

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.073>



# 沉积深度对非饱和原状黄土压缩及湿陷特性的影响

许 领, 兰天刚, 陆世锋, 左 璐

西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西西安 710049

**摘 要:** 通过非饱和一维固结仪对比研究黑方台地区沉积深度为 10 m (HFT10 m) 和 30 m (HFT30 m) 原状黄土的持水特性、非饱和压缩特性及湿陷特性, 揭示应力历史和历史上的水文环境对原状黄土的持水特性、非饱和压缩特性和湿陷特性的影响机制。利用压汞实验和电镜扫描分别测试了原状黄土的孔径分布特征及颗粒排列方式, 便于为黄土持水曲线、压缩特性和湿陷特性的结果进行辅助分析。研究表明: HFT30 m 试样的进气值较 HFT10 m 试样的进气值大, 这可以用压汞实验的结果解释, HFT10 m 试样相对于 HFT30 m 试样具有更大的大孔隙峰值对应的孔隙尺寸。对于不同沉积深度试样的压缩性而言, 在相同的吸力下, HFT10 m 试样相对于 HFT30 m 试样有更低的塑性压缩系数。在吸力低于 100 kPa 时, HFT10 m 试样相对于 HFT30 m 试样有更低的屈服应力; 当吸力大于 100 kPa 时, HFT30 m 试样相对于 HFT10 m 试样有更高的屈服应力。黄土的压缩特性不仅与试样的上覆压力有关, 还与试样的基质吸力、饱和度和颗粒之间的胶结程度有关。在相同的基质吸力下, 其饱和度越大其结构更容易在应力的作用下屈服。对于不同沉积深度黄土的湿陷性试验结果表明黄土的湿陷系数随着轴向应力的增加而增加, 并且随着轴向应力的进一步增加, 湿陷系数有减小的趋势。在本研究给定的压力水平下 (1~1400 kPa), 在相同的轴向应力下, HFT10 m 试样相对比 HFT30 m 试样有更低的湿陷系数。上述结果表明, 黄土的水力特性、压缩特性和湿陷特性均会受到沉积深度及历史赋存环境的影响。

**关键词:** 沉积深度; 非饱和黄土; 压缩特性; 湿陷特性; 岩土工程。

中图分类号: TU 443

文章编号: 1000-2383(2026)02-375-11

收稿日期: 2024-02-29

## Effect of Sediment Depth on the Compression Behavior and Collapse Behavior of Intact Loess

Xu Ling, Lan Tiangang, Lu Shifeng, Zuo Lu

Department of Civil Engineering, School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

**Abstract:** Comparative study of the water retention behavior, unsaturated compression behavior and collapse behavior of the sediment depth of 10m and 30m intact loess deposited in the Heifangtai area. To investigate the effect of stress and hydraulic history on the water retention behavior, unsaturated compression behavior and collapse behavior. Mercury intrusion porosimeter (MIP) and scanning electron microscopy (SEM) were used to evaluate the microstructure of two different sediment loess. The result shows that the sample of HFT30 m has a greater air entry value than the sample of HFT10 m, this is because HFT30 m loess has a smaller dominated size for large pores than HFT10 m loess and hence exhibits a larger (air entry value, AEV). For the compression behavior, the HFT30 m loess has larger compression index than the HFT10 m. The yield stress increased with the

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (No. 41772316)。

**作者简介:** 许领 (1982-), 男, 教授, 主要从事黄土力学与灾害防治等方面的研究与教学工作。ORCID: 0000-0002-0952-7867. E-mail: xuling82@xjtu.edu.cn

\* **通讯作者:** 兰天刚, ORCID: 0000-0001-7838-3185. E-mail: tianganglans@163.com

**引用格式:** 许领, 兰天刚, 陆世锋, 左璐, 2026. 沉积深度对非饱和原状黄土压缩及湿陷特性的影响. 地球科学, 51(2): 375-385.

**Citation:** Xu Ling, Lan Tiangang, Lu Shifeng, Zuo Lu, 2026. Effect of Sediment Depth on the Compression Behavior and Collapse Behavior of Intact Loess. *Earth Science*, 51(2): 375-385.

increase of suction, however, the increased rate of yield stress decreased obviously with the further increase of suction. When the suction was larger than 100 kPa, the yield stress of HFT10 m was smaller than that of HFT30 m; however, with the suction decreasing to smaller than 100 kPa, an unexpected result is observed that the yield stress of HFT30 m was smaller than that of HFT10 m. Overall, the experiment results from compression tests on the two unsaturated loess samples with different depths demonstrated that the effect of suction, saturation and overburden pressure was of great significance to the compression behaviors of unsaturated intact loess. For the collapse behavior, both the HFT10 m loess and HFT30 m loess exhibit that the collapse volumetric strain increases with the increase of net vertical stress, and then decreases slightly with the increase of net vertical stress. Furthermore, the HFT10 m behaved a larger collapse volumetric strain under the same net vertical stress than HFT30 m loess.

**Key words:** sediment depth; unsaturated loess; compression behavior; collapse behavior; geotechnical engineering.

## 0 引言

研究不同沉积深度原状黄土的持水特性、压缩特性和湿陷性对黄土地区工程建设中水分入渗、沉降变形和湿陷变形的预测具有重要的作用(张龙等, 2018; 蔡国庆等, 2020; 张亚国, 2022; Lan *et al.*, 2023; 曾鹏等, 2023). 黄土处于干旱半干旱的地区, 所以大部分黄土都处于非饱和状态, 其亚稳态结构和架空结构依靠颗粒之间的胶结作用及吸力维持骨架的稳定(Jiang *et al.*, 2012, 2017; 陈正汉, 2014; Xu *et al.*, 2016, 2021). 而对于不同沉积深度的黄土, 首先其经历的应力历史不同, 导致其形成不同的孔隙比和孔隙结构且胶结程度也不同; 此外其历史上的水文环境也不同, 历史上的干湿循环过程以及水文环境也会影响黄土孔径分布及颗粒的胶结程度. 在大量的工程建设中, 涉及到不同沉积深度黄土, 其力学特性和持水特性也存在着明显差异(Mu *et al.*, 2022, 2023). 目前, 针对黄土的持水特性、压缩特性和湿陷特性, 国内外学者做了大量深入的研究. 然而, 这些研究大多数是针对单一深度的原状黄土或者不同孔隙结构的击实黄土和重塑黄土, 较少的将同一剖面不同沉积深度的原状黄土进行对比研究. 一方面, 将两种不同沉积深度的原状黄土进行对比研究, 可以加深对应力历史和历史上的水文环境对非饱和黄土的压缩特性、持水特性和湿陷特性影响的理解. 此外, 在工程建设中, 往往会遇到不同沉积深度的非饱和原状黄土, 且其持水特性、压缩特性及湿陷特性是否存在差异仍然不清晰.

针对黄土的压缩特性, 学者们主要通过一维压缩实验或非饱和等向压缩实验进行研究. 研究结果表明黄土的压缩性与其结构性、干密度和制样含水率等因素有关. 穆青翼等(2019)利用一维压缩实验

研究了不同初始含水量的原状黄土和击实黄土的压缩特性, 结果表明原状黄土和压实黄土在孔隙比与应力的半对数坐标系下压缩曲线均表现出明显的非线性. 原状黄土和击实黄土的屈服应力都随着含水量的降低迅速增大, 并且在相同的含水量下, 原状黄土有更大的屈服应力. 韦锋等(2015)利用控制吸力的非饱和土三轴仪进行了原状黄土和重塑黄土不同吸力下的等向压缩实验, 结果表明, 原状黄土与重塑黄土相比具有更大的压缩指数. 两者的屈服应力均随着吸力的增加而增加, 且在相同的吸力下, 原状黄土相对于重塑黄土表现出更大的屈服应力. 牛丽思等(2021)研究不同含水量和密度下伊犁黄土的压缩特性和湿陷特性, 当干密度一定时, 试样的屈服应力随着含水率的增加逐渐降低. 在相同的含水率下, 屈服应力先随着干密度的增大而缓慢增加, 当干密度超过  $1.39 \text{ g/cm}^3$  时, 屈服应力随着干密度迅速增加. Xu *et al.*(2021)进行了原状黄土与击实黄土及原状黄土垂直方向和水平方向的控制吸力的一维压缩实验, 结果表明在相同的吸力下, 原状黄土比击实黄土具有更大的屈服应力. 此外, 还发现了黄土在非饱和状态下的各向异性, 黄土垂直方向压缩与水平方向压缩相比具有更高的屈服应力. 综上所述, 前人针对非饱和黄土的压缩特性开展了大量的试验研究, 而上述研究未考虑自然沉积过程中不同沉积深度的原状黄土的应力历史以及历史上的水力环境对压缩性及屈服特性的影响.

针对黄土的湿陷特性, 学者们主要用一维固结仪和三轴试验进行研究. 已有研究结果表明黄土的湿陷系数与黄土的结构性、初始孔隙比、温度和轴向应力等因素有关. Shao *et al.*(2018)利用一维固结仪研究了不同干密度击实黄土在不同增湿量下的湿陷特性, 随着初始干密度的增加其湿陷系数有

减小的趋势,并且当干密度从  $1.35 \text{ g/cm}^3$  增加至  $1.40 \text{ g/cm}^3$  时,其湿陷系数存在非常明显的减小.此外,湿陷系数随着轴向应力的增加迅速增加,但增大到一定程度后几乎不再随轴向应力的增大而变化. Munoz-Castelblanco *et al.* (2011)通过可测吸力的一维固结仪研究了法国原状黄土的湿陷特性,通过双线法计算黄土的湿陷系数和单线法实验测定的湿陷系数有较好的一致性,并且湿陷系数随着轴向应力的增加先增大,但随着轴向应力的进一步增加,湿陷系数有明显的减小趋势.最大的湿陷系数对应的轴向应力为  $30 \text{ kPa}$ ,大于测试黄土的原位上覆压力  $16 \text{ kPa}$ . Liu *et al.* (2016)利用双线法确定原状黄土的湿陷系数,最大的湿陷系数出现在垂直应力为  $200 \text{ kPa}$  的时候,湿陷系数与轴向应力的曲线呈现出抛物线的形状,即湿陷系数随着轴向应力的增大先增大,而随着轴向应力的进一步增加,湿陷系数有减小的趋势.综上可知现有关于黄土的湿陷特性的研究多针对单一沉积深度的原状黄土、压实黄土,而不同沉积深度的原状黄土的孔径结构以及胶结程度也存在明显的差异,缺乏对于不同天然沉积深度原状黄土湿陷特性的对比研究.

针对目前关于沉积深度对非饱和黄土湿陷特性和非饱和压缩特性研究的不足,本研究针对兰州某剖面不同沉积深度的原状黄土进行对比研究,揭示不同沉积深度下的原状黄土的持水特性、压缩特性及湿陷特性的差异.同时,采用压汞实验和电镜扫描查明不同沉积深度原状黄土的孔径分布特征及颗粒排列方式的差异.上述黄土微观实验结果用来辅助解释不同沉积深度原状黄土持水特性、非饱和压缩特性和湿陷特性的差异原因.通过对比研究不同沉积原状黄土的持水特性、压缩特性和湿陷特性的差异,能够加深理解两个沉积深度应力历史和历史上的水文环境潜在差异对非饱和黄土水力特性的影响.

## 1 实验概况

### 1.1 试样黄土基本物理特性

本研究所测试的原状黄土来自于兰州黑方台某较直立的边坡,取样深度分别为  $10 \text{ m}$  和  $30 \text{ m}$  (分别称为 HFT10 m 和 HFT30 m),取土前需至少挖除表面  $1 \text{ m}$  范围内的上覆土,防止草根及人工扰动对原状黄土结构的影响.首先将从边坡中取出的原状黄土手工仔细削成  $0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$  的块

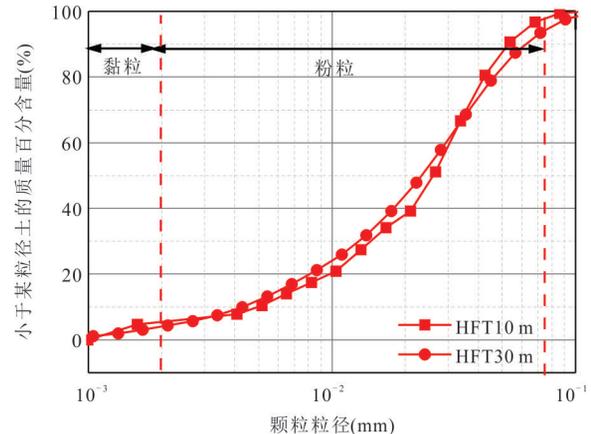


图1 HFT10 m和HFT30 m黄土的颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of two tested loess

表1 两种原状的基本物理力学特性

Table 1 Physical properties of the two tested loess

性质	测量值	
	HFT10 m	HFT30 m
液限(%)	26.4	28.5
塑限(%)	17.8	18.3
颗粒相对密度	2.71	2.71
初始含水量(%)	10.5	11.2
干密度( $\text{g/cm}^3$ )	1.33	1.37
孔隙比	1.04	0.97
黏粒(%)	8	8
粉粒(%)	85	79
砂粒(%)	7	13

状,然后快速用保鲜膜和石蜡进行密封,再装入定制的木箱中.这样可以尽可能减小土样水分的变化以及运输过程中对土样的扰动.将土样运回实验室后,削下粉末样利用激光粒度仪进行颗粒分析测试,测试土的颗粒分布曲线结果如图1所示.由测试结果可知,两个不同沉积深度黄土的颗粒粒径分布基本类似,没有明显的差异.粉土颗粒分别占比为  $79\%$  和  $85\%$ .因此该黄土为典型的粉黄土,值得注意的是,HFT10 m的原状黄土的初始孔隙比为  $1.04$ ,HFT30 m的原状黄土的初始孔隙比为  $0.97$ .这是由于HFT30 m试样有更大的上覆压力,导致黄土颗粒之间有更紧密的排列.土体的其它基本物理特性如表1所示.

### 1.2 试样的制备

本研究需要进行原状环刀黄土试样的制备.原状土样制备时,首先在环刀周围涂抹适量的凡士林,减小侧壁与土体之间的摩擦力.然后利用环刀



图2 原状试样照片

Fig. 2 Pictures of intact loess  
a. HFT10 m; b. HFT30 m

切入现场取回的块状土体,切入的同时利用刀具对试样周边进行切削处理,避免因环刀切入阻力过大而对试样扰动破坏,在削样过程中边切削环刀周围的土体,边给环刀一定的压力.待环刀完全切入土块后,利用切土刀切平其上下表面的土体.将两个深度的原状土样制作完毕后测量其干密度及初始含水量,HFT10 m和HFT30 m试样的干密度分别为 $1.33 \text{ g/cm}^3$ , $1.37 \text{ g/cm}^3$ ,其初始含水量分别为10.5%,11.2%.图2给出了试样制备过程中的原状试样,其中图2a为HFT10 m的原状试样,图2b为HFT30 m试样的原状试样.从图2可以看出HFT10 m和HFT30 m试样的原状块状试样,两者颗粒排列都较为致密,但可见一些肉眼可见的孔隙,肉眼未见两者明显的差异,在试样制备过程中,HFT30 m试样相对于HFT10 m原状试样相比更脆.该试样与作者前期试验为同一地点取样,其更详细土体基本物性和压缩数据来源于Xu *et al.* (2021)和Lan *et al.* (2024).

## 2 实验设备及方案

### 2.1 实验设备

采用带有加载装置的Fredlund SWCC仪器进行持水曲线试验、不同吸力下的压缩实验和控制吸力的湿陷实验.该实验试样的直径为63.5 mm,高31.8 mm.吸力控制采用轴平移技术,空气压力由压力调节系统控制,孔隙水压力 $u_w$ 由饱和的高进气值

陶土板控制,陶土板下部设有一个储水仓,储水仓与垂直带刻度的滴定管用透明软管相连,可以记录试样中水分的变化,带刻度的玻璃管的上部与空气连通.滴定管的液面高度产生的孔隙水压力,相对于施加的基质吸力基本可以忽略.施加在试样上的空气压力 $u_a$ 与孔隙水压力 $u_w$ 之差就是施加在试样上的吸力 $s$ .垂直LVDT记录试样的轴向变形,试样与环刀紧密接触,因此试样的径向变形为0,根据试样的轴向变形可以计算出试样的体积变化.带有气压千斤顶的加载架可以为试样提供轴向压力.

为了从微观角度揭示不同沉积深度原状黄土微观孔隙结构以及颗粒排列方式的差别,分别对两个沉积深度的原状试样进行了压汞(MIP)实验测试其孔径分布特征和电子显微镜观测(SEM)其颗粒排列方式.所采用的扫描电镜仪器购自于捷克的TESCAN公司,仪器型号为MAIA3 LMH.采用MicroActive AutoPoreV9600型压汞仪测试样品的孔隙分布,温度为 $20 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最大压力为61 000 psia.

### 2.2 实验方案

本研究主要分为3组实验,均采用带有加载装置的Fredlund SWCC仪器进行,其中每组实验的实验目的如下所示(表2):其中第一组实验的目的主要是研究HFT10 m和HFT30 m试样脱湿路径的持水特性.试样包括HFT10 m和HFT30 m原状试样各一个.首先将试样饱和,然后放入Fredlund SWCC的陶土板上,用轴平移技术控制试样的基质吸力,沿着基质吸力 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80 \rightarrow 150 \rightarrow 300 \rightarrow 450 \text{ kPa}$ 的顺序脱湿.该组实验主要对比研究不同沉积深度原状黄土持水特性的差异.

第二组实验分别研究HFT10 m和HFT30 m试样在不同吸力下的非饱和压缩特性.其中,HFT10 m和HFT30 m的原状试样分别为6个.控制其基质吸力分别为0,50,100,200,300和400 kPa,当试样在给定吸力下平衡后,再分级加载至最大轴向应力.该组实验的主要目的是研究沉积深度对非饱和原状黄土的压缩和屈服特性的影响.

第三组实验的目的主要是研究HFT10 m和HFT30 m黄土试样的湿陷特性.分别控制吸力在50 kPa和400 kPa压缩至轴向净应力为358.5 kPa,然后在该轴向净应力下渐进增湿至饱和状态,然后继续增加轴向应力压缩试样.该组实验的主要目的是研究沉积深度对非饱和原状黄土湿陷特性的

表2 实验方案及目的

Table 2 Test programs and objectives

系列	实验目的	备注
一	不同沉积深度的持水特性	脱湿路径
二	不同沉积深度的非饱和压缩特性	$s=0, 50, 100, 200, 300$ 和 $400$ kPa
三	不同沉积深度的湿陷特性	$s=50$ 和 $400$ kPa

影响。

需要指出的是,由于土的持水曲线存在明显的滞回效应,已有结果表明从脱湿和增湿路径到相同的基质吸力下,土体的力学特性存在明显的差异 (Estabragh *et al.*, 2017)。为了使试样压缩过程的水力路径初始点保持在脱湿路径上,在吸力施加之前将试样增湿。对试样添加适量的无氧水,并利用两个试样的持水曲线计算所需的水量,使其达到略高于目标基质吸力所对应的含水率。将带有环刀的原状试样放置到压力室内,施加预设的空气气压力,并记录试样垂直LVDT和带刻度玻璃管的初始读数。打开排水阀的阀门,试样能够自由吸水或排水,使土样在给定吸力下达到平衡。当在给定吸力下达到平衡后,给试样施加预设的轴向压力,当在该级轴向压力的压缩变形和水分变化稳定后,方可施加下一级轴向应力。本文所采用的平衡条件为,当在给定的基质吸力下含水率变化 $<0.04\% d^{-1}$  (Sivakumar, 1993),且垂直位移 $<0.01\text{ mm }d^{-1}$ 时 (Haeri *et al.*, 2019),假定试样的吸力和变形达到平衡。间隔24 h冲刷陶土板底部的气泡,在冲洗结束时,记录两容积管中的水量以及试样的变形数据。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 原状黄土的微观结构及持水曲线结果

图3为HFT10 m和HFT30 m原状黄土在初始状态下的电镜扫描照片。图3a是HFT10 m黄土在200倍分辨率下的图像。图3b为HFT10 m试样黄土在1000倍分辨率下的图像。可以看出,原状黄土中广泛分布粉土颗粒和黏土,但是以粉土颗粒为主,这与颗粒分布的结果是一致的(图1)。图3c是HFT30 m黄土在200倍分辨率下的图像。图3d为HFT10 m试样黄土在1000倍分辨率下的图像。HFT30 m试样的电镜扫描结果与HFT10 m的电镜扫描结果相比,其黏土颗粒的分布形式存在明显的差异。HFT10 m试样的粉土颗粒包裹在粉土颗粒的表面,在粉土颗粒的接触部分形成了胶结,而

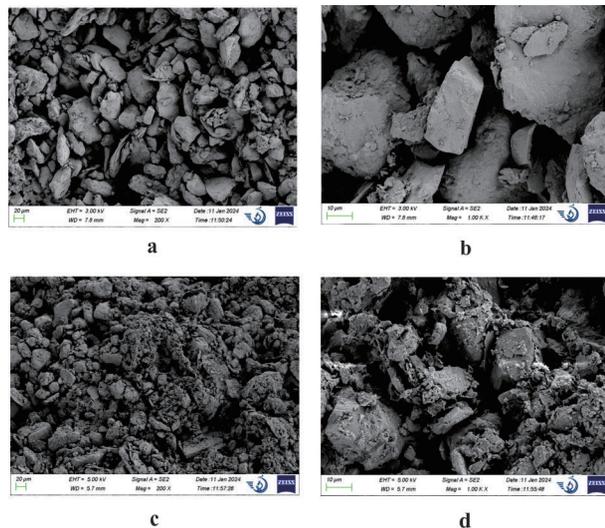


图3 原状试样的SEM图片

Fig. 3 SEM pictures of natural loess

a. HFT10 m放大200倍; b. HFT10 m放大1000倍; c. HFT30 m放大200倍; d. HFT30 m放大1000倍

HFT30 m尽管其粉土颗粒表面也有黏土颗粒附着,且会形成一定的黏土团聚体,但粉土颗粒之间并无明显的胶结,粉土颗粒之间大多数为颗粒之间的直接接触。历史上的不同水文环境以及应力历史会导致试样中孔隙结构和颗粒排列方式产生明显的差异(刘伟等,2022)。

图4为HFT10 m和HFT30 m黄土试样在天然状态下的MIP测试结果。两个深度试样的孔径分布均呈现出单峰分布,HFT10 m的大峰值孔隙峰值孔径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,没有明显的小峰。而HFT30 m黄土大峰值孔隙峰值孔径为 $8\text{ }\mu\text{m}$ ,同样也没有明显的小孔隙峰值。

这与Muñoz-Castelblanco *et al.* (2012)测试的法国原状黄土的孔径分布呈现出单峰的结果是一致的,但也有结果表明,原状黄土的孔径分布呈现两个峰值或者3个峰值 (Ng *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2020)。这可能与原状黄土的颗粒级配、应力历史及历史上的水文过程等因素有关。已有研究表明,土体的干湿循环过程会影响土体的孔隙结构的变化。此外,有结果表明土体被压缩过程中,大孔隙会被

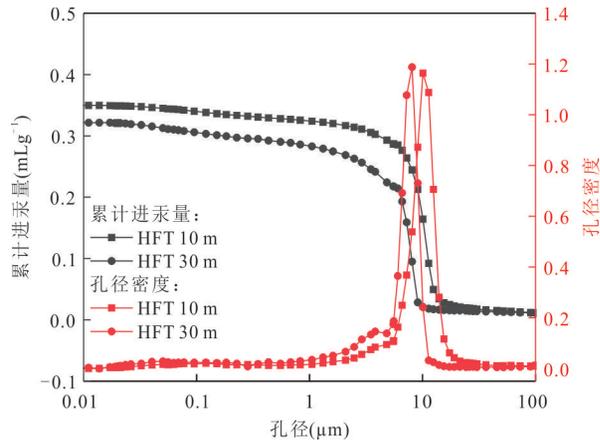


图4 HFT10 m 和HFT30 m 试样的孔径分布

Fig. 4 The pore size distribution of HFT10 m and HFT30 m

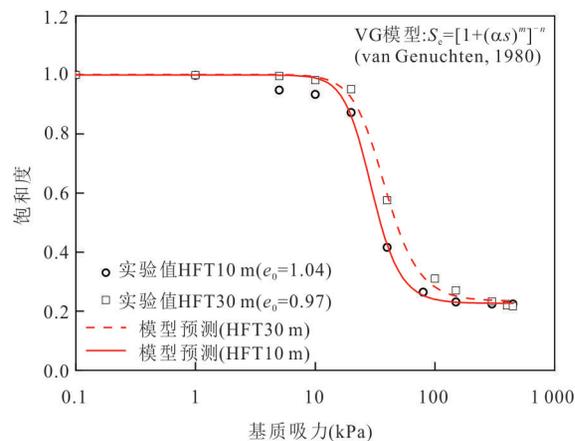


图5 不同沉积深度黄土的持水曲线

Fig. 5 The water retention curve of two different sediment depth

首先压缩变成较小的孔隙 (Wang *et al.*, 2019). 与 HFT10 m 相比, HFT30 m 试样的上覆压力较大, 更大的上覆压力导致 HFT30 m 的试样大峰值孔隙峰值孔径 (8  $\mu\text{m}$ ) 小于 HFT10 m 试样大峰值孔隙峰值孔径 (10  $\mu\text{m}$ ).

土体的持水曲线 (SWRC) 是非饱和土力学试验的基础. 采用 Fredlund SWCC 仪器对两个沉积深度的原状黄土样品的持水行为进行了测试, 该仪器配置有 5 Bar 的高进气值陶土板. 本文研究的是黄土脱湿路径的持水曲线, 首先将原状黄土放置在真空缸内进行饱和, 然后将饱和的试样放置在 Fredlund SWCC 仪器的压力室内按照一定的吸力路径进行脱湿. 图 5 绘制了两个试样脱湿过程的持水曲线, 并用 van Genuchten (VG) 函数 (van Genuchten, 1980) 进行拟合, 拟合参数如表 3 所示.

由图 5 可以看出, 吸力范围在 20~150 kPa 内, HFT10 m 试样的饱和度明显低于 HFT30 m 试样.

表3 持水曲线 VG 模型的拟合参数

Table 3 VG model parameters of the two samples

试样	孔隙比	拟合参数				$R^2$
		$S_s$	$S_{re}$	$\alpha$	$m$	
HFT30 m	0.97	1.001	0.234	0.030	0.679	0.996
HFT10 m	1.04	0.969	0.229	0.035	0.718	0.996

HFT30 m 试样的进气值 (AEV) 大于 HFT10 m 试样的进气值, 这可能是由于 HFT10 m 试样大孔隙的峰值对应的孔隙尺寸大于 HFT30 m 的试样. 两种沉积深度黄土的微观结构试验结果表明, HFT10 m 样品大峰值孔隙峰值孔径 (约 10  $\mu\text{m}$ ) 比 HFT30 m 样品大峰值孔隙峰值孔径 (约 8  $\mu\text{m}$ ) 大. 持水曲线中增湿曲线和脱湿曲线的斜率分别称为吸附和脱附速率. 本研究的试验结果表明, HFT10 m 试样的脱附速率与 HFT30 m 试样的脱附速率没有明显的差异. 这也可以从两种黄土试样的孔径分布得到证明, HFT10 m 试样大孔隙的峰值几乎 HFT30 m 大孔隙的峰值相当.

### 3.2 非饱和黄土的一维压缩

**3.2.1 压缩特性** 不同沉积深度原状黄土压缩曲线如图 6 所示. 干燥后观察到试样的初始孔隙比略有不同, 可能是试样的非均匀性和试样在吸力平衡过程中的收缩导致的. 不同沉积深度的一维压缩曲线的形状非常相似, 压缩曲线的大致趋势可以分为两个阶段, 在屈服应力前, 试样孔隙比的变化随着应力的增加变化比较缓慢, 说明原状黄土的结构性能够抵抗一定的应力, 该阶段可以近似认为是弹性阶段. 当应力超过其屈服应力时, 试样孔隙比随着应力的增大迅速减小, 表明颗粒之间的胶结及架空结构逐渐被破坏. 当黄土的原状结构被破坏, 在应力的作用下黄土迅速被压缩. 由于黄土特殊的结构性, 其压缩曲线并不是严格意义上的弹塑性, 在半对数的坐标轴上未表现出明显的从弹性到塑性的边界, 没有表现出明显的屈服应力. 这里采用 Munoz-Castelblanco *et al.* (2011) 的方法确定原状黄土的屈服应力, 在压缩曲线的弹塑性段上拟合两条线的交点处确定为屈服应力. 不同吸力下的原状黄土的压缩曲线的形态基本类似, 但随着吸力的减小, 压缩曲线有向下移动的趋势. 并且试样的吸力越大其黄土的结构性会越强. 因此, 可以看到吸力越大的压缩曲线, 其弹性段和塑性段的拐点会更加明显. 对比不同沉积深度的压缩曲线, 可以看到 HFT30 m 试样的压缩曲线, 弹性阶段和塑性压缩阶

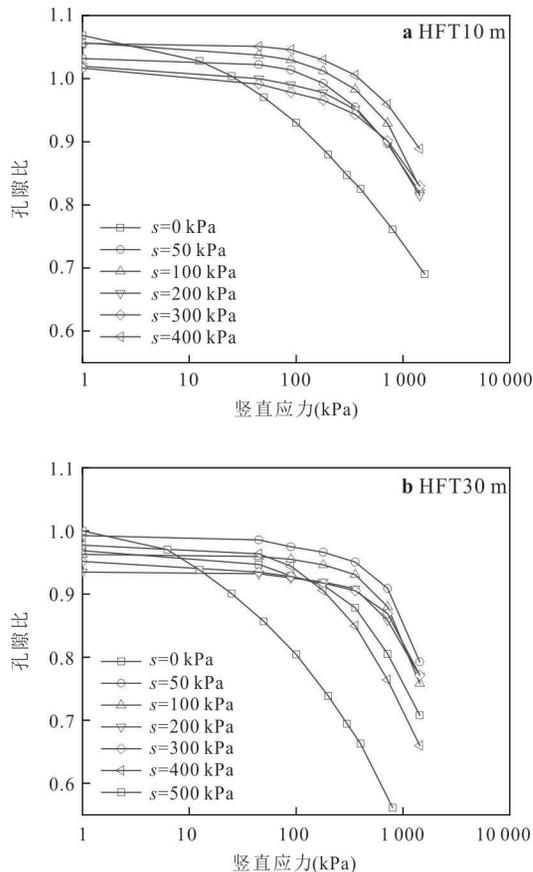


图 6 不同沉积深度黄土的非饱和压缩曲线  
Fig. 6 The compression curve of unsaturated loess  
a.HFT30 m;b. HFT10 m

段之间的拐点会更加明显,这是与 HFT30 m 中粉土颗粒的接触没有明显的黏土胶结有关. Wheeler and Sivakumar (1995) 假设非饱和土的压缩曲线在屈服点后,压缩曲线的斜率随着吸力的增加而单调增加. 本文也将分析控制吸力的一维固结实验中塑性压缩系数随着吸力的变化趋势. 需要注意的是本文中的塑性压缩系数  $\lambda_{\text{odedo}}$  与传统意义上的压缩指数  $C_c$  存在明显差异,本研究中的塑性压缩系数为屈服点后压缩曲线的斜率,而传统意义上的压缩指数  $C_c$  为压缩曲线正常固结线的斜率,而本文中试样的最大轴向压力约为 1 400 kPa,该轴向压力下未接近正常固结线.

非饱和原状黄土的塑性压缩系数  $\lambda_{\text{odedo}}$  与吸力的变化趋势如图 7 所示. 总体上塑性压缩系数  $\lambda_{\text{odedo}}$  随着吸力的增大先增大,随着吸力的进一步增加,塑性压缩系数  $\lambda_{\text{odedo}}$  有减小的趋势. 在吸力为 200 kPa 左右时,HFT10 m 黄土的塑性压缩系数达到最大值,其为 0.278. 在较低吸力范围内观察到的  $\lambda_{\text{odedo}}$  随吸力的变化趋势与 Ng *et al.* (2018) 对原状黄土的

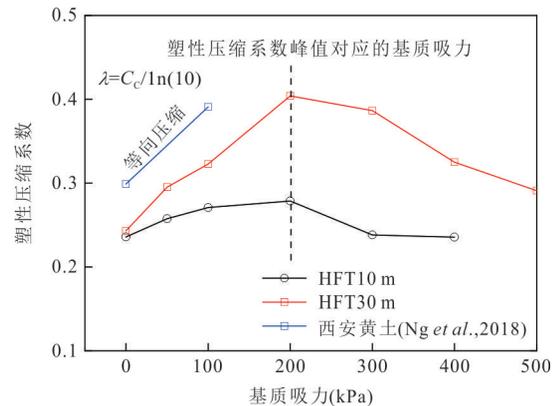


图 7 黄土的塑性压缩系数与吸力的关系  
Fig. 7 Variation of plastic compression parameter with suction of two different sediment depth

压缩试验结果一致. 值得注意的是 HFT30 m 原状黄土的压缩试验结果也显示,随着吸力从 0 增加到 200 kPa,  $\lambda_{\text{odedo}}$  值急剧增加,然后逐渐减小. 以前的研究也报告了类似的现象 (Wheeler and Sivakumar, 1995; Raveendiraraj, 2009),  $\lambda_{\text{odedo}}$  在小吸力范围内,随着吸力增大而增大,然后随着吸力的进一步增大而略有减小. 此外,前人的有些实验结果显示土体的  $\lambda_{\text{odedo}}$  随着吸力的增加单调减小 (Patil *et al.*, 2016), 还有一些实验结果显示土体的塑性压缩系数随着吸力的增加而单调增加 (Ng and Peprah-Manu, 2023). 塑性压缩系数随着吸力的变化有不同的趋势可能与土体的性质有关,以及与确定塑性压缩系数的应力水平有关. 虽然 HFT10 m 和 HFT30 m 试样的塑性压缩系数峰值均对应于 200 kPa 的吸力,但 HFT30 m 原状试样的塑性压缩系数的峰值大于 HFT10 m. 其原因可能是在应力的作用下颗粒之间发生滑移和重分布,进而导致土体产生塑性应变. 由两个沉积深度的 SEM 图像可知,HFT10 m 试样粉土颗粒之间存在明显的黏土胶结,而 HFT30 m 试样粉土主要以粉土颗粒的直接接触为主. 由于 HFT10 m 有黏土颗粒的胶结的存在,颗粒之间的滑移变的更加困难,因此,HFT10 m 试样具有更低的塑性压缩系数.

**3.2.2 屈服特性** HFT30 m 和 HFT10 m 试样的屈服应力  $\sigma_{\text{vc}}$  与吸力的关系如图 8 所示,由此可以确定加载湿陷 (LC) 曲线. 由图 8 可以看出,屈服应力随吸力的增大而增大,但屈服应力的增大速率随吸力的增加有明显减小. 非饱和黄土的屈服应力随着吸力的增大而增大的现象与前人的研究结果一致 (Alonso *et al.*, 1990; 韦锋等, 2015). 这种现象的主

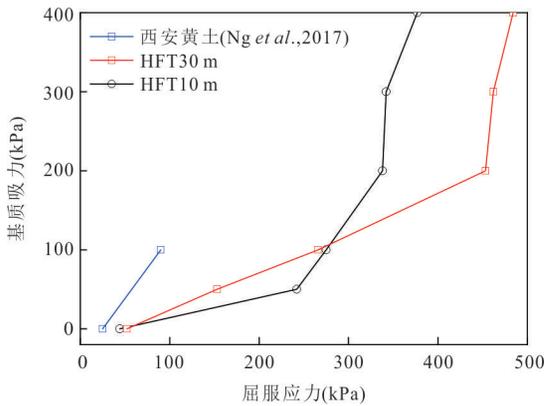


图 8 测试黄土屈服应力与吸力的关系

Fig. 8 Relationship between yield stress and suction of tested loess

要原因是原状黄土中存在黏土胶结粉土颗粒的现象,该结构的粘结强度会随着试样的脱湿而被加强.此外,随着吸力的增加,试样中弯液面水的数量会明显增加,弯液面水可以给土颗粒提供稳定骨架结构的作用.

如图 8 所示,当吸力大于 100 kPa 时,HFT10 m 的屈服应力小于 HFT30 m;然而,当吸力为 50 kPa 和 100 kPa 时,发现了一个意想不到的结果,即在相同的吸力下,HFT30 m 的屈服应力小于 HFT10 m 的屈服应力.事实上,试样的饱和度对非饱和黄土的屈服行为有显著影响.HFT10 m 和 HFT30 m 试样在不同吸力下的屈服应力的大小关系不一致,可以用 HFT10 m 和 HFT30 m 试样的持水曲线来解释.如图 3 所示,可以看出,当吸力小于 100 kPa 时,HFT30 m 试样的饱和度远大于 HFT10 m 试样的饱和度,更大的饱和度更容易导致黄土的屈服 (Wheeler *et al.*, 2003).这可能是由于饱和度越大,弯液面水的数量减小,弯液面水可以提供对颗粒的稳定作用,因此,饱和度越大其结构更容易在应力的作用下屈服. Estabragh *et al.*, (2017) 也报道了类似的现象,粉质土沿着脱湿路径和增湿路径至相同的吸力,其屈服应力不同,并且前者的屈服应力小于后者.这是因为脱湿和增湿到相同的吸力时,脱湿路径稳定后的饱和度大于增湿路径稳定后的饱和度.随着吸力的增大,HFT10 m 与 HFT30 m 试样的饱和度差异变小,而 HFT30 m 试样的上覆压力远大于 HFT10 m 试样,更大的上覆压力导致试样具有更致密的结构.因此,在相同吸力下,HFT30 m 试样的上覆压力越大,屈服应力越大.前人针对饱土的压缩实验也表明屈服应力随着沉积

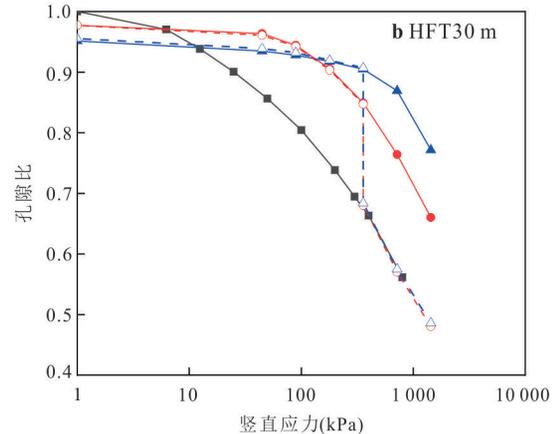
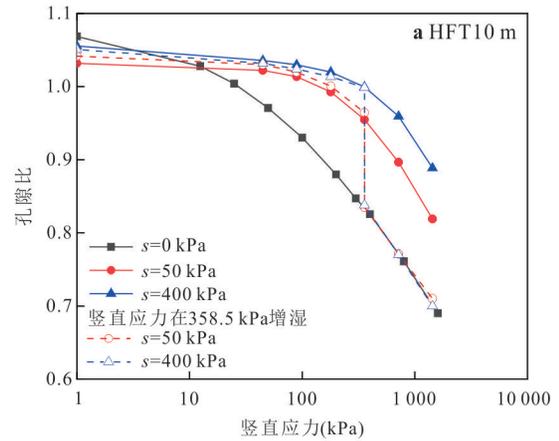


图 9 HFT10 m 和 HFT30 m 黄土湿陷特性

Fig. 9 The collapse behavior of HFT10 m and HFT30 m  
a. HFT10 m; b. HFT30m

深度的增加而增加 (Xu and Coop, 2016). 此外 Ng *et al.* (2016) 研究了取自深度 3.5 m 的西安原状黄土的非饱和等向压缩,其结果表明基质吸力为 100 kPa 和饱和状态下的屈服应力均小于本研究中黄土的屈服应力.上述两种不同深度非饱和黄土试样的压缩试验结果表明,吸力、饱和度和应力历史均对非饱和原状黄土压缩行为的影响具有重要影响.

### 3.3 湿陷特性

HFT30 m 和 HFT10 m 原状黄土控制吸力及轴向应力的湿陷实验结果如图 9 所示.图 9a 和 9b 分别为 HFT10 m 和 HFT30 m 试样在初始吸力  $s=200$  和 400 kPa,轴向净应力为 358.5 kPa 下增湿至饱和状态的湿陷曲线.其中分别将两个深度试样在吸力 ( $s$ ) 分别为 0, 50 和 400 kPa 的压缩曲线重新绘制到图 9 中作为分析湿陷实验结果的参考以及利用双线法计算分别计算 HFT10 m 和 HFT30 m 试样的湿陷系数.

可以看到在相同的吸力下,增湿前湿陷实验的压缩曲线和控制吸力的压缩曲线基本重合,在轴向应力

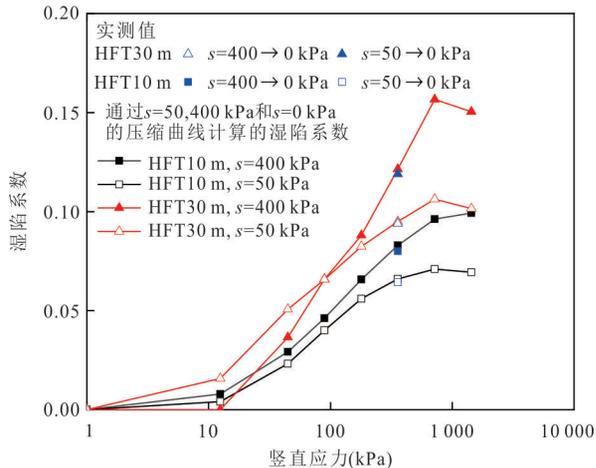


图10 原状黄土湿陷系数随竖直应力的变化

Fig. 10 The evaluation of collapse volumetric strain with net vertical stress of intact loess

保持不变时,将吸力降低到0 kPa后的压缩曲线基本上与饱和状态的压缩曲线重合.在控制吸力的湿陷实验中,当吸力降到饱和状态时,继续压缩时压缩曲线会回到饱和状态下的压缩曲线.这种现象在前人的研究中也被发现(Mu *et al.*, 2023),以及初始状态为非饱和状态下的某常含水量的压缩实验中,增湿饱和后压缩曲线也会回到饱和状态的压缩曲线(Munóz-Castelblanco *et al.*, 2011; Mu *et al.*, 2019).

图10为HFT10 m和HFT30 m试样实验实测和计算的湿陷系数.计算的湿陷系数是由饱和状态和 $s=50$  kPa及 $s=400$  kPa的压缩曲线之间的差值计算得到的.可以看到图10中计算得到的湿陷系数和实测的湿陷系数有较好的一致性.此外可以看到所有吸力下的湿陷系数在较小的竖直应力下变化不大,但是随着竖直应力的增大,湿陷系数迅速增大.随着轴向应力的进一步增大,湿陷系数有轻微的减小.湿陷系数随着应力的增大先增大,达到一定的压力水平后有轻微的减小,这种变化趋势在前人的一些研究中也被发现(Munóz-Castelblanco *et al.*, 2011).此外,通过比较不同吸力下的湿陷系数,可以发现,最大的湿陷系数所对应的轴向应力不同,吸力越大其最大湿陷系数对应的竖直应力也越大.这可能是由于吸力越大其对应的屈服应力越大,在屈服应力处一般对应最大的湿陷系数.

通过对比HFT10 m和HFT30 m试样不同竖直应力的湿陷系数可以看出,在相同的竖直应力下,HFT30 m试样比HFT10 m试样有更大的湿陷系数.这是由于HFT10 m试样粉土颗粒之间存在胶结,而HFT30 m试样颗粒主要以直接接触为主.因此,在增

湿之后,在上覆压力的作用HFT30 m试样与HFT10 m试样相比,其结构更容易破坏,而HFT10 m试样粉土颗粒存在黏土胶结,其在上覆压力和增湿的共同作用下湿陷变形会更小.由于HFT10 m有更大的孔隙比,在更大的上覆压力下具有更大的湿陷潜能.在低竖直应力水平下存在一个异常点,HFT30 m试样在 $s=50$  kPa下变现出较高的湿陷系数,这可能是由于 $s=400$  kPa和 $s=50$  kPa的试样初始孔隙比存在细微不同,影响了计算湿陷系数的结果.但基本不会影响湿陷系数与竖直应力的整体变化趋势.

## 4 结论

本文通过研究了不同沉积深度黄土的持水特性、不同吸力下的非饱和压缩特性,以及进行了控制吸力和轴向应力的湿陷实验.尽管本研究中只研究了两个沉积深度的原状试样,考虑本研究的主要目的是研究沉积深度可能导致的黄土水力特性差异的原因,以及进行控制吸力的非饱和压缩和控制吸力的湿陷实验十分耗时.因此,本研究采用两个沉积深度的试样去初步探究潜在的应力历史和历史上的水文过程差异对黄土压缩和湿陷的影响是可以接受的.目前,主要可得出以下4点结论:

(1)对于不同沉积深度的持水特性而言,HFT10 m的试样相对于HFT30 m试样有更小的进气值,这主要是前期的上覆压力会影响黄土中的大孔隙的数量,并且沉积深度越浅越容易形成大的孔隙.在土体的沉积过程中,大的孔隙首先在上覆压力的作用被压缩为小的孔隙.两个沉积深度的持水曲线的脱湿速率没有明显的差异,其MIP的结果也显示其大孔隙的峰值没有明显差异.

(2)对于沉积深度对非饱和黄土的塑性压缩系数 $\lambda_{\text{edo}}$ 而言,在 $s=0\sim 200$  kPa时,塑性压缩系数 $\lambda_{\text{edo}}$ 随着基质吸力的增加而增加,当吸力超过200 kPa时,塑性压缩系数 $\lambda_{\text{edo}}$ 会随着吸力的进一步增加有减小的趋势.并且HFT30 m试样的塑性压缩系数 $\lambda_{\text{edo}}$ 在测试的吸力范围内都要大于HFT10 m的试样.这可能是HFT10 m试样粉土颗粒的接触存在黏土胶结,而HFT30 m试样颗粒以直接接触为主,因此在应力的作用下,HFT30 m试样的颗粒更容易发生滑移,导致更大的塑性压缩系数 $\lambda_{\text{edo}}$ .

(3)对于沉积深度对非饱和黄土的屈服特性而言,在饱和状态下,HFT30 m土样的屈服应力大于HFT10 m试样,而在非饱和状态下,在吸力低于100 kPa时,

HFT10 m 的试样的屈服应力大于 HFT30 m 试样,这主要是由于在该吸力范围内,前者的饱和度明显大于后者.而在吸力大于 100 kPa 时,HFT30 m 试样的屈服应力明显大于 HFT10 m 试样,这主要是沉积深度的增加,会增加颗粒之间的胶结强度和密实度.上述结果表明原状黄土的屈服应力受到饱和度、沉积深度及颗粒间的胶结程度的共同影响.

(4)湿陷系数的大小与增湿和加载的次序没有明显的关系,通过饱和状态与  $s=50$  kPa 和 400 kPa 计算得到的湿陷系数和在给定竖直压力下增湿湿陷实验实测的湿陷系数基本吻合.结果表明 HFT30 m 试样与 HFT10 m 试样相比有更大的湿陷系数,并且湿陷系数随着轴向应力先迅速增加,增加值一定值后有减小的趋势.

## References

- Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., 1990. A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Géotechnique*, 40(3): 405–430. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>
- Cai, G. Q., Han, B. W., Yang, Y., et al., 2020. Experimental Study on Soil-Water Characteristic Curves of Sandy Loess. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(S1): 11–15(in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. H., 2014. On Basic Theories of Unsaturated Soils and Special Soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(2): 201–272(in Chinese with English abstract).
- Estabragh, A. R., Moghadas, M., Moradi, M., et al., 2017. Consolidation Behavior of an Unsaturated Silty Soil during Drying and Wetting. *Soils and Foundations*, 57(2): 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.03.005>
- Haeri, S. M., Akbari Garakani, A., Roohparvar, H. R., et al., 2019. Testing and Constitutive Modeling of Lime-Stabilized Collapsible Loess. I: Experimental Investigations. *International Journal of Geomechanics*, 19(4): 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001364](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001364)
- Jiang, M. J., Hu, H. J., Liu, F., 2012. Summary of Collapsible Behaviour of Artificially Structured Loess in Oedometer and Triaxial Wetting Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(10): 1147–1157. <https://doi.org/10.1139/t2012-075>
- Jiang, Y., Chen, W. W., Wang, G. H., et al., 2017. Influence of Initial Dry Density and Water Content on the Soil-Water Characteristic Curve and Suction Stress of a Reconstituted Loess Soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(3): 1085–1095. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0899-x>
- Lan, T. G., Xu, L., Lu, S. F., 2023. Experimental Study on the Water Retention Behavior of Intact Loess under Mechanical Wetting and Hydraulic Wetting. *Acta Geotechnica*, 18(2): 1125–1134. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01593-7>
- Lan, T. G., Xu, L., Lu, S. F., 2024. Effect of Suction on Time-Dependent Behavior of Intact Loess under Oedometric Conditions: Strain Rate Dependency and Stress Relaxation. *Soils and Foundations*, 64(6): 101520.
- Liu, W. Sun, X. R., He, N. W., 2022. Structural Evolution and Mechanical Response Mechanism of Loess in Strong Earthquake Area. *Earth Science*, 47(12): 4442–4455(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Liu, F. Y., Ma, F. L., et al., 2016. Collapsibility, Composition, and Microstructure of Loess in China. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(4): 673–686. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0285>
- Mu, Q. Y., Dang, Y. J., Dong, Q., et al., 2019. Water-Retention Characteristics and Collapsibility Behaviors: Comparison between Intact and Compacted Loesses. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41(8): 1496–1504(in Chinese with English abstract).
- Mu, Q. Y., Dong, H., Liao, H. J., et al., 2020. Water-Retention Curves of Loess under Wetting-Drying Cycles. *Géotechnique Letters*, 10(2): 135–140. <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00025>
- Mu, Q. Y., Dong, H., Liao, H. J., et al., 2022. Effects of in Situ Wetting-Drying Cycles on the Mechanical Behaviour of an Intact Loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(7): 1281–1284. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0696>
- Mu, Q. Y., Meng, L. L., Zhou, C., 2023. Stress-Dependent Water Retention Behaviour of Two Intact Aeolian Soils with Multi-Modal Pore Size Distributions. *Engineering Geology*, 323: 107233. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107233>
- Muñoz-Castelblanco, J. A., Pereira, J. M., Delage, P., et al., 2012. The Water Retention Properties of a Natural Unsaturated Loess from Northern France. *Géotechnique*, 62(2): 95–106. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.084>
- Muñoz-Castelblanco, J., Delage, P., Pereira, J. M., et al., 2011. Some Aspects of the Compression and Collapse Behaviour of an Unsaturated Natural Loess. *Géotechnique Letters*, 1(2): 17–22. <https://doi.org/10.1680/geolett.11.00003>
- Ng, C. W. W., Cheng, Q., Zhou, C., 2018. Thermal Effects on Yielding and Wetting-Induced Collapse of Reconstituted and Intact Loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(8): 1095–1103. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0332>

- Ng, C. W. W., Peprah-Manu, D., 2023. Influence of Aggregate Structure on the Compressibility of an Unsaturated Compacted Silty Sand. *Engineering Geology*, 314: 107007. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107007>
- Ng, C. W. W., Sadeghi, H., Belal Hossen, S. K., et al., 2016. Water Retention and Volumetric Characteristics of Intact and Re-Compacted Loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(8): 1258—1269. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0364>
- Niu, L. S., Zhang, A. J., Wang, Y. G., et al., 2021. Characteristics of Compressibility and Collapsibility of Ili Loess under Varying Water Content and Dry Density. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 40(2): 167—176(in Chinese with English abstract).
- Patil, U. D., Hoyos, L. R., Puppala, A. J., 2016. Modeling Essential Elastoplastic Features of Compacted Silty Sand via Suction-Controlled Triaxial Testing. *International Journal of Geomechanics*, 16(6): D4016012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000726](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000726)
- Raveendiraraj, A., 2009. Coupling of Mechanical Behaviour and Water Retention Behaviour in Unsaturated Soils. University of Glasgow, Glasgow.
- Shao, X. X., Zhang, H. Y., Tan, Y., 2018. Collapse Behavior and Microstructural Alteration of Remolded Loess under Graded Wetting Tests. *Engineering Geology*, 233: 11—22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.025>
- Sivakumar, V., 1993. "A Critical State Framework for Unsaturated Soils." Dep. Civ. Struct. Eng., (February).
- van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892—898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wang, J. D., Li, P., Ma, Y., et al., 2019. Evolution of Pore-Size Distribution of Intact Loess and Remolded Loess Due to Consolidation. *Journal of Soils and Sediments*, 19(3): 1226—1238. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2136-7>
- Wei, F., Yao, Z. H., Chen, Z. H., et al., 2015. Influence of Structural Properties on Strength and Yielding Characteristics of Unsaturated Q3 Loess. *Rock and Soil Mechanics*, 36(9): 2551—2559(in Chinese with English abstract).
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S., Buisson, M. S. R., 2003. Coupling of Hydraulic Hysteresis and Stress-Strain Behaviour in Unsaturated Soils. *Géotechnique*, 53(1): 41—54. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.41>
- Wheeler, S. J., Sivakumar, V., 1995. An Elasto-Plastic Critical State Framework for Unsaturated Soil. *Géotechnique*, 45(1): 35—53. <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.35>
- Xu, L., Coop, M. R., 2016. Influence of Structure on the Behavior of a Saturated Clayey Loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(6): 1026—1037. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0200>
- Xu, L., Lan, T. G., Mu, Q. Y., 2021. Effects of Structure on the Compression Behavior of Unsaturated Loess. *International Journal of Geomechanics*, 21(4): 06021007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001967](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001967)
- Zeng, P., Wang, Y. H., Zhang, T. L., et al., 2023. Parameter Back Analysis and Stability Prediction of Loess Landslide Based on NSGA-II Genetic Algorithm. *Earth Science*, 48(5): 1675—1685(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Chen, Z. H., Hu, S. X., et al., 2018. Seepage and Water Retention Characteristics of Fill in a Construction Site in Yan'an. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(S1): 183—188(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., Wang, Y. G., Li, T. L., et al., 2022. Investigation on Water Retention and Permeability Characteristics of Yan'an Compacted Loess in a Full Suction Range Incorporating Temperature Effects. *Journal of Engineering Geology*, 30(4): 1148—1156(in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 蔡国庆, 韩博文, 杨雨, 等, 2020. 砂质黄土土-水特征曲线的试验研究. *岩土工程学报*, 42(S1): 11—15.
- 陈正汉, 2014. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究. *岩土工程学报*, 36(2): 201—272.
- 刘伟, 孙欣然, 何乃武, 2022. 强震区黄土结构演变与力学响应机制. *地球科学*, 47(12): 4442—4455.
- 穆青翼, 党影杰, 董琪, 等, 2019. 原状和压实黄土持水特性及湿陷性对比试验研究. *岩土工程学报*, 41(8): 1496—1504.
- 牛丽思, 张爱军, 王毓国, 等, 2021. 湿度和密度变化下伊犁黄土的压缩和湿陷特性. *水力发电学报*, 40(2): 167—176.
- 韦锋, 姚志华, 陈正汉, 等, 2015. 结构性对非饱和 Q<sub>3</sub> 黄土强度和屈服特性的影响. *岩土力学*, 36(9): 2551—2559.
- 曾鹏, 王宇豪, 张天龙, 等, 2023. 基于 NSGA-II 遗传算法的黄土滑坡参数反分析与稳定性预测. *地球科学*, 48(5): 1675—1685.
- 张亚国, 王幼博, 李同录, 等, 2022. 考虑温度效应的延安新区压实黄土全吸力范围持水和渗透特性研究. *工程地质学报*, 30(4): 1148—1156.
- 张龙, 陈正汉, 扈胜霞, 等, 2018. 延安某工地填土的渗水和持水特性研究. *岩土工程学报*, 40(S1): 183—188.