

DOI: 10.11779/CJGE20231268

# 考虑水油分离的柴油污染土持液特性试验研究

华龙飞<sup>1,2</sup>, 万 勇<sup>1</sup>, 陈之祥<sup>\*1</sup>, 李顺群<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384)

**摘 要:** 为探究土体对水油两相非溶混合液的吸持性能以及脱湿过程中孔隙水油分布的演化规律, 采用离心机法对不同水油含量土体进行了持液特性测试, 并通过离心杯内壁界面改性及体积量测法实现了土中水油混合体的微损收集以及分离定量。在此基础上, 通过对离心过程中土样收缩体变的修正, 给出了离心等效吸力与含水率、含油率和油水总含量的关系; 进一步分析了柴油含量对土体持液特性和孔隙演化的影响机理。结果表明: 污染土的持液特性与柴油含量相关, 随着柴油含量增大, 土体的进气值及残余含液率均减小, 持液能力减弱; 经历相同离心荷载作用后, 含油量高的土体收缩变形量更小, 孔隙含量更大; 柴油因极性弱、黏度大、表面张力小而优先填充土中大孔隙, 水优先填充小孔隙; 相同离心等效吸力作用下, 土体的排油和排水速率均与初始柴油含量密切相关, 随着吸力增大, 孔隙水油比趋于达到同一状态。

**关键词:** 持液特征曲线; 柴油污染土; 离心机; 土体变形; 水油分离

中图分类号: TU43; X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)05-0995-09

**作者简介:** 华龙飞(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: hualf0307@163.com。

## Liquid-retention characteristics of diesel-contaminated soil considering water-diesel separation

HUA Longfei<sup>1,2</sup>, WAN Yong<sup>1</sup>, CHEN Zhixiang<sup>1</sup>, LI Shunqun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** To investigate the liquid-retention characteristics of soils with immiscible liquid of water and diesel, and analysis the distribution and evolution of pore water-diesel during the dehumidification process, a centrifuge method is used to test the liquid-retention characteristics of soils with different water-diesel contents. Additionally, the modified interface of the centrifuge cup and the volumetric measurement method are used to achieve the micro-loss collection and quantitative separation of the soil and diesel. On this basis, the relationship among centrifugal equivalent suction, water content, diesel content and total liquid content is respectively analyzed considering the soil deformation during the centrifugal process. Furthermore, the influence mechanism of the diesel content on the liquid-retention characteristics of soils and the pore evolution is analyzed. The results show that the liquid-retention characteristics of the contaminated soil are related to its diesel content. The air entry value and residual liquid content of the soil decrease as the increase of the diesel content, indicating a weakening of the liquid retention capability of the soil. The soil with high diesel content undergoes small shrinkage deformation and large pore content under the same centrifugal loads. The diesel is preferred to fill larger pores due to its high viscosity and low surface tension, while the water is preferred to exist in smaller pores due to its strong polarity and wettability. The water-diesel ratio in the pores trends to reach a constant range as the matric suction increases.

**Key words:** liquid-retention characteristic curve; diesel-contaminated soil; centrifuge; soil deformation; water-diesel separation

## 0 引 言

由于石油的泄漏、工业污水排放以及农药的广泛使用, 致使大量有机污染物进入土体并长期残留<sup>[1]</sup>。非水相有机污染物的存在及其扩散迁移会引起土体内部各相物质间的界面作用发生改变<sup>[2-3]</sup>。进而造成土体剪切强度、压缩性和持水性等水-力性质变化, 对工程

设施稳定和农业生产安全构成严重威胁<sup>[4-5]</sup>。开展污染土的治理和修复, 是土体污染形势驱动下的必然要求。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52308384); 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(51827814)

**收稿日期:** 2023-12-26

**\*通信作者** (E-mail: chen\_zhixiang@126.com)

气相抽提是一项典型有机污染土修复技术，其修复效率易受注气压力、土体含水率以及温度等的影响<sup>[6-7]</sup>。同时，由于土体对柴油的吸附容量有限，在高浓度有机污染土中，超出该容量后的柴油通常以弱吸附态或自由态存在于孔隙中，该部分柴油的去除主要受土体吸力影响<sup>[8]</sup>。因此，在柴油污染土持液特性研究的基础上考虑土中油水两相非溶混液体的分离定量，对于修复能耗控制以及效率提升具有指导意义。

持液特性是指土体对孔隙液体吸附和保持能力，可通过土体持液特性曲线（SLRC）来评价，该曲线通常以含液率和基质吸力表示<sup>[9-10]</sup>。在土的持液特性研究方面，常用的测定方法包括压力板仪法（轴平移）、滤纸法、蒸汽平衡法以及离心机法等<sup>[11-13]</sup>。其中，离心机法因测试时间短、控制条件便捷等优点而应用广泛<sup>[14]</sup>。同时，土的持液特性易受到多种因素的影响<sup>[15-16]</sup>。大量学者针对非水相柴油侵入对土体的持液特性的影响进行了探究。杨华等<sup>[17]</sup>利用离心机法测定了不同石油烃污染浓度黄绵土的持水特征曲线，发现原油或柴油均会影响土体的持水特征和水分有效性。魏样等<sup>[18-19]</sup>以陕北采油区土质进行了污染土模拟，并探究了石油污染对土体有效水含量的影响。发现土体受到石油烃污染后会产生一定程度的斥水性，饱和导水率随着石油烃污染浓度的增大而下降。Hewelke 等<sup>[20]</sup>评估了柴油污染砂质黏土的导水性和保水性，发现柴油对土体水分平衡产生了不利影响。Zhang 等<sup>[21]</sup>试验研究了石油污染盐渍土的土体离子含量和土体持水能力的变化，发现石油以及土体离子含量分布不均匀会导致土体持水能力产生空间差异。综上可知，由于测试方法以及土体可视化手段的限制，关于有机污染土持液特性方面的研究大多聚焦于污染浓度、污染物类型不同的对比分析，而对于非水相液体在土体脱湿过程中的赋存状态及变化规律关注较少。

基于此，本文考虑土体脱湿过程中非溶混液体的分离需求，采用离心法对不同水油含量土体的持液特性进行测试，并通过对离心杯内壁界面改性以及排液体积量测方法实现了土中油水两相非溶混液体的微损收集与分离定量。在此基础上，修正了离心过程中土样压缩体变以及等效孔隙液密度引起的离心等效吸力计算误差，给出了离心等效吸力与含水率、含油率和油水总含液率的关系。进一步，从土中各物质间界面耦合角度，分析了柴油含量对土体持液特性和孔隙演化的影响机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用砂土采自陕西榆林市远离油井污染的清洁区域，取土深度为 20~50 cm，主要矿物成分为石英、长石、碳酸盐类矿物、高岭石等，该土质石英颗粒占比较高，黏粒含量较小。取烘干除杂后土体 50 g，经 800℃煅烧 4 h 后测得有机质含量约为 3.9%。其基本物理参数和颗粒级配，分别如表 1 和图 1 所示。所采用柴油为标准#0 柴油，其密度为 0.84 g/cm<sup>3</sup>，沸点为 180~370℃，黏度系数为 3.45 mPa·s。

表 1 试验用土基本物理参数

Table 1 Geotechnical properties of soil					
相对质量 密度 $G_s$	不均匀系 数 $C_u$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_p$	最优含水率 $w_{op}/\%$
2.68	4.31	25.7	16.5	9.2	12

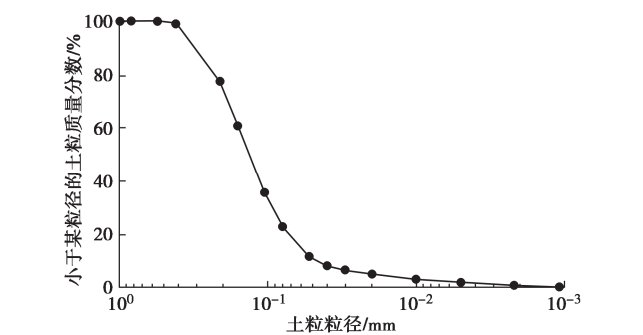


图 1 土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of soil

1.2 试样制备

试验用土制样干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup>，由于油水混合试样难以达到完全饱和，本试验土样中柴油和水的总饱和度  $S_r$  控制在 0.75。分别按表 2 中的油水配比制备非饱和试样。

表 2 柴油污染土试样配比方案

Table 2 Water-diesel ratios of diesel-contaminated soil samples					
试样 编号	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	水饱和度 $S_{rw}$	油饱和度 $S_{rd}$	含水率 $\theta_w/\%$	含油率 $\theta_d/\%$
S1	1.6	0.75	0.00	18.89	0.00
S2	1.6	0.70	0.05	17.63	1.06
S3	1.6	0.65	0.10	16.37	2.12
S4	1.6	0.55	0.20	13.85	4.23
S5	1.6	0.35	0.40	8.82	8.46
S6	1.6	0.00	0.75	0.00	15.87

具体制样步骤如下：①将土烘干、破碎并过 1 mm 孔径的筛后备用。②用喷壶依次向干土均匀地喷洒水和柴油，添加顺序为 2/3 质量的水、全部柴油、1/3 质量的水，充分搅拌后将土样密封保存 48 h，以保证土样内水油分布均匀。③在离心机专用环刀内壁均匀涂抹凡士林，并将土样压入尺寸为  $\Phi 49\times 53\text{ mm}$  ( $V=100\text{ cm}^3$ ) 的环刀中，土样的压实过程依据土样高度分 3 次进行。④将土样用保鲜膜包裹，置于恒温恒湿箱中平衡 7 d 后取出备用，期间每隔 24 h 将土样上下颠倒 1 次，避免重力引起水油分层。

### 1.3 试验设备与分析步骤

#### (1) 试验设备

试验用离心机为上海卢湘仪公司生产的 H1400pF 高速控温离心机, 转子最大转速 13500 r/min, 最大离心力 17828 g。转子内部可以放置 4 个离心杯, 离心杯分为装载土样的试样仓和收集离心排出液体的储液仓, 两部分中间隔有多孔透水板, 如图 2 所示。

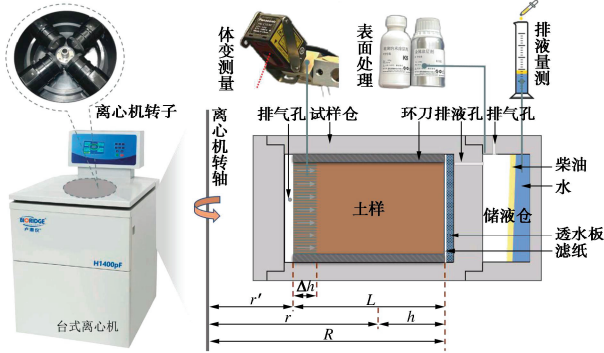


图 2 离心机法试验原理示意

Fig. 2 Principle of matrix suction measurement using a centrifuge

#### (2) 试验步骤

离心试验及水油分离方法的操作步骤如下: ①试验前采用纳米疏油疏水涂层 (M1502) 对离心杯和移液滴管进行表面处理, 以减少水油挂壁现象引起的称量误差。②将滤纸与试样仓内部的透水板贴紧, 接着装入土样并称量每个离心杯的总重, 然后向储液仓中加水配重, 使 4 个离心杯之间质量差小于 0.05 g。③将离心杯装入转子内, 考虑离心机的加载能力, 结合转速与离心加速度间的换算关系, 按照离心力逐级倍增的原则设置 9 级转速, 分别为 700, 1100, 1600, 2200, 3100, 4400, 6300, 8900, 12600 r/min。同时, 为保证充足的加载时间, 使各相物质间不存在压力梯度, 即土体达到了水力平衡<sup>[22]</sup>。结合本试验的实际情况, 选取每级离心时间 8 h。经验证, 对 8 h 后的土样继续加载, 质量基本不再变化, 表明土中液体已充分稳定。④每级离心结束后, 取出土样并称重, 然后利用激光位移传感器测量土样顶面 3 个不同点位的沉降高度, 并计算 3 者平均值作为该级离心作用下的土样变形量  $\Delta h$ 。⑤用滴管将储液仓中油水混合液体转移至量筒中并在量筒口覆膜密封静置 12 h, 以避免液体挥发影响量测结果。待油水界面清晰后, 分别读取本吸力段排出油体积  $V_d$  和水体积  $V_w$ 。⑥重复步骤②~⑤, 直到试验结束。最后计算特定转速下的等效基质吸力  $\psi$ , 并将水油排量  $V_w$  和  $V_d$  转换为土中含水率  $\theta_w$ 、含油率  $\theta_d$  以及总含液率  $\theta$ 。绘制离心力等效吸力  $\psi$  与  $\theta$ ,  $\theta_w$  以及  $\theta_d$  关系曲线, 即为土的持液特征曲线。根据土中液体含量的不同表述方式, 可分为土体持液特征曲

线 (SLRC)、土体持水特征曲线 (SWRC)、土体持油特征曲线 (SDRC)。

#### (3) 离心等效吸力计算方法

离心机法测定土样吸力的基本原理是将离心力场代替重力场。进而建立离心势能与土体毛管势的平衡方程。如图 2 所示, 以土样底面为基准面, 则土样中心处的土体水势  $H_r$  和等效基质吸力为<sup>[14]</sup>

$$H_r = \frac{\omega^2}{2g}(R^2 - r^2) = \frac{h\omega^2}{g}(R - 0.5h), \quad (1)$$

$$\psi = \frac{\rho g H_r}{100} \quad (2)$$

式中:  $H_r$  为土样中心处的土体水势 (cm);  $\psi$  为土样等效基质吸力 (kPa);  $\rho$  为孔隙液密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\omega = 2\pi n/60$  为角速度 ( $\text{rad}/\text{s}$ );  $R$  为离心机转轴中心到土样底面距离 (cm);  $r$  为离心机转轴中心到土样中心的距离 (cm);  $h$  为土样高度的一半 (cm);  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

为获得更准确的等效吸力  $\psi$ , 须考虑土样高度收缩的影响。此外, 由于土样含两相非溶混液体, 且孔隙水油比随吸力变化而变化。需根据  $V_d$  和  $V_w$  计算各级离心力平衡时各相液体的含液率及等效孔隙液密度:

$$h = \frac{1}{2}(L - \Delta h), \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_w &= \frac{m_{w0} - \sum \rho_w V_w}{m_s} \\ \theta_d &= \frac{m_{d0} - \sum \rho_d V_d}{m_s} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\rho' = \frac{\rho_w \theta_w + \rho_d \theta_d}{\theta_w + \theta_d} \quad (5)$$

式中:  $h$  为某级离心后土样高度的一半 (cm);  $L$  为土样的初始高度 (cm);  $\Delta h$  为离心后土样高度的沉降高度 (cm);  $\theta_w$  为离心后的土样含水率 (%);  $V_w$  离心后的排水体积 ( $\text{cm}^3$ );  $m_{w0}$  为土样初始含水质量 (g);  $\rho_w$  为水的密度 ( $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ );  $\theta_d$  为离心后的土样含油率 (%);  $V_d$  为离心后的排油体积 ( $\text{cm}^3$ );  $m_{d0}$  为土样初始含油质量 (g);  $\rho_d$  为柴油的密度 ( $0.84 \text{ g}/\text{cm}^3$ );  $m_s$  为干土质量 (g);  $\rho'$  为离心后土样的等效孔隙液密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

将式 (3) 带入式 (1), 然后将式 (1), (5) 带入式 (2) 可得修正孔隙液密度及变形量后的等效基质吸力:

$$\psi' = \frac{\rho'}{800} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 (R - L - \Delta h)(3R + L + \Delta h) \quad (6)$$

式中:  $\psi'$  为土样在离心后考虑变形及孔隙液密度修正后的基质吸力 (kPa);  $n$  为离心机转速 (r/min)。



2 试验结果与分析

2.1 柴油含量对 SLRC 的影响

为分析柴油含量对土体持液特性的影响，绘制不同柴油含量土样的 SLRC。如图 3 所示，柴油污染土 SLRC 演化规律与常规土的持水特征曲线相似。相同吸力下总含液率随着柴油含量的增高而降低，即柴油污染土的持液性能与柴油浓度呈负相关。典型的土-水特征曲线可分为边界效应段、过渡段和残余饱和段 3 段<sup>[23]</sup>。对比可知，S1 边界效应段比 S2 稍长，S2~S4 边界效应段长度相当，S5，S6 边界效应段缩短明显。对比 S1 与 S6 可知，纯油试样比纯水试样更先进入残余饱和段，说明柴油能够在较低吸力下从土中排出。

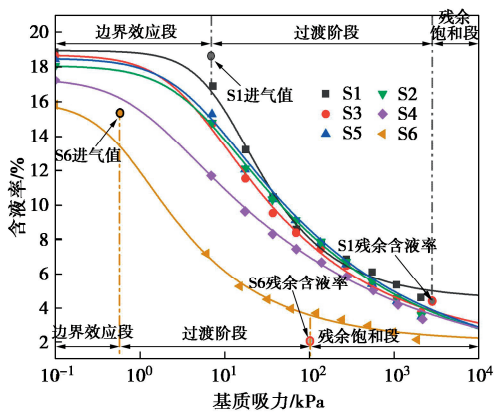


图 3 不同柴油含量土样的 SLRC

Fig. 3 Soil-liquid-retention characteristics (SLRC) of samples with different diesel contents

为量化评价柴油污染土的持液特性，采用 VG 模型<sup>[24]</sup>对  $\theta$ - $\psi$ ， $\theta_w$ - $\psi$  和  $\theta_d$ - $\psi$  等 3 组数据分别进行拟合，结合 SLRC 的拟合参数，对柴油污染土的进气值  $\psi_b$ 、残余含液率  $\theta_r$  以及孔隙均匀性进行对比分析。其中参数  $\alpha$  为进气值  $\psi_b$  的倒数，进气值  $\psi_b$  为空气开始侵入土中孔隙，驱动孔隙液体排出时所对应的吸力，残余含液率  $\theta_r$  是土体内结合态液体与毛细态液体相互转换的分界<sup>[25]</sup>。VG 模型参数  $m$  可反映土体孔隙的分布情况， $m$  越大代表孔隙分布越均匀<sup>[13]</sup>。将  $\theta$ - $\psi$  数据的拟合参数列于表 3 中，各曲线拟合相关系数  $R^2$  均优于 0.97，可见 VG 模型可以较好适用于柴油污染土。

由表 3 可知，进气值  $\psi_b$  总体上随着柴油含量的增大而减小，说明柴油的侵入降低了初始脱湿阶段的持液性能。这是由于土的进气值  $\psi_b$  由土中大孔隙数量和土-液界面的相互作用力共同控制<sup>[16]</sup>。水分子中的正氢原子可与黏土矿物表面的负电荷相互吸引，形成静电作用力。而柴油则因缺乏明显的极性键而与土颗

粒表面的吸附作用较弱，表现为土颗粒对柴油的吸持性能远小于对水的吸持性。进而造成了含油量较高时土体的进气值变小。此外，由表 3 可知水油混合土样 S2，S3，S4 的进气值基本一致，但 S4 和 S5 试样进气值差值达 6.31 kPa。表明土体的进气值与初始柴油含量的关系并非呈线性正相关。根据 S4 和 S5 初始配比，推测二者产生较大差值的原因可能是由于土样中孔隙液主要成分发生了转变。

残余含液率  $\theta_r$  随着柴油含量的增大而减小，对比 S2 和 S5 土样，柴油初始含量增大 8.81%，残余含液率减小了 2.4%。这是由于水和柴油的液体性质不同而引起的毛细态液体含量差异，水的表面张力大于柴油（常温下  $\sigma_w=0.072$  N/m， $\sigma_o=0.026$  N/m），因此，水能够克服孔隙的阻力更大，从而更容易渗入土中的微小孔隙形成毛细水。此外，水和柴油的黏度系数分别为 0.891，3.45 mPa·s。相比之下，油的液体分子内部流动阻力大，流动性更差。因此，充分平衡后的油水混合试样内部，含水量越大毛细态液体也越多。

由表 3 可知，对于水油混合试样，参数  $m$  随着柴油含量的增大而增大，这是由于随着柴油含量的升高，土中柴油填充的孔隙量增多。石油烃取代土中孔隙水后，会导致微观结构的显著重排<sup>[3]</sup>。油水混合土中，柴油倾向于填充较大孔隙，而水倾向于填充小孔隙<sup>[26]</sup>。因此，油水比例越大，大孔隙量增多，小孔隙量减少，土体孔隙整体的均匀性降低。

表 3 S1~S6 土样 SLRC 的 VG 模型拟合参数

Table 3 Model parameters of VG model for SLRC(soil S1~S6)

序号	$\psi_b$	$m$	$\theta_s$	$\theta_r$	$R^2$
S1	8.69	0.367	0.190	0.045	0.995
S2	7.35	0.359	0.181	0.037	0.973
S3	7.46	0.301	0.179	0.024	0.982
S4	7.35	0.291	0.175	0.023	0.981
S5	1.04	0.159	0.174	0.013	0.997
S6	0.59	0.295	0.160	0.020	0.998

2.2 SLRC 与 SWRC 和 SDRC 的关系

将 SLRC，SWRC，SDRC 共 3 条曲线与每级吸力平衡后的水油排出量一同绘制成双 Y 轴图。如图 4 所示，对于含有油水两相非溶混孔隙液的土体，持液特性曲线是持水特征曲线和持油特征曲线的叠加。总体上 3 条曲线均呈现随吸力增大而下降的趋势，但各阶段的排液速率却不尽相同。

过渡阶段的曲线斜率反映了土样的排液速率，与柱状图中矩形高度相对应。土样 S1 的排水量先增大再减小，17 kPa 时达到最大值 5.91，135 kPa 后趋于稳定。对应图 4（a）中 SWRC 斜率在 7~17 kPa 段最大，135 kPa 后逐渐稳定。对于水油混合土样 S2 和 S3，



低吸力段排水量较大而几乎没有柴油排出, 随着吸力的增大, 排水量逐渐减小, 而排油量略有增大。因此, 图 4 (b), (c) 中, SLRC 与 SWRC 的形状几乎相同, 过渡段斜率均随吸力增大而不断减小, 而 SDRC 在低吸力段则近似水平。对于土样 S5, 柴油的排量成为影响曲线斜率的主要因素。低吸力段柴油排量巨大, 7 kPa 时柴油排出 8.82 g, 占总含量的 65.1%, 吸力增大到 70 kPa 以后, 排油量迅速减小并稳定在较低水平。而排水量则一直保持在稳定状态。图 4 (e) 中表现为 SLRC 与 SDRC 的斜率在 17 kPa 之前均较大, 而 17 kPa 以后 SLRC 则与 SWRC 更相似, 近似保持线性减小。纯油土样 S6 的排油量变化规律以及 SDRC 的形状均与 S5 类似。

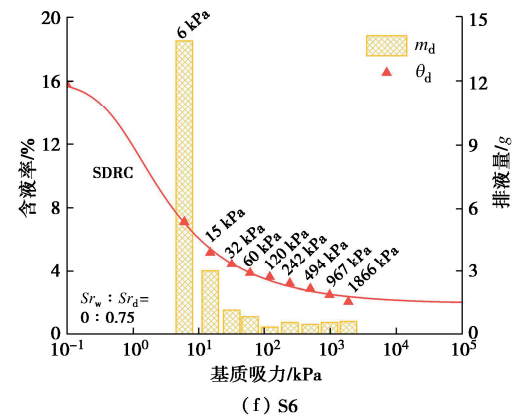
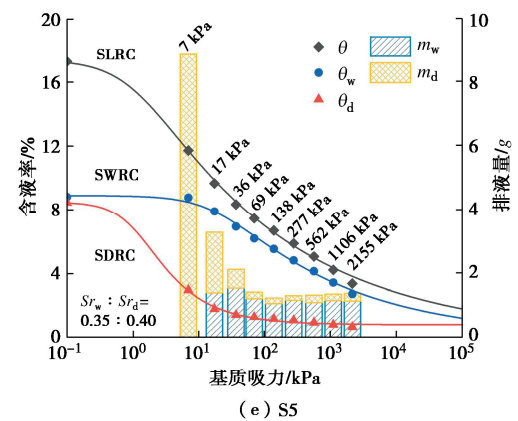
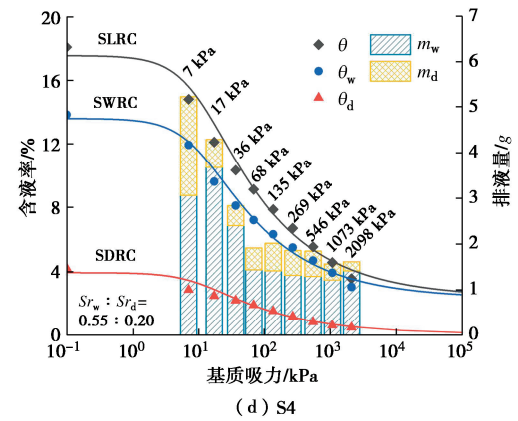
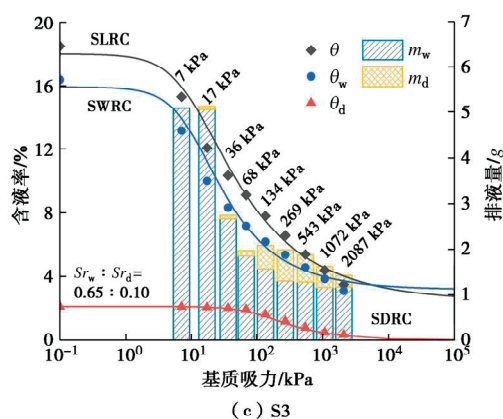
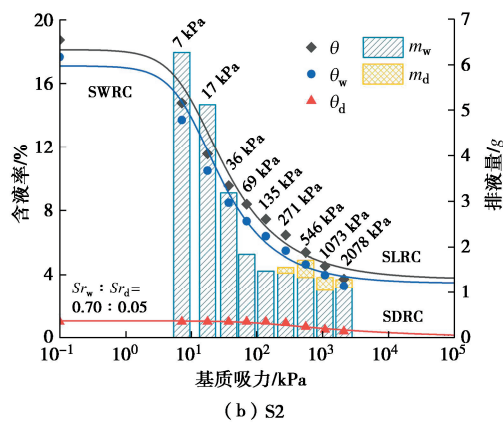
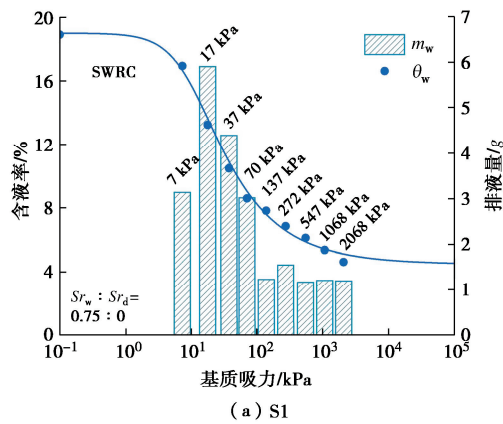
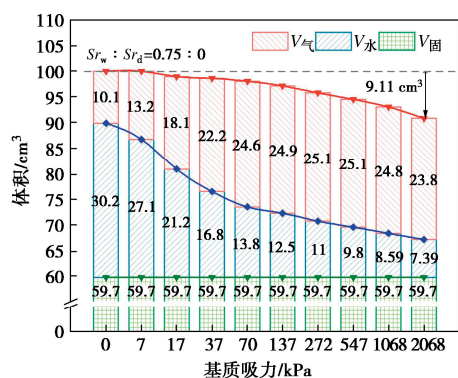


图 4 不同柴油含量试样的 SLRC, SWRC 和 SDRC  
Fig. 4 SLRC, SWRC and SDRC of soils with different diesel contents

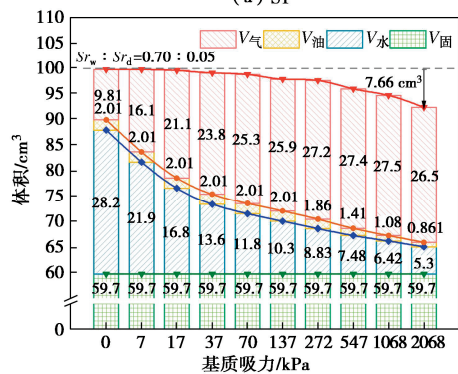
进气值在图 4 中表现为边界效应段水平直线与过渡阶段切线的交点。可以明显看出, SLRC 的进气值在水占比>50%的土样 S2-S4 中与 SWRC 相近, 而在柴油占比>50%的土样 S5 中则与 SDRC 相近。这表明含水油两相不混溶孔隙液的土中, SLRC 的进气值受孔隙液的主要组分控制。综上可知, 尽管施加等效吸力相同, 土中柴油的去除效果也会因初始柴油浓度不同而发生改变。因此, 有必要根据土体柴油浓度而针对性确定土体修复过程中所施加的注汽压力。在柴油污染土的持液特性研究中, 不能忽视非水相液体的存在。

### 2.3 柴油对土体变形特性的影响

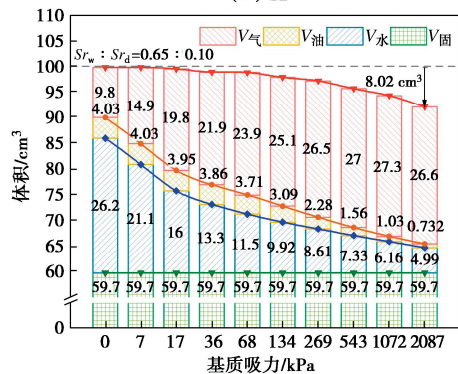
通过水油分离方法可以得到土中固、气、油、水四相体积的变化,如图5所示。总体上,吸力增加会引起土体压实,导致土样体积逐渐减小。分开来看,相同吸力条件下,随着柴油含量的升高,土样的沉降变形量逐渐减小。S1~S6土样离心结束后的体积沉降量分别为9.11, 7.66, 8.02, 8.06, 5.08, 4.49 cm<sup>3</sup>。这是由于液体与土颗粒之间的相互作用影响了土的压缩效应。水是极性分子,与土颗粒表面接触时表现出较强润湿性<sup>[27]</sup>。这增加颗粒间的黏合力和相互吸附能力,有助于土颗粒之间的聚集和黏结,导致土的压缩较强。而柴油中碳-碳键和碳-氢键是共价键,电子对分布均匀。因此,相比于水,柴油的润湿性较差,不能有效地润湿土颗粒表面并填充孔隙空间,减少了土颗粒之间的黏结,同时柴油的存在也降低了土颗粒与水的接触面积,弱化了土-水间界面作用。使得土颗粒之间较松散,从而影响了压缩量。



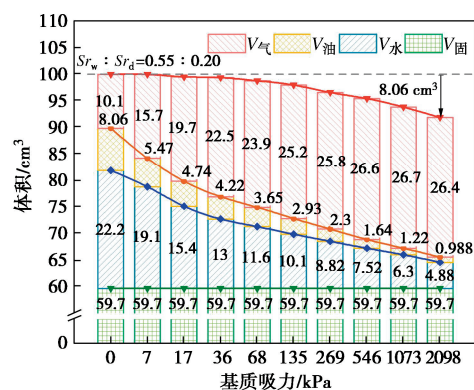
(a) S1



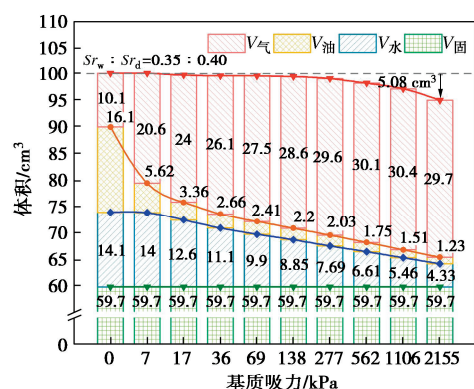
(b) S2



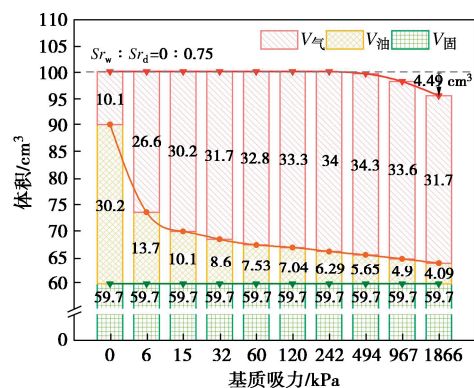
(c) S3



(d) S4



(e) S5



(f) S6

图5 不同柴油含量土样的四相组成及体积变化

Fig. 5 Volume change of soil composition with different diesel contents

土力学中认为土颗粒是不可压缩的,因此土样的变形主要是由孔隙压缩和流体排出引起。根据Young-Laplace方程,土样内每一个孔径与吸力值存在着对应关系<sup>[16]</sup>。随着施加等效吸力的增大,较大孔径区间内的柴油优先被排空。因此在相同离心力作用下,柴油含量高的土体更加干燥,这一规律在低吸力段更加明显(图5)。然而,由于湿润的土颗粒表面会形成一层液体膜,液体膜的存在减少了颗粒直接接触的面积,从而减小了颗粒间的接触力,使得土体的内部结构更易于发生滑动和重排,也使得土体更容易发生变形。土体脱湿后,颗粒之间的摩擦力增加,使得土体的内部阻力增大,从而降低了其变形性能,孔隙总



体积更大。如图5所示,在经历相同离心荷载作用后, S1~S6 相应的孔隙比为 0.522, 0.547, 0.541, 0.54, 0.59, 0.60。

## 2.4 脱湿过程中孔隙构成分析

图5表明,土样的孔隙构成随着吸力增大而动态变化。气相体积占比不断增大,油水两相液体的体积均不断减少,土中孔隙饱和度降低,表示了土体的脱湿过程。孔隙水油的体积比可以反应该吸力下土中孔隙液构成,对水油混合试样 S2~S5 进行分析。

由图6可知,施加等效吸力的大小显著影响着孔隙水油比,随着吸力的增大,4个土样中的孔隙水油比均向同一个数值靠近。根据图4排液规律对这一现象背后可能的原因进行推测,可知初始含量较高的液相排量整体大于初始含量低的液相,这是由于土中含量高的液体在土中占据的孔隙体积更大,其连通性也越强,饱和度较高时还会形成连通的液桥,大大减小了液体流动所需克服的阻力,因而排液速率较初始含量低的液相更快,减小了土体孔隙水油比。在吸力达 269 kPa 时, S3, S4, S5 的孔隙水油比均为 3.84,而 S2 略高出 0.9。这可能是由于 S2 中初始柴油含量较少,相同吸力段内含水量多的土样排液不充分导致的。在吸力大于 269 kPa 的吸力路径上,各土样孔隙水油比又开始发散。这是由于在高吸力段土体内的液体含量较低,计算基数小,因此误差较大。

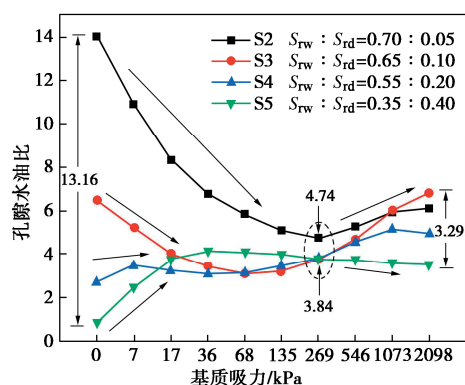


图6 不同柴油含量土样的孔隙水油比

Fig. 6 Pore water-diesel ratios of samples with different diesel contents

综合上述分析可知,在施加等效吸力增大的过程中,柴油污染土中两相非溶混液体的排液速率与土体变形量之间有很好的对应关系。可概括为:孔隙液性质影响着土体在荷载作用下的变形,土体变形过程的微观本质是孔隙结构的变化,孔隙结构又直接控制着土体基质吸力及持液特性。因此,依托考虑水油分离的柴油污染土持液特性试验,探究等效吸力与水油含量的影响规律,对于拓展土体持液性质的内涵与

外延具有重要作用,可为污染场地修复能耗确定提供借鉴。

## 3 结 论

本文采用离心机法对含水和柴油两相非溶混液体土的持液特性进行分析,分析了离心等效吸力与水油含量的关系。结合土样的离心体变及孔隙液性质指标,分析了柴油含量对土体持液特性和孔隙演化的影响机制。得到3点主要结论。

(1) 污染土的持液特性与柴油含量相关,柴油含量越高,土体的进气值及残余含液率均减小,土体持液能力减弱。对比 S1 和 S6 土样,柴油的侵入使得土体进气值减小了 8.1 kPa,而残余含液率减小了 2.5%。

(2) 土中孔隙液性质影响相间界面相互作用,进而影响孔隙液分布状态,随着基质吸力变化,孔隙水油残余量之比趋于达到同一状态,在 269 kPa 时水油混合试样的孔隙水油比均接近于 3.84。柴油因黏度大、表面张力小而优先填充较大孔隙,水因具有较强的极性和润湿性而优先赋存于较小孔隙。

(3) 孔隙液与土体颗粒间的相互作用会影响土体抵抗荷载的能力,经历相同荷载作用后,含油量高的土体内颗粒堆积更松散,孔隙含量也越大,进而体现为土体压缩量的减小。对比 S1 和 S6 土样,纯油试样沉降量较纯水试样小 4.62 cm<sup>3</sup>。

## 参考文献:

- [1] AWAD A M, SHAIKH S M R, JALAB R, et al. Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 228: 115719.
- [2] SHANG Z J, XU P, KE Z Y, et al. Diesel removal and recovery from heavily diesel-contaminated soil based on three-liquid-phase equilibria of diesel + 2-butyloxyethanol + water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 442: 130061.
- [3] IZDEBSKA-MUCHA D, TRZCIŃSKI J. Clay soil behaviour due to long-term contamination by liquid petroleum fuels: microstructure and geotechnical properties[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(4): 1-14.
- [4] 蔡国庆, 王亚南, 周安楠, 等. 考虑微观孔隙结构的非饱和土水-力耦合本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 618-624. (CAI Guoqing, WANG Yanan, ZHOU Annan, et al. A microstructure-dependent hydro-mechanical coupled constitutive model for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 618-624. (in



- Chinese))
- [5] 贺泳超, 陈秋南, 曾 奥, 等. 受柴油污染的高液限红黏土抗剪强度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, **19**(3): 691-696. (HE Yongchao, CHEN Qiunan, ZENG Ao, et al. Shear strength of high liquid limit red clay contaminated by diesel oil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, **19**(3): 691-696. (in Chinese))
- [6] 李晓杰, 张文文, 马传博, 等. 热强化气相抽提修复东北地区苯污染土壤研究[J]. 环境工程, 2022, **40**(4): 134-139, 187. (LI Xiaojie, ZHANG Wenwen, MA Chuanbo, et al. Removal of benzene from clay soil in Northeastern China by thermal enhanced soil vapor extraction[J]. Environmental Engineering, 2022, **40**(4): 134-139, 187. (in Chinese))
- [7] 于 颖, 邵子婴, 刘 靓, 等. 热强化气相抽提法修复半挥发性石油烃污染土壤的影响因素[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(4): 2522-2527. (YU Ying, SHAO Ziying, LIU (Jing|Liang), et al. Factors influencing remediation of semi-volatile petroleum hydrocarbon-contaminated soil by thermally enhanced soil vapor extraction[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(4): 2522-2527. (in Chinese))
- [8] 李 敏, 李 辉, 于禾苗, 等. 石灰粉煤灰固化石油污染土的渗透特性及其工程再利用探讨[J]. 岩土力学, 2024, **45**(1): 108-116. (LI Min, LI Hui, YU Hemiao, et al. Discussion on permeability characteristics of lime and fly ash solidified oil-contaminated soil and its engineering reuse[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(1): 108-116. (in Chinese))
- [9] 栾茂田, 李顺群, 杨 庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(6): 611-615. (LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(6): 611-615. (in Chinese))
- [10] 栾茂田, 李顺群, 杨 庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 863-868. (LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Matric suction and tension suction of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 863-868. (in Chinese))
- [11] WEN T D, SHAO L T, GUO X X, et al. Experimental investigations of the soil water retention curve under multiple drying - wetting cycles[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(11): 3321-3326.
- [12] WANG H M, NI W K, YUAN K Z, et al. Study on SWCC and PSD evolution of compacted loess before and after drying-wetting cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, **82**(5): 180.
- [13] 桑 进, 刘文化, 张洪勇, 等. 全吸力范围内固化土的土-水特征曲线试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(增刊 1): 3843-3850. (SANG Jin, LIU Wenhua, ZHANG Hongyong, et al. Experimental study of soil-water characteristic curve of solidified soil in full suction range[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(S1): 3843-3850. (in Chinese))
- [14] LI L C, LI X A, LEI H N. On the characterization of the shrinkage behavior and soil-water retention curves of four soils using centrifugation and their relation to the soil structure[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, **13**(23): 1259.
- [15] 颜荣涛, 徐玉博, 颜梦秋. 含水合物土体的土水特征曲线及渗透系数[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(5): 921-930. (YAN Rongtao, XU Yubo, YAN Mengqiu. Soil-water characteristic curve and permeability of hydrate-bearing soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(5): 921-930. (in Chinese))
- [16] 牛 庚, 邵龙潭, 孙德安, 等. 土-水特征曲线测量过程中孔隙分布的演化规律探讨[J]. 岩土力学, 2020, **41**(4): 1195-1202. (NIU Geng, SHAO Longtan, SUN Dean, et al. Evolution law of pore-size distribution in soil-water retention test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(4): 1195-1202. (in Chinese))
- [17] 杨 华, 石 辉, 李 卓, 等. 石油烃污染对土壤持水特征及水分有效性的影响[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(3): 142-146. (YANG Hua, SHI Hui, LI Zhuo, et al. Influence of petroleum hydrocarbon pollution on soil water holding characteristics and soil water availability[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(3): 142-146. (in Chinese))
- [18] 魏 样, 王益权, 韩霁昌, 等. 石油污染对土壤持水能力及供水强度的影响[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(6): 21-26. (WEI Yang, WANG Yiquan, HAN Jichang, et al. Effects of oil pollution on soil water-holding capacity and water supply intensity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, **39**(6): 21-26. (in Chinese))
- [19] 魏 样, 蔡 苗, 朱 坤, 等. 石油污染对土壤水分特性的影响[J]. 地球环境学报, 2018, **9**(3): 266-272. (WEI Yang, CAI Miao, ZHU Kun, et al. Effects of oil pollution on soil moisture[J]. Journal of Earth Environment, 2018, **9**(3):

- 266-272. (in Chinese))
- [20] HEWELKE E, GOZDOWSKI D. Hydrophysical properties of sandy clay contaminated by petroleum hydrocarbon[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(9): 9697-9706.
- [21] ZHANG M, GUO P H, WU B, et al. Change in soil ion content and soil water-holding capacity during electro-bioremediation of petroleum contaminated saline soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **387**: 122003.
- [22] VERO S E, HEALY M G, HENRY T, et al. A methodological framework to determine optimum durations for the construction of soil water characteristic curves using centrifugation[J]. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 2016, **55**(2): 91-99.
- [23] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(12): 3345-3351. (SUN De'an, LIU Wenjie, LÜ Haibo. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(12): 3345-3351. (in Chinese))
- [24] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892-898.
- [25] NING Lu, WILLIAM J Likos, 韦昌富, 等. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (NING Lu, WILLIAM J Likos, WEI Changfu, et al. *Unsaturated Soil Mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [26] 毛柏杨, 刘松玉, 刘志彬. 柴油污染粉土水油分布的核磁共振试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, **53**(2): 122-128. (MAO Boyang, LIU Songyu, LIU Zhibin. Experimental nuclear magnetic resonance study of the water and oil distributions in diesel contaminated silt[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, **53**(2): 122-128. (in Chinese))
- [27] LIU X M, FENG B, TIAN R, et al. Electrical double layer interactions between soil colloidal particles: polarization of water molecule and counterion[J]. *Geoderma*, 2020, **380**: 114693.