

DOI: 10.11779/CJGE2022S1014

横观各向同性非饱和黄土的真三轴试验研究

郭 楠¹, 陈正汉^{1,2}, 杨校辉^{*1}, 高登辉³

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311; 3. 黄淮学院建筑工程学院, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了研究复杂应力路径下横观各向同性非饱和黄土的力学特性, 采用真三轴仪对横观各向同性非饱和重塑黄土进行了两组共 15 个剪切试验。第一组 9 个试验, 每个试验包括两个阶段, 即试样先在竖向压力为常数的条件下进行 K_0 预固结, 再进行控制吸力、净围压和中主应力参数 b 为常数的真三轴固结排水剪切试验; 第二组 6 个试验, 为不同剪切速率下, 控制吸力、净围压和中主应力参数 b 为常数的真三轴固结不排水剪切试验。试验结果表明: 真三轴固结排水剪切试验中各应力-应变曲线皆为硬化型, 且满足双曲线形式, b 值越大试样的硬化趋势越明显; 所有的试样在剪切过程中均处于剪缩状态, 随着剪切的发展试样的含水率不断减小, 试样破坏前含水率-轴向应变关系可近似为直线。真三轴固结不排水剪切试验中, 加载速率对应力-应变曲线的基本形态并没有多大影响, 但是对试样的刚度有一定影响, 该影响效应也不是单调的, 有可能存在临界速率; 试样在剪切过程中体积不断缩小, 饱和度随着偏应力的增大而增大, 故孔隙水压力增大, 吸力不断减小。本文的研究成果可为横观各向同性非饱和黄土的本构模型及强度准则的建立及工程应用提供有益的参考。

关键词: 横观各向同性; 非饱和黄土; 真三轴试验; 基质吸力

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0074-06

作者简介: 郭 楠(1987—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学及地基处理等方面的教学和科研工作。E-mail: 355094754@qq.com。

True triaxial tests on transversely isotropic unsaturated loess

GUO Nan¹, CHEN Zheng-han^{1,2}, YANG Xiao-hui¹, GAO Deng-hui³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Military Installation, Army Service University, Chongqing 401311, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of transversely isotropic unsaturated remolded loess under complex stress paths, two groups of 15 tests are carried out using the true triaxial apparatus. The first group consists of 9 tests, each of which includes two stages: the sample is pre-consolidated by K_0 under the constant vertical pressure, and then the true triaxial consolidated drained shear tests with the constant suction, net confining pressure and intermediate principal stress parameter are carried out. The second group of 6 tests are the true triaxial shear ones with the constant water content under different shear rates and the constant suction, net confining pressure and intermedium principal stress parameter. The test results show that all the stress-strain curves in the true triaxial consolidated drained shear tests are hardening type and in hyperbolic form, and the hardening trend is more obvious with the increase of the intermedium principal stress parameter. All the samples are in shear contraction state during the shearing process, and the water content of the samples decreases with the shearing process. The water content-axial strain relationship curve of the samples before failure can be approximated as a straight line. In the true triaxial shear tests with the constant water content, the loading rate has few effects on the basic form of the stress-strain curve, but has certain effects on the stiffness of the samples, which are not monotonous, so there may be a critical rate. In the shear process, the volume of the samples decreases continuously, and the saturation increases with the increase of the deviatoric stress, so the pore water pressure increases and the suction decreases continuously. The research results may provide useful reference for the establishment of constitutive model and strength criterion for the transversely isotropic unsaturated loess and its engineering application.

Key words: transverse isotropy; unsaturated loess; true triaxial test; matrix suction

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168051, 11672330); 甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RA200, 20JR5RA434); 甘肃省高校创新基金项目(2020A-031); 甘肃省住房和城乡建设厅科研项目(JK2021-55); 河南省科技攻关项目(212102310938); 河南省高等学校重点科研项目(22B560010)
收稿日期: 2022-09-22
*通信作者(E-mail: yxhui86@126.com)

0 引言

随着西部大开发战略、城镇化战略和“一带一路”战略的实施, 工程建设中遇到的非饱和土与特殊土的种类和问题急剧增加, 研究方法多种多样^[1]。横观各向同性非饱和土在国内外广泛分布, 例如天然沉积形成的成层地基和机场、大坝等分层填筑的填土工程, 都具有横观各向同性特性^[2]。郭楠等^[3-4]和陈天宇等^[5]的一系列横观各向同性岩土材料的试验研究均表明, 各向异性的影响不容忽视。研究土的横观各向同性必须综合考虑材料横观各向同性的影响、应力大小和应力方向的影响, 主要研究方法包括组构张量法^[6]、微观结构张量法^[7]和主应力空间坐标旋转法^[8]等。

天然地基土和填土大都处于非饱和状态, 针对横观各向同性非饱和土的研究目前较少^[2-4], 且相关试验结果均是通过常规三轴试验得到的, 但是, 常规三轴仪的中主应力(σ_2)和小主应力(σ_3)是相等的, 很难反应出土体在复杂应力条件下的应力状态。目前, 已有不少学者利用真三轴仪来研究土体的应力应变特性^[9]。如方瑾瑾等^[10]利用真三轴仪, 研究了真三轴压缩条件下非饱和黄土的有效应力屈服变化规律。杨康康等^[11]利用真三轴仪对德州地区粉质黏土进行不同围压和中主应力系数 b 条件下的不排水剪切试验, 研究了应力和孔压曲线变化规律、抗剪强度、主应变等。姜景山等^[12]应用大型真三轴仪对常规三轴应力状态、平面应变应力状态和真三轴应力状态下粗粒料的力学特性进行了压缩试验研究。但这些研究大都没有考虑基质吸力的影响, 且均未考虑土体的横观各向同性特性。

为了研究复杂应力条件下横观各向同性非饱和土体的力学特性, 本文采用西安理工大学邵生俊教授研发改装的真三轴仪, 对横观各向同性黄土进行研究。西安理工大学研制的新型真三轴仪具有一室四腔、竖向和水平面内正交两向分别呈刚性和柔性加载机构的特征, 试样的竖向采用刚性板加载, 侧向正交双轴分别采用两组内置于压力腔的液压囊加载^[13]。

1 真三轴条件下横观各向同性非饱和黄土的固结排水剪切试验

1.1 试验方案及过程

试验用土取自延安新区工地现场, 为 Q₃ 重塑黄土, 该土的基本物理性质见表 1^[4]。

重塑试样按照 1.51 g/cm³ 的干密度、18.6% 的含水率进行制样。

表 1 土样的基本物理指标

Table 1 Physical parameters of soil samples

相对质量密度 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{op}/\%$
2.71	17.3	31.1	1.91	12.5

试验包括 K_0 预固结及真三轴排水剪切两个阶段。控制试样的吸力为 100 kPa, 净围压分别为 100, 200, 300 kPa, 中主应力参数 b 值分别为 0.25, 0.5, 0.75, 共计 9 个试样。 K_0 预固结阶段固结稳定的标准如下: 在 2 h 内, 试样的竖向位移小于 0.01 mm, 排水量小于 0.01 mL, 试验设定剪切速率为 0.015 mm/min (该仪器目前所能达到的最小速率), 设定轴向应变达到 15% 为试验结束条件。



图 1 大尺寸横观各向同性试样的 K_0 预固结

Fig. 1 K_0 -preconsolidation of large-scale transversely isotropic samples



图 2 横观各向同性试样的削样及真三轴试验过程

Fig. 2 Sample cutting and true triaxial tests

试验所用试样为 70 mm × 70 mm × 140 mm 的立方体, 横观各向同性非饱和土真三轴试样的制样基本过程如下: ①配制含水率为 18.6% 的 Q₃ 重塑黄土, 按 1.51 g/cm³ 的干密度计算所需湿土的质量, 将所需土样平均分为 10 份放入制样模具中(自行设计加工的内径 101 mm, 高 200 mm 的大尺寸制样模具), 在压样设备上将重塑黄土按 10 层均匀压实, 各层间接触处必须刮毛; ②将制备好的圆柱试样放入图 1 所示的大型压力室中, 并用侧壁光滑的两瓣模及两个钢环将它固定在大型压力室的底座上, 用真三轴仪对试样进行 K_0 预固结, 固结过程中试样的轴向荷载控制为 200 kPa, 两瓣模及两个钢环可严格限制试样的径向位移不变; ③ K_0 预固结结束后取出试样, 首先将圆柱样大致削成

立方体形状, 然后在削样器上削成 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ 的标准真三轴试样; ④将削好的试样立即装在真三轴仪上进行试验(见图 2), 以免水分散失。

横观各向同性非饱和土的真三轴试验对装样要求如下: ①试验开始前必须首先饱和陶土板, 保证陶土板在试验过程中过水不过气; ②将充分饱和后的陶土板立刻放入橡皮膜底部, 橡皮膜与陶土板间放有柔性垫片(保证橡皮膜与陶土板之间充分接触, 不会发生漏气现象), 用螺丝把陶土板紧紧地固定在压力室底座上; ③用立方体状的铁皮桶将橡皮膜撑开, 轻轻地塞入试样, 试样顶端依次放置多孔板(使气压力均匀施加到试样上)、柔性垫片(保证橡皮膜与试样帽之间充分接触, 不会发生漏气现象)及试样帽, 用螺丝将多孔板、柔性垫片、橡皮膜顶面及试样帽紧紧固定, 以免漏气; ④安装压力室侧壁, 放入柔性液压囊, 固定压力室顶盖; ⑤安装竖向位移传感器。装样过程需准确、细致且快速, 若耗时太长会导致试样吸收底部陶土板的水分, 而使得陶土板重新处于非饱和状态, 造成较大试验误差^[4]。

1.2 试验结果分析

图 3 为不同净围压和不同 b 值条件下偏应力-轴向应变和体应变-轴向应变关系曲线。由图 3 可以看出, 不同 b 值下的各应力-应变曲线皆为应变硬化型, 且满足双曲线形式。与常规重塑试样一样, 当 b 值一定时, 净围压($\sigma_3 - u_a$)越大横观各向同性真三轴试样的硬化趋势越明显, 相同净围压下, b 值越大试样的偏应力越大, 硬化趋势越明显。 $b=0.5$ 和净围压为 300 kPa 的试样以及 $b=0.75$ 和净围压为 100, 200, 300 kPa 的试样均未达到剪切破坏标准(轴向应变为 15%)就已破坏。这是由于剪切过程中 b 值越大, σ_2 方向的应力增长得越快, 而柔性液压囊的承受力有限, 往往 σ_2 方向的应力达到 830 kPa 左右甚至更小时, 该方向的液压囊便会被水压涨破, σ_2 迅速较小至 0 kPa, 试验被迫停止。

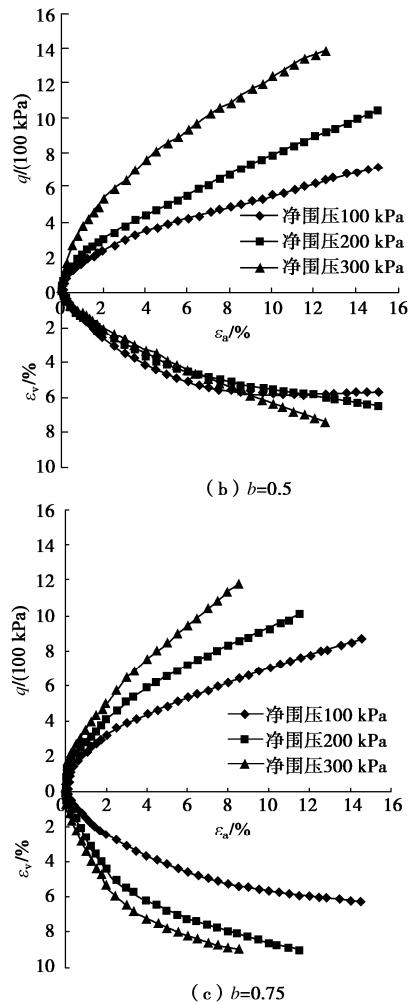
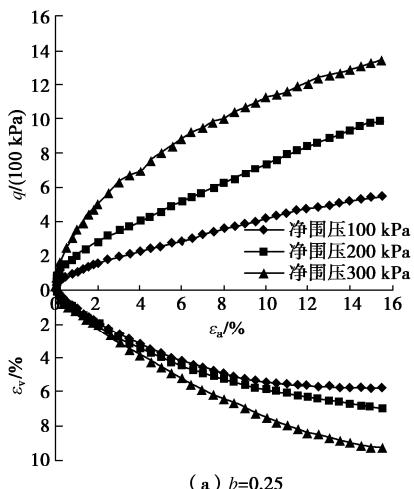


图 3 真三轴固结排水剪切试验 $q - \varepsilon_a$ 及 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 关系曲线

Fig. 3 $q - \varepsilon_a$ and $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ curves of true triaxial consolidated drained shear tests

由图 3 可知, 所有的试样在剪切过程中均处于剪缩状态。除 $b=0.5$ 的试样, 其余试样的体应变-轴向应变关系曲线变化较为规律, 净围压越大试样的体应变越大, $b=0.75$ 时, 净围压对试样体应变的影响更为显著。 $b=0.5$ 时的 3 个试样的体应变-轴向应变关系曲线存在交叉现象, 轴向应变达到 9% 之前, 各试样的体应变相差不大, 曲线几乎重合, 轴向应变超过 10% 后, 净围压 100 kPa 试样的体应变逐渐较小, 剪缩趋势略有减弱, 净围压 300 kPa 试样的体应变增长较快, 但由于液压囊破坏, 未能测得试样破坏时的体应变。相同净围压下, 并非 b 值越大试样的体应变越大。这主要是由试样在 σ_2 , σ_3 两个方向的体积变化不均匀导致的, 当 b 值较大时试样 σ_2 方向的两个对立面往往被压得凹进去, 而 σ_3 方向的两个对立面却被挤得凸出来, 不过试样整体还是处于体缩状态。

图 4 是同一吸力下(100 kPa), 不同净围压和不同 b 值条件下的含水率-轴向应变关系曲线。由图 4 可知, 排水剪切过程中, 试样含水率的变化较为规律,

试样的含水率在剪切过程中不断减小, 试样破坏前含水率-轴向应变关系可用直线近似拟合。相同 b 值下, 净围压为 100 kPa 和 200 kPa 的试样含水率-轴向应变关系线的斜率相似, 均略小于净围压为 300 kPa 时试样的相应斜率, 说明净围压增大有助于试样内水分的排出。但总体上, 不同净围压下各曲线斜率相差不大, 有可能与剪切速率较快有关, 剪切速率较快时, 试样中的水分来不及充分排出。

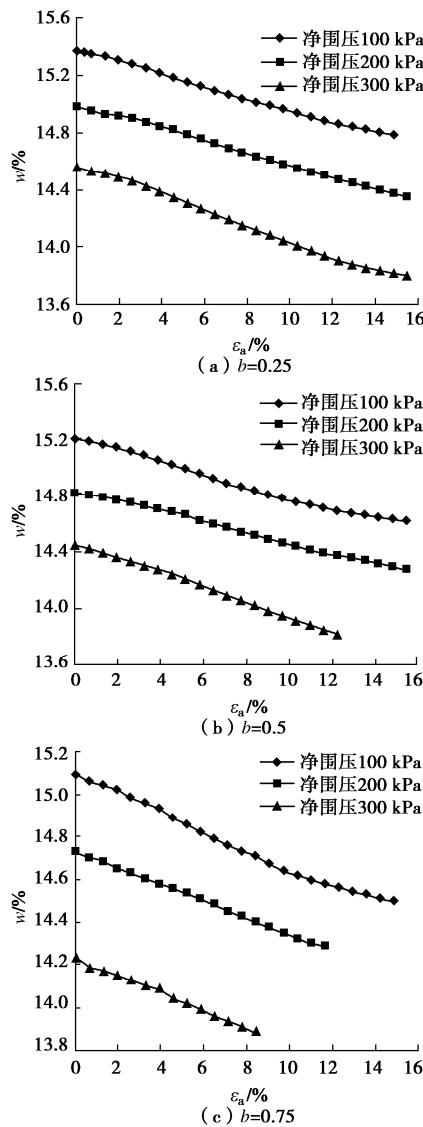


图 4 真三轴试样 w - ε_a 关系曲线

Fig. 4 w - ε_a curves of true triaxial samples

2 真三轴条件下横观各向同性非饱和黄土的固结不排水剪切试验

应变速率是影响土体强度特性指标的主要因素之一^[14-16], 为了研究不同的加载速率对横观各向同性非饱和土体的影响, 本节进行了 6 个真三轴固结不排水剪切试验。试验用土仍为延安新区工地现场的 Q₃ 重塑

黄土, 重塑试样按照 1.51 g/cm³ 的干密度、18.6% 的含水率进行制样。控制气压力为 100 kPa, 净围压为 100 kPa, b 值分别为 0.25, 0.5 (为保证液压囊不被涨破, 气压力、净围压、 b 值均取较小值), 速率分别为 0.015, 0.03, 0.05 mm/min。设定轴向应变达到 15% 为试验结束条件。

图 5 为不同加载速率下试样的偏应力-轴向应变关系曲线和体应变-轴向应变关系曲线。对比图 3 (a), (b) 可以看出, 相同净围压、相同吸力、相同 b 值条件下, 排水剪切试验试样的偏应力均大于不同加载速率下不排水剪切试验试样的偏应力。

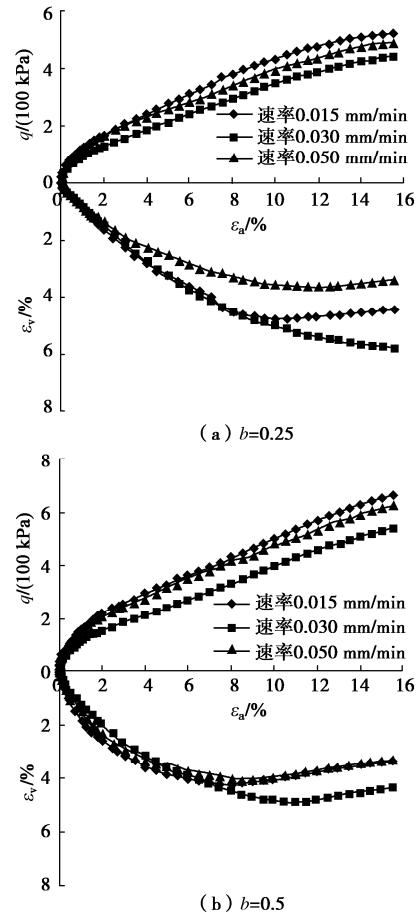


图 5 真三轴不排水试验的 q - ε_a 及 ε_v - ε_a 关系曲线

Fig. 5 q - ε_a and ε_v - ε_a curves of true triaxial undrained tests

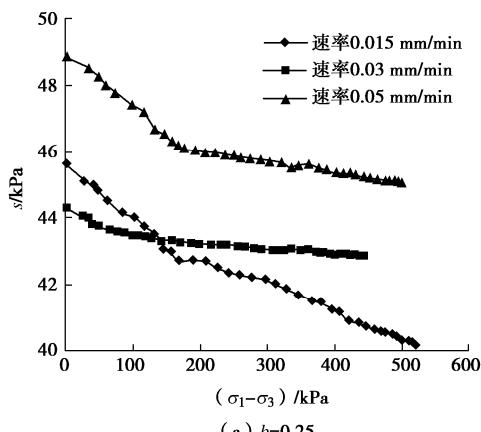
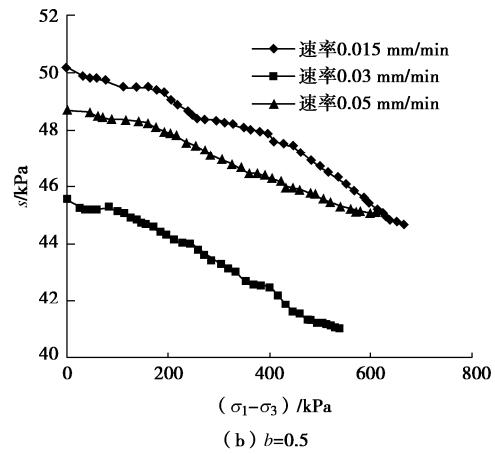
由图 5 可知, 不同加载速率下试样的偏应力-轴向应变整体的变化形态较为相似, 均表现出应变硬化特性, 没有峰值出现。剪切刚开始时, 不同加载速率的几条曲线存在交叉现象, 剪切过程中, 净围压和 b 值相同时, 加载速率为 0.015 mm/min 的试样偏应力最大, 加载速率为 0.03 mm/min 的试样偏应力最小, 加载速率为 0.05 mm/min 的试样偏应力介于中间。可见加载速率对曲线的基本形态并没有多大影响, 但是对试样的刚度有一定影响, 这种影响效应也不是单调的,

并非加载速率越小, 试样的偏应力越大, 而是有可能存在临界加载速率。

由图 5 还可以看出, 剪切过程中各试样均处于剪缩状态。除 $b=0.25$ 和加载速率为 0.03 mm/min 的试样外, 其余各试样的体应变-轴向应变关系曲线均存在峰值点。 $b=0.25$ 时, 加载速率为 0.03 mm/min 的试样体缩程度最大, 加载速率为 0.05 mm/min 的试样体缩程度最小, 加载速率为 0.015 mm/min 的试样介于两者之间。 $b=0.5$ 时, 不同加载速率下各试样的体应变不存在单调关系, 但剪切破坏时加载速率为 0.03 mm/min 的试样的体应变最大, 其他两试样在剪切破坏时的体应变几乎相等。

图 6 为相同净围压、不同加载速率下试样的吸力 s 与偏应力 q 之间的关系曲线。由图 6 可知, 随着偏应力的增大, 吸力均逐渐减小。由图 5 可知, 剪切过程中试样一直处于剪缩状态, 由于试样在真三轴剪切过程中体积不断缩小, 饱和度随着偏应力的增大而增大, 故孔隙水压力增大, 吸力不断减小。从图 6 可以看出, 真三轴条件下试样的初始吸力变化范围为 $44.2 \sim 50.1 \text{ kPa}$ 。 $b=0.25$ 时, 加载速率为 $0.015, 0.05 \text{ mm/min}$ 的试样的吸力-偏应力关系曲线发展形态略微相似。加载速率为 0.05 mm/min 的试样的吸力最大, 加载速率为 $0.015, 0.03 \text{ mm/min}$ 的两条曲线相交。 $b=0.5$ 时, 3 个加载速率下试样的吸力-偏应力关系曲线整体的变化形态也存在相似之处, 偏应力较小时吸力缓慢减小, 而后吸力减小速率有所加快。另外, 加载速率较快时, 孔隙水压力没有足够的时间分布均匀, 故不同的加载速率下, 试样的吸力变化没有很好的规律性。

综上可见, 剪切速率对不排水试验的应力-应变曲线和吸力演化的影响显著, 从试验采用的三个剪切速率尚不能选出一个对各方面都影响较小的合适速率, 这个问题有待今后进一步研究。

(a) $b=0.25$ 图 6 真三轴不排水试验的 $s - q$ 关系曲线Fig. 6 $s - q$ curves of true triaxial undrained tests

3 结 论

(1) 真三轴固结排水剪切试验中各应力-应变曲线皆为硬化型, 且满足双曲线形式, 当 b 值一定时, 净围压越大试样的硬化趋势越明显, 相同净围压下, b 值越大试样的硬化趋势越明显; 所有的试样在剪切过程中均处于剪缩状态, 同一 b 值下, 净围压越大试样的体应变越大; 随着剪切的发展试样的含水率不断减小, 试样破坏前轴向应变-含水率关系曲线可用直线近似拟合。

(2) 真三轴固结不排水剪切试验中, 加载速率对应力-应变曲线的基本形态并没有多大影响, 但是对试样的刚度有一定影响, 这种影响效应也不是单调的, 有可能存在临界加载速率。另外, 加载速率较快时, 孔隙水压力没有足够的时间分布均匀, 故不同的加载速率下, 试样的吸力变化虽略有相似之处, 但没有很好的规律性。

参 考 文 献:

- [1] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展 [J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54. (CHEN Zheng-han, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54. (in Chinese))
- [2] 郭楠, 陈正汉, 杨校辉, 等. 横观各向同性非饱和土的增量非线性本构模型及参数变化规律研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2283-2290. (GUO Nan, CHEN Zheng-han, YANG Xiao-hui, et al. Incremental nonlinear constitutive model and parameter variation of transversely isotropic unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2283-2290. (in Chinese))
- [3] 郭楠, 陈正汉, 杨校辉, 等. 各向同性土与横观各向同性

- 土的力学特性和持水特性[J]. 西南交通大学学报, 2019, **54**(6): 1235 – 1243. (GUO Nan, CHEN Zheng-han, YANG Xiao-hui, et al. Mechanical properties and water holding characteristics of initially isotropic soils and transversely isotropic soils[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, **54**(6): 1235 – 1243. (in Chinese))
- [4] 郭 楠. 非饱和土的增量非线性横观各向同性本构模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018. (GUO Nan. Study on incremental nonlinear transverse isotropic constitutive model of unsaturated soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [5] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(9): 1772 – 1779. (CHEN Tian-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(9): 1772 – 1779. (in Chinese))
- [6] GAO Z W, ZHAO J D, YAO Y P. A generalized anisotropic failure criterion for geomaterials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, **47**(22/23): 3166 – 3185.
- [7] LU D C, LIANG J Y, DU X L, et al. A novel transversely isotropic strength criterion for soils based on a mobilised plane approach[J]. Géotechnique, 2019, **69**(3): 234 – 250.
- [8] LADE P L, ABELEV A. Characterization of cross-anisotropic soil deposits from isotropic compression tests[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(5): 89 – 102.
- [9] 郑 方, 邵生俊, 张 博, 等. 控制吸力的非饱和土真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 33 – 36. (ZHENG Fang, SHAO Sheng-jun, ZHANG Bo, et al. True triaxial tests on unsaturated soils with suction-controlled condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 33 – 36. (in Chinese))
- [10] 方瑾瑾, 冯以鑫, 王立平, 等. 真三轴条件下非饱和黄土的有效应力屈服特性[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 492 – 500. (FANG Jin-jin, FENG Yi-xin, WANG Li-ping, et al. Effective stress yielding behavior of unsaturated loess under true triaxial conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 492 – 500. (in Chinese))
- [11] 杨康康, 柴寿喜, 王 沛, 等. 山东德州地区粉质黏土真三轴不排水抗剪性能[J]. 天津城建大学学报, 2021, **27**(4): 244 – 249. (YANG Kang-kang, CHAI Shou-xi, WANG Pei, et al. True triaxial shear properties under undrained conditions on silty clay of Dezhou of Shandong province[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2021, **27**(4): 244 – 249. (in Chinese))
- [12] 姜景山, 左永振, 程展林, 等. 应力状态对粗粒料力学特性影响的大型真三轴试验[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3563 – 3572. (JIANG Jing-shan, ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, et al. Effects of stress state on mechanical properties of coarse granular material using large-scale true triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3563 – 3572. (in Chinese))
- [13] 邵生俊, 许 萍, 邵 帅, 等. 一室四腔刚-柔加载机构真三轴仪的改进与强度试验: 西安理工大学真三轴仪[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1575 – 1582. (SHAO Sheng-jun, XU Ping, SHAO Shuai, et al. Improvement and strength testing of true tri-axial apparatus with one chamber and four cells and rigid-flexible-flexible loading boundary mechanism—True triaxial apparatus developed in Xi'an University of Technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(9): 1575 – 1582. (in Chinese))
- [14] 胡田飞, 刘建坤, 刘振亚, 等. 粉质黏土强度特性应变速率效应的试验研究[J]. 铁道学报, 2018, **40**(2): 132 – 140. (HU Tian-fei, LIU Jian-kun, LIU Zhen-ya, et al. Experimental study on strain rate effect of strength characteristics of silty clay[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, **40**(2): 132 – 140. (in Chinese))
- [15] 朱启银, 尹振宇, 朱俊高, 等. 软黏土加载速率效应特性试验研究: 进展与趋势[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 7 – 24. (ZHU Qi-yin, YIN Zhen-yu, ZHU Jun-gao, et al. Progress and trend of experimental investigation on rate-dependent behavior of soft clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 7 – 24. (in Chinese))
- [16] 彭芳乐, 李福林, 李建中, 等. 砂土应力 – 应变关系的加载速率效应分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 16 – 20. (PENG Fang-le, LI Fu-lin, LI Jian-zhong, et al. Loading rate effects on stress-strain relation of sandy soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 16 – 20. (in Chinese))

(编校: 明经平)