

DOI: 10.11779/CJGE20240890

砂土孔隙结构对注气减饱和过程气体运移的影响研究

秦程朝¹, 陈育民^{*1}, 陈润泽¹, 汪子君¹, SARAJPOOR Saeed², 韩一¹, 冯义³

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 重庆大学溧阳智慧城市研究院智慧地下空间中心, 江苏 溧阳 213300,

3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 注气减饱和法是一种通过工程措施将气体注入可液化土体内部, 通过减小土体的饱和度以提高土体抗液化强度的方法。开展了饱和砂土注气减饱和过程的可视化薄板模型试验, 考虑了粒径分组和密实程度的影响。结果表明:

①根据注气量和砂土排水量的对比, 可将气体注入砂样内部的过程分为 4 个阶段: I 突破阶段, II 内部运移阶段, III 扩展溢出阶段, IV 稳定溢出阶段。注入气体的运移形态受孔隙结构内的孔喉尺寸和连通性控制, 其主要呈现出两种典型特征: 以惯性力主导的通道流和以黏性力和毛细管力主导的室流。②I 阶段的最小注气压力 P_{\min} 等于静水压力 u 和毛细管阻力 P_{cr} 之和。 P_{cr} 与特征粒径 d_{eff} 呈负相关, 而与 D_r 呈正相关。③粗砂组中气相饱和度 $S_{r,a}$ 与 d_{eff} 呈现正相关, 与 D_r 呈现负相关, 且在 II 和 III 阶段均显著变化。中细砂组和细砂组 $S_{r,a}$ 与 d_{eff} 呈现负相关, 与 D_r 呈现正相关, 且集中在 II 阶段中变化。④粗砂组实现减饱和的过程主要依赖易于扩展的连通通道, 而中细砂组和细砂组主要依赖气体在选择流动路径的途中在低流动阻力区域内的积累。

关键词: 减饱和法; 气体运移形态; 孔隙结构; 微观机理; 图像处理

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)12-2468-10

作者简介: 秦程朝(2001—), 男, 博士研究生, 从事防灾减灾及防护工程相关研究。E-mail: 250204030002@hhu.edu.cn。

Study on influence of sand pore structure on air migration during air injected desaturation process

QIN Chengzhao¹, CHEN Yumin¹, CHEN Runze¹, WANG Zijun¹, SARAJPOOR Saeed², HAN Yi², FENG Yi³

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Smart Underground Space

Research Center, Institute for Smart City of Chongqing University in Liyang, Liyang 213300, China; 3. China Railway First Survey and

Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Air injection desaturation method is a kind of liquefaction mitigation measure to reduce the saturation degree of soil by engineering measures to inject air into the interior of liquefiable soil. In order to study the air transport patterns and gas phase saturation in saturated sand, the visual sheet model test of saturated sand air-injection is carried out. The results show that:

(1) According to the characteristics of the morphology of the transport path of the injected air and the time-range change of the air pressure during the air injection process, the air injection process is divided into four stages: I breakthrough stage, II migration stage, III expansion overflow stage, and IV stabilized overflow stage. The flow state of the gas is controlled by the size of the pore throat and the connectivity of the pore structure and the air injection process shows two typical morphological features: channel flow dominated by inertial forces and chamber flow dominated by viscous and capillary forces. (2) The minimum air injection pressure P_{\min} in stage I is equal to the sum of hydrostatic pressure u and capillary resistance P_{cr} . P_{cr} is negatively correlated with the characteristic particle size d_{eff} and positively correlated by D_r . (3) $S_{r,a}$ in the coarse sand group shows a positive correlation with d_{eff} and a negative correlation with D_r . Its desaturation value changes significantly in both II and III stages. In the medium and fine sand groups, $S_{r,a}$ is negatively correlated with d_{eff} and positively correlated with D_r . Their desaturation values are basically concentrated only in stage II. (4) The process of achieving desaturation in the coarse sand group relies mainly on easily expandable connectivity channels, whereas the medium-fine and fine sand groups rely mainly on the accumulation of gases in the region of low flow resistance on way to the selected flow path.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52179101, 41831282) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52378358 and 52401336).

收稿日期(Received): 2024-09-03 **修回日期(Revised):** 2025-02-13 **接受日期(Accepted):** 2025-02-25 **网络出版日期(Online):** 2025-02-26

***通信作者** (E-mail: ymch@hhu.edu.cn)

Key words: desaturation method, air migration patterns, pore structure, microscopic mechanism, image processing

0 引言

地震作用下砂土及其他无黏性土地基发生的液化是岩土工程建筑物发生破坏的首要原因之一。如发生在汶川^[1]和玛多^[2]的地震造成了广泛的砂土地基液化现象,大量建筑物及其桩基础遭到破坏。过往的地震灾害情况研究发现,经过抗液化措施处理过的可液化地基上的建筑物,其破坏程度较小^[3]。故对抗液化措施的研究有利于工程中防灾减灾的实施。

在 1977 年前后, Sherif 等^[4]和 Chaney 等^[5]在非饱和砂土的研究中得出砂土饱和度的降低会提高自身的抗液化能力。随后, Pande 等^[6]监测了非饱和土试样在三轴试验以及振动台试验中的超孔隙压力的发展,验证了降低砂土饱和度可以降低地基液化潜力的猜想。基于上述研究成果,抗液化措施-减饱和法的概念^[7]被提出并被众多学者广泛研究。减饱和法^[8-10]的基本原理是通过外部措施在饱和易液化土中引入气相,取代孔隙水,以降低饱和度的方式来提高土体的抗液化能力。其中注气减饱和法^[8,11]是最直接的一种方式,它通过加压方式在饱和土体中注入空气。在注气过程中,注入气体驱使孔隙水流动,并存留在沿途的土体孔隙内部。因此为了分析注气减饱和法的减饱和效果,注入气体的运移过程和形态需要被研究。

在探索多孔介质中注入气体的运移过程和形态时,透明玻璃球被作为搭建多孔介质的颗粒,用于实现注气过程的可视化分析。Ji 等^[12]展示了不同直径的玻璃球内注入气体的运移形态。Varas 等^[13]研究了玻璃球群内气体运移过程的机理,即气体运移路径由重力和毛细管作用所控制。事实上,玻璃球与土颗粒作为搭建多孔介质的单元时,对结构内部二相流流动过程造成的阻力差异明显,同时土样内部孔隙形状与分布远比玻璃样的结构复杂。为了可视化分析土样内部注入气体的运移过程,物质之间的透光性差异和图像处理技术被应用。Van 等^[14]用均质硅砂粒制样,分析了注入气体的运移形态特征,证明了水湿介质中气体流动受到重力、黏性力和毛细力的影响。此外微观可视化手段也被用于分析气体运移路径形成的机理。Zhang 等^[15]应用 X-CT 技术,研究了钙质砂在电解过程中气泡的行为,结果表明电解水产生的气泡是毛细管侵入形式的小气泡,同时发现长时间的电解会导致气泡聚集并沿着孔喉通道流动。Chen 等^[16]利用低场核磁共振仪器发现电解产生的气泡形状和大小与钙质砂孔隙结构有关,孔隙和孔喉尺寸的分布影响小气泡的迁移和聚集。

这些学者对气体在小范围特定多孔介质中的运移过程、形态和机理进行了研究,但上述研究结果远不足以协助指导现场的工程施工。因为在真实场地中的地基物理参数差异明显,如果在不清楚注入气体在它们内部的运移过程、形态以及机理的前提下,贸然进行减饱和处理,那么处理后地基的减饱和效果难以被预估且呈现显著的差异性^[11,17]。因此有必要考虑在不同孔隙结构的角度下研究注入气体运移的过程、形态和机理。这样的研究不仅是现有减饱和试验所缺乏的,而且其结果有利于促进注气减饱和工艺的改良以及未来现场施工的指导。

综上所述,本文设置了 12 组空气注入试验,初步研究了颗粒粒径和相对密实度对砂样内注入气体运移的影响。为了研究上述因素的影响,在模型试验中对 4 个不同级配曲线的砂样进行了比较。通过改变各砂样的特征粒径 d_{eff} 和相对密实度 D_r (或孔隙率 n) 来获取变化不同的孔隙结构。其中 d_{eff} 可根据级配曲线来获取。在注气试验中,通过实时记录排水量换算砂样的气相饱和度 S_{ra} ,以确定注入气体存留在砂样孔隙内部的量。此外,注气试验进行了实时拍摄,用以获得气体运移的变化过程。利用图像处理技术获得了图像中气体的运移形态,并对这些形态进行划分和分析。最后基于上述结果对减饱和过程的机理进行解释。

1 试验装置和材料

1.1 试验装置

试验容器由 1 cm 厚的亚克力板黏接形成,以确保在试验过程中不发生变形。容器尺寸为长 30 cm、宽 1 cm 和高 45 cm。容器设有直径为 0.6 cm 的注气口和排水口。其中注气口在底面形心处,排水口在侧壁靠近顶部处,且始终处于打开状态。排水口的下方设有量筒,用于收集注气过程中排出的水。此外容器的各连接处均进行了密闭处理以保证气密性。

试验用小型注气泵作为注气的来源。气泵输出气流稳定,气压为 0~12 kPa。试验中通过旋钮控制注气压力来实现在不同级配的砂样中成功注气,即开始减饱和。注入气体的压力值用量程为 ± 13 kPa 的数字气压表测量,流量用流量计测量,并通过控制节流阀来保持注气口输入值的恒定。最后用 PU 管和三通管将上述各装置连接,完成注气减饱和和模型试验装置的安装(图 1)。

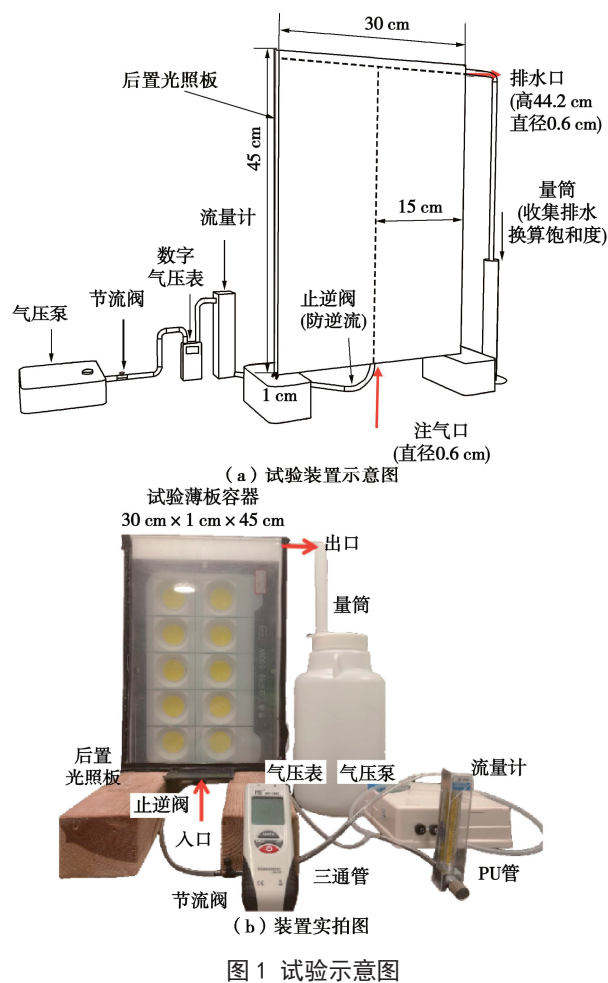


Fig. 1 Test schematic diagram

1.2 试验材料

本次试验各粒径组的砂样为福建砂，其被广泛用于砂土地基液化的试验中^[18]。试验开始前用筛网筛选福建砂以获取试验所需的 0.1~2 mm 粒径范围的颗粒。试验组共有 4 种级配的粒径组（图 2），各粒径组物理性质详见表 1。这些粒径组均属于不良级配：①不同粒径组不存在任意相同粒径。②同一粒径组内的粒径相对均一，且粒径范围较窄。上述特征使得它们的孔隙尺寸能很好地被特征粒径反映^[19]。

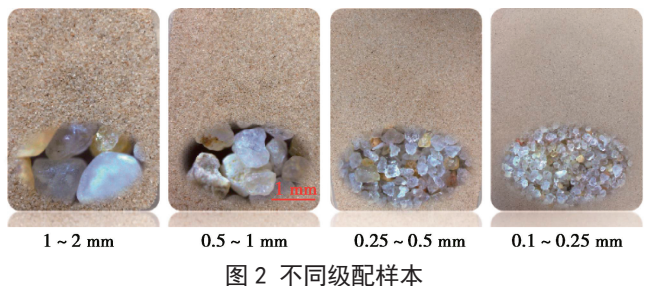


Fig. 2 Samples of different gradations

对于各粒径组颗粒粒径分布的确定采用随机取样和统计的方法来获取。具体方法为在某粒径组中随机抓取几组样品先后置于显微镜下，统计各组样品中颗

粒大小的分布，并重复 3~5 次，根据各组样品的平均尺寸分布来拟合该组的粒径分布曲线。各粒径组级配曲线详见图 3。

表 1 福建砂基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Fujian sand

粒径组 (S ₁ →S ₄)	最小 孔隙比 <i>e</i> _{min}	最大 孔隙比 <i>e</i> _{max}	土粒相 对质量 密度 <i>G</i> _s	不均匀 系数 <i>C</i> _u	曲率系 数 <i>C</i> _c
S ₁ : 1~2 mm	0.48	0.72	2.65	1.22	0.96
S ₂ : 0.5~1 mm	0.56	0.83	2.65	1.40	1.08
S ₃ : 0.25~0.5 mm	0.65	0.95	2.65	1.35	0.94
S ₄ : 0.1~0.25 mm	0.67	1.00	2.65	1.52	0.99

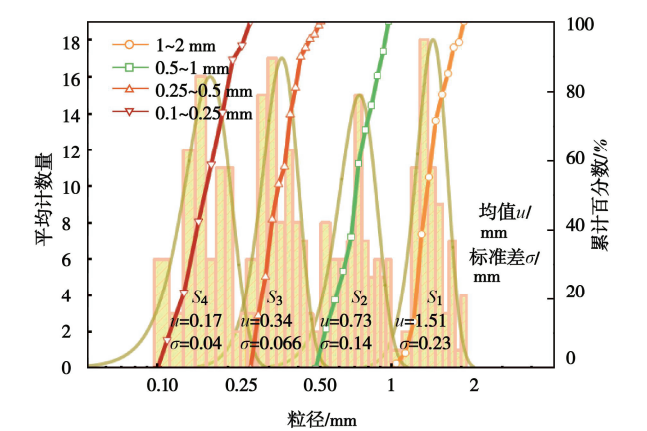


图 3 试验中采用的福建砂级配曲线

Fig. 3 Gradation curve of Fujian sand

1.3 图像可视化处理

在试验容器后放置 40 cm×30 cm 大小的高亮度光板照射（如图 1）。光线在穿透土样时会在容器的四周侧壁上发生折射与反射，影响图像的拍摄。因此需要在容器的侧壁和底部内外侧贴上黑色贴纸并将试验容器置于黑暗中，以减少其他光线源的干扰。

由于砂样是多孔介质，存在空隙与颗粒两种透光性质差异明显的两部分，故当后置光源照射时，砂样会形成明暗相间的平面。又因为容器足够的薄，故认为该映射出来的平面反映的是样本孔隙结构的剖面。试验中，注入气体会改变区域的透光性，故这些变化区域结合图像处理技术能成功获取注气过程中的气体运移路径变化和最终形态。

图像处理的步骤如下（图 4）：①将注气过程获取的图像裁剪为仅包含试验容器的区域。②将未注气与注气时的图像前后对比并获取相异区域。③对亮度对比度和色阶进行调整。④调节滤波器范围进行锐化和去噪，以突出试验过程中的气体运移形态。

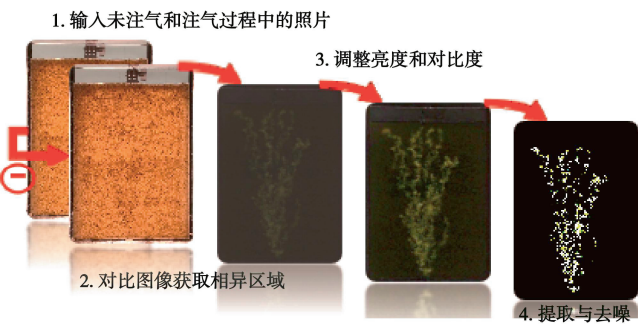


图 4 图像处理过程示例

Fig. 4 Example of image processing process

2 试样制备与试验工况

预试验结果表明, 合适的制样方法有利于试验结果的均匀性。制样方法所需辅助工具包括特制长颈漏斗, 搅拌棒、洗耳球、塑料锤和多个小型塑料筒。

样品均采用水下沉淀法制备, 初始注水量约 2 cm 左右, 而后续注水量保证略高于砂样表面, 直至水面高度到达排水口底部。采用以下步骤来饱和样品: ①制样前对砂粒用水煮法除气, 并采用除气水制样。②借用长颈漏斗在水下制样; ③逐层倒入砂粒, 分层制样; ④静置制好后的试样。为保证砂样的充分混合: ①采用塑料筒随机取样(图 5 (a)), 每次取样量在总砂量的 1/20 (对于粗砂组可取 1/10); ②在干燥条件下搅拌各塑料筒中的样品; ③用洗耳球在筒中注入适量水以完全湿润样品, 再搅拌以确保充分混合(图 5 (b))。用下述操作来避免砂粒群在水中分离: ①将特制长颈漏斗的底部出口紧贴之前形成的砂样表面; ②将混合均匀的少量砂团从塑料筒中倒入漏斗, 然后应用洗耳球滴入些许水将其送入底部; ③根据样本在管中的下落情况来缓慢移动漏斗以形成新的砂样表面(图 5 (c))。此外, 样本预设的相对密实度通过以下步骤确定: ①由不同砂样相对密实度对应的孔隙率计算所需的砂粒质量; ②由每次分层制样所取砂量的质量占比来预设每层砂样的高度; ③为了实现预定高度需要借助塑料锤轻敲容器、缓慢制样和多次尝试修正所需质量等措施来控制。

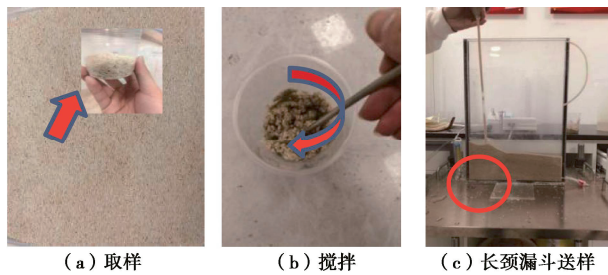


图 5 操作示意图

Fig. 5 Operation diagram

注气试验中, 只有气压逐步增大并达到 P_{min} 时, 映射平面的注气口附近开始出现微小色差(即原本的亮色变暗), 同时流量开始变化, 此时气体被成功注入土样内部。由于注气时的气压在允许气压范围内, 所以认为砂样的初始结构不会因注入气体而扰动^[11]。

气体成功注入样品后, 在土样内部发生运移^[14]。运移路径内部分孔隙水被注入气体取代而排出, 即饱和土孔隙空间内原本充满的孔隙水体积被部分气体体积置换。气相饱和度 $S_{r,a}$ 根据量筒采集的排水量 V_w 除以砂样孔隙体积 V_v 换算得到, 故变化的 $S_{r,a}$ 可作为孔隙内气体量的评判指标, 同时它也反映砂土饱和度, 即孔隙内水的变化, 气相饱和度增大表明孔隙内水量降低, 即砂土饱和度下降。

本研究对福建砂进行了注气试验, 主要测定了样本的 P_{min} 、注气过程中的 II 内部运移阶段内累计的气相饱和度 $S_{r,a}$ (II) 以及 II, III 阶段内总累计(气体迁移形态不变时)的气相饱和度 $S_{r,a}$ (III)。其中表 2 为试验结果概述。

表 2 试验工况表

Table 2 Test program

试验 编号	特征粒 径 d_{eff} / mm	相对密 实度 D_r /%	最小 注气值 P_{min} / kPa	II 阶段内 累计气相 饱和度 $S_{r,a}$ (II) /%	稳态时总气 相饱和度 $S_{r,a}$ (III) /%
S ₁ 1	1.425	30	5.83	3.61	10.41
S ₁ 2		50	5.89	2.45	10.24
S ₁ 3		70	5.96	1.64	10.07
S ₂ 1	0.690	30	6.06	1.17	3.31
S ₂ 2		50	6.12	1.02	3.25
S ₂ 3		70	6.21	0.85	3.21
S ₃ 1	0.330	30	7.64	1.80	3.61
S ₃ 2		50	8.09	2.82	3.75
S ₃ 3		70	8.14	3.53	4.12
S ₄ 1	0.155	30	10.05	2.46	2.64
S ₄ 2		50	10.33	4.95	5.13
S ₄ 3		70	10.54	6.33	6.71

其中, 特征粒径 d_{eff} 的获取步骤如下:

(1) 通过对级配曲线对颗粒进行粒径再分组, 如图 6 所示。取粒径区间中间值作为粒组粒径, 区间对应的累计含量差值则为该粒组的含量占比。每个级配曲线分为 4 个区间, 假设级配曲线端点值为 a, b , 则各区间依次对应为 $(a, u-\sigma), (u-\sigma, u), (u, u+\sigma)$ 和 $(u+\sigma, b)$ 。

(2) 采用比表面积等效方法来计算砂样的特征粒径,

$$d_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta P_i}{d_i}} \leftarrow \quad (1)$$

式中: d_i 为第 i 个区间最小粒径与最大粒径的平均值; ΔP_i 为第 i 个粒径区间对应的累积百分比之差; m 为划

分的粒组数。

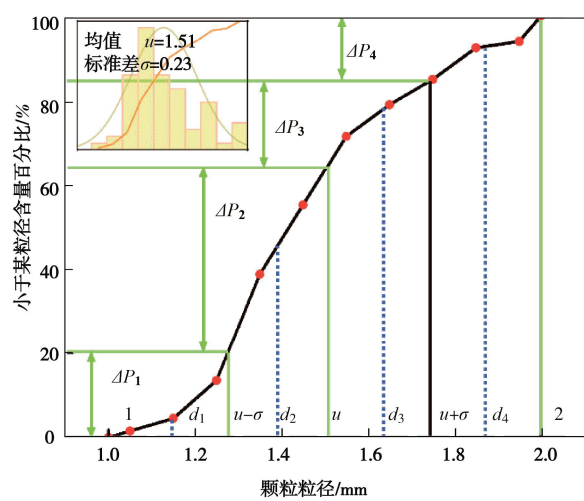


图 6 基于级配曲线对粒径再分组
Fig. 6 Regrouping of particle size based on grading curve

3 结果与分析

3.1 气体运移过程

本文根据气体运移的时程变化特征，将气体注入过程分为 4 个阶段：I 突破阶段、II 内部运移阶段、III 扩展溢出阶段、IV 稳定溢出阶段。以 $D_r=30\%$ 的各粒径组为例来展示注气土样内部气体运移过程。

各阶段的特征如下：

(1) I 突破阶段

只有当输入气压达到最小注气压力 P_{\min} 时，气体才能被成功注入土样内部。I 阶段是成功注气前和成功注入时刻（图 7（a），（b）中 0 min）的过程，注入气体量和排水量极其微量，均约等于零。

(2) II 内部运移阶段

注入气体仅在土样内部运移，具体特征表现在图 7（b）中 0 min 时红色虚线与第一条紫色虚线之间的区域。注气压力随着气体运移路径的竖向上升出现逐步下降趋势；注气量等于排水量。

(3) III 扩展溢出阶段

具体特征表现在图 7（b）中两条紫色虚线之间的区域，该阶段会因为砂样级配的差异出现不同特征：①在内部运移阶段结束后首次形成贯通砂样表面的气体溢出通道，且出现短时间的稳定形态。此时气压下降趋势消失，在小范围内波动。②在气体溢出通道形成后，气体再次运移在土体底部和表层分别生成新的运移路径和气体溢出通道（图 7（a），1~2，0.1~0.25 mm 砂样在 12 min 时分别在底部新增运移路径和表层新增气体溢出通道）。气压随着新路径的生成而增大，但在形成贯通砂样表面的溢出通道后下降，整体呈现较大幅度的波动（图 7（b））；注入气体量均大于排水量。

(4) IV 稳定溢出阶段

具体特征表现在图 7（b）中第二条紫色虚线之后的区域，此时新注入的多余气体不再在土样内部占据新的孔隙，而是通过已经存在的通道以气流的形式溢出孔隙结构，气体运移形态呈稳态。气压基本不变；排水量与注入气体量无关且保持不变。

3.2 气体运移形态

将各级配砂样的气体扩散形态图像按粒径组类别和相对密实度差异整理如图 8。其中红色和绿色分别表示 II，III 阶段中新增的气体运移路径。

不同粒径组内的注入气体，其运移形态图像表现出两种典型的特征：①以惯性力主导的通道流。该流动形式在 II 和 III 阶段中均存在明显的迁移路径增加。

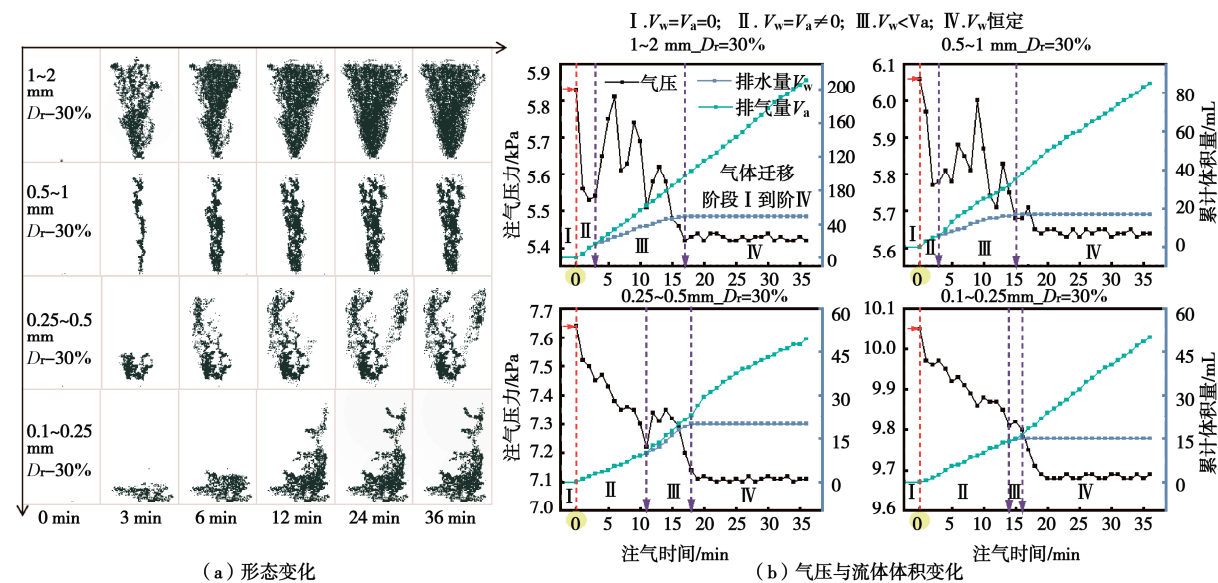


图 7 注入气体运移过程
Fig. 7 Air migration process

②以黏性力和毛细管力为主导的室流^[20]。该流动形式基本只在Ⅱ阶段中存在迁移路径增加。

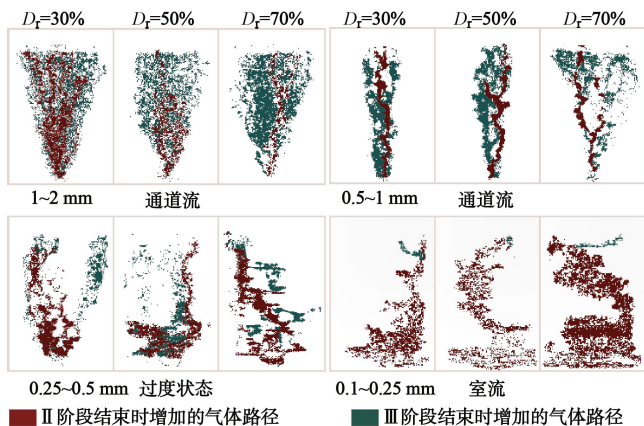


图 8 各级配砂样的气体扩散形态

Fig. 8 Air transport patterns of different graded sand samples

上述的通道流和室流与前人在观测均质玻璃球^[13]、硅砂^[14]以及熔融石英砂^[20]内部的气体迁移现象类似。参考《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)中砂的分类,将表现出通道流气体运移形态的粒径组称为粗砂组(1~2, 0.5~1 mm),表现出室流气体运移形态的粒径组称为细砂组(0.1~0.25 mm),而在不同相对密度 D_r 下的气体运移形态出现通道流到室流转变(图 8)的粒径组称为中细砂组(0.25~0.5 mm)。因为粗砂组和细砂组在不同 D_r 下只表现单一类型的气体运移形态,故认为中细砂组是内部存在临界粒径的过渡粒径组,其内部气体运移形态受 D_r 的控制。

3.3 孔隙结构与最小注气压力 P_{\min}

注气减饱和的理论最小注气压力 P_{\min} 可通过下述等式获得^[21]

$$P_{\min} = P_c + u \quad (2)$$

式中: u 为静水压力; P_c 为毛细管力,

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (3)$$

式中: σ 为界面张力; θ 为润湿接触角; r 为毛管半径。

硅砂土属于非憎水性土,放在砂土上的水能自发地进入土内,它的接触角 θ 的范围为 $0 \sim 90^\circ$ ^[22],本文取 $\theta = 0^\circ$ (用理论最大值估算)。砂土的孔径可通过级配曲线来获取^[23],并将砂样的平均孔径作为毛细管半径 r 的值。此外注气试验中发现在纯水内注气,注气压力与静水压力 u 存在差值,且该值在改变水面高度的情况下保持几乎不变,约为 1.1 kPa。该值的出现与本文小孔注气条件有关,因此需要将试验测得的 P_{\min} 减去该值来进行修正。

将理论与实测的 P_{\min} 结果对比(图 9),发现即使偏大估算的 P_{\min} 也要低于实测的 P_{\min} ,且在较小 d_{eff} 的砂样中,这种差异更显著。因此式(2)需要被修正为

$$P_{\min} = P_c + P_\lambda + u \quad (4)$$

式中: u 为静水压力; P_c 为毛细管力; P_λ 定义为黏性阻力。

试验中,水位均为高 44.2 cm,静水压力 $u = 4.32$ kPa

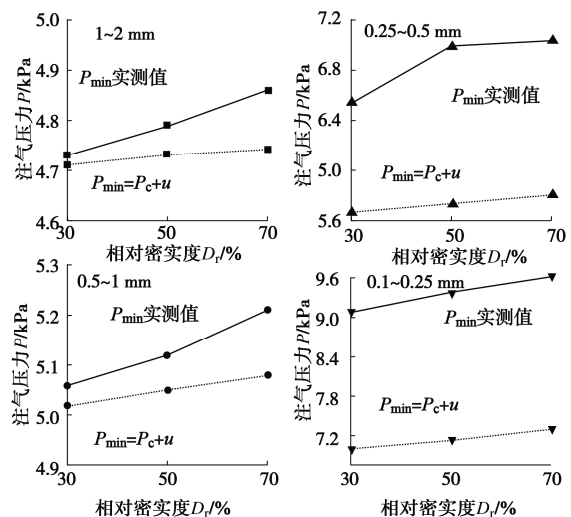


图 9 理论与实测的 P_{\min} 结果对比

Fig. 9 Comparison between theoretical values and measured values

如果将二相流运动的过程假设在一条条弯曲的毛管中,则注入气体在Ⅰ突破阶段所受动力和阻力如图 10 所示。

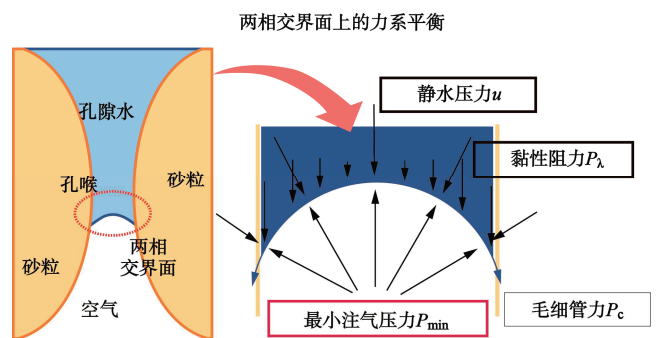


图 10 两相交界面上的力系平衡

Fig. 10 Force-balance at two-intersection interfaces

注气试验结果发现 P_c 和 P_λ 在不同砂样中变化。为了便于研究将两者之和统称为毛细管阻力 P_{cr} , 则式(4)可改写为

$$P_{\min} = P_{cr} + u \quad (5)$$

式中: u 为静水压力; P_{cr} 为毛细管阻力。在气液相不变的条件下, u 只与水相高度有关, P_{cr} 只与孔隙结构有关,是 P_c 和 P_λ 之和。

砂样中 d_{eff} 和 D_r 对 P_{cr} 的影响见图 11。其中 P_{cr} 的变化程度用斜率绝对值表示(斜率均为负值),反映两组砂样 P_{cr} 的接近程度,斜率绝对值越小,它们的 P_{cr} 越

接近。

总结现象如下：① P_{cr} 变化程度随 d_{eff} 减小而显著增加，其中相同粒径组内 P_{cr} 基本无变化，但在粗-中细-细粒径组的转变下产生显著差异性（图 11（a））。② P_{cr} 因 D_r 改变而产生的变化趋势在各粒径组中互异，但均呈现正相关。其中对中细砂组影响最剧烈，细砂组次之，而对粗砂组影响最小。

这些结果表明：① d_{eff} 对 P_{cr} 的影响高于 D_r ，且起主要作用。由相异 d_{eff} 组成的孔径的变化对 P_{cr} 的影响不同。由较大 d_{eff} 组成的孔径对砂样结构紧密程度的敏感度较低，它们的 P_{cr} 相近；而由较小 d_{eff} 组成的孔径对砂样结构紧密程度的敏感度较高，它们的 P_{cr} 差异明显（图 11（b））。② D_r 的增大不仅会整体缩小该组的土骨架结构来减小孔径的大小，还导致其内部的较细砂充分填充入较粗砂形成的孔隙内部，改变结构内部孔径的空间分布。这样的结果对内部同时存在中砂和细砂的过渡粒径组（中细砂组）是明显的，这也是出现图 8 中注入气体运移形态转变的原因（图 11（c），（d））。

上述结果与前人的渗流试验研究结论类似^[24]：流体在多孔介质内部的流动能力由小颗粒控制，同时密实程度的增大会削弱流体的流动能力。

3.4 孔隙结构与气相饱和度 $S_{r,a}$

根据试验气相饱和度 $S_{r,a}$ 结果（表 2）绘制图 12。

其中 $S_{r,a}$ 的变化率用斜率反映。其中斜率的正负反映特征粒径 d_{eff} 与 $S_{r,a}$ 的正负相关性。

根据图 12 可总结如下结果：① $S_{r,a}$ 变化趋势在 $d_{eff}=0.690$ 处出现突变。即粗砂组中 $S_{r,a}$ 与 d_{eff} 呈现正相关，中细砂组和细砂组 $S_{r,a}$ 与 d_{eff} 呈现负相关（图 12（a））。② $S_{r,a}$ 斜率整体呈现增长趋势。在负增长情况下较小 d_{eff} 利于 $S_{r,a}$ 的变化；在正增长情况下较大 d_{eff} 利于 $S_{r,a}$ 的变化（图 12（b））。此外中细砂组是过渡粒径组被验证：0.5~0.25 mm 砂样在 II，III 阶段的减饱和和效果先均与 0.5~1 mm 接近，但随着 D_r 的增加，它的减饱和和效果逐渐与 0.5~1 mm 产生差距，尤其是 II 阶段（图 12（b））。③在粗砂组中， $S_{r,a}$ 与 D_r 呈现负相关。但在中细砂和细砂组中两者呈现正相关（图 12（c））。④ D_r 的影响主要集中于 II 阶段，对中细砂组和细砂组的减饱和和效果影响较大。此外中细砂组是过渡粒径组被验证：在 II 阶段的归一化 $S_{r,a}$ 曲线靠近细砂组，而在 III 阶段时曲线靠近粗砂组。（图 12（d））。

这些结果与图 8 所示的现象吻合。这也意味着粗砂组和细砂组内部气体运移的差异性会导致最终减饱和和效果的不同。

4 不同孔隙结构内减饱和的机理分析

由前述的所有章节可知，孔隙结构通过改变注入气体的运移方式来影响减饱和和效果。

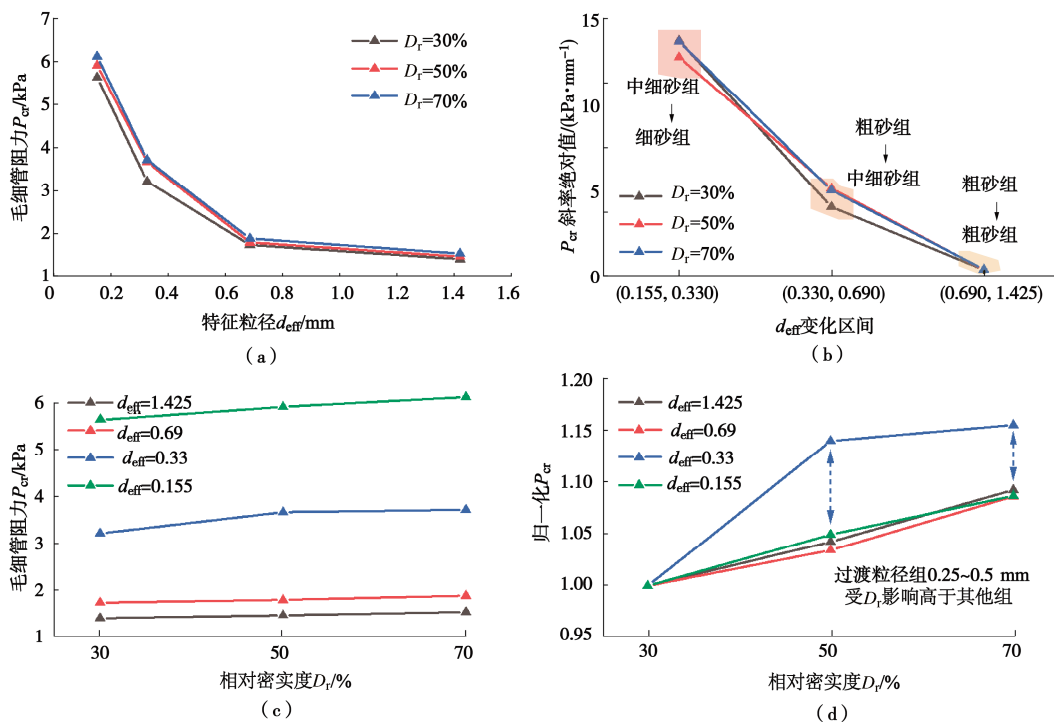


图 11 特征粒径与相对密度对毛细管阻力的影响

Fig. 11 Effect of characteristic particle size and relative density on capillary resistance

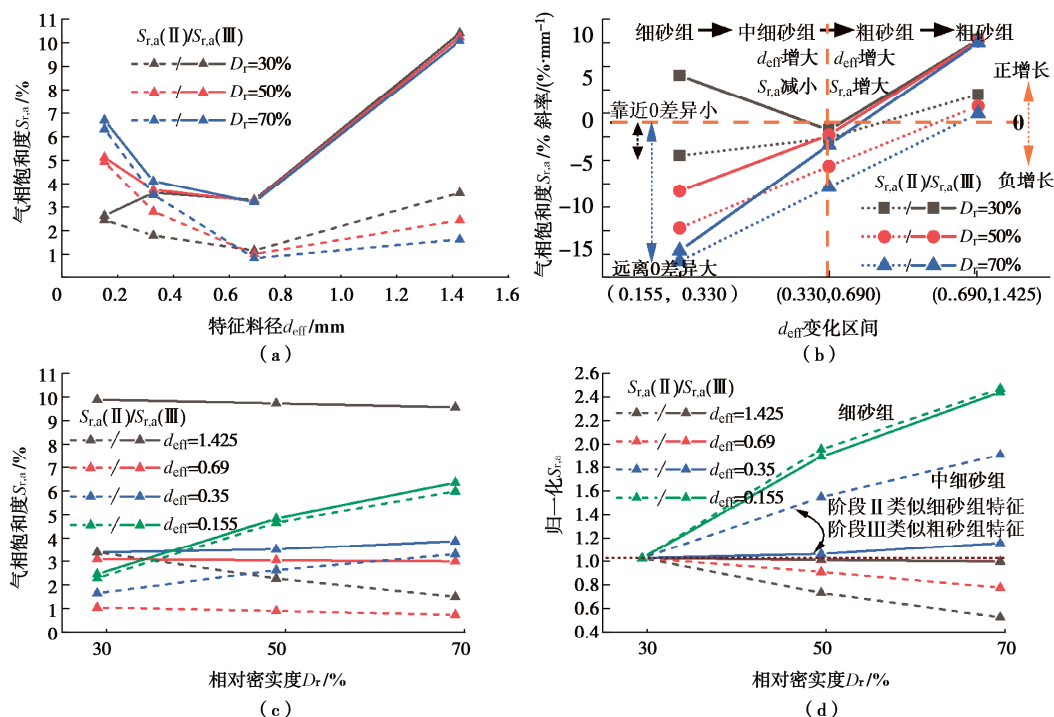


图 12 特征粒径和相对密度对气相饱和度的影响

Fig. 12 Effect of characteristic particle size and relative density on gas phase saturation

减饱和和过程的机理如下:

(1) 孔隙结构。孔隙结构受粒径和相对密度 D_r 的影响如图 13 所示。颗粒粒径的减小和 D_r 的增大会降低孔喉尺寸和连通长度, 它导致流体在孔隙结构内流过相同路径长度时, 沿途的连通性下降。其中连通性的差异性表现在流动通道的数量和曲折率: 如细粒组的连通性较差, 因为其内部存在大量封闭和离散的曲折流动通道^[25], 而这样的通道特征会导致流体流动受阻激增和滞留。

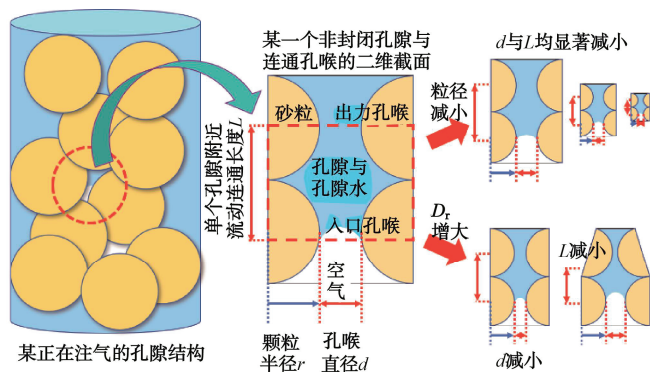


图 13 粒径和相对密度对孔隙结构的影响

Fig. 13 Effect of particle size and relative density on pore structure

(2) 孔隙结构内的流体流动状态。流体在砂样孔隙和孔喉中的流动受到黏性力和毛细管力 P_c 的阻碍。且流体的流动会选择在阻碍作用低的优势路径内流动, 如气体倾向于在松散的多孔介质中运移^[26]。当孔喉尺寸和孔隙结构的连通性降低时, 流体流动受到的

黏性力和毛细管力 P_c 增大 (图 14), 进而加剧了流体在多方选择流动通道的过程。即流体在原流动路径中流动受到较高阻力时, 会先向四周低阻力的区域转移并占据它们, 整体呈现横向扩展, 最后流体在该区域内选择良好连通性的通道离开。其中较高阻力常常在小孔喉中存在, 而四周低阻力的区域则为较大的孔隙或部分孔喉。这样的结果会导致流体在遇到高阻力区域和封闭通道时, 出现在附近低阻力区域滞留和积累的现象。

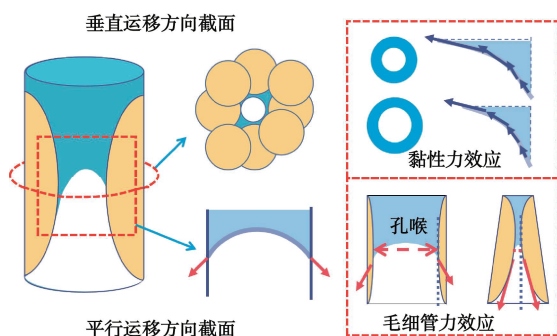


图 14 孔隙结构对流体流动状态的影响

Fig. 14 Effect of pore structure on fluid flow state

综上所述, 在粗砂组中, 其内部流体在该孔径条件下的流动受阻较小, 且由于存在大量良好的连通路经, 内部流体易于沿着注入时的惯性方向流动 (图 15)。同时粗砂组砂样的 d_{eff} 增大和 D_r 减小会导致的流体流动受阻减小和连通性的增大, 这有利于减饱和和效果的提高。而在中细砂组和细砂组中, 因为内部高阻

力区域大量的存在,迫使流体流动滞留。即气体在多方选择流动通道时,在沿途的较低流动阻力孔隙内的滞留和积累是实现减饱和的主要原因(图15), d_{eff} 减小和 D_r 增大导致的流体流动受阻增大和非连通区域的增加,它们有利于减饱和效果的提高。

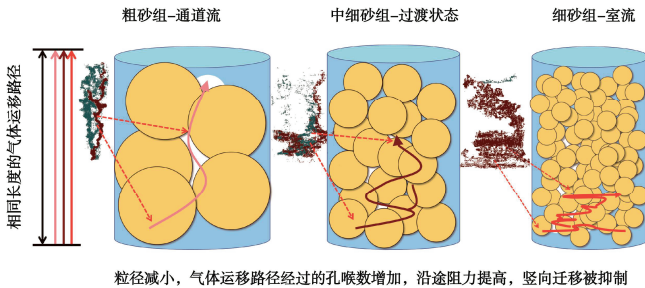


图15 各级配砂样内部气体运移举例

Fig. 15 Examples of air transport of various sand samples

5 结 论

本文通过可视化薄板模型盒条件下的土样注气试验,研究了不同级配和相对密度的砂样。这些砂样内部的气体运移和气相饱和度变化的规律如下:

(1)根据注入气体运移路径形态的特点和注气过程气压、排水量和注气量的时程曲线,将气体注入过程分为4个阶段: I 突破阶段、II 内部运移阶段、III 扩展溢出阶段、IV 稳定溢出阶段。在注气过程中气体运移形态表现出两种典型的形态特征:以惯性力主导的通道流和以黏性力和毛细管力为主导的室流。气体运移形态在粗砂组中表现为通道流,在细砂组中表现为室流。而在中细砂组中,它随着相对密度 D_r 增大时,出现通道流到室流的转变。

(2) I 阶段的最小注气压力 P_{min} 等于毛细管阻力 P_{cr} 和静水压力 u 之和。其中 P_{cr} 等于毛细管力 P_c 和黏性阻力 P_v 之和,它与特征粒径 d_{eff} 呈负相关,而与 D_r 呈正相关。在粗砂组中变化 d_{eff} 和 D_r , P_{cr} 基本不变,而在中细砂组和细砂组中 P_{cr} 变化显著。

(3)粗砂组中气相饱和度 $S_{\text{r,a}}$ 与 d_{eff} 呈现正相关,与 D_r 呈现负相关,其减饱和度值在II和III阶段变化均显著。中细砂组和细砂组 $S_{\text{r,a}}$ 与 d_{eff} 呈现负相关,与 D_r 呈现正相关,其减饱和度值基本仅集中于II阶段。

(4)注气过程中的气流在孔隙空间中的流动状态决定了砂样内气体运移形态和存留量。而流动状态由孔隙结构内孔喉尺寸和连通性决定。粗砂组实现减饱和的过程主要依赖气流通道区域的扩展,而中细砂组和细砂组主要依赖气体在选择流动路径的途中在低流动阻力区域内的积累。

本文虽然修正了 P_{min} 的关系式,但未对式中的 P_{cr} 进行理论推导。此外用 d_{eff} 和 D_r 来反映孔隙空间对于

更复杂的级配砂样是不够的,因此后续研究中需要应用X-CT技术来量化孔隙空间特征。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 秦程朝,陈育民和陈润泽参与研究内容设计;陈育民提供试验指导;秦程朝,汪子君, Saeed Sarajpoor和韩一完成试验和分析;秦程朝,陈育民,陈润泽和冯义参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by QIN Chengzhao, CHEN Yumin and CHEN Runze. The experiments were supervised by CHEN Yumin. The experiments and analyses were conducted by QIN Chengzhao, WANG Zijun, Saeed Sarajpoor and Han Yi. The manuscript was drafted and revised by QIN Chengzhao, CHEN Yumin, CHEN Runze and FENG Yi. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] CAO Z Z, LESLIE YOUNG T, YUAN X M. Gravelly soils that liquefied during 2008 Wenchuan, China earthquake, $M_s=8.0$ [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**(8): 1132-1143.
- [2] 袁近远, 王兰民, 汪云龙, 等. 不同设防水准下场地液化震害风险差异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(1): 246-260. (YUAN Jinyuan, WANG Lanmin, WANG Yunlong, et al. Study on difference of risk of earthquake liquefaction damages at different fortification levels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(1): 246-260. (in Chinese))
- [3] 黄雨, 于淼, SUBHAMOY B. 2011年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 834-40. (HUANG Yu, YU Miao, BHATTACHARYA Subhamoy. Review on liquefaction-induced damages of soils and foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 834-40. (in Chinese))
- [4] SHERIF M A, TSUCHIYA C, ISHIBASHI I. Saturation effects on initial soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(8): 914-917.
- [5] CHANEY R C. Saturation Effects on the cyclic strength of sands[J]. Earthquake Engng & Soil Dynamics, 1978, **1**: 342-58.
- [6] PANDE G N, PIETRUSZCZAK S. Assessment of risk of liquefaction in granular materials and its mitigation [C]// Proc Iacmag, Goa, 2008.

- [7] PIETRUSZCZAK S, PANDE G N, OULAPOUR M. A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(9): 833-838.
- [8] OKAMURA M, ISHIHARA M, TAMURA K. Degree of saturation and liquefaction resistances of sand improved with sand compaction pile[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(2): 258-264.
- [9] 何森凯, 陈育民, 方志. 可液化地基电解减饱法处理的电学特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(8): 1434-1441. (HE Senkai, CHEN Yumin, FANG Zhi. Electrical characteristics of electrolytic desaturation method for liquefiable foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(8): 1434-1441. (in Chinese))
- [10] 陈育民, 何森凯, 吴海清, 等. 电解减饱和法处理可液化地基的振动台试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(4): 726-733. (CHEN Yumin, HE Senkai, WU Haiqing, et al. Model tests on liquefaction resistance of desaturation measures of electrolysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(4): 726-733. (in Chinese))
- [11] OKAMURA M, TAKEBAYASHI M, NISHIDA K, et al. In-situ desaturation test by air injection and its evaluation through field monitoring and multiphase flow simulation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(7): 643-652.
- [12] JI W, DAHMANI A, AHLFELD D P, et al. Laboratory study of air sparging: air flow visualization[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 1993, **13**(4): 115-126.
- [13] VARAS G, GÉMINARD J C, VIDAL V. Air invasion in a granular layer immersed in a fluid: morphology and dynamics[J]. *Granular Matter*, 2013, **15**(6): 801-810.
- [14] VAN DE VEN C J C, MUMFORD K G. Characterization of gas injection flow patterns subject to gravity and viscous forces[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, **18**(1): 1-11.
- [15] ZHANG Z, CHEN Y M, LIU H L, et al. Resistivity characteristics during horizontal-layered electrolysis desaturation of calcareous sand[J]. *Engineering Geology*, 2020, **279**: 105899.
- [16] CHEN R Z, CHEN Y M, LIU H L, et al. Microscopic mechanism analysis of calcareous sand in electrolysis desaturation using ^1H L-F NMR[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, **59**(10): 1743-1755.
- [17] CHEN R Z, CHEN Y M, LIU H L, et al. In situ desaturation tests by electrolysis for liquefaction mitigation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, **58**(11): 1744-1756.
- [18] YE B, ZHANG L, WANG H H, et al. Centrifuge model testing on reliquefaction characteristics of sand[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, **17**(1): 141-157.
- [19] MAHMOODLU M G, RAOOF A, SWEIJEN T, et al. Effects of sand compaction and mixing on pore structure and the unsaturated soil hydraulic properties[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, **15**(8): 1-11.
- [20] SONG X L, ZHAO Y S, WANG H F, et al. Predictive models and airflow distribution associated with the zone of influence (ZOI) during air sparging remediation[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, **537**: 1-8.
- [21] MARULANDA C, CULLIGAN P J, GERMAINE J T. Centrifuge modeling of air sparging: a study of air flow through saturated porous media[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, **72**(2/3): 179-215.
- [22] LETEY J, CARRILLO M L K, PANG X P. Approaches to characterize the degree of water repellency[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **231**: 61-65.
- [23] TANG Y, WEI H H, CHEN Y M, et al. Modeling of permeability for granular soils considering the particle size distribution[J]. *Granular Matter*, 2023, **25**(2): 35.
- [24] REN X W, SANTAMARINA J C. The hydraulic conductivity of sediments: a pore size perspective[J]. *Engineering Geology*, 2018, **233**: 48-54.
- [25] CHEN M-R, HINKLEY R E, KILLOUGH J E. Computed tomography imaging of air sparging in porous media[J]. *Water Resources Research*, 1996, **32**(10): 3013-3024.
- [26] VAN DE VEN C J C, ABRAHAM J E F, MUMFORD K G. Laboratory investigation of free-phase stray gas migration in shallow aquifers using modified light transmission[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, **139**: 103543.