

DOI: 10.11779/CJGE201705015

# 从变形、水量变化和强度三方面验证非饱和土的两个应力状态变量

张 龙<sup>1,3</sup>, 陈正汉<sup>\*1,2</sup>, 周凤玺<sup>1</sup>, 孙树国<sup>2</sup>, 扈胜霞<sup>4</sup>, 姚志华<sup>5</sup>

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 401331; 3. 机械工业勘察设计研究院, 陕西 西安 710043; 4. 延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000; 5. 空军工程大学机场建筑工程系, 陕西 西安 710038)

**摘 要:** 为了验证非饱和土两个应力状态变量的合理性, 对常规非饱和土三轴仪进行了改进, 采用 3 个压力-体积控制器分别控制孔隙水压力、内室压力和外室压力, 提高了量测体变和含水率的精度; 用加荷器施加轴向荷载, 可以方便地控制偏应力。在笔者前期用各向等压试验验证非饱和土的两个应力状态变量的基础上, 使用改进的非饱和土三轴仪和重塑 Q<sub>3</sub> 黄土做了两类验证试验: 第一类是两组控制净围压、偏应力和吸力的固结不排水剪切试验, 第二类是 3 组控制净围压和吸力的固结排水剪切试验。在第一类试验中, 等值改变 (增加或减少) 总围压、孔隙水压力和孔隙气压力而保持净围压、吸力和偏应力本身不发生变化, 发现试验过程中土样的体积变化和含水率变化均非常小, 可以忽略不计。第二类试验的每一组包含两个控制净围压和吸力分别相同的固结排水剪切试验, 其中一个试样在固结完成后直接进行排水剪切试验, 另一个试样在固结完成后等值增加总围压、孔隙水压力和孔隙气压力而保持净围压和吸力本身不发生变化的条件下进行排水剪切试验, 发现二者的抗剪强度、剪切过程中的体积变化、排水量和广义剪应变都分别十分接近, 可以认为两两相等。研究结果从变形 (包括体应变和剪应变)、水量变化和强度 3 个方面说明描述非饱和土的两个应力状态变量是合理的, 进一步夯实了非饱和土力学的应力理论基础, 为非饱和土的两个应力状态变量理论提供了牢靠的试验依据。

**关键词:** 非饱和土; 应力状态变量; 重塑黄土; 偏应力; 抗剪强度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)05-0906-10

**作者简介:** 张 龙 (1988-), 男, 河北藁城人, 硕士研究生, 主要从事非饱和土与特殊土力学研究。E-mail: 709194126@qq.com。

## Verification of rationality of two stress state variables of unsaturated soil from deformation, moisture change and strength

ZHANG Long<sup>1,3</sup>, CHEN Zheng-han<sup>\*1,2</sup>, ZHOU Feng-xi<sup>1</sup>, SUN Shu-guo<sup>2</sup>, HU Sheng-xia<sup>4</sup>, YAO Zhi-hua<sup>5</sup>

(1. School of Architecture and Construction of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Logistic Engineering

University of PLA, Chongqing 401331, China; 3. China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China;

4. School of Architecture and Civil Engineering of Yan'an University, Yan'an 716000; 5. School of Airport Construction Project of Air

Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to verify the rationality of two stress state variables of unsaturated soil, the conventional triaxial apparatus is improved: three pressure-volume controllers are employed to respectively control the pore water pressure, inner and outer chamber pressures so as to improve the measurement precision of volume change and water content; and the axial load by loading device can conveniently control the deviator stress. Based on the previous verified results of isotropic tests by the authors, the improved unsaturated soil triaxial apparatus and remolded Q<sub>3</sub> loess are used to conduct two types of experiments: one is two groups of consolidation undrained shear tests under the net confining pressure, deviator stress and suction, and the other is three groups of consolidation drained shear tests under the net confining pressure and suction. In the first type of tests, with the equivalent change (increase or decrease) of the confining pressure, pore water pressure and pore air pressure, and without the change of the net confining pressure, suction and deviator stress, it is found that the volume change and moisture change are very small and can be neglected. In the second type of tests, each group contains two consolidation drained

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11272353, 11672330, 51309199, 51509257)

收稿日期: 2016-05-05

\*通讯作者 (E-mail: chenzhenghan47@163.com)



shear tests with the same net confining pressure and suction. Among the tests, one is that after the completion of the consolidation, the direct drained shear tests are performed; the other is that after the completion of the consolidation, with the equivalent increase in the total confining pressure, pore water pressure and pore pressure and without the change of the net confining pressure and suction, the drained shear tests are performed. It is found that their shear strengths, volume changes in the shearing process, generalized shear strains and drainages are very close and can be considered to be equal. The use of two stress state variables to describe the stress state of unsaturated soil is reasonable in terms of deformation, moisture change and strength, which consolidates the mechanics theory of unsaturated soil and provides a reliable experimental basis for the theory of two stress state variables of unsaturated soil.

**Key words:** unsaturated soil; stress state variable; remolded loess; deviator stress; shear strength

## 0 引 言

应力状态是研究土力学性质的前提,也是研究土应力应变关系的基础。对单一介质,连续介质力学用一个应力张量描述其应力状态。对于固-液两相介质组成的饱和土,通常用总应力或 Terzaghi 提出的有效应力描述其应力状态,但总应力与饱和土的变形和强度之间没有明确的对应关系。有效应力原理认为,饱和土的变形和强度是由有效应力控制的,反映了问题的本质,因而得到了广泛应用。从饱和土的有效应力原理可知,若饱和土的总应力和孔隙水压力发生变化,但有效应力保持不变,则饱和土就不会发生变形与强度的改变。

对由固-液-气三相介质组成的非饱和土,描述其应力状态有两种方法:有效应力和应力状态变量,分别以 Bishop 提出的有效公式<sup>[1]</sup>和 Fredlund 提倡的两个应力状态变量<sup>[2-3]</sup>最为流行。由于 Bishop 提出的有效公式中包含难以确定的参数,其应用受到了限制。Fredlund 提倡的两个应力状态变量分别称为净总应力和基质吸力,可用张量表示为 $(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$ 和 $(u_a - u_w) \cdot \delta_{ij}$ ,其中 $\sigma_{ij}$ 为总应力张量, $u_a$ 为孔隙气压力, $u_w$ 为孔隙水压力, $\delta_{ij}$ 为 Kronecker 记号;因其不包含材料参数,既有一定的理论依据<sup>[2,4]</sup>,又经过他本人的初步验证和 Tarantino 等<sup>[5]</sup>的试验验证,故得到众多学者的认可和较广泛的应用。

为了验证两个应力状态变量的合理性, Fredlund 对高岭土做了 19 个“零体变-零排水”试验<sup>[2]</sup>,试样的饱和度和基质吸力范围分别为 0.759~0.950 和 26~362 kPa,在试验中让总应力、孔隙气压力、孔隙水压力独立变化而保持两个应力状态变量本身不变,量测得到的土样的体变和排水量都非常小,可视为零。换言之,若应力状态变量保持不变,则土样的体积和含水率就不变。Tarantino 等<sup>[5]</sup>用专门设计的装置做了进一步的验证工作,土样为重塑高岭土,共做了 7 个非饱和土试验和 2 个饱和土试验,采用帝国学院研制的高吸力张力计(最高量程为 1500 kPa)量测基质吸力,

试样的饱和度和基质吸力范围分别为 0.558~0.773 和 1088~1355 kPa;在试验过程中改变气压力而不让土样发生变形(包括体变和畸变)和排水,施加的最大气压力达到 600 kPa,量测到的净总应力变化和基质吸力变化都非常小,可视为零。换言之,若土样不发生变形和排水,则两个应力状态变量就不会变化。Fredlund 和 Tarantino 的工作从“必要和充分”两个方面表明,非饱和土的两个应力状态变量与土的变形和含水率具有一一对应的关系,在 3 个各向同性变量(总应力、孔隙水压力和孔隙气压力)中只有两个是独立的。

近年来,一些学者对非饱和土相继提出了其他形式的应力状态变量,如 Bolzon 等<sup>[6]</sup>、Lu<sup>[7]</sup>、Houlsby<sup>[8-9]</sup>、Li<sup>[10]</sup>和赵成刚等<sup>[11-12]</sup>等。陈正汉等<sup>[13]</sup>以连续介质力学的应力理论为基础,从非饱和土的土骨架平衡方程出发,导出了一系列应力状态变量,文献中使用的应力状态变量都在其中,并分析指出了各自的优缺点<sup>[13]</sup>。

陈正汉等<sup>[13]</sup>指出:非饱和土应力状态变量的选择应考虑 4 个方面,即理论合理、应用方便、逻辑关系正确、有试验验证;据此认为,在不考虑土颗粒和水压缩性的条件下,选择 Fredlund 提倡的两个应力状态变量描述非饱和土的应力状态比较方便。

必须指出, Fredlund<sup>[2]</sup>和 Tarantino 等<sup>[5]</sup>对非饱和土的两个应力状态变量的验证不够充分:①只做了各向等压试验,没有考虑试样的复杂受力情况,譬如试样同时承受净围压、吸力和偏应力的作用;②验证内容只涉及土样体变和水量变化,没有涉及强度和剪切变形方面的验证工作。

众所周知,变形特性、强度特性和水分变化是非饱和土重要的力学性质,对非饱和土应力状态变量合理性的验证应包括变形、强度和水分变化 3 个方面;变形包括体应变和剪应变,强度指抗剪强度,水分变化指试验过程中试样的排水量。引起非饱和土变形、强度和水分变化的应力有球应力、偏应力和吸力。对两个应力状态变量的全面验证理应包括在球应力、偏应力和吸力共同作用下的变形验证、强度验证和含水

率方面的验证。笔者前期用各向等压试验对非饱和土的两个应力状态变量进行了初步验证<sup>[14]</sup>, 试验考虑了不同初始条件(饱和度、干密度、吸力、结构性)的非饱和土, 在吸力和球应力共同作用下变形和水分变化两方面的验证。本文的验证工作在此基础上, 利用改进的非饱和土三轴仪对重塑 Q<sub>3</sub> 黄土做了两类验证试验, 对描述非饱和土应力状态的两个应力状态变量做了进一步的验证。

顺便指出, 通常认为土颗粒和水是不可压缩的, 收缩膜的体积变形可以忽略, 则非饱和土的孔隙体积变化等于水分体积变化和气相体积变化之和, 3 个量中只有两个是独立的。在非饱和土试验中, 孔隙体积变化就是试样的体积变化, 只要量测了试样体变和排水量, 就可以推得气相的体积变化, 故试验中无需量测气相的体积变化, 也无需从气相体变方面进行验证。

## 1 研究方法

### 1.1 试验原理

Fredlund 等<sup>[3]</sup>提出了验证应力状态变量的准则, 即“当应力状态变量的个别组成部分有所改变而应力状态变量本身保持不变时, 单元体不发生畸变或体变。”换言之, 仅当两个应力状态变量本身发生变化时, 土才会产生变形。比照 Terzaghi 有效应力的定义, 从变形角度看, 非饱和土的应力状态变量就是其有效应力, 只不过非饱和土的有效应力有两个应力张量罢了。反过来, 饱和土的有效应力也可以称为饱和土的应力状态变量。

必须指出, 对于非饱和土, 上述准则还应包括土样的水分和强度不发生改变。因此验证应力状态变量是否合理, 就是要观测当应力状态变量的个别组成部分发生改变而应力状态变量本身不发生改变时, 土是否发生变形、水分和强度的改变。本文通过第一类试验, 从体变和水量变化两个方面验证非饱和土的两个应力状态变量的合理性; 通过第二类试验, 从抗剪强度、剪切过程中的变形(包括体积变化与偏应力-轴向应变曲线及广义剪应变)和排水量 3 个方面验证非饱和土的两个应力状态变量的合理性。

### 1.2 试验仪器和仪器标定

#### (1) 第一类验证试验所用仪器及标定

为了能控制偏应力, 在文献[14]中用到的改进的非饱和土三轴仪的基础上做了改进, 改进后的非饱和土三轴仪如图 1 所示。该非饱和土三轴仪用加荷器施加轴向应力, 可以方便地控制偏应力的大小。具体控制方式为通过外接气源使加荷器内的滚动隔膜充气, 推动滚动隔膜下的活塞提供压力。

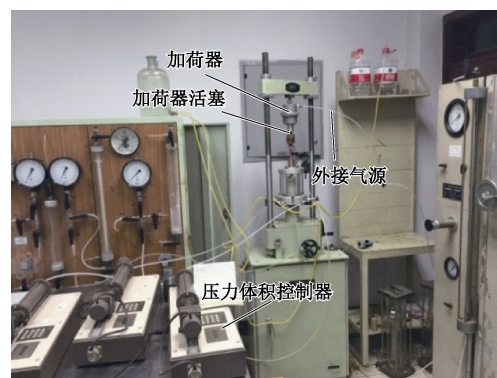


图 1 改进的应力控制式非饱和土三轴试验设备

Fig. 1 Improved stress-controlled unsaturated soil triaxial apparatus

该非饱和土三轴仪采用双层压力室, 通过内压力室里的水体积的变化量反映试样的体变; 采用 GDS 公司生产的两个标准压力-体积控制器分别给内层和外层压力室以同步等量的方式施加液压(即总围压), 压力-体积控制器可以同时量测并显示所施加液压的量值和液压管道及压力室的体变量。由于内层压力室的侧壁两边受到的液压相等, 因而内层压力室本身在液压作用下不会发生膨胀变形, 从而提高了量测试样体变的精度。对连接压力-体积控制器和内层压力室之间的尼龙管及其他因素(包括试样帽、压力室)在不同液压作用下的总变形量, 可通过逐级施加液压进行标定, 在整理试验的试样体变资料时加以扣除即可。具体标定结果详见文献[14]中表 1。

为了尽可能使内外压力室的液压同步等量施加, 把压力分成若干步, 每步施加 10 kPa, 先分别在两个压力-体积控制器上设置压力目标值, 然后用两只手分别同时按下两个控制器上的执行键, 在 5 s 内即可达到预定压力并保持稳定。如此继续, 直到达到需要的围压为止。

用精密气压阀给试样施加气压力。为了保证试样所受的净围压不变, 在施加气压的同时, 用压力-体积控制器给内外压力室同步等量施加液压, 液压的量值与气压相等。施加的方式与上述相同, 即分步施加, 每步施加 10 kPa, 直到达到预定目标值为止。

该仪器具有操作方便, 精度高的特点, 排水和体积变化量测精度可达到 1 mm<sup>3</sup>, 压力控制/量测精度可以达到 1 kPa。仪器的有关情况可参考文献[14]。

试验前需进行仪器标定, 包括 3 个方面: ①标定内压力室及其通水管道在不同压力下的变形量, 以消除压力室和管路由于受到压力而体积发生变化造成的误差; ②对高进气值陶土板下的反压管道在不同压力下进行标定。③对加荷器产生推力的大小与对应的气压力大小, 进行一一对应。

①, ②的标定沿用文献[14]中表 1, 2 的结果③标定的方法为: 在加荷器下方放置量力环, 量力环放置在刚性很大的钢块上; 通过精密调压阀控制加荷器中气压力, 加荷器中的气压力推动活塞产生推力, 用量力环测量产生的推力大小; 量测不同气压力下加荷器产生的推力, 这样就使加荷器中的气压力与加荷器产生的推力值一一对应, 最后通过拟合, 得出气压力与加荷器产生的推力值的对应曲线, 达到标定目的。标定从 10 kPa 开始, 每级增加 10 kPa, 直到 100 kPa 为止。三方面标定均需要标定两次, 取其平均值作为以后校正试样体变和排水量变化及计算偏应力的依据。第三方面标定结果如表 1 所示。

表 1 加荷器标定结果

Table 1 Calibrated values of loading device				
气压值 /kPa	量力环第 1 次读数 数/(0.01 mm)	量力环第 2 次读数 数/(0.01 mm)	平均值 /(0.01 mm)	加荷器推 力/N
10	2.3	2.1	2.20	33.65
20	5.1	5.0	5.05	77.23
30	8.0	7.8	7.90	120.82
40	11.2	11.0	11.10	169.76
50	14.1	14.0	14.05	214.88
60	17.2	17.2	17.20	263.06
70	20.7	20.7	20.70	316.59
80	23.8	23.7	23.75	363.23
90	26.8	26.7	26.75	409.11
100	30.0	30.0	30.00	458.82

注: 量力环参数为 15.294 N/(0.01 mm)。

(2) 第二类验证试验所用仪器及标定

仪器的主体部分与上述相同, 只是用量力环代替了加荷器, 采用电动机施加轴向荷载 (应变控制式)。第二类验证试验所用仪器如图 2 所示。



图 2 改进的应变控制式非饱和土三轴试验设备

Fig. 2 Improved strain-controlled unsaturated soil triaxial apparatus

1.3 土样初始指标和试验研究方案

试验用土取自延安新区工地的 Q<sub>3</sub> 黄土, 重塑制样, 制样前土过 2 mm 筛, 测定其含水率。用电子天平称量需要配置的土料质量 (譬如 3 kg), 计算该土料

达到目标含水率时需要加入的水量, 把水装入喷雾器。在塑料盆里撒一层土料, 用喷雾器喷入适量的水; 再撒一层土料, 再喷适量的水; 一般分 3 次喷水即可。在第 3 次喷水后, 在其上撒上剩余的土料。将加湿的土料用塑料布覆盖密封 3 d, 让水分扩散均匀。在此期间, 每隔 1 d, 用削土刀把土料翻动一遍, 以加速水分扩散。制样时要重新测定所配土料的含水率, 作为试验土样的初始含水率。

为了保证试样具有相同的初始条件 (包括含水率、干密度和尺寸) 和均质性, 专门设计加工了一套制样设备和模具, 图 3 是 2014 年新加工的制样设备和试样模具照片。试样模具包括底座、模筒、钢环、制样活塞、脱模活塞和三脚架, 均用不锈钢制造。试样模筒的内径是 39.1 mm, 制样活塞的直径略小于模筒内径, 以便制样时排气。土样分 5 层压实, 每层的厚度用套在活塞上的不锈钢环控制, 每个钢环的高度是 16 mm。共 4 个钢环, 第一层不套钢环, 直接用制样活塞的长度控制土样第一层的厚度 (16 mm)。制样步骤如下: ①按预定的试样干密度计算每层所需的湿土质量, 用量程 200 g 的电子天平称取第一层土料, 装入模筒中, 用螺丝刀整平; ②把制样活塞插入模筒, 用制样设备的千斤顶施压, 直到制样活塞帽下边与模筒紧密相接为止; ③松开千斤顶, 取出制样活塞, 用螺丝刀把第一层顶面划毛, 以便层间结合良好; ④称取第二层土料并装入模筒, 在制样活塞上套第一个钢环, 把制样活塞插入模筒, 重复上述步骤, 直到压完第 5 层; ⑤取出制样活塞, 插入长度超过模筒的脱模活塞, 从制样设备的三脚架下面用玻璃板接着土样, 用千斤顶缓慢施加压力, 直到试样完全脱模为止; ⑥把脱模的土样连同玻璃板放在工作台上, 套上三瓣模, 加箍, 用削土刀将土样顶面削平即可。制成的土样为三轴标准试样, 直径 39.1 mm, 高 80 mm。

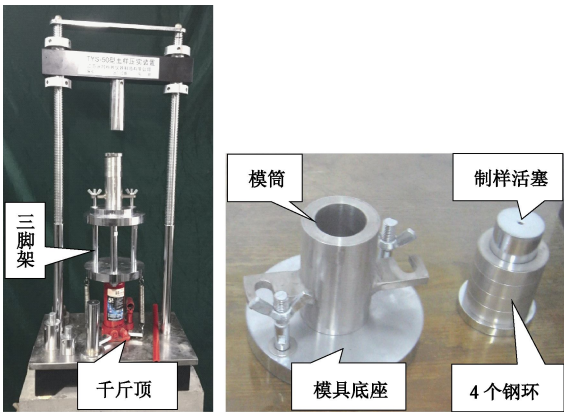


图 3 制样设备和试样模具

Fig. 3 Sampling apparatus and mould tool

用此法制样, 省工省时, 效率高, 质量好, 土样如同工厂产品, 彼此之间的干密度、含水率和几何尺



寸相差甚微。为了减少脱模对试样的扰动，将模筒改成三瓣模（图 4），制样效果更佳。

应当指出，图 3 所示设备和模具的原型由西安理工大学土力学及地质工程教研室的郭耀堂在 20 世纪 80 年代初设计加工，并投入使用。后勤工程学院在 1992 年仿制了一套，迄今仍在使用。



图 4 三瓣模制样模筒

Fig. 4 Trivalve sampling mold tool

共做了两类验证试验，分述如下。

（1）第一类验证试验的方案

第一类验证试验进行了 2 组，每组试验包括 2 个土样。土样编号及起始物理指标见表 2。由表 2 可知，两组土样的初始物理指标相同，但偏应力和净围压不同；每组试验的两个土样的偏应力和净围压相同，但吸力不等。这样的试验方案就包含了吸力、偏应力和净围压的影响。

表 2 第一类试验土样的初始物理指标及固结应力状态

Table 2 Initial conditions of samples of first type of tests

组号	编号	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和度 /%	偏应力 /kPa	净围压 /kPa	吸力 /kPa
5	5a	1.65	67.2	75	75	100
	5b	1.65	67.2	75	75	200
6	6a	1.65	67.2	150	50	100
	6b	1.65	67.2	150	50	200

注：两组均为重塑 Q<sub>3</sub> 黄土土样，试样的相对密度均为 2.7

试验分两个阶段。第 5 组土样在 75 kPa 的净围压、75 kPa 的偏应力和一定的吸力下排水固结，第 6 组土样在 50 kPa 的净围压，150 kPa 的偏应力和一定的吸力下排水固结。待固结完成后，记录试样体积和排水量，作为后续试验的基准。然后关闭排水阀，打开控制反压的压力体积控制器的阀门，同步等值改变总围压、孔隙水压力和孔隙气压力，从而使净总应力、基质吸力保持不变。每个试样在固结后改变 4 次压力，各次施加的压力增量依次为 25，25，50，-25 kPa，均在前一次改变稳定后的基础上增加或减少。前 3 次压力增量为正，第 4 次压力增量为负，如此进一步扩大了验证条件。在每级压力下稳定后，同时记录量测体变、排水量等变化情况。需要注意的是，围压每次增

加或减少对加荷器提供的偏应力值是有影响的，例如围压增加时，由围压对压力室活塞产生的推力增大，这会使加荷器提供的偏应力值减小，应根据总围压增加或减小值调整加荷器提供的推力的大小，使偏应力值保持不变。

固结过程稳定标准为：在 2 h 内，试样体积和排水量变化分别小于 0.001，0.0063 cm<sup>3</sup>。围压、孔隙水压力和孔隙气压力每次改变后共历时 2160 min，期间每隔 360 min 记录一次体积和排水量变化。这样每个试验耗时 9~10 d。

（2）第二类验证试验的方案

第二类验证试验共做了 3 组控制净围压和基质吸力等于常数的固结排水剪切试验。在排水剪切试验中，试样的孔隙水压力等于零，施加的气压力就等于基质吸力。每组试验包括 2 个土样，总共 6 个试验。土样编号及初始条件见表 3。由表 3 可知第 7~9 组试验的固结净围压都为 50 kPa，固结吸力分别为 100，200，300 kPa，且 3 组土样的初始物理指标都相同。

表 3 第二类试验土样的初始物理指标及固结净围压和吸力

Table 3 Initial conditions of samples of second type of tests

组号	编号	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和度 /%	净围压 /kPa	吸力 /kPa
7	7a	1.65	67.2	50	100
	7b	1.65	67.2	50	100
8	8a	1.65	67.2	50	200
	8b	1.65	67.2	50	200
9	9a	1.65	67.2	50	300
	9b	1.65	67.2	50	300

注：3 组均为重塑 Q<sub>3</sub> 黄土土样；试样的相对密度均为 2.7

试验分两个阶段。每组土样先在 50 kPa 的净围压和一定的吸力下排水固结，3 组试验固结吸力不同，分别为 100，200，300 kPa，以反映初始吸力的影响。待固结完成后，记录试样体积和排水量，作为后续试验的基准，然后关闭排水阀，打开控制反压的压力体积控制器的阀门；每组中 a 土样直接进行排水剪切试验，b 土样在固结完成后同步等值改变总围压、孔隙水压力和孔隙气压力（各增加 50 kPa），从而使净总应力、基质吸力保持不变，待体变和排水基本稳定后再进行排水剪切试验。每个试验的剪切速率均选择 0.0067 mm/min，同时记录量测体变、排水量、轴向应变等变化情况，直至破坏。由于在剪切过程中的剪切速率相同，并且剪切过程中孔隙气压力和孔隙水压力是恒定的，因此剪切过程中同组的两个土样的应力状态可近似视为时时相等的。这样就可以对比相同初始条件的土样，在不改变应力状态变量的前提下的剪切强度以及剪切过程中的体变、广义剪应变、偏应力 -

轴向应变曲线和水量变化情况是否一样, 从变形、水量变化和抗剪强度三方面进行验证。

2 试验结果与分析

2.1 第一类验证试验的结果与分析

第 5, 6 组土样体积和含水率变化结果如表 4, 5、图 5, 6 所示。需要指出的是, 由于本试验中土样体积变化和含水率变化非常小, 文中图和表中的体积变化和含水率变化数据均用千分数表示。应力各分量在每一次改变后的体积变化和含水率变化分别等于本次体积改变量除以固结后的土样体积和本次含水率改变量。由表 4, 5 和图 5, 6 可知, 对于重塑土样, 不同初始偏应力或者初始吸力的土样, 体积变化和含水率变化均在 0 附近上下浮动, 体积变化浮动范围为  $-1.09‰\sim0.50‰$ , 含水率变化范围为  $-0.77‰\sim0.22‰$ , 可见浮动范围相当小, 可以忽略。其中正值表示土样体积或含水率增加, 负值表示土样体积或含水率减小。

表 6 给出了第 5, 6 组试样在偏压固结过程中的体应变。各试样在应力改变过程中的体变浮动最大值(由表 4 得到)亦列于表 6 中。从该表第 4 行可见, 各试样的体变浮动值与其固结体应变的比值都不超过 2%。因此, 试样的体变浮动值是可以忽略的。

表 4 第 5, 6 组土样的体积变化情况

Table 4 Volume changes of groups 5 and 6 (‰)								
编 号	第 1 次各增加		第 2 次各增加		第 3 次各增加		第 4 次各减少	
	25 kPa		25 kPa		50 kPa		25 kPa	
	即刻	结束	即刻	结束	即刻	结束	即刻	结束
5a	0.03	-0.55	0.01	-0.35	-0.04	-0.59	0.08	-0.40
5b	-0.12	-0.52	-0.12	-0.77	-0.11	0.36	-0.02	0.50
6a	-0.02	-0.69	0.05	-0.75	-0.18	-0.97	0.16	-0.29
6b	-0.10	-1.01	-0.12	-0.92	-0.29	-1.09	0.11	-0.62

表 5 第 5, 6 组土样的含水率变化情况

Table 5 Moisture changes of groups 5 and 6 (‰)								
编 号	第 1 次各增加		第 2 次各增加		第 3 次各增加		第 4 次各减少	
	25 kPa		25 kPa		50 kPa		25 kPa	
	即刻	结束	即刻	结束	即刻	结束	即刻	结束
5a	0.22	-0.15	0.10	-0.13	0.14	-0.31	0.01	-0.35
5b	0.01	-0.58	0.17	-0.59	0.14	-0.74	0.01	-0.26
6a	0.06	-0.77	0.21	-0.31	0.17	-0.14	0.17	-0.42
6b	0.08	-0.24	0.08	-0.45	0.12	-0.36	-0.07	-0.34

由此可知, 对具有不同净围压、偏应力和初始吸力的土样, 在仅改变应力状态变量的个别组成部分而保持两个应力状态变量不变时, 所有土样的体积和水分均不发生变化。换言之, 在球应力、偏应力和吸力

共同作用下, 不同起始条件的土可用非饱和土的两个应力状态变量描述其应力状态。

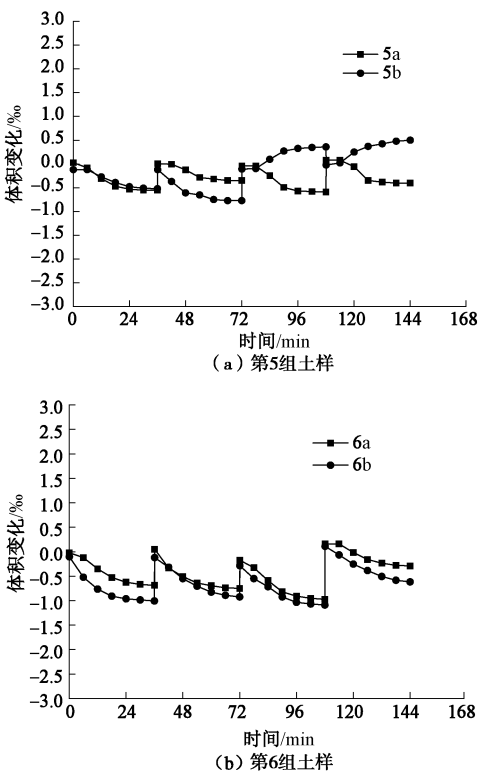


图 5 第 5, 6 组土样的体积变化情况

Fig. 5 Volume changes of groups 5 and 6

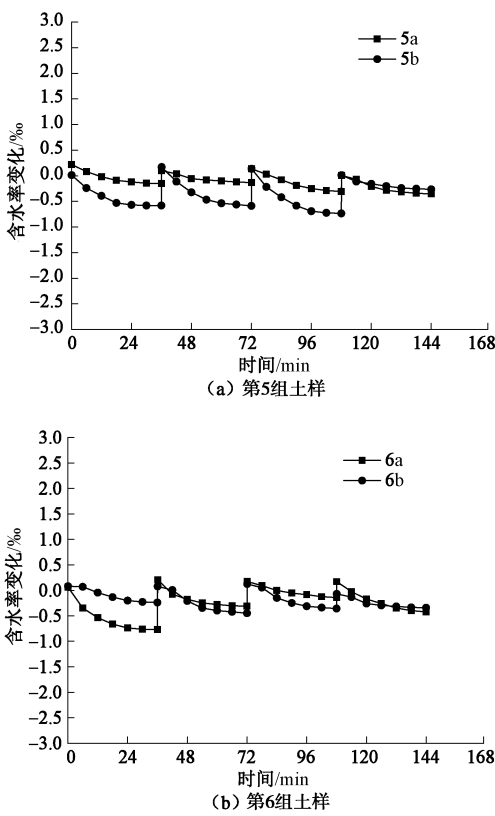


图 6 第 5, 6 组土样的含水率变化情况

Fig. 6 Moisture changes of groups 5 and 6

表 6 第一类试验的偏压固结体应变

Table 6 Volumetric strains of samples of first type of tests			
试样 编号	固结体 应变/%	体应变浮动最 大值/‰	体变浮动值/固结 体变/%
5a	3.06	-0.59	1.93
5b	4.12	-0.77	1.87
6a	4.84	-0.97	2.00
6b	5.46	-1.09	2.00

2.2 第二类验证试验的结果与分析

对第二类试验结果分别从体变 - 轴向应变关系、排水量 - 轴向应变关系、偏应力 - 轴向应变关系和强度进行分析,分述如下。

(1) 体变 - 轴向应变关系结果与分析

每组的两个土样剪切过程与破坏时的体变 - 轴向应变关系对比结果如图 7 和表 7 所示。排水剪切过程进行到一定阶段,土样均发生不同程度的剪胀,这与土样干密度较大和所受净围压较小有关。

由图 7 和表 7 可知,每组的两个土样的体变 - 轴向应变关系曲线比较接近。破坏时第 9 组的两个土样的轴向应变相差值及体变相差值最小,分别为 0.01% 和 0.07%。第 8 组两个土样破坏时轴向应变相差值及体变相差值最大,分别为 0.51% 和 0.53%。剪切过程和破坏时每组的两个土样体变十分接近,可认为相等。由此可知相同初始条件下的土样,在不改变应力状态变量本身,只改变应力状态变量的个别组成部分,其剪切过程和破坏时的体变和轴向应变相等。

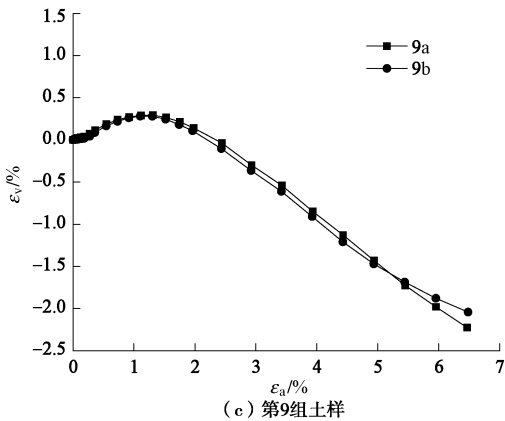
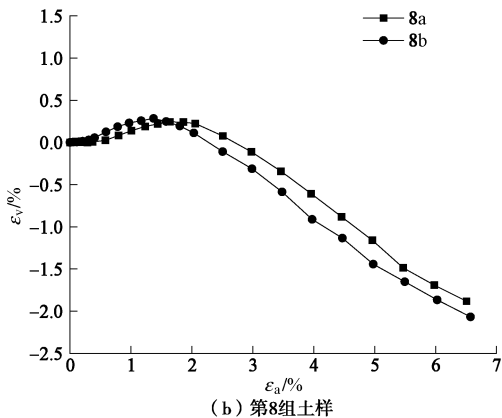
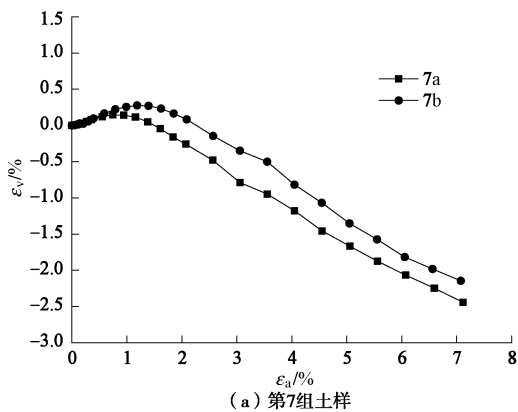


图 7 第 7~9 组土样  $\varepsilon_v - \varepsilon_a$  关系  
Fig. 7  $\varepsilon_v - \varepsilon_a$  curves of group 7, 8 and 9

表 7 第 7~9 组土样破坏时  $\varepsilon_v$  和  $\varepsilon_a$

Table 7 Values of $\varepsilon_v$ and $\varepsilon_a$ of groups 7, 8 and 9 at failure				
编号	破坏时 $\varepsilon_a$ /‰	破坏时 $\varepsilon_a$ 相差值/%	破坏时 $\varepsilon_v$ 相差值/%	破坏时 $\varepsilon_v$ 相 差值/%
7a	4.05	0.50	-1.18	0.11
7b	4.55		-1.07	
8a	3.96	0.51	-0.61	0.53
8b	4.47		-1.13	
9a	3.43	0.01	-0.54	0.07
9b	3.42		-0.61	

对三轴试验而言,广义剪应变  $\bar{\varepsilon}$  与轴向应变  $\varepsilon_a$ 、径向应变  $\varepsilon_r$  及体应变  $\varepsilon_v$  有如下关系:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r) = \varepsilon_a - \frac{1}{3}\varepsilon_v \quad (1)$$

第 7~9 组土样  $\bar{\varepsilon} - \varepsilon_a$  关系曲线如图 8 和表 8 所示。由图 8 和表 8 可知,同一组试验的两个土样的广义剪应变是很接近的。换言之,两个土样不仅体应变可视为相同,而且剪应变也认为是相同的。

(2) 排水量 - 轴向应变关系结果与分析

每组的两个土样破坏时体变 - 轴向应变关系对比结果如图 9 和表 9 所示。由图 9 和表 9 可知,排水剪切过程进行到一定阶段,土样的排水速率均发生明显转折,且转折点均为土样开始发生剪胀时间。每组的两个土样的排水量 - 轴向应变关系曲线十分接近。破坏时两个土样排水量相差值最小的为第 7 组,相差值为 0.002 cm<sup>3</sup>。最大的为第 9 组,相差值为 0.014 cm<sup>3</sup>。破坏时每组两个土样的排水量十分接近,可认为相等。由此可知相同初始条件下的土样,在不改变应力状态变量本身,只改变应力状态变量的个别组成部分,其剪切过程和破坏时的排水量相等。

(3) 偏应力 - 轴向应变关系结果与分析

试验结束后,土样均发生脆性破坏。试验控制的净围压相对较小,并且试样干密度相对较大,这是发生脆性破坏原因。



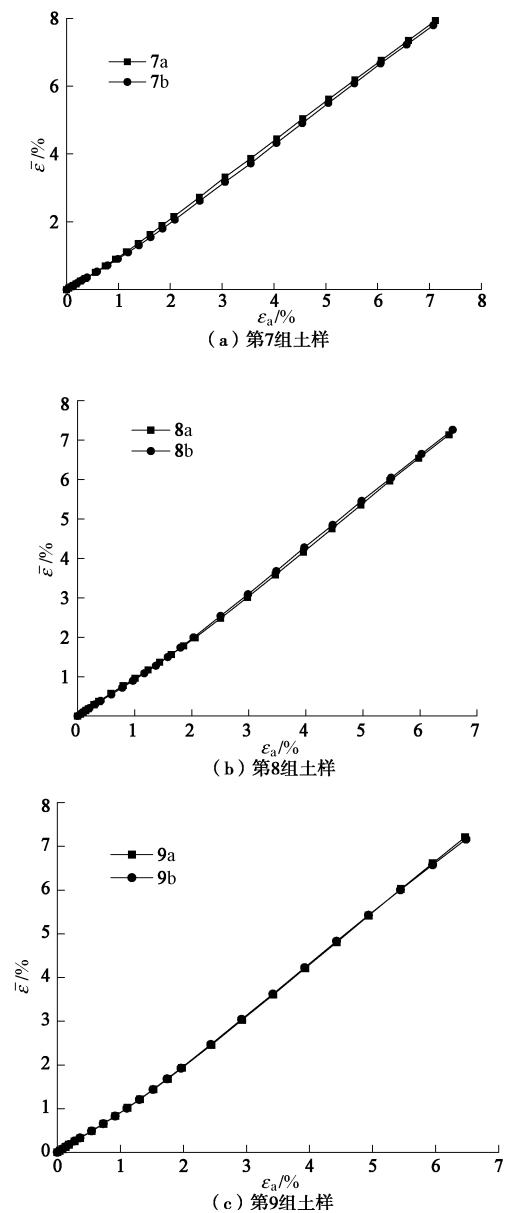


图 8 第 7~9 组土样  $\bar{\varepsilon}$  -  $\varepsilon_a$  关系

Fig. 8  $\bar{\varepsilon}$  -  $\varepsilon_a$  curves of group 7, 8 and 9

表 8 第 7~9 组土样破坏时  $\bar{\varepsilon}$  和  $\varepsilon_a$

Table 8 Values of $\bar{\varepsilon}$ and $\varepsilon_a$ of groups 7, 8 and 9 at failure				
编号	破坏时 $\varepsilon_a$ /%	破坏时 $\varepsilon_a$ 相差 值/%	破坏 时 $\bar{\varepsilon}$ /%	破坏时 $\bar{\varepsilon}$ 相 差值/%
7a	4.05	0.50	4.45	0.45
7b	4.55		4.90	
8a	3.96	0.51	4.16	0.69
8b	4.47		4.85	
9a	3.43	0.01	3.61	0.01
9b	3.42		3.62	

每组的两个土样破坏时偏应力值对比结果如图 10 和表 10 所示。由图 10 和表 10 可知, 同一组土样的两个土样的偏应力 - 轴向应变曲线相当接近。在净法向应力相同时, 在试验吸力范围内土样剪切强度随

着吸力的增大而增大, 第 7 组土样抗剪切强度均较小, 第 9 组土样抗剪切强度最大; 对于每组的两个土样, 相差最大的一组土样在破坏时的偏应力相差值为 16.448 kPa, 最小的一组土样偏应力相差值为 5.257 kPa, 剪切强度十分接近, 可认为相等。由此可知, 相同初始条件下的土样, 在不改变应力状态变量本身、只改变应力状态变量的个别组成部分时, 其剪切强度值不发生变化。

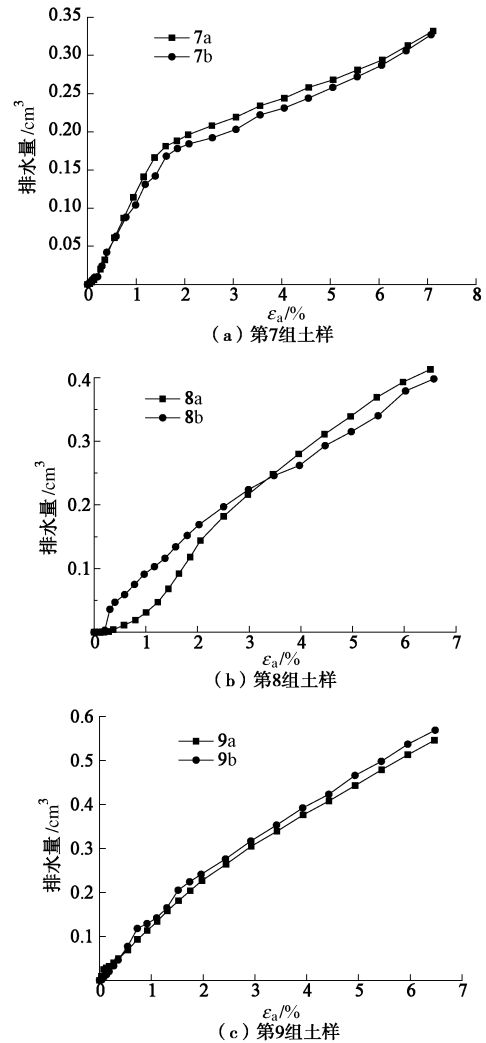


图 9 第 7~9 组土样排水量 - 轴向应变关系

Fig. 9 Water volume-axial strain curves of groups 7, 8 and 9

表 9 第 7~9 组土样破坏时的排水量

Table 9 Values of water volumes of groups 7, 8 and 9 at failure				
编号	破坏时 $\varepsilon_a$ /%	破坏时 $\varepsilon_a$ 相差 值/%	破坏时排水量 /cm <sup>3</sup>	破坏时排水 量相差值/cm <sup>3</sup>
7a	4.05	0.50	0.244	0.002
7b	4.55		0.246	
8a	3.96	0.51	0.280	0.013
8b	4.47		0.293	
9a	3.43	0.01	0.339	0.014
9b	3.42		0.353	

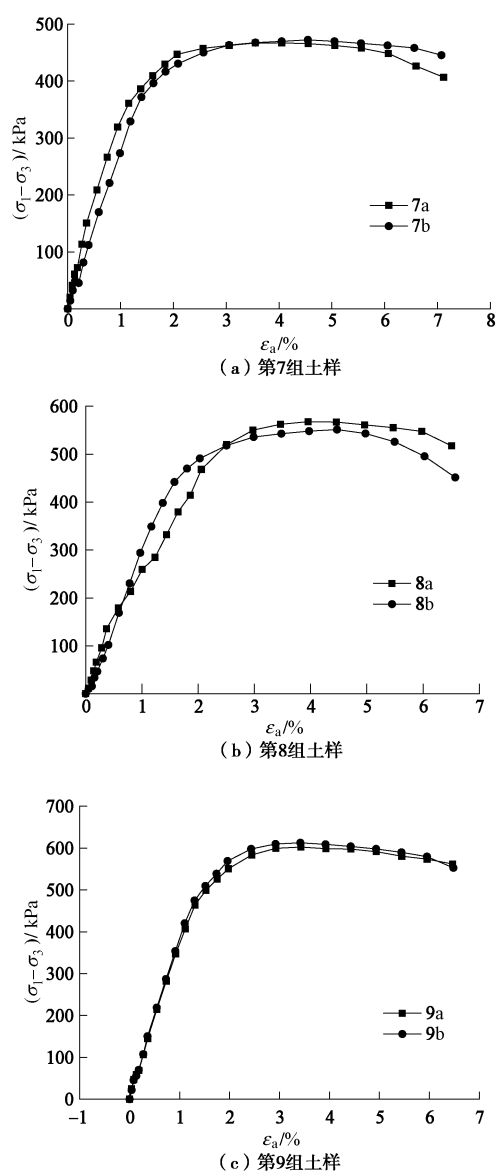


图 10 第 7~9 组土样 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$  关系

Fig. 10  $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$  curves of each group of samples

表 10 第 7~9 组土样破坏时偏应力值

Table 10 Values of deviator stress at failure

组号	编号	最大值 /kPa	相差值/kPa	抗剪强度平均值 /kPa
7	7a	467.12	5.26	469.75
	7b	472.38		
8	8a	567.77	16.45	559.55
	8b	551.32		
9	9a	602.40	10.29	607.55
	9b	612.69		

4 结 论

(1) 2 组重塑黄土的控制净围压、吸力和偏应力的固结不排水剪切试验表明, 对具有不同净围压、偏

应力和初始吸力的土样, 在仅改变应力状态变量的个别组成部分而保持两个应力状态变量不变时, 所有土样的体积和水分均不发生变化。换言之, 在球应力、偏应力和吸力共同作用下, 不同起始条件的土可用非饱和土的两个应力状态变量描述其应力状态。

(2) 3 组重塑黄土的固结排水剪切试验表明, 对于初始条件相同两个的土样, 在仅改变应力状态变量的个别组成部分而保持两个应力状态变量不变时, 抗剪强度、剪切过程中的体积变化和排水量及偏应力-轴应变曲线都分别十分接近, 广义剪应变很接近, 可以认为两两相等。换言之, 相同物理指标且应力状态变量相同的土体具有相同的抗剪强度, 且剪切过程中的体变、水量变化及广义剪应变均相同。

本文的研究结果从变形(包括体变和剪应变)、水量变化和强度 3 个方面说明描述非饱和土的两个应力状态变量是合理的, 进一步夯实了非饱和土力学的应力理论基础, 为非饱和土的两个应力状态变量理论提供了牢靠的试验依据。

参考文献:

[1] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, **106**(39): 859 - 863.

[2] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1977, **103**(GT5): 447 - 466.

[3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and SonsInc, 1993.

[4] 陈正汉. 非饱和土的应力状态和应力状态变量[C]// 第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 186 - 191. (CHEN Zheng-han. Stress state and stress state variables of unsaturated soil[C]// Proceedings of 7th Chinese Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994: 186 - 191. (in Chinese))

[5] TARANTINO A, MONGIOVŌA L, BOSCO G. An experimental investigation on the independent isotropic stress variables for unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 275 - 282.

[6] BOLZON G, SCHREFLER B A, ZIENKIWICZ O C. Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states[J]. Géotechnique, 1996, **46**(2): 279 - 289.

[7] LU N. Is matric suction stress variables[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, **134**(7): 899 - 905.

- [8] HOULSBY G T. The work input to a granular material[J]. Géotechnique, 1979, **29**(3): 354 - 358.
- [9] HOULSBY G T. Editorial[J]. Géotechnique, 2004, **54**(10): 416.
- [10] LI X S. Thermodynamics-based constitutive framework for unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2007, **57**(5): 411 - 422.
- [11] ZHAO C G, LIU Y, GAO F P. Work and energy equations and the principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, **34**: 920 - 936.
- [12] 赵成刚, 蔡国庆. 非饱和土广义有效应力原理[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3232 - 3236. (ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing. Principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3232 - 3236. (in Chinese))
- [13] 陈正汉, 秦 冰. 非饱和土的应力状态变量研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 1 - 11. (CHEN Zheng-han, QIN Bing. On stress state variables of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [14] 张 龙, 陈正汉, 周凤玺, 等. 非饱和土应力状态变量试验验证研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 380 - 384. (ZHANG Long, CHEN Zheng-han, ZHOU Feng-xi, et al. On the test verification of stress state variables of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 380 - 384. (in Chinese))

### 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)