

DOI: 10.11779/CJGE201810023

循环抽注水作用下承压含水层砂土的变形特性

李亚杰, 王旭东*, 王雅平, 常银生

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 为探讨人工回灌和地下水位季节性变化等因素对承压含水层砂土变形特性的影响, 利用 FlowTrac II 增量固结试验系统, 设计了符合承压含水层砂土应力状态、符合抽注水应力路径的单向压缩试验, 研究了循环抽注水作用对砂土变形特性的影响规律及抽注水作用下砂土变形特性的影响因素。试验结果表明: 抽水作用(加载)下砂土产生压缩变形, 注水作用(卸载)下, 砂土变形呈现压缩和回弹两种现象, 且砂土孔隙比大(密度小)时易发生注水压缩现象; 循环抽注水作用下砂土总体呈现压缩变形特性, 随抽注水循环次数的增加和前期固结压力增大, 注水作用下砂土变形逐渐由压缩向回弹转化。基于砂土结构演变, 构建了以弹性理论和最小势能原理为基础的抽注水作用下砂土变形机理, 解释了注水作用过程中砂土变形呈现的回弹与压缩交替波动的试验现象, 用试验结果总结了注水强度、前期固结压力、注水速率等因素对砂土变形特性的影响规律, 验证了抽注水作用下砂土变形机理的合理性。

关键词: 循环抽注水; 承压含水层; 粗砂; 变形特性

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)10-1943-07

作者简介: 李亚杰(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事土的力学性质方面的研究工作。E-mail: 15062281963@njtech.edu.cn。

Deformation characteristics of sand in confined aquifer under cyclic pumping-recharging groundwater

LI Ya-jie, WANG Xu-dong, WANG Ya-ping, CHANG Yin-sheng

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to investigate the influences of artificial recharge and seasonal changes of groundwater levels on deformation characteristics of sand in confined aquifer, using the FlowTrac II system for incremental consolidation testing, the uniaxial compression test is designed, which satisfies the sand stress states of the confined aquifer and the stress paths of pumping-recharging groundwater. Moreover, the effect of cyclic pumping-recharging groundwater on sand deformation characteristics and influencing factors of sand deformation characteristics under pumping-recharging groundwater are studied. The tests results show that the sand is compressed during pumping (loading), while both compression and rebound are observed during recharging (unloading), and compression tends to occur in the sand of large void ratio (low density). In general, the sand presents compression deformations during cyclic pumping-recharging water. However, with the increase of the number of pumping-recharging cycles and pre-consolidation pressures, the sand deforms from compression to rebound during recharging water. Considering the evolution of sand structures, the deformation mechanism of sand during pumping-recharging water is proposed using the elastic theory and the principle of the minimum potential energy. The phenomenon of alternating rebound and compression of sand during recharging water is well explained. The influences of recharging water intensity, pre-consolidation pressure and recharging water rate on the deformation characteristics of sand are summarized, and the rationality of deformation mechanism of sand during pumping-recharging water is verified by the test results.

Key words: cyclic pumping-recharging groundwater; confined aquifer; coarse sand; deformation characteristic

0 引言

过量抽取地下水引起土体产生压缩变形, 造成地面沉降地质灾害, 严重威胁地面建筑物的安全和国民经济的可持续发展, 常采用人工回灌地下水等技术手段控制地面沉降。

近年国内学者对上海、苏锡常等长江三角洲地区的水位变化及土层变形的大量监测资料研究分析发

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272303)

收稿日期: 2017-08-24

*通讯作者 (E-mail: cewdx@njtech.edu.cn)

现, 在地下水位持续回升阶段, 承压含水层砂土的变形并不都是呈现同步回弹现象, 而是具有明显的滞后效应, 回弹变形量小, 甚至部分含水层砂土随有效应力的减少呈现持续压缩现象^[1-4]。地下水位上升时含水砂层产生的压缩变形现象难以用现有的土体变形理论在机理上给予清晰的解释。

为了寻找地下水位回升时含水层砂土产生压缩变形的原因, Shi 等^[5]和张云等^[6]采用单轴压缩试验证实了承压含水层砂土存在蠕变变形特性, 将地下水位回升时含水层砂土继续产生压缩变形的原因归咎为前期地下水位下降引起的砂土蠕变变形量大于地下水位回升引起的回弹变形量。张云等^[7]和叶淑君^[8]利用分级反复荷载单向固结试验研究了地下水位升降条件下含水层砂土的变形特性。试验结果表明, 在一定荷载范围内, 砂土经历(2~3)次的循环加卸载后, 加载引起的压缩变形和卸载导致的回弹变形渐趋一致。上述室内试验研究成果为认识抽注水作用下含水层砂土的变形特性提供了试验依据, 但所有试验都采用了对砂土进行直接加卸载方式模拟地下水位的变化过程, 试验应力路径不符合含水层砂土应力状态的变化规律, 因此, 对含水层砂土变形特性的认识不免存在局限性。Li 等^[9]通过模型箱抽注水试验研究了砂土在抽注水条件下的竖向变形特性, 并在试验中观察到中密砂在注水过程中出现了压缩现象; 王旭东等^[10]利用孔压控制的室内单向压缩试验观察到注水作用下细砂的压缩变形现象; 李广信等^[11-12]在三轴循环加卸载试验中发现了松砂、低应力水平中密砂的卸载体缩现象, 卸荷状态下砂土呈现的体缩特性为解释地下水位上升时含水砂层产生压缩变形现象提供了一条新的思路。

为了深入认识地下水位变化条件下承压含水层砂土的变形特性, 尤其是地下水位回升时砂土的变形特性。采用 FlowTrac II 增量固结试验系统, 以标准粗砂为研究对象, 设计符合承压含水层砂土应力状态、满足抽注水过程应力路径的单向压缩试验, 拟通过对孔隙水压力的控制模拟抽注水作用, 研究抽注水循环作用、前期固结压力、抽注水强度等因素对承压含水层砂土变形特性的影响规律及砂土变形机理。

1 试验设计

1.1 试验仪器

试验仪器为美国 GEOCOMP 公司生产的 FlowTrac II 增量固结试验系统, 主要由两台 FlowTrac II 压力/体积控制器、Rowe 固结仪、位移计和孔压传感器、RCON 软件等部分组成。该试验系统的位移计分辨率为 10^{-4} mm, 孔压传感器分辨率为 10^{-2} kPa。试

验在 26 ± 3 °C 的室内环境中进行。

1.2 试验材料

试验所用土样为中国福建标准砂 (SiO_2 含量大于 96%), 通过筛析法得到了粒径在 (0.5~1.0) mm 之间较为均匀的粗砂, 其粒径级配累积曲线如图 1 所示。粗砂的干密度为 $\rho_d = 1.543 \text{ g/cm}^3$; 颗粒比重 $G_s = 2.66$; 最大孔隙比与最小孔隙比分别为 $e_{\max} = 0.891$, $e_{\min} = 0.560$ 。试验中试样为重塑砂样, 原始高度 $h_0 = 25.4$ mm, 直径 $D = 63.5$ mm, 制样初始孔隙比 $e_0 = 0.727$ 。

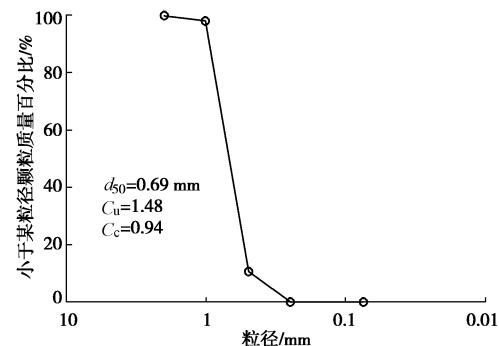


图 1 粗砂的粒径级配累积曲线

Fig. 1 Cumulative curve of particle-size distribution of coarse sand

1.3 试验原理

已有的含水层砂土变形特性试验研究大多基于常规压缩试验^[5-8, 13], 该试验条件下砂土的应力路径如图 2 中 AC 所示。实际承压含水层中, 由于抽注水作用引起的地下水位升降, 诱发的含水层砂土应力状态变化的应力路径如图 2 中 AB 所示, 即土中广义剪应力 q 保持不变, 平均主应力 p' 随孔隙水压力变化^[10]。已有的试验研究表明, 砂土经历不同的应力路径会影响其变形行为^[14-15]。由此可见, 设计符合承压含水层砂土应力状态和满足地下水位升(降)条件的应力路径试验, 是正确认识循环抽注水作用下承压含水层砂土变形特性的前提。

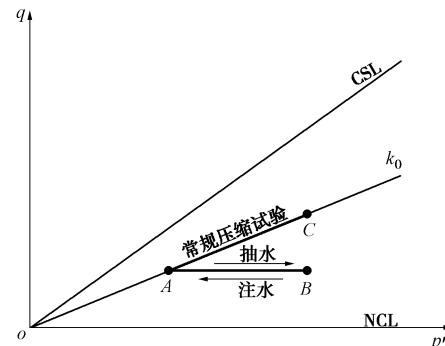


图 2 抽注水条件下含水层砂土的应力路径

Fig. 2 Stress paths of sand in aquifer during pumping-recharging groundwater

根据图 3 所示 Rowe 固结仪结构系统和工作原理。

砂土试样处于一维压缩状态, 以模拟承压含水层砂土的侧限应力状态; 通过轴压控制对砂土试样施加轴向总应力并保持不变, 模拟承压含水层上覆土体荷载; 通过孔压控制实现对试样中孔隙水压力控制, 以模拟含水层的抽水和注水作用, 砂土固结过程中通过试样上表面设置的透水石排水。根据有效应力原理, 孔隙水压力变化引起试样的有效应力变化, 从而导致砂土产生变形, 由位移计获取抽注水作用下砂土的变形值。

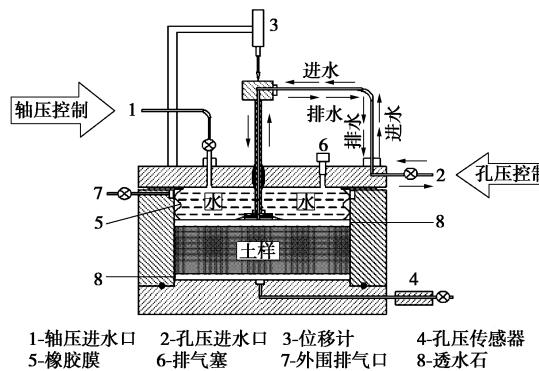


图 3 Rowe 固结仪的基本配置

Fig. 3 Basic configuration of Rowe consolidation cell

1.4 试验方案

(1) 循环抽注水试验方案

设计了如图 4 所示的循环抽注水模式。图中 CP-SP-CR-SR-CP 表达了一定抽注水强度、抽注水速率下抽水和注水的一个循环过程。其中 CP-SP 为连续抽水阶段, SP-CR 为稳压抽水阶段(孔压恒定), CR-SR 为连续注水阶段, SR-CP 为稳压注水阶段(孔压恒定)。试样先在竖向总应力 σ_v (600 kPa) 和初始孔隙水压力 u (550, 450, 350 kPa) 作用下固结稳定, 然后通过改变孔隙水压力实现抽注水作用模拟, 抽水强度与注水强度相等, 粗砂循环抽注水试验方案如表 1 中试验类型 I 所示。

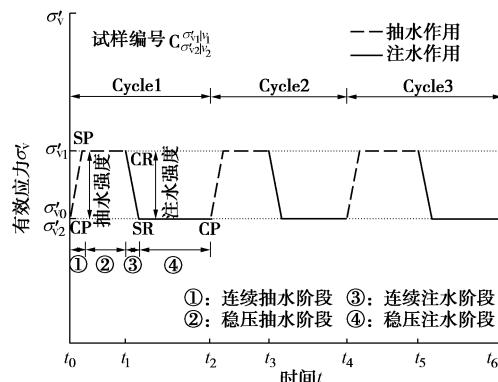


图 4 循环抽注水模式

Fig. 4 Model of cyclic pumping-recharging groundwater

(2) 稳压抽注水试验方案

为了深入了解注水作用(卸载)下承压含水层砂土变形特性, 在如图 4 中 Cycle1 抽注水模式下, 设计了考虑注水强度、注水速率、前期固结压力等因素的粗砂稳压抽注水试验方案, 如表 1 中试验类型 II 所示。

表 1 粗砂循环抽注水及稳压抽注水试验方案

Table 1 Test schemes of cyclic and stable pumping-recharging water for coarse sand

试验类型	试样编号	总应力 σ_v /kPa	前期固结压力 σ'_{v0} /kPa	抽/注水强度 Δu /kPa	加/卸载速率 $/(kPa \cdot min^{-1})$
			强度 Δu /kPa	速率 $/(kPa \cdot min^{-1})$	
I	$C_{500,1}^{100,0,1}$	600	50	50/-50	0.1/0.1
	$C_{150,0,1}^{200,0,1}$	600	150	50/-50	0.1/0.1
	$C_{250,0,1}^{300,0,1}$	600	250	50/-50	0.1/0.1
II	$C_{175,0,2}^{200,0,2}$	600	100	100/-25	0.2/0.2
	$C_{150,0,2}^{200,0,2}$	600	100	100/-50	0.2/0.2
	$C_{100,0,2}^{200,0,2}$	600	100	100/-100	0.2/0.2
	$C_{150,0,0}^{200,1,0}$	600	100	100/-50	1.0/1.0
	$C_{125,0,2}^{150,0,2}$	600	50	100/-25	0.2/0.2

注: ①试验编号中 $C_{\sigma'_{v2}^{v1}}^{\sigma'_{v1}^{v1}}$, C 表示粗砂; 上标 σ'_{v1} 表示抽水作用(加载)对应的竖向有效应力; 下标 σ'_{v2} 表示注水作用(卸载)对应的竖向有效应力。 v_1 , v_2 分别表示连续抽水、连续注水时孔隙水压力的变化速率(加、卸载速率)。②前期固结压力 σ'_{v0} 指抽注水作用前, 试样所受的竖向固结有效应力。

1.5 试验方法

将砂土洗净后烘干, 根据试验要求称取干砂质量, 用水浸泡 12 h 以上以提高砂土饱和度^[16]。试样为直径 63.5 mm、高度 25.4 mm 的实心圆柱样, 为保证试样制备的均匀性, 采用分层振捣制备试样。

试样制备完成后, 先利用注水排气法排出橡胶膜内的空气, 再通过逐级增大轴向压力和孔压进行分级反压饱和, 分级加载过程中保持轴压大于孔压 5 kPa, 多次开闭孔压阀门对土体进行排气, 对分级反压饱和后的试样进行孔压系数 B 值测定, 若 $B > 0.95$, 认为试样达到饱和^[17]。完成饱和的试样在前期固结压力 σ'_{v0} 下固结稳定, 之后进行孔压控制来改变孔隙水压力模拟抽注水过程(地下水位变化), 稳压抽(注)水阶段砂土变形稳定标准规定为在 300 min 内不超过 0.002 mm。

2 循环抽注水作用下含水层砂土变形特性

2.1 抽注水循环和前期固结压力对砂土变形特性的影响

图 5 给出了不同前期固结压力 σ'_{v0} 下的砂土孔隙比 e 、有效应力 σ'_v 与时间 t 的关系曲线。试验结果显

示, 循环抽注水作用总体上造成砂土孔隙比减小(密度增加), 砂土呈现压缩变形现象, 并随着循环抽注水过程的增加变形渐趋稳定。抽水作用(加载)下, 砂土受到的竖向有效应力增加而产生压缩变形。注水作用(卸载)下, 砂土受到的竖向有效应力减小, 在不同的抽注水循环中, 砂土变形呈现回弹和压缩两种不同现象, 值得注意的是注水引起的压缩变形现象与有效应力原理相矛盾, 难以利用经典土体变形理论给予清晰的解释。

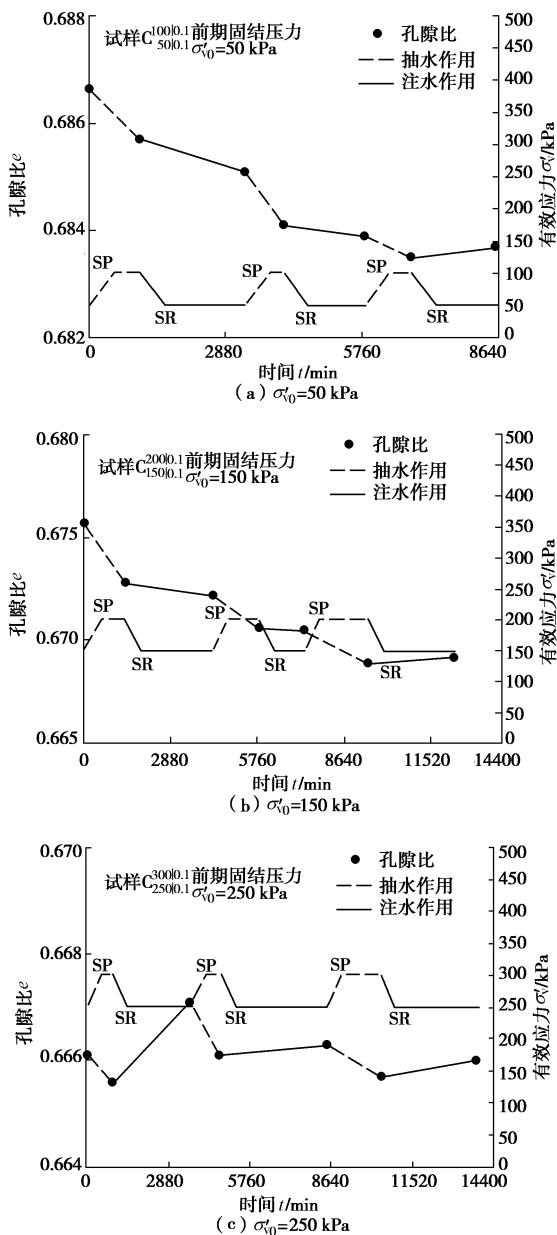


图 5 循环抽注水下砂土变形特性

Fig. 5 Deformation characteristics of sand under cyclic pumping-recharging water

当试样前期固结压力 σ'_{v0} 较小时(50 kPa 和 150 kPa), 前两次抽注水循环中注水作用引起砂土产生压缩变形, 但第 2 次注水作用引起的压缩变形量较第 1

次的压缩变形量小, 第 3 次抽注水循环中注水作用下砂土出现回弹变形, 如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示。随着前期固结压力增大, 当试样 σ'_{v0} 为 250 kPa 时, 注水作用下均出现砂土回弹变形现象, 且注水回弹变形量随抽注水循环次数的增加而减小, 如图 5 (c) 所示。

由此可知, 注水作用下, 砂土的变形特性与影响砂土孔隙比(密度)的前期固结压力 σ'_{v0} 和抽注水循环密切相关。砂土在孔隙比大(密度小)时, 砂土易出现压缩变形现象, 随着砂土孔隙比减小, 砂土变形逐渐由压缩转化为回弹。

2.2 循环抽注水作用下砂土变形的时间效应

图 6 给出了不同前期固结压力 σ'_{v0} 下循环抽注水各阶段砂土孔隙比 e 与时间 t 关系曲线, 在连续抽水

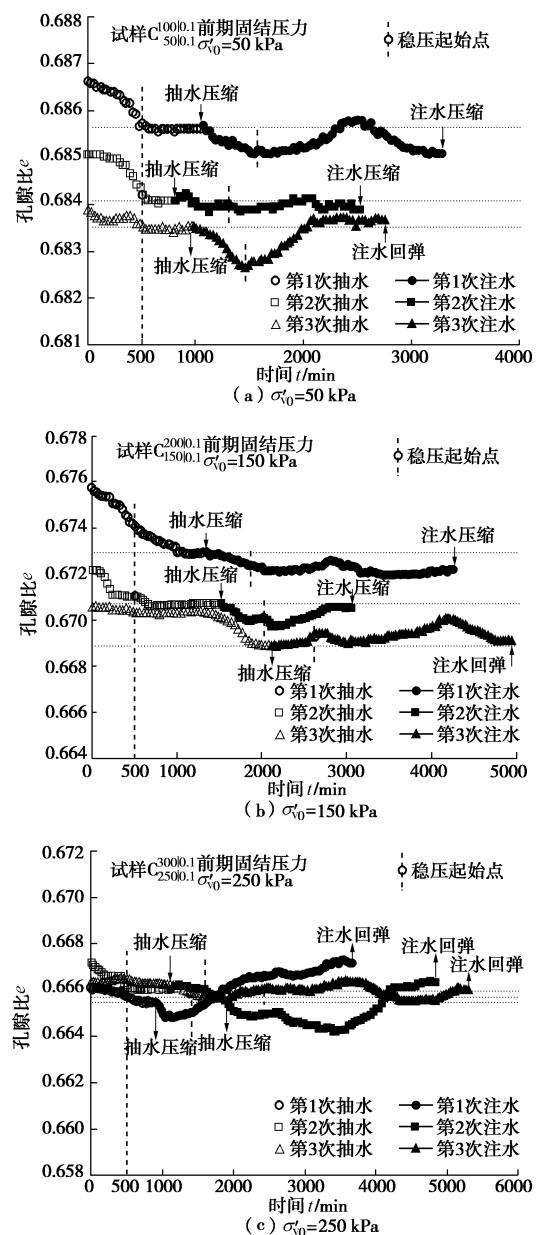


图 6 砂土孔隙比-时间关系曲线

Fig. 6 Relationship between void ratio of sand and time

或连续注水作用完成后的稳压阶段, 砂土变形随时间变化的现象说明砂土变形存在滞后效应, 也表明了砂土具有蠕变特性。抽水作用(加载)下, 砂土产生压缩变形, 且变形随时间增加而趋于稳定; 注水作用(卸载)下, 砂土变形随时间呈现压缩与回弹交替波动的现象, 受前期固结压力 σ'_{v0} 和循环抽注水作用的影响, 注水作用下砂土最终呈现稳定的压缩或回弹变形特性。

3 注水作用下砂土变形影响因素

为了深入认识砂土在注水作用下呈现的压缩和回弹两种变形特性, 设计了考虑注水强度(卸载量)、前期固结压力、注水速率(卸载速率)等因素的试验方案, 试验在前期固结压力 σ'_{v0} 下固结完成, 再经抽水作用固结稳定后进行注水试验。图 7 给出了注水作用下砂土应变-时间关系曲线(以注水作用起始点为基准), 正应变表示压缩变形, 负应变表示回弹变形。

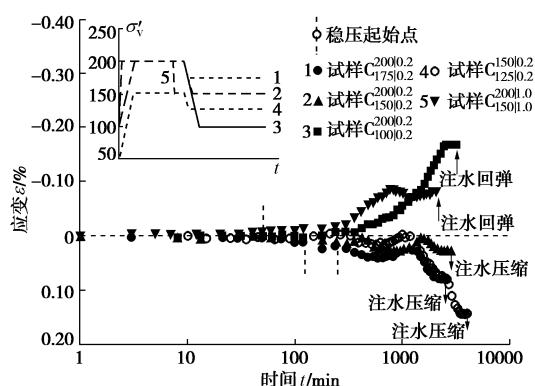


图 7 不同注水模式下砂土应变-时间关系曲线

Fig. 7 Strain-logarithmic time curves of sand under different recharging water models

试验结果分析表明, 注水强度(卸载量)、前期固结压力、注水速率(卸载速率)影响注水作用下砂土的变形特性。由图 7 中试验结果可知, 在抽水强度相同条件下, 砂土变形随注水强度的增加由压缩转为回弹, 且注水强度小时, 砂土产生的压缩变形量大, 注水强度小于抽水强度时, 砂土易产生压缩变形。图 7 中试验 1 和试验 4 的结果反映了前期固结压力对砂土注水压缩的影响, 前期固结压力大, 砂土的孔隙比小(密度大), 注水作用下砂土的压缩变形小, 与循环抽注水试验得到的注水作用下砂土变形特性相吻合。图 7 中试验 2 和试验 5 结果表明了注水速率对砂土变形特性的影响, 在注水强度-50 kPa 作用下, 注水速率(0.2 kPa/min) 小时砂土产生压缩变形, 而注水速率(1.0 kPa/min) 大时砂土产生回弹变形。

4 抽注水作用下砂土变形机理

砂土是散粒体材料, 易形成具有一定稳定性的超静定粒状架空接触结构^[18], 土体应力状态改变必将造成土体变形。当应力变化较小时, 土体变形由土结构骨架的弹性变形引起, 土结构保持稳定; 当应力变化导致土结构失稳时, 必然伴随不可逆的土体塑性变形发生^[19]。研究表明, 在不同应力状态下砂土变形在宏观上呈现弹性变形和塑性变形两种变形特性, 土结构骨架的弹性变形服从弹性理论, 而土结构的塑性变形服从于最小势能原理。

砂土结构演变受其稳定性影响, 砂土结构的稳定性与应力引起的次生各向异性密切相关^[20-21]。抽注水作用下承压含水层砂土的大主应力 σ'_v 和小主应力 σ'_h 随孔隙水压力而变化, 其应力比 σ'_v/σ'_h 可表示为

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_h} = \frac{\sigma'_{v0} \pm \Delta u}{\sigma'_{h0} \pm \Delta u} \quad (1)$$

式中 σ'_{v0} 为初始竖向有效应力(前期固结压力); σ'_{h0} 为初始水平向有效应力; Δu 为抽水(或注水)引起的孔压(有效应力)变化。

抽水加载时, 有效应力 σ'_v 和 σ'_h 增加, 应力比 σ'_v/σ'_h 减小, 土结构骨架产生弹性压缩变形同时, 砂土的次生各向异性减弱, 土结构的稳定性增强, 发生“压密”失稳, 导致土颗粒趋于密实排列, 引起塑性压缩变形。注水卸载时, 有效应力 σ'_v 和 σ'_h 减小, 应力比 σ'_v/σ'_h 增大, 伴随土结构骨架产生可恢复弹性回弹变形, 土颗粒间的接触减弱, 砂土的次生各向异性强化, 导致土结构稳定性减弱, 土结构易产生“松塌”失稳现象, 基于最小势能原理, 砂土孔隙减小将产生塑性压缩变形。

由于抽水作用引起的土结构骨架弹性压缩变形和土结构“压密”塑性压缩变形的特征相一致, 砂土变形始终呈现压缩现象; 而注水作用引起的土结构骨架弹性回弹变形与土结构“松塌”塑性压缩变形的特征相反, 砂土变形是土结构骨架弹性回弹变形和土结构

“松塌”塑性压缩变形的综合反映。因此, 注水作用时, 砂土变形会依据土结构骨架弹性回弹变形和土结构演变塑性压缩变形的大小呈现压缩或回弹现象。上述对抽注水作用下砂土变形特性的描述, 构成了以弹性理论和最小势能原理为基础、土结构演变为核心的砂土变形机理。

上述砂土变形机理为解释注水作用下砂土的变形特性提供新的途径, 由于循环抽注水作用和前期固结压力均影响砂土的孔隙比(密度), 砂土孔隙比大(密度小), 在注水引起粒间有效应力减小同时, 土结构发

生“松塌”失稳，当土结构“松塌”产生的压缩变形大于土结构骨架回弹变形时，就造成砂土变形呈现压缩现象。随前期固结压力和抽注水循环次数的增加，砂土的密度增大，受稳定孔隙率原理^[19]的控制，砂土结构“松塌”的可能性和结构“松塌”引起的压缩变形逐渐减小，当砂土达到一定密度后，土结构“松塌”产生的压缩变形小于土结构骨架回弹变形，砂土变形就呈现回弹现象，循环抽注水作用和前期固结压力体现了应力历史对砂土变形的影响，上述分析切合了图 6 以及图 7 中试样 1 和试样 4 给出的砂土试验结果。

受应力控制的砂土结构骨架回弹变形量随注水强度增大而增大，而土结构“松塌”产生的压缩变形量受前期固结压力和抽水强度等因素制约。因此，土结构骨架回弹变形量与土结构压缩变形量之间的相对大小随注水强度发生变化，导致砂土变形呈现随着注水强度的增加，砂土变形由压缩逐渐转为回弹的现象，如图 7 中 1~3 试验结果所示。

此外，注水作用下砂土结构突然“松塌”引起压缩变形的同时，造成了砂土密度增大而呈现“超密”现象，即其密度与所受应力状态不相适应，致使土结构骨架必须产生回弹变形（减小密度）以适应其应力状态，从而导致注水试验中观察到砂土变形呈现压缩和回弹交替波动的土结构演变宏观现象，此现象在微观上表现为砂土颗粒位置不断调整、达到新平衡的过程，最终形成与砂土应力历史相适应、既符合最小势能原理，又满足力学平衡的稳定砂土结构。

从试验结果分析可知，砂土注水出现的压缩变形现象，不仅与砂土自身因素（颗粒级配、密度）有关，而且受外界因素（前期固结压力、抽水强度、注水强度、注水速率、抽注水形式等）的影响，是应力控制的土结构骨架弹性变形和土结构“松塌”失稳引起的塑性变形的综合体现，试验结果验证了抽注水作用下的砂土变形机理的合理性。

5 结 论

(1) 循环抽注水作用使砂土密度不断增加，砂土变形总体呈现压缩现象，并渐趋稳定。抽水作用下砂土产生压缩变形，注水作用下砂土变形呈现压缩与回弹两种现象，随抽注水循环次数的增加和前期固结压力的增大，注水作用下砂土变形逐渐由压缩向回弹转化。

(2) 注水作用下砂土变形特性是卸荷引起的土结构骨架回弹变形和土结构“松塌”压缩变形的综合反映，砂土注水压缩现象与砂土的密度密切相关，砂土密度小时易发生注水压缩变形；砂土变形随注水强度

的增加由压缩转为回弹，且注水强度小于抽水强度时易发生注水压缩变形。

(3) 基于抽注水作用下砂土次生各向异性变化造成的土结构演变特性，从抽水作用下土结构“压密”失稳和注水作用下土结构“松塌”失稳角度，构建了以弹性理论和最小势能原理为基础的抽注水作用下砂土变形机理，解释了注水作用过程中砂土变形呈现的回弹与压缩交替波动的现象，并用试验结果定性验证了砂土变形机理的合理性。

(4) 注水作用下砂土的压缩变形特性为合理解释地下水位上升引起的地面沉降现象和制订承压含水层人工回灌措施提供了依据。现有试验资料还不足以全面掌握抽注水作用下砂土变形机理，仍需在试验和理论分析上开展进一步的深入研究。

参 考 文 献：

- [1] ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, et al. Characteristics of aquifer system deformation in the Southern Yangtse Delta, China[J]. Engineering Geology, 2007, 90(3/4): 160~173.
- [2] SHI X, FANG R, WU J, et al. Sustainable development and utilization of groundwater resources considering land subsidence in Suzhou, China[J]. Engineering Geology, 2012, 124(1): 77~89.
- [3] ZHANG Y, WU J, XUE Y, et al. Land subsidence and uplift due to long-term groundwater extraction and artificial recharge in Shanghai, China[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(8): 1851~1866.
- [4] 李明霞, 张 云. 地下水控采条件下上海土层变形特征研究[J]. 上海国土资源, 2014, 35(4): 17~20. (LI Ming-xia, ZHANG Yun. Effect on land subsidence of controlling groundwater extraction in Shanghai[J]. Shanghai Land & Resources, 2014, 35(4): 17~20. (in Chinese))
- [5] SHI X Q, XUE Y Q, YE S J, et al. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China[J]. Environmental Geology, 2007, 52(1): 27~40.
- [6] 张 云, 薛禹群, 施小清, 等. 饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1869~1873. (ZHANG Yun, XUE Yu-qun, SHI Xiao-qing, et al. Study on nonlinear creep model for saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1869~1873. (in Chinese))
- [7] 张 云, 薛禹群, 李勤奋. 上海现阶段主要沉降层及其变形特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 6~11. (ZHANG Yun, XUE Yu-qun, LI Qin-fen. Current prominent subsidence layer and its deformation properties in

- Shanghai[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, **30**(5): 6 - 11. (in Chinese))
- [8] 叶淑君, 薛禹群, 张 云, 等. 上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(2): 140 - 147. (YE Shu-jun, XUE Yu-qun, ZHANG Yun, et al. Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(2): 140 - 147. (in Chinese))
- [9] LI Y, HU Z, WENG T, et al. Experimental study on the vertical deformation of sand caused by cyclic withdrawal and recharging of groundwater[J]. *Engineering Geology*, 2014, **183**: 247 - 253.
- [10] 王旭东, 罗东娜, 曾 婕. 含水层注水砂土压缩变形试验研究[C]// 中国水利学会 2014 学术年会论文集(下册). 南京: 河海大学出版社, 2014: 739 - 744. (WANG Xu-dong, LUO Dong-na, ZENG Jie. Experimental study on compression deformation of sand induced by water injection in aquifer[C]// 2014 CHES Annual Conference (Volume 2). Nanjing: Hohai University Press, 2014: 739 - 744. (in Chinese))
- [11] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩与可恢复剪胀[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(2): 158 - 161. (LI Guang-xin, GUO Rui-ping. Volume-contraction in unloading of shear tests and reversible dilatation of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(2): 158 - 161. (in Chinese))
- [12] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(1): 47 - 50. (LI Guang-xin, WU Shi-feng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [13] 张 云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 上海砂土蠕变变形特征的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(5):1226 - 1230. (ZHANG Yun, XUE Yu-qun, WU Ji-chun, et al. Experimental research on creep of Shanghai sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(5): 1226 - 1230. (in Chinese))
- [14] 孙岳崧, 潘家骝, 李广信. 不同应力路径对砂土应力 - 应变关系影响[J]. *岩土工程学报*, 1987, **6**(6):78 - 88. (SUN Yue-song, PU Jia-liu, LI Guang-xin. The influence of different stress paths on stress-strain relation of sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, **6**(6):78 - 88. (in Chinese))
- [15] 孔令伟, 钟方杰, 郭爱国, 等. 杭州湾浅层储气砂土应力路径试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(8): 2209 - 2214. (KONG Ling-wei, ZHONG Fang-jie, GUO Ai-guo, et al. Experimental study of stress path of shallow gassy sand of Hangzhou Bay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(8):2209 - 2214. (in Chinese))
- [16] 朱俊高, 史江伟, 罗学浩, 等. 密度对砂土应力应变强度特性影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(2): 336 - 341. (ZHU Jun-gao, SHI Jiang-wei, LUO Xue-hao, et al. Experimental study on stress-strain-strength behavior of sand with different densities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(2):336 - 341. (in Chinese))
- [17] KOKUSHO T. Correlation of pore-pressure *B*-value with P-wave velocity and Poisson's ratio for imperfectly saturated sand or gravel[J]. *Soils and Foundations*, 2000, **40**(4): 95 - 102.
- [18] 高国瑞. 近代土质学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012. (GAO Guo-rui. Neoteric soil geotechnology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000. (in Chinese))
- [20] ODA M, NEMAT-NASSER S, KONISHI J. Stress-induced anisotropy in granular masses[J]. *Soils and Foundations*, 1985, **25**(3): 85 - 97.
- [21] 矫德全, 陈愈炯. 土的各向异性和卸荷体缩[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(4): 9 - 16. (JIAO De-quan, CHEN Yu-jiong. Anisotropy and volume-contraction of soil due to axial unloading in CD test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(4): 9 - 16. (in Chinese))