ 的曲线部分明显低于南京云母砂 1。当 $R_\varepsilon<0$ 时两条曲线基本重合是由于此时剪切效应占优势，两种材料的峰值强度基本相同的原因。由于丰浦砂的压缩变形的各向异性比以上 3 种材料更强，并且其峰值强度更大($j'=44.7^\circ$)，因此整条曲线的位置较前 3 条曲线的位置进一步降低。

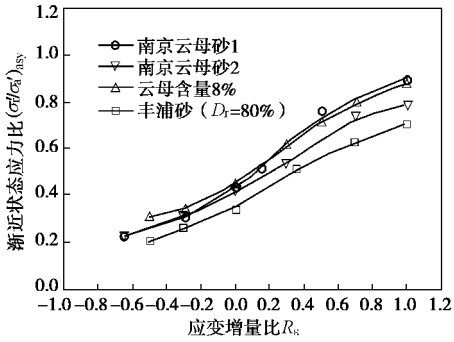


图 20 不同各向异性材料的应力比与应变增量比的关系

Fig. 20 Relationship between asymptotic stress ratio and strain increment ratio for different anisotropic soils

3 试验结果与各向同性准则的对比

图 21 给出了不同各向异性材料沉积面水平的渐近状态应力比与各向同性准则预测结果的对比。其中各向同性渐近状态准则是张建民等（1997）根据丰浦砂的试验结果提出的[5, 7]。比较时以沉积面水平为基准，各向同性材料的力学性质和各向异性砂土在沉积面水平情况下的性质相同。从图中可以看出，当应变增量比为 1 时，各向异性砂土的剪切变形为零，但是由于压缩变形各向异性的影响，剪应力不为零，渐近状态应力比值小于 1，体变包括球应力引起的体缩分量和剪应力引起的体缩分量，土单元体同时存在压缩效应和剪切效应，以压缩效应为主。随着应变增量比的减小，压缩效应逐渐减小，剪切效应逐渐增大。当 $R_\varepsilon>0$ 时，体变由压缩引起的体缩分量和剪切引起的体缩分量两部分组成，砂土的剪切变形随剪－正应力比的增大而增大的幅度较小，因此应变增量比变化较小，而渐近状态应力比的减小量较大。当 $R_\varepsilon<0$ 时，土单元体的剪切变形迅速增大，剪切效应居于主导地位，压缩引起的体缩分量远远小于剪切引起的体胀分量。此时微小的剪－正应力比增量就会引起较大的剪切变形，因此应变增量比变化较大，而渐近状态应力比的减小量较小。当应变增量比减小到一定程度时，试样发生剪切破坏，强度完全发挥，剪－正应力比达到极大值。

在应变增量比较大时，即剪切变形较小的条件下，各向异性砂土的渐近状态应力比与各向同性准则的预测结果差别较大。在应变增量比等于 1 附近，由于压缩变形各向异性的影响，各向异性砂土的渐近状态应

力比小于各向同性准则预测结果，随着应变增量比的减小，因为相对于各向同性体，各向异性砂土由于剪切引起的体缩分量较大，所以各向异性砂土的渐近状态应力比逐渐大于各向同性准则的预测结果。在应变增量比较小时，即剪切变形较大的条件下，二者之间

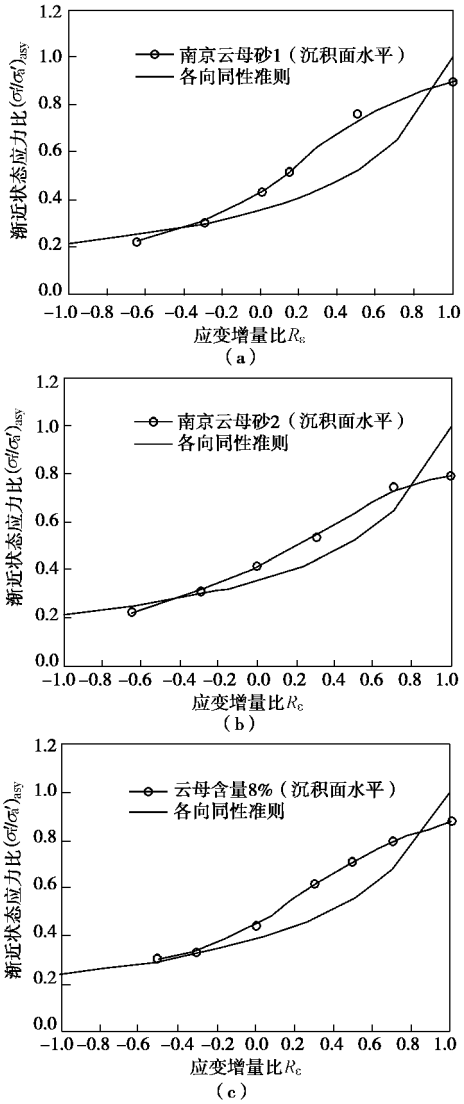


图 21 各向异性砂土渐近状态应力比与各向同性的比较

Fig. 21 Comparison of asymptotic stress ratio between anisotropic sand and isotropic one

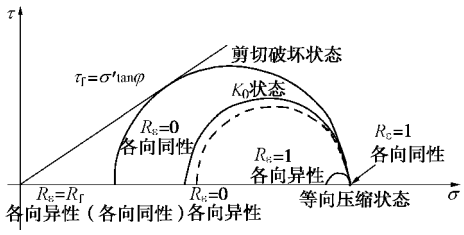


图 22 应力状态随应变增量比的变化

Fig. 22 Variation of stress state with R_ε in strain path tests

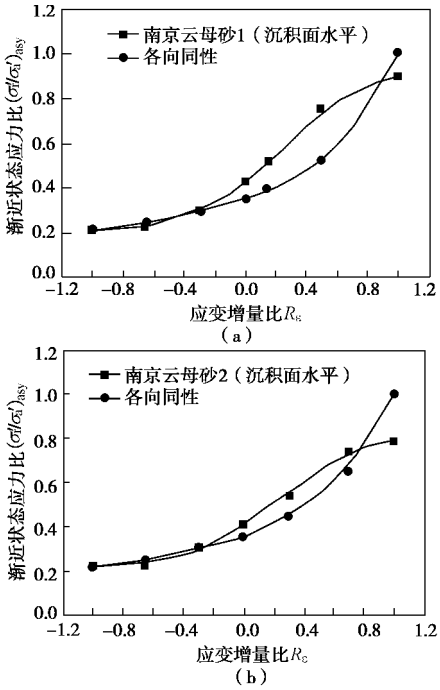
的差别比较小。这是由于在剪切变形较小时压缩变形各向异性处于主导地位，而随着剪切变形的逐渐增大，剪切效应居于主导地位，因此强度参数对于渐近状态应力比起的决定作用较大，所以渐近状态应力比值与各向同性准则的预测结果很接近。图 22 给出了应变路径试验中几个应力状态的示意图，图中 R_f 代表土单元体达到破坏时的应变增量比。

4　数学描述

根据材料试验结果给出定量描述各向异性砂土的渐近状态应力比随应变增量比变化的数学表达式如下：

$$\left(\frac{s_r'}{s_a'}\right)_{asy}=A_2+\frac{A_1}{1+A_4e^{A_3R_\varepsilon}}\quad 。\tag{1}$$

图中 s_a' 和 s_r' 分别表示轴向和侧向有效应力。式（1）待定参数 A_1,A_2,A_3 和 A_4 时，用 K_i 代表 $R_\varepsilon=1$ 时的应力比，可由等向压缩试验确定；K_0 代表 $R_\varepsilon=0$ 时的应力比，可以由 K_0 固结试验来确定，有关 K_0 的确定可参阅文献[18]；K_u 代表三轴不排水剪试验中试样破坏时的应力比，即 $R_\varepsilon=-0.5$ 时的应力比；K_a 代表 $R_\varepsilon=-1$ 的应力比，可由 Mohr-Coulomb 准则确定，其中强度参数由三轴排水剪切试验确定。将 $R_\varepsilon=1$，$R_\varepsilon=0$，$R_\varepsilon=-0.5$，$R_\varepsilon=-1$ 分别对应的应力比代入式（1）可以求解 A_1，A_2，A_3，A_4 的值。式（1）能同时描述各向异性材料和各向同性材料的应力比随应变增量比的变化。式（1）的计算结果和试验结果的对比如图 23 所示。图中各向同性材料的力学性质和各向异性砂土在沉积面水平情况下的性质相同，其内摩擦角是通过沉积面水平的试样的三轴排水剪切试验得到的。



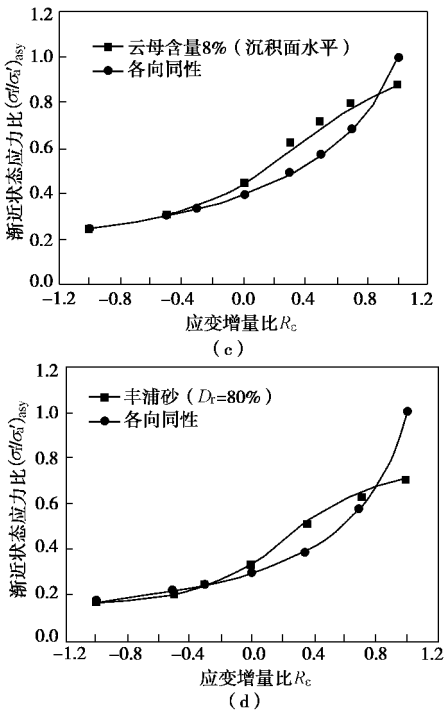


图 23 公式预测结果与试验结果的对比

Fig. 23 Comparison between test results and those predicted by the equation

5 结 论

本文基于各向异性砂土的三轴排水剪切试验、三轴等向压缩试验和等应变增量比试验初步探索了各向异性砂土的压剪效应规律与渐近状态，可得到以下几点结论：

（1）通过三轴等向压缩试验和三轴排水剪切试验发现砂土表现出压缩变形各向异性和强度各向异性。将砂土在水平和铅直方向的变形相等时轴向和侧向应力不等的现象，或者等向压力下压缩变形不等的现象称之为压缩变形各向异性。将剪切变形比较大时，试样达到剪切破坏时其峰值强度的差异称之为强度各向异性。

（2）通过系列等应变增量比试验发现，相对于沉积面水平的试样而言，沉积面铅直的试样的渐近状态应力比稍大。不论是在剪切变形条件较小时还是在剪切变形较大的情况下，当应变增量比保持为一个常数时，应力比值最终趋于一个稳定的常数。当应变增量比减小到一定程度，试样发生剪切破坏时，不同沉积方向的试样在等应变增量比试验中表现出强度各向异性。此时等应变增量比试验与三轴排水剪切试验的力学响应一致，渐近状态应力比与三轴排水剪切试验中试样达到峰值强度时的应力比很接近。并且当试样破坏之后，若在试验中仍控制同样的应变增量比，则应力比值也保持与破坏时相同的常数。

（3）随着应变增量比的减小，剪－正应力比逐渐增大，砂土的剪应变也随之逐渐增大。当应变增量比从 1 减小到 0 时，砂土的剪切变形随应变增量比减小和剪-正应力比增大而增大的幅度较小；当应变增量比小于零之后，随着应变增量比的减小和剪－正应力比的增加，剪切变形急剧增大。从等向压缩状态到 K_0 状态，压缩效应占优势，试样的剪切变形较小，从 K_0 状态到剪切破坏状态，剪切效应占优势，试样的剪切变形较大。对于不同应变增量比对应的渐近状态，K_0 状态是剪切变形由小到大的一个转折点，也是从压缩效应占优势转化到剪切效应占优势的一个转折点。

（4）由于各向异性的影响，试验中砂土的渐近状态应力比与各向同性渐近状态准则的预测结果是有差别的。在应变增量比较大时，即剪切变形较小的条件下二者之间的差别相对较大，在应变增量比较小时，即剪切变形较大的条件下二者之间的差别比较小。

（5）不同各向异性程度的砂土的渐近状态应力比随应变增量比变化的规律相同，但是具有定量差别。压缩变形各向异性对于渐近状态影响较大，强度各向异性对于渐近状态影响较小。对于压缩变形各向异性相差较大，而峰值强度较接近的砂土，在剪切变形较小时渐近状态应力比相差较大，在剪切变形较大时相差较小。

（6）给出了同时适用于各向异性材料与各向同性材料的定量描述应变增量比和渐近状态应力比之间关系的数学表达式，并通过与试验结果的对比进行了验证分析。

参考文献：

[1] GUDEHUS G, GOLDSCHEIDER M, WINTER H. Mechanical properties of sand and clay and numerical integration methods: some sources of errors and bounds of accuracy[M]// Gudehus G, ed. Finite Elements in Geomechanics, London; New York: Wiley, 1977: 121－150.

[2] CHU J, LO S-C R, LEE I K. Response of a granular soil during strain path testing[C]// Proceedings of the Workshop on Modern Approaches to Plasticity, Horton, Greece, 1993: 599－640.

[3] CHU J, LO S-C R. Asymptotic behavior of a granular soil in strain path testing[J]. G'eotechnique, 1994, **44**(1): 65－82.

[4] CHU J. Development of the asymptotic state concept for soils and its application to slope stability analysis[R]. Singapore: Research Report of Nanyang Technical Universtiy, 1997: 9－41.

[5] ZHANG J M. Cyclic critical stress state theory of sand with its application to geotechnical problems[R]. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 1997: 78 – 100.

[6] ASAKA Y, TOKIMATSU K, IWASAKI K, SHAMOTO Y. A simple stress-strain relation based on stress-path behavior in strain-path controlled triaxial tests[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(2): 55 – 68.

[7] 张建民，宋　飞. 砂土的压剪效应与渐近状态准则[J]. 岩土工程学报，2008, **30**(2): 166 – 171. (ZHANG Jian-min, SONG Fei. Compression-dilatancy coupling effect and asymptotic state criterion of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 166 – 171. (in Chinese))

[8] EI-SOHBY M A, ANDRAWES K Z. Experimental examination of sand anisotropy[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1973, **1**(1): 103 – 103.

[9] HARUYAMA M. Drained deformation-strength characteristics of loose Shirasu (volcanic sandy soil) under three-dimensional stresses[J]. Soils and Foundations, 1985, **25**(1): 65 – 76.

[10] ARTHUR J R F, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand[J]. G'eotechnique, 1972, **22**(1): 115 – 128.

[11] ODA M. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material[J]. Soils and Foundations, 1972, **12**(1): 1 – 18.

[12] HARUYAMA M, KITAMURA R. Anisotropic deformation-strength properties of soft sedimentary rock “Shirasu” originated from pyroclastic flows[J]. Soils and Foundations, 1984, **24**(4): 84 – 94.

[13] ARTHUR J R F, CHUA K S. DUNSTAN T. Induced anisotropy in a sand[J]. G'eotechnique, 1977, **27**(1): 13 – 30.

[14] ODA M, KOISHIKAWA I., HIGUCHI T. Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test[J]. Soils and Foundations, 1978, **18**(1): 25 – 38.

[15] YAMADA Y, ISHIHARA K. Anisotropic deformation characteristics of sand under three dimensional stress conditions[J]. Soils and Foundations, 1979, **19**(2): 79 – 94.

[16] HARUYAMA M. Anisotropic deformation-strength characteristics of an assembly of spherical particles under three dimensional stress[J]. Soils and Foundations, 1981, **21**(4): 41 – 55.

[17] 宋　飞，张建民，张　嘎，等. 等应变增量比试验控制功能的开发与实现[J]. 岩土工程学报，2009, **31**(7): 1144 – 1148. (SONG Fei, ZHANG Jian-min, ZHANG Ga, et al. Development of constant strain increment ratio path test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 1144 – 1148. (in Chinese))

[18] 姜安龙，郭云英，高大钊. 静止土压力系数研究[J]. 岩土工程技术，2003(3): 354 – 359. (JIANG An-long, GUO Yun-ying, GAO Da-zhao. The study on coefficient of earth pressure at rest[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(6): 354 – 359. (in Chinese))

《岩土工程 50 讲——岩坛漫话》介绍

《岩土工程 50 讲——岩坛漫话》（第二版），作者：李广信；书号：978-7-114-07998-6；定价：56.00 元；页码：380 页。

本书是“岩土工程师，甚至是土木工程师不得不读的一本好书”。本书收录了李广信教授的专题文章 50 讲，或阐述心得，或针砭时弊，或案例分析，或讨论争鸣，文风活泼、风趣幽默，令人莞尔，令人深思，或唤起思索，或豁然感悟；于工作和学习有所裨益。

首先，书里面的很多文章，涉及了这门学问的许多本质和核心问题。

其次，这本书涉及的论题，或出于技术规范的编制与执行中的争论，或见于文献和工程实例中的错漏，或来自课堂答疑及考试中带有共性的问题，基本上都是有的放矢，切中关键的。

本书从“岩土工程中的哲学思考”、“趣味土力学”、“论文写作与学风”、“议规范”、 “谈案例”、“讨论与答复”、“土力学教材的讨论”、“工程事故分析”、“感怀与杂议”几方面进行了“漫话”。

这本书的写法，不是板起面孔的说教，更像是饭后炉前的促膝谈心，加上文笔流畅，形成了亦庄亦谐的风格，具备了极好的可读性。同时寓庄于谐，是一本严肃的书。

（人民交通出版社　供稿）