

DOI: 10.11779/CJGE201709025

排灌水条件下砂黏土层变形响应模型箱试验

刘 春^{1,3}, 施 斌^{*1}, 吴静红¹, 汪义龙¹, 姜洪涛²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059;
3. 南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏苏州 215123)

摘要: 地面沉降区野外钻孔土层应变监测数据表明, 含水砂层上方的黏土层存在着明显的压应变。为研究这一现象, 建立了砂黏互层小型模型箱, 沿土层竖直方向埋设分布式应变监测光纤, 水位管和沉降标。开展了3次排灌水循环试验, 并监测土层在竖直方向上的应变, 水位高度和沉降量的变化。试验结果表明: 在3次排灌水循环中, 土体渗透率减小, 土体被压密; 黏土层存在水压变化的滞后现象; 排水过程中, 黏土层中的孔隙水出现负压, 相应区域也出现显著的压应变。结合前人研究, 分析讨论了钻孔应变数据与模型箱试验结果, 得出结论: 砂层排水后, 黏土层释水和补给不平衡, 导致负压的出现, 并在黏土层中产生额外的有效应力和压缩变形。在地下水位波动时, 这种效应可能会导致砂层上方的黏土层被持续缓慢压缩。

关键词: 模型箱; 砂黏互层; 负压; 压应变

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)09-1746-07

作者简介: 刘春(1984-), 男, 福建顺昌人, 副教授, 主要从事计算工程地质领域的教学和科研工作。E-mail: chunliu@nju.edu.cn。

Model box tests on response of deformation of sand and clay layer under draining-recharging condition

LIU Chun^{1,3}, SHI Bin¹, WU Jing-hong¹, WANG Yi-long¹, JIANG Hong-tao²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Geo-hazard

Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Nanjing University (Suzhou)
High-tech Institute, Suzhou 215123, China)

Abstract: The field monitoring data of borehole in land subsidence region indicate that the compressive strain is significant in clay layers above saturated sand layers. To study this phenomenon, a small sand-clay interbed model box is built, in which the distributed strain monitoring fiber, water table and settlement mark are embedded along the vertical direction. Three draining-recharging test cycles are carried out, and the variations of strain of soil layers, height of water table and settlement amount are monitored. The test results show that the overall permeability of soils decreases, and the soil layer is compressed during the three draining-recharging cycles. The delay phenomenon of water pressure variation exists in the clay layers. In the draining tests, the negative pressure of pore water is observed in the clay layers, and significant compressive strain is also observed in the same region. Considering the previous studies, the monitoring data of borehole and the results of model tests are compared and discussed. It is concluded that the release and supply of water in the clay layers is not equilibrium when draining in the sand layers, which leads to the emergence of negative pressure, and the extra effective stress and compressive strain are generated in the clay layers. With the fluctuation of groundwater table, this effect may result in the continuous slow compression in the clay layers above the sand layers.

Key words: model box; sand-clay layer; negative pressure; compressive strain

0 引言

地面沉降是自然因素或人类工程活动引发的地表松散未固结土体压缩, 以及地面高程缓慢降低的地质现象, 其主要由地下水的过量开采引起^[1-2]。地面沉降给人们生活和城市经济建设带来巨大的负面影响, 如:

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230636, 41372265, 41302216);
地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目
(SKLGP2015K018)

收稿日期: 2016-06-05

*通讯作者(E-mail: shibin@nju.edu.cn)

地面沉降导致城市建筑物、结构物等遭到破坏；破坏地下公用设施，造成地下管线如自来水管、煤气管等的变形、失效甚至爆裂；河床下沉，河道防洪排涝能力降低；降低交通干线路基的强度^[3]。因此，掌握土体在地面沉降过程中的土体变形响应和灾变机理具有重要的经济和社会意义。

Poland 等^[4]在 1969 年就指出，排水引起含水层水头下降，使得含水层与隔水层产生水头差，土层内有效应力增加，产生释水压密，从而导致地面沉降。在地面沉降中，砂层和黏土层具有不同的压缩沉降机制和特点。叶淑君等^[5]从对上海地层变形的监测发现，不同的土层在不同的应力条件下其变形特性是不同的，提出对不同时期不同位置的土层建立相应的沉降模型。张云等^[5]、施小清等^[6]通过监测和试验发现上海、常州地区砂层在某些位置和时段存在非弹性变形。张云等^[7]通过试验建立了考虑黏性土非线性蠕变的固结模型。陈阳等通过室内试验，对黏土和砂土在不同组合情况下进行排水试验，得出土层的沉降主要是由于黏土的沉降引起的，由于黏土的弱透水性，存在着地面沉降的滞后性^[8]。

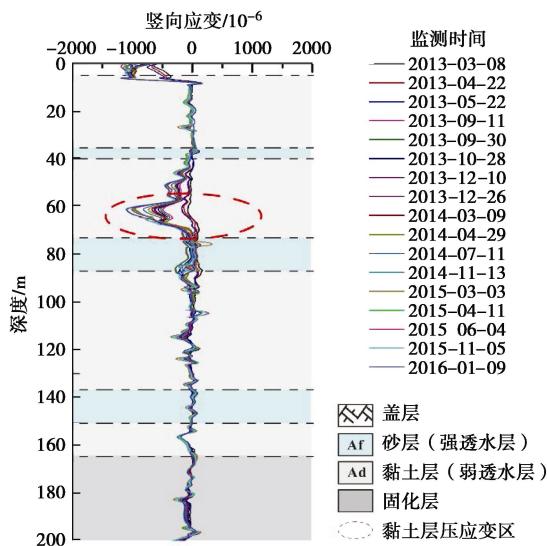


图 1 苏州盛泽钻孔地层剖面和监测的土层应变曲线

Fig. 1 Stratigraphic section of borehole in Shengze, Suzhou and curve of corresponding strain

苏锡常地面沉降区域地层存在着弱透水的黏土和强透水的砂土交错互层的特点，使得地面沉降现象规律有着更大的复杂性。为了获取野外实际的地面沉降数据，本课题组在苏州盛泽镇钻孔取样^[9]，并进行分布式光纤地面沉降监测。监测数据表明^[10]，在地面沉降过程中，透水层（砂层）和弱透水层（黏土层）边界上存在着明显的压应变（图 1）。如图 1 所示，特别是在临近砂层的上覆黏土层，在水位变化时的应变十分显著。为了探究这种压应变产生的原因，设计了一

个可控水位的地面沉降模型箱，并堆填砂层和黏土层来模拟透水层和弱透水层。在模型箱内沿竖向方向埋设分布式应变监测光纤、水位管和沉降标，以监测排灌水过程中土层的应变、水压和沉降量变化。通过分析对比这些信息，探究砂黏互层情况下，砂层和黏土层的相互作用机制和规律。

1 室内小尺度模型箱试验

1.1 试验装置和试验准备

为精细化地研究地下水抽灌水过程中，不同土层的变形特征和相互作用，实验室内建立了小尺度的地面沉降模型试验装置。如图 2 所示，装置包括主体模型箱、灌水装置、水位管装置和 BOTDA 光纤应变监测仪。模型箱为一圆柱体，内径 41 cm，高 100 cm。箱内堆积土层总厚为 60 cm，自下向上分为 3 层，20 cm 砂层，30 cm 黏土层和 10 cm 砂层。填土过程中，每填 5 cm 用木槌压实土体。砂土为中砂，直径 0.3~0.5 mm，初始含水率为 18.6%，击实干密度为 1.4 g/cm³。黏土层为南京下蜀黏土，配成含水率 16.0%，击实饱水后干密度约为 1.5 g/cm³。

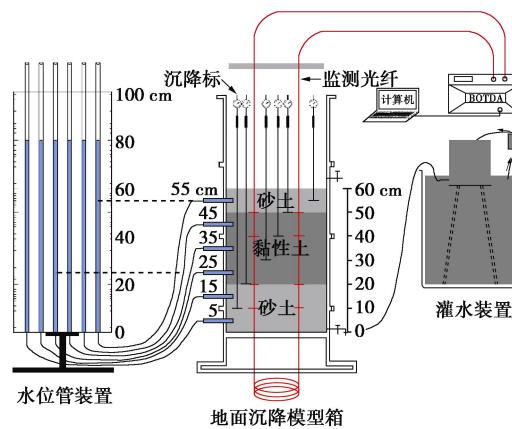


图 2 地面沉降模型箱示意图

Fig. 2 Stratigraphic section of borehole in Shengze, Suzhou and curve of corresponding strain

采用 BOTDA 分布式光纤监测技术^[11-12]来测量土体的在深度方向上的应变分布。BOTDA 分布式光纤传感技术是一种利用受激布里渊散射现象实现应变等参数测量的传感方法。通过发射脉冲光，并接收解调反射光信号，可以得到光纤每一点上的应变信息，实现分布式应变监测。如图 2 所示，光纤自上而下贯穿土层，并构成一个回路。由于光纤只能反映拉应变，为了测量土体的压缩应变，在填土前，对光纤进行预拉至 7000×10^{-6} 应变。由于模型箱中土压力较小，为了提高光纤与土体的变形耦合性，在光纤上每隔 10 cm 垂直于光纤固定一个直径 4 cm 的圆形塑料片，平行于土层埋设。光纤连到 BOTDA 仪器和计算机，用

于发射激光和解译反射光信号，并进一步获取光纤应变。同时，土层中每隔 10 cm 布置一个沉降标，用于与光纤应变监测数据进行对比。

为研究土体中水位和水压的变化，在模型箱内侧面沿深度方向每 10 cm 布一个水位管，自下而上由 5~55 cm 处理设共 6 个水位管（图 2）。水位管插入土层中，并形成连通器。通过左侧水位高度数据来反映模型箱中相应土层中水压的变化。模型箱内的水位控制通过模型箱下方的水阀和灌水水箱实现。灌水水箱能保持注水的水头高度。为减少土体中的空气，使土体充分饱和，填土完成后，密封模型箱，用抽气泵从模型箱上方抽气。然后，利用灌水装置（图 2 右侧）从模型箱下方的水阀缓慢注水，使水位逐渐上升并保持在土体表面之上。采用以上装置和传感器，可以获得排灌水过程中不同土体深度处水头随时间的变化曲线，以及不同时刻土体的应变和土层的沉降量变化曲线。

1.2 排水和灌水系列试验

模型箱中土体饱和 12 h 后，开展模型箱排水试验。打开模型箱下方水阀排水，模型箱内水压降低，水位逐渐下降，以模拟野外抽取地下水后水位下降的过程。同时，读取记录水位管中水位高度，并监测不同时刻土体在深度方向上的应变。待水位（10 h 内水位变化小于 1 cm）和土体应变基本保持稳定后，结束排水试验。然后进行灌水试验，将水阀接通灌水装置。如图 2 右侧所示，灌水水头高度设在 80 cm 左右，逐渐向模型箱内注水，并记录水位和土体应变分布。同样，在水位和土体应变基本稳定后停止灌水试验。共开展了 3 次排水和灌水循环，以研究水位变化循环对沉降的作用。

试验完成后，取模型箱土层中的土样做剪切试验和固结试验。土样在泡水情况下，开展常规排水直剪试验。测得黏土层土样黏聚力和内摩擦角分别为 27 kPa 和 16°；砂层土样内摩擦角为 32°。模型箱中的土强度较低，采用环刀取样时样品易受到扰动。因此，在固结试验中，对土样进行了一次加压和卸荷循环。考虑到模型箱中的最大土压力在 50 kPa 以内，试验中土样荷载由 12.5 kPa 逐级加至 50 kPa。逐级卸荷后，再从 12.5 kPa 逐级加荷至 400 kPa。每项试验取两个土样开展试验，并对结果取平均。通过试验得到的黏土层的压缩系数为 0.505 MPa^{-1} ；砂土层的压缩系数为 0.166 MPa^{-1} 。由于模型箱中土压力较小，为较准确反映土体在水位变化时的应变变化规律，根据第二次加荷 12.5 kPa 和 25 kPa 时的压缩量计算得到压缩模量。在这一压力范围内，黏土的压缩模量为 4.77 MPa，砂土层的压缩模量为 10.89 MPa。可以看到，黏土层的

压缩系数是砂层的约 3 倍，表现出较大的可压缩性。

2 水位管水位和土层水压变化分析

2.1 排灌水过程中水位变化特征

图 3 (a)~(c) 给出了 3 次排水试验中不同深度的水位变化曲线。在 3 次排水试验中，各水位管读数总体呈下降趋势，各水位管读数均达到稳定的时间分别约为 21, 42 和 56 h。而在相应灌水过程中（图 3 (d)~(f)），水位稳定时间也呈递增规律，第一次第二次灌水试验水位稳定时间约为 50 和 99 h。第三次灌水试验中，106 h 后水位才达到 55 cm 砂层，在 111 h 试验结束时水位仍然没有稳定。3 次试验中，模型箱中渗流速率总体呈下降趋势。根据达西定律，渗流速率与水头差和渗透系数成正比。由于 3 次排水试验的初始水位几乎一致，说明模型箱土层整体渗透系数减小，揭示土层孔隙率减小，土体被压密。

由于砂层的渗透系数很大，在各次试验中，下部砂层中的 5 cm 和 15 cm 处的水位几乎保持一致，且迅速达到平衡水位（0 cm 或 80 cm 左右）。而中间黏土层的渗透系数很小，水位较慢达到平衡，各层水位变化存在明显的差异。灌水装置通过水阀和模型箱构成连通器，因此，灌水平衡后各土层水位应在 80 cm 左右。如图 3 (a)，在第一次排水初始时刻，土体不同高度处的水位不一致。由于水是从下方灌入，虽然经过 12 h 的饱水，黏土层中的水位还未完全平衡，位置越高的水位管其水位越低。图 3 (e) 和图 3 (f) 中，灌水 100 h 后，各水位管的高度仍不一致，通常越高的水位管，其水位越低，且水位高度随时间增加，逐渐趋近平衡水位。而第二组、第三组排水试验前，土体均已灌水饱和超过 20 d，各水位管水位一致（图 3 (b) 和 3 (c)）。可见，在排灌水过程中，砂土层的水压迅速变化；而黏土层的渗透系数很低，水排出和重新进入以及接受上部砂层的越流补给都需要较长的时间，水压的变化也出现明显的滞后现象。这种差异性和滞后现象使得砂黏互层土层具有不同的排水和压缩变形机制。

2.2 排水过程中的“负压”现象

在排水过程中，部分水位管存在着水位的过度下降和回升现象。如图 3 (a) 所示，第一次排水试验中，55 cm 水位管首先保持在 60 cm 以上缓慢下降。在 10 h 到 12 h 之间，快速下降至约 41 cm。在 12~13 h 之间，水位又跳至 43 cm，然后保持稳定。水位管是连通器，55 cm 处水位管读数为 41 cm，说明此水位管所嵌入土层的孔隙水压力低于大气压 14 cm 水柱，即土层中存在着孔隙负压。

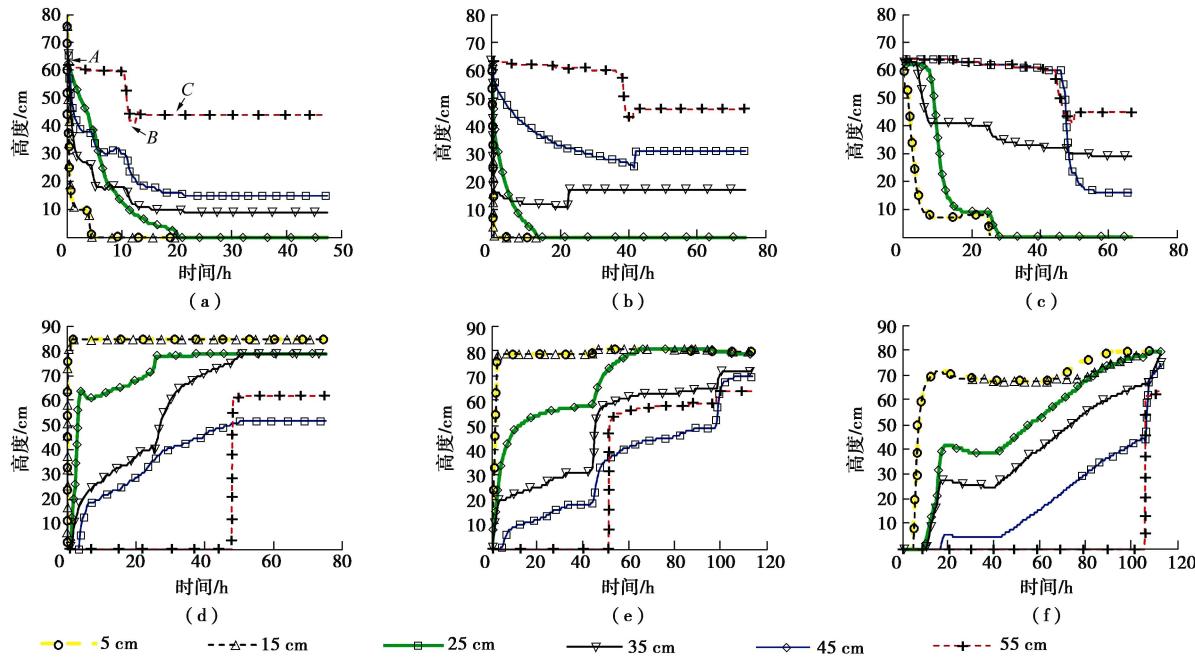


图3 排灌水试验中各水位管示数变化曲线

Fig. 3 Variation of values of water table pipes in draining and recharging tests

图4给出了水位变化的原理示意图。在土体饱水平衡时(图4(a)),水压由水面的大气压向下逐渐增加,对应于图3(a)中55 cm水位线A点。图4(b),排水开始后,底部砂层中的水迅速排出,仅其上部可能存在少量滞水。由于黏土层渗透系数小,黏土层和顶部砂层中的水在重力等作用下缓慢向下渗流,并存在着滞后现象。由于水的流失和补给不平衡,导致模型箱土层中上部水压低于大气压,存在着低于大气压力的负压区。在土层中负压的作用下,水位管中的水被吸回至土层中,水位管示数降低至41 cm,并对应于图3(a)中的水位最低点B。图4(c)中,随着水份进一步排出,当模型箱中水位低于水位管插入口时,模型箱中空气进入到水位管中,U型水位管水位重新平衡,使得水位读数突然跳动上升。因此,55 cm水位管在12.8 h时读数跳至43 cm(图3(a)),之后保持不变(对应于图3(a)的C点)。在第二和第三次排水试验中,同样也观察到55 cm水位的跳动。

负压现象在黏土层中更为明显,如第一次排水后,黏土层45 cm和35 cm处水位分别降至15 cm和9 cm,分别存在着30 cm和26 cm水柱高的负压。需要注意的是,上层砂土层出现负压是由于空气进入砂层孔隙中,形成毛细水压力,需待水位下降到砂表面以下时出现负压。而黏土层中的负压是由于下部砂层中的水流失,黏土中水在重力作用下,趋于向下流动,负压形成较快。因此,从图3(a)可以看到,黏土层负压出现的时间(35 cm, 45 cm处于2 h)均早于上部砂层(55 cm处于11 h)。根据图4(c),砂层水位低于

水位管在土层中的高度时,即存在负压情况下才可能产生水位上升。图3(a)中的55 cm, 45 cm和35 cm水位管的曲线上升部分均低于相应水位管高度。这一规律也从侧面验证了土层中,特别是黏土层中负压的存在和作用。

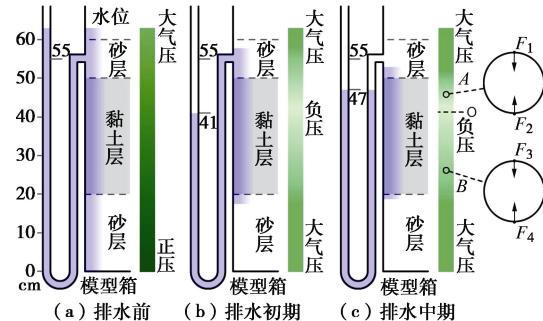


图4 排水过程土层内水压变化示意图

Fig. 4 Variation of water pressure in soil layers during draining process

2.3 黏土层渗透系数计算与分析

此模型箱实际上为一渗透固结装置。砂层的渗透系数较大,模型箱的总体渗透速率受黏土层控制,并通过排水试验来计算黏土层渗透系数。在第一次排水试验中,55 cm水位管初始示数(即初始水位高度)为62 cm。如上所述,在第一次排水试验12.8 h时,空气进入55 cm高度处水位管,水位管示数突然上升,即渗流时间(dt)为12.8 h。

模型箱内径为41 cm, 渗流面积(A)为 1320 cm^2 , 水位由62 cm降至60 cm, 排水量为 2640 cm^3 。试验

测得砂层干密度为 1.4 g/cm^3 , 湿密度为 1.7 g/cm^3 , 砂颗粒密度为 2.6 g/cm^3 。据此可计算得出, 当水位下降, 砂层转为非饱和状态时, 其实际排出水量为砂层总体积的 16.2%, 即水位由砂层 60 cm 降至黏土层上表面 55 cm 处实际排水约为 1066 cm^3 。因此, 水位由 62 cm 降至 55 cm 总排水量 (V) 为 3706 cm^3 。黏土层上表面高度为 50 cm, 取渗流过程平均水头差 (dh) 为 8.5 cm 。黏土层厚度 (dL) 为 30 cm 。采用以下公式近似计算黏土层的渗透系数:

$$K = V \cdot dL / (dh \cdot dt \cdot A) \quad (1)$$

得到第一次排水试验中黏土层渗透系数为 $2.15 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

同样地, 计算得到第二次和第三次排水试验黏土层渗透系数分别为 $8.50 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 和 $8.42 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。数据表明第一次排灌水循环后, 土体的渗透系数减小, 之后则相对稳定; 说明第一次排灌水后, 土体具有较多孔隙压密和结构变化。

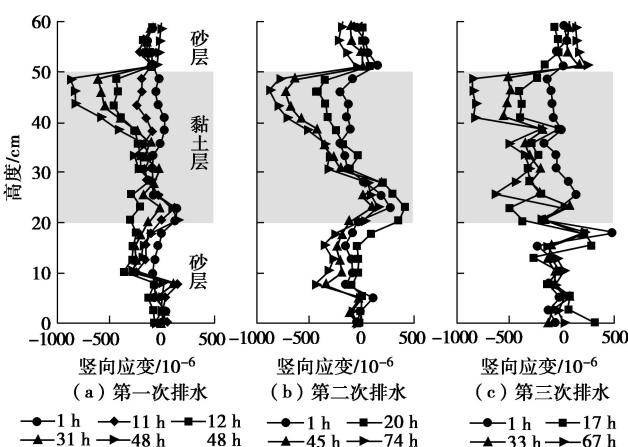


图 5 排水过程中土层在深度方向上应变

Fig. 5 Variation of soil strain along depth direction during draining process

3 模型箱土层压缩沉降特征分析

3.1 土层光纤监测应变

图 5 为排水过程中模型箱中光纤的相对应变数据, 应变值以每次排水前光纤应变为零值进行计算。可以看出, 在排水后 1 h 时, 各土层的应变相对较小; 之后数十小时中, 随着水位不断下降, 黏土层的压应变绝对值逐渐增大, 最大可达到近 1000×10^{-6} , 而砂土的应变则相对较小。一方面原因是砂土具有较大的压缩模量, 在同样应力作用下的变形较小。另一方面, 从图 5 可以看到, 在 3 次降水试验中, 黏土层的中上部均存在着明显的压应变, 这与水位管测得的负压区位置一致。据此推测, 降水过程中黏土层中较大的压缩应变与黏土层中负压的形成有关。

如图 4 (c), 在下部砂层中水排出后, 模型箱土层中的水上表面和下表面均与大气接触, 黏土层中存在着负压, 水压由上下表面的大气压力向黏土层负压中心 O 高度处逐渐减小。对于在 O 处以上的土颗粒, 如颗粒 A , 其上表面所受的水压力大于其下表面 ($F_1 > F_2$), 水对土体骨架产生向下的总作用力。类似地, 对于 O 处以下的土颗粒 B , 其下表面受到的水压力较大 ($F_4 > F_3$), 因此水对土体骨架产生向上的总作用力。可见, 由于排水后黏土层出现负压, 水对土体骨架产生额外的以负压区 O 为中心的压缩力, 并使黏土层中出现更大的压应变。

值得注意的是, 在图 5(a) 中, 黏土层中上部(30~50 cm) 的压应变在 11~12 h 间迅速增大, 其应变变化值大于前 10 h (至 1 h) 和后 20 h (至 31 h 时) 的应变变化。而在图 3 (a) 中, 这一时间段正是上部砂层和 (55 cm) 和黏土层 (35 cm 和 45 cm) 水位的急剧下降和负压迅速上升的时段。这一现象进一步说明, 土层中负压的出现促进了黏土层的压缩。在 3 次试验结束时, 土层在垂直方向上平均相对压应变分别为 -205×10^{-6} , -286×10^{-6} 和 -224×10^{-6} 。

3.2 土层沉降标位移

图 6 为第一次排水试验的沉降标变化曲线。在降水开始后, 各层的沉降标逐渐下降, 并在 10 h 左右发生跳动。例如, 上部砂层 50 cm 和 55 cm 处沉降标在 10 h 处突然上升后又迅速下降。这一现象与水位的变化趋势近似, 并紧密联系。图 3 (a) 中, 55 cm 水位在 10 h 处迅速下降, 并产生负压, 土体压应变迅速增加。在空气进入土层后, 水位管示数向上跳动。由于负压突然消失, 土体压应变减小, 砂层中的沉降标位移也向上跳动 (图 6)。随着水量的进一步排出, 及黏土层中负压的增加, 沉降位移迅速增大。在图 6 中 10 h 至 12 h 时段, 土层 40 cm 和 50 cm 沉降量较 30 cm 明显增大, 这与图 5 (a) 中相应的黏土层应变增大, 以及图 3 (a) 中水位的突变相对应, 说明了土层中的负压加剧了土层的压缩沉降。

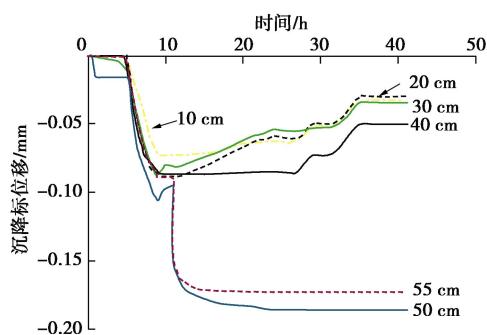


图 6 第一次排水试验沉降标位移

Fig. 6 Displacements of settlement mark during first draining tests

试验结束时, 在 55 cm 处土层的沉降标总沉降量约为 0.16 mm。另一方面, 由光纤监测应变计算得到第一次降水试验中土层总沉降量为 0.123 mm, 比沉降标测得的值略小。这种差异可能是由于光纤没有完全同步变形, 测得的应变值和总变形量较实际值略小。

4 讨 论

通过本文试验发现, 下部砂层排水会导致黏土层中出现负压, 并加剧黏土层的压缩沉降。前人的研究表明, 由于黏性土层渗透性差, 其内部水位对外部水位变化的响应要迟缓得多, 有明显的滞后现象^[13-14]。对于厚度大、渗透性小的黏土层来说, 滞后现象会更为显著。在地面沉降区, 当含水层水位降低时, 由于黏土层的渗透系数较低, 下部砂层排水后, 上部砂层中的水无法立即通过黏性土层进行越流补给, 而是存在越流滞后现象^[14-15]。这种滞后现象会导致黏土层的孔隙水量不平衡, 即黏土层孔隙水向下部砂层排出, 而由于黏土层渗透系数大, 上部砂层孔隙水未能及时补给黏土层, 使得黏土层孔隙水量趋于减少, 并可能导致孔隙负压出现。

此模型箱试验尺度较小, 持续时间较短, 能定性地反映水位变化时砂黏层的变形响应规律。黏土层中的负压随着排水过程逐渐形成和累积, 与黏土层的渗透系数、排水距离和排水时间等都有密切的关系。区域地面沉降通常尺度大且持续时间长。对于较厚的黏土层, 其排水的距离更长, 负压产生的时间和强度都可能增加, 并可能对地面沉降产生更为显著的作用。这些因素对地面沉降的具体作用机制和规律还不明确, 有待于进一步开展大型模型试验和野外监测研究。

本次试验中, 负压区中心和最大应变区均出现在黏土层的中上部, 即接近上部砂层, 这并不意味着降水时负压区趋于出现在黏土层的顶部。相反, 负压区是由于黏土层向砂层中释水导致的, 应出现在黏土层底部靠近砂层几十厘米至十几米的位置。从图 1 可以看出, 弱透水层(黏土层)压应变区与第二含水层(砂层)紧邻, 位于弱透水层的底部。而本试验中, 由于模型箱尺寸较小, 负压区出现于黏土层中上部。

在排水过程中, 黏土层中会产生负压和额外的压缩。但是, 在灌水过程中, 黏土层并没有相应的额外正压。这种非对称性可能导致黏土层在多次排灌水过程中被不断压密。从图 1 中可以看出, 在第二含水层上方的黏土层出现明显的压应变, 而这一含水层也是苏州市地下水的主要采水层^[16]。结合本模型箱试验和分析, 可以推测, 排灌水循环和地下水位变化是黏土层出现较大压应变的主要原因。当水位降低时, 靠近

砂层的黏土层容易出现负压和额外压缩。在野外钻孔中, 也发现砂层上方的紧邻的黏土层存在着较明显硬化现象。这种硬化现象可能与近砂层黏土层往复的释水压缩有关, 这些现象有待于进一步的分析和研究。

5 结 论

本文开展了室内小型砂黏互层模型箱试验, 研究砂层和黏土层在排水和灌水过程中土层应变和水压的变化规律, 得出了以下 3 点结论。

(1) 排灌水循环中, 水位达到相对稳定的时间递增, 土层总体渗透率降低, 土体被压密。排灌水过程中, 黏土层存在着水压变化滞后现象。

(2) 在模型箱下部砂层排水过程中, 黏土层孔隙水中逐渐出现负压。同时, 在排水过程中, 黏土层的中上部存在着明显的压应变区。

(3) 由于黏土渗透系数小, 在砂层排水后, 上部水体无法及时越流补给, 导致了黏土层中排水和补给的不平衡, 促使黏土层孔隙水中出现负压。在负压的作用下, 土体骨架产生向负压中心的额外压力。黏土层的压缩模量较砂土层小, 这种额外的压力导致黏土层中出现明显的压应变, 并加剧地面沉降。

致 谢: 感谢审稿专家对本文提出了非常有价值的建议; 研究生王雪帆参与部分土工试验和监测工作, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 薛禹群, 张 云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585 - 593. (XUE Yu-qun, ZHANG Yun, YE Shu-jun, et al. Land subsidence in china and its problems[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 585 - 593. (in Chinese))
- [2] CHEN C, PEI S, JIAO J. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(2): 275 - 287.
- [3] 姜洪涛. 苏锡常地区地面沉降及其若干问题探讨[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 29 - 33. (JIANG Hong-tao. Problems and discussions in the study of land subsidence in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 29 - 33. (in Chinese))
- [4] POLAND J F, DAVIS G H. Land subsidence due to withdrawal of fluids[J]. Reviews in Engineering Geology, 1969: 187 - 270.
- [5] 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))
- [6] 施小清, 薛禹群, 吴吉春, 等. 常州地区含水层系统土层压缩变形特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 1 - 6. (SHI Xiao-qing, XUE Yu-qun, WU Ji-chun, et al. A study of soil deformation properties of the groundwater system in the Changzhou area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 吴蓉. 考虑地层结构时地面沉降滞后性的模拟分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(12): 22 - 26. (WU Rong. Simulation analysis on the hysteretic of ground subsidence considering strata structure[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(12): 22 - 26. (in Chinese))
- [9] 陈阳, 计鹏, 俞俊平, 等. 抽水条件下地面沉降效应的试验研究[J]. 勘察科学技术, 2012(3): 18 - 20. (CHEN Yang, JI Peng, YU Jun-ping, et al. Experimental study on ground settlement effect by pumping[J]. Site Investigation Science and Technology, 2012(3): 18 - 20. (in Chinese))
- [10] WU J, JIANG H T, SU J W, et al. Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(5): 587 - 597.
- [11] HORIGUCHI T, KURASHIMA T, KOYAMADA Y. Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers[C]// Proceedings Volume 1797, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II. Boston, 1993: 2 - 13.
- [12] HORIGUCHI T, KURASHIMA T, KOYAMADA Y. Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Bellingham, 1993, 1797: 2 - 13.
- [13] 陈阳, 计鹏, 俞俊平, 等. 抽水条件下地面沉降效应的试验研究[J]. 勘察科学技术, 2012(3): 18 - 20. (CHEN Yang, JI Peng, YU Jun-ping, et al. Experimental study on ground settlement effect by pumping[J]. Site Investigation Science and Technology, 2012(3): 18 - 20. (in Chinese))
- [14] 吴蓉. 考虑地层结构时地面沉降滞后性的模拟分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(12): 22 - 26. (WU Rong. Simulation analysis on the hysteretic of ground subsidence considering strata structure[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(12): 22 - 26. (in Chinese))
- [15] SHI X Q, XUE Y Q, WU J C, et al. Characterization of regional land subsidence in Yangtze Delta, China: the example of Su-Xi-Chang area and the city of Shanghai[J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(3): 593 - 607.
- [16] WANG G Y, YOU G, SHI B, et al. Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China[J]. Engineering Geology, 2009, 104(1/2): 109 - 118.