

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019051

引用格式: 吴静红, 程刚, 施斌, 顾凯, 蒋娜. 2019. 土层回弹变形特性及回弹潜力试验研究[J]. 高校地质学报, 25 (4): 495-501

土层回弹变形特性及回弹潜力试验研究

吴静红¹, 程刚^{2,3*}, 施斌³, 顾凯³, 蒋娜¹

1. 苏州科技大学 土木工程学院, 苏州 215011;

2. 华北科技学院 计算机学院, 北京 101601;

3. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要: 对土层的回弹变形效应进行研究有助于科学实施地下水回灌、管理地下水资源及预测地面沉降。文章通过大量室内压缩回弹试验,研究了土层回弹影响因素及回弹变形特性。试验结果表明:土层的最终回弹量受土样性质、最大固结压力、固结时间以及卸荷比等因素影响;相同固结回弹条件下,土层黏粒含量越高,回弹量越大;对于同一种土,固结时间越短,卸荷压力越大,回弹量越大;当卸荷比小于0.5时,固结压力对土层回弹量影响不明显,随着卸荷比的增大,同一种土样所受固结压力越大,土样回弹率也越大,而当卸荷比大于0.9时,回弹率迅速增大。当土层类型及固结压力确定时,土层最大回弹率和固结压力大致呈线性关系,可用于土层最大回弹率的预测。

关键字: 回弹变形; 固结时间; 固结压力; 卸荷比; 回弹率

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2019) 04-495-07

Experimental Study on Rebound Deformation Characteristics and Rebound Potential of Soil Layer

WU Jinghong¹, CHENG Gang^{2,3*}, SHI Bin³, GU Kai³, JIANG Na¹

1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. School of Computer Science, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: The study of the rebound deformation effect of soil layer is helpful for the scientific implementation of groundwater recharge, management of groundwater resources and prediction of land subsidence. In this paper, the influencing factors and deformation characteristics of soil layer rebound are studied through a large number of indoor compression rebound tests. The experimental results show that the ultimate rebound of soil layer is affected by soil properties, maximum consolidation pressure, consolidation time and unloading ratio, etc. The higher the content of clay soil is, the greater the rebound is. For the same kind of soil, the shorter the consolidation time and the greater the unloading pressure are, the greater the rebound is. When the unloading ratio is less than 0.5, the consolidation pressure has no obvious influence on the soil layer rebound. With the increase of the unloading ratio, the soil rebound increases and the influence of the consolidation pressure on the same soil becomes greater. And, when the unloading ratio is greater

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20180972); 国家自然科学基金青年项目 (41702347); 河北省自然科学基金青年基金项目 (D2018508107); 国家重点研发计划 (2018YFC1505104); 江苏省建设系统科技项目 (2018ZD053) 联合资助

作者简介: 吴静红, 女, 1989年生, 博士, 讲师, 主要从事地质工程监测与评价研究; E-mail: wjh@mail.usts.edu.cn

*通讯作者: 程刚, 男, 1987年生, 博士, 讲师, 主要从事地质 (岩土) 工程分布式光纤传感技术、物联网远程数据采集与地质灾害评价; E-mail: chenggang@ncist.edu.cn

than 0.9, the rebound increases rapidly. When the type of soil layer and consolidation pressure are determined, the maximum rebound rate and consolidation pressure show a nearly linear relationship, which can be used to predict the maximum rebound rate of soil layers.

Key words: rebound deformation; consolidation time; consolidation pressure; unloading ratio; rebound rate

Corresponding author: CHENG Gang, Ph. D., Lecturer; E-mail: chenggang@ncist.edu.cn

地面沉降是区域性或大地带性的,其发生、发展和孕灾过程缓慢而不易察觉,已经成为全球范围内关注的地质灾害问题(秦同春等, 2018; Nikos et al., 2016; Mahmoudpour et al., 2016; Anzidei et al., 2016)。中国地面沉降的主要原因是长期过量开采地下水资源(Shi et al., 2008; 薛禹群, 2003; 李莎等, 2018)。实施地下水禁采以及回灌后,地下水位普遍回升,有监测资料表明,地下水位恢复到一定程度后,由于卸荷作用使得土层中的弹性变形部分恢复,不少地方监测到地面回弹现象(吴静红等, 2016),特别是水位埋深小于 20 m 的沉降区(胡建平, 2011)。因此,研究土层的回弹变形效应,有助于科学实施地下水回灌、管理地下水资源及预测地面沉降(吴静红等, 2017)。

然而,现阶段地面沉降的研究重点仍然是地下水位持续下降条件下的土层压缩,对水位持续抬升过程中的土层回弹研究较少(施小清等, 2006)。一方面学者通过沉降区观察分析土层变形特点,如张云等(2006)分析了地下水位变化模式下含水砂层变形特征,认为土体变形特征与其经历的应力状态有关。罗跃等(2015)根据地面沉降、水位观测和钻孔资料,系统分析了上海市 90 年代末以来地下水位大幅抬升条件下各土层的变形特征。另一方面,大量室内试验研究了卸荷条件下土体的压缩回弹特性,楼晓明等(2011)对上海沉降区粉质粘土进行压缩试验,利用回弹变形参数估算了土层回弹量;张淑朝等(2008)确定了产生回弹变形的临界卸荷比及产生强回弹的卸荷比;李建民和滕延京(2010)提出了回弹比率的概念,更为清晰地反映出了回弹变形随卸

荷比变化的发展过程。吴静红等(2017)模拟了水位升降过程中土层的变形,对不同土层回弹特征进行了分析。总的来说,受野外观测资料限制,现阶段仍无法对土层回弹变形进行有效预测,室内试验缺少对影响土层回弹因素的分析,且对土层回弹机理的解释也较为模糊。

本文通过大量室内压缩回弹试验,研究土样性质、最大固结压力、固结时间以及卸荷比等因素对土层回弹变形的影响,分析土层回弹变形特征并对其进行回弹潜力预测。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本次试验所用砂土及南京地区广泛分布的下蜀土粒径分布如图 1 所示,表 1 给出了砂土及下蜀土物理力学性质。

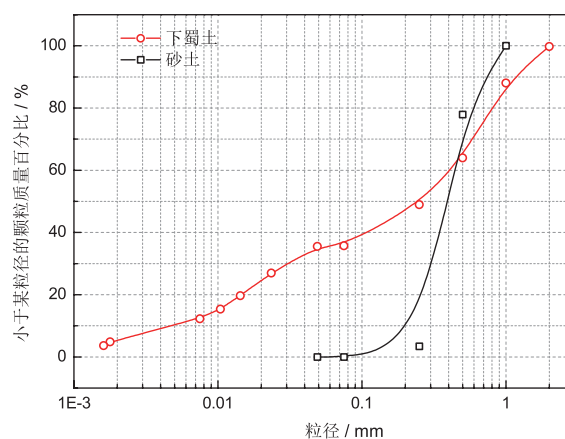


图 1 颗粒大小级配曲线

Fig. 1 Particle size grading curve

表 1 下蜀土及砂土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of Xiashu soil and sandy soil

土壤类型	物理力学性质					
	比重 G_s	塑限 $\omega_p / \%$	液限 $\omega_L / \%$	塑性指数 (I_p)	最大干密度 $\rho_d / (g/cm^3)$	最优含水率 $\omega_{opt} / \%$
下蜀土	2.73	19.5	36.5	17.0	1.71	15.7
砂土	比重 G_s	粒径 d / mm	干密度 $\rho_d / (g/cm^3)$	渗透系数 $k / (cm/s)$	摩擦角 $\phi / ^\circ$	
	2.65	0.3~0.5	1.4	7.71×10^{-3}	32	

1.2 试验方法

将风干碾碎并过 2 mm 筛的下蜀土按一定质量比和干砂混合配制一组含水率 14%, 干密度 1.3 g/cm^3 的试样, 包括黏土、砂土、砂土:黏土=1:3 及砂土:黏土=3:1 (质量比) 四种土样, 一次试验配制 3 组试样, 共 12 个环刀样。按土工试验方法标准制备试样, 采用多联高压固结仪进行压缩回弹试验。将 3 组试样 12 个土样进行饱和后逐级施加荷载, 每一级加荷后持续 24 h, 其变形基本达到稳定时再施加下一级荷载, 第一组试样最大荷载为 800 kPa, 第二组试样最大荷载为 1600 kPa, 第三组试样最大荷载为 3200 kPa, 最大荷载作用一段时间后即开始卸载, 卸载过程同样采用逐级卸载, 利用土工试验数据采集装置自动采集数据。本试验共进行了 3 次试验共计 36 个压缩回弹样, 3 次试验最大荷载作用时间分别为 1d、10d 和 30d, 其他过程均保持

一致。

2 结果与讨论

2.1 回弹变形影响因素分析

表 2 给出了不同试验条件下 36 个土样的最终回弹量, 可以看到, 对于同一性质相同固结压力的土样其固结时间越久, 在相同卸荷条件下回弹量越小; 对于同一性质相同固结时间的土样, 其最大固结压力越小, 在卸荷到相同荷载时其回弹量也越小。

选取固结时间为 1d 试验中的 3 组试样对土层性质及固结压力对土体回弹变形性质影响做进一步分析。图 2, 3 和 4 分别是四种类型土样在最大固结压力为 800 kPa、1600 kPa 及 3200 kPa 下的回弹量及压缩回弹 $e-p$ 曲线。从回弹 $e-p$ 曲线可以看出, 卸载初始阶段四种土样的回弹量均较小, 当

表 2 不同固结时间不同固结压力下的最终回弹量

Table 2 The final rebound under different consolidation time and different consolidation pressure

固结时间/d	3200 kPa 回弹至 50 kPa				1600 kPa 回弹至 50 kPa				800 kPa 回弹至 50 kPa			
	黏土	砂土	砂:黏=1:3	砂:黏=3:1	黏土	砂土	砂:黏=1:3	砂:黏=3:1	黏土	砂土	砂:黏=1:3	砂:黏=3:1
1	0.556	0.274	0.422	0.320	0.431	0.210	0.295	0.219	0.248	0.128	0.180	0.149
10	0.538	0.259	0.409	0.301	0.418	0.192	0.288	0.215	0.235	0.125	0.170	0.146
30	0.517	0.247	0.390	0.295	0.408	0.190	0.264	0.205	0.232	0.109	0.154	0.121

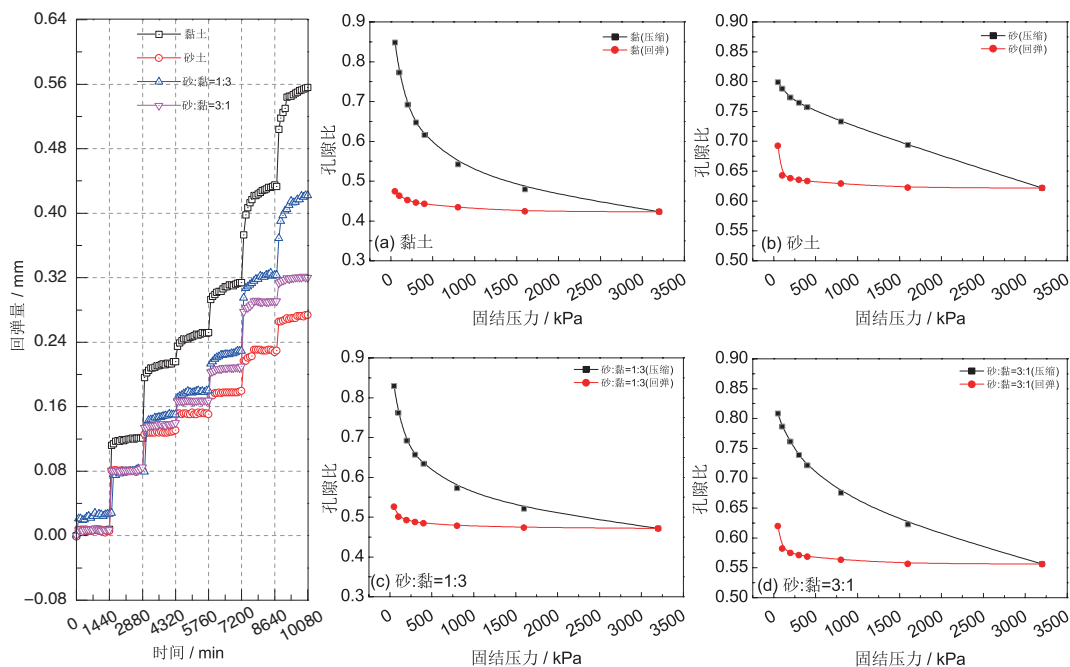
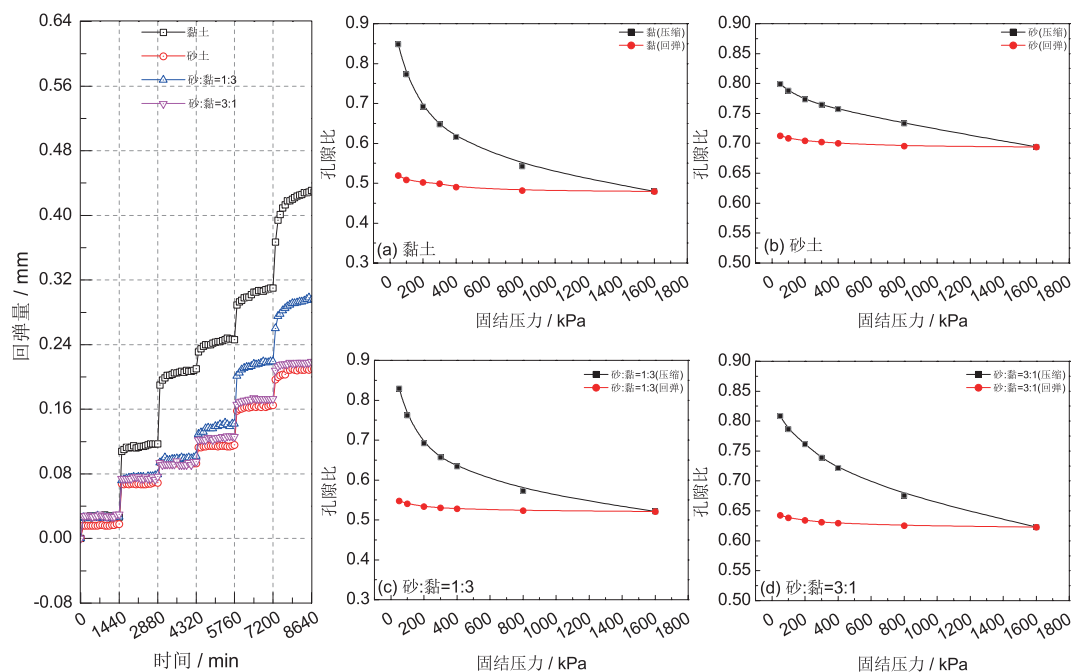
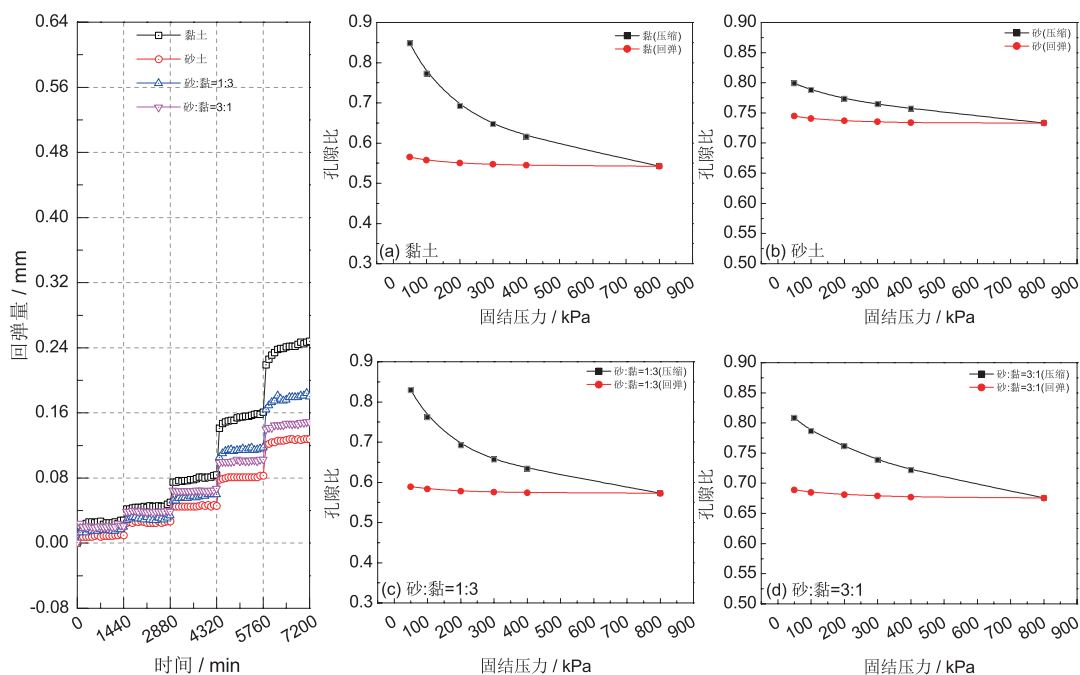


图 2 四种土样在 3200 kPa 固结压力下逐级卸载 $e-p$ 曲线

Fig. 2 $e-p$ curves of four soil samples unloading stage by stage at 3200 kPa consolidation pressure

图3 四种土样在1600 kPa固结压力下逐级卸载 $e-p$ 曲线Fig. 3 $e-p$ curves of four soil samples unloading stage by stage at 1600 kPa consolidation pressure图4 四种土样在800 kPa固结压力下逐级卸载 $e-p$ 曲线Fig. 4 $e-p$ curves of four soil samples unloading stage by stage at 800 kPa consolidation pressure

卸荷量达到一定程度时才有较大的回弹变形发生。黏粒含量的高低对土样的回弹性质影响表现为:黏粒含量越高,土样越易被压缩,不同土样压缩系数表现为黏土 (0.808 MPa^{-1}) >砂:黏=1:3 (0.694 MPa^{-1}) >砂:黏=3:1 (0.251 MPa^{-1}) >砂土

(0.142 MPa^{-1});在不同固结压力下开始卸载,回弹量都呈现出:黏土>砂:黏=1:3>砂:黏=3:1>砂土的规律,即土样黏粒含量越高,回弹量越大。

表3罗列了3组土样在压缩回弹过程中主要孔隙比的变化情况。对于同一种土,固结压力越

表3 压缩回弹过程中主要孔隙比的变化

Table 3 Changes of main void ratios in compression-rebound process

土样	最大固结压力/kPa	e_1	e_{\min}	e_2	$e_1 - e_2$
黏土	800	0.848	0.542	0.565	0.283
	1600	0.848	0.480	0.520	0.328
	3200	0.848	0.423	0.474	0.374
砂土	800	0.799	0.733	0.744	0.055
	1600	0.799	0.694	0.713	0.086
	3200	0.799	0.622	0.692	0.107
砂:黏=1:3	800	0.829	0.573	0.589	0.240
	1600	0.829	0.521	0.548	0.281
	3200	0.829	0.472	0.527	0.302
砂:黏=3:1	800	0.809	0.676	0.689	0.120
	1600	0.809	0.623	0.643	0.166
	3200	0.809	0.556	0.620	0.189

注: e_1 为加载至 50kPa 时土样的孔隙比; e_{\min} 为加载至最大荷载时土样的孔隙比; e_2 为卸载至 50kPa 时土样的孔隙比

大, 压缩越明显, 最终稳定孔隙比 e_{\min} 也越小; 当卸载至初始压力时, 其回弹量也相对越大, 但由于前期压缩量大, 其孔隙比 e_2 依然最小。差值 $e_1 - e_2$ 代表了此次压缩回弹过程中的不可逆变形部分, 可以发现固结压力越大, 黏粒含量越高, 不可逆

变形所占比例也越大。

2.2 回弹潜力分析

为了更好的对回弹变形规律进行分析, 引入回弹变形参数, 包括卸荷比 R 、回弹率 λ 以及回弹模量 E :

$$R = \frac{p_{\max} - p_i}{p_{\max}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{e_i - e_{\min}}{e_{\min}} \quad (2)$$

$$E = \frac{p_{\max} - p_i}{e_i - e_{\min}} (1 + e_i) \quad (3)$$

式中: p_{\max} 为最大荷载压力; p_i 为卸荷后上覆荷载; e_{\min} 为最大荷载下的孔隙比; e_i 为 p_i 荷载下的孔隙比。

在卸载回弹过程中, 3 组土样的卸荷比—回弹率及卸荷比—回弹模量曲线见图 5。从图 5(a~c) 中可以看出, 在相同初始固结压力下, 随着卸荷比 R 的增大, 回弹率 λ 先缓慢增长后迅速增大, 且当 R 相同时, λ 呈现出: 黏土 > 砂: 黏=1:3 > 砂: 黏=3:1 > 砂土的规律。图 5(d~f) 中, 随着卸荷比 R 的增大, 不同土样的回弹模量 E 都逐渐减小, 当 R 相同时, E 呈现出: 黏土 < 砂: 黏=1:3 < 砂: 黏=3:1 < 砂土的规律。不同固结压力条件下土样受到的最大固结压力越大, 其

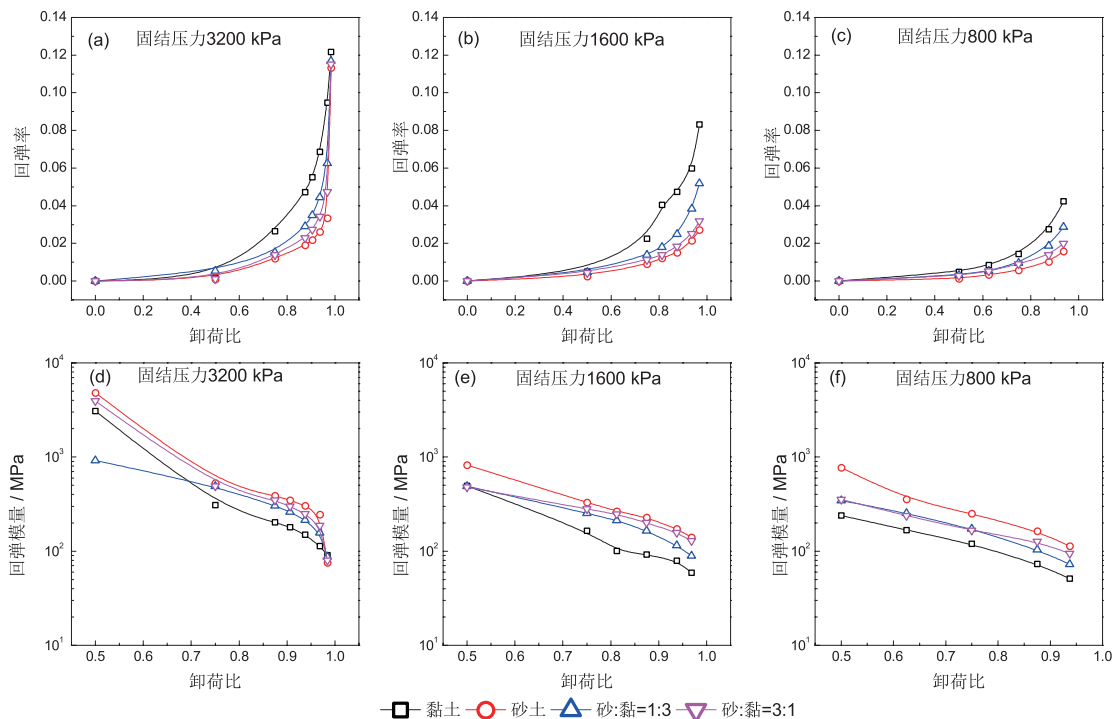


图5 不同土样卸荷比—回弹率关系曲线(a-c)及其卸荷比—回弹模量关系曲线(d-f)

Fig. 5 Relationship curves of unloading ratio-rebound rate and unloading ratio-rebound modulus for different soil samples

最大回弹率 λ 越大,初始卸荷时回弹模量 E 越大。

如图6所示,当卸荷比小于0.5时,不同固结压力下土样回弹率的差异并不大,即在卸荷开始阶段固结压力大小的影响并不明显;随着卸荷比的逐渐增大,回弹率逐渐增大,在相同卸荷比条件下,固结压力大小的影响在回弹率上逐渐体现并越来越明显,同一种土样所受固结压力越大,土样回弹率也越大;当卸荷比大于0.9时,回弹率迅速增大,这一结果与李建民和滕延京(2010)研究相似。

土样回弹率与初始应力水平有关。土样所受固结压力越大,其回弹充分后土样的回弹率也越大。图7给出了不同土样在不同固结压力下卸载至充分回弹后的最大回弹率。随着初始固结压力增大,不同土样的最大回弹率大致呈线性增长趋势,可用式 $\lambda_{\max}=A+Bp$ 拟合, A 、 B 值见表4。根据拟合结果,当土层类型及固结压力确定时,可对其最大回弹率进行预测。

3 结论及展望

本文通过大量室内压缩回弹试验,研究了土

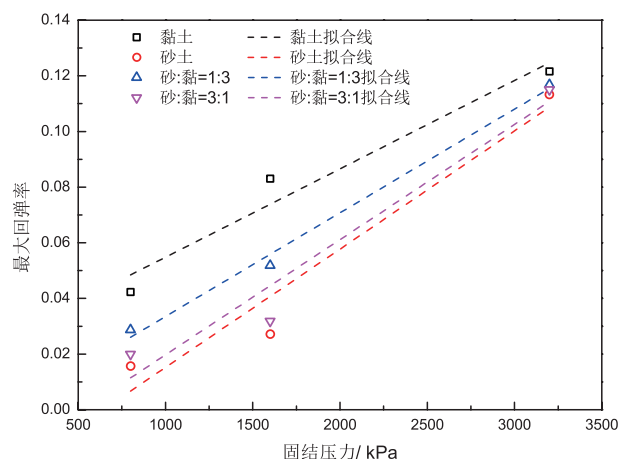


图7 固结压力与卸荷后最大回弹率关系图

Fig. 7 Relationship between consolidation pressure and maximum rebound rate after unloading

表4 不同土样最大回弹率拟合结果系数表

Table 4 Fitting results of maximum rebound rate of different soil samples

土样	A	B	R ²
黏土	0.02306	3.17568E-5	0.91577
砂土	-0.02728	4.24996E-5	0.90029
砂:黏=1:3	-0.00376	3.72656E-5	0.99695
砂:黏=3:1	-0.02166	4.1392E-5	0.90586

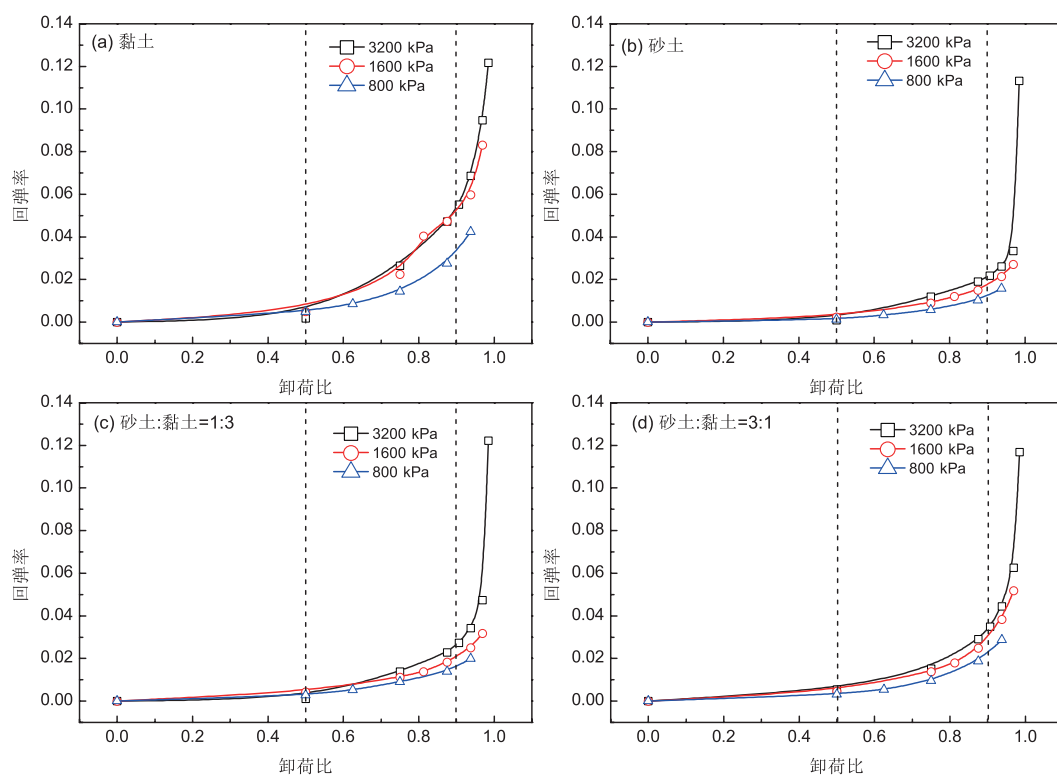


图6 不同固结压力下土样卸荷比—回弹率关系曲线

Fig. 6 Relationship between unloading ratio and rebound rate under different consolidation pressures

层回弹影响因素及回弹变形特性。试验结果表明：

(1) 由于地下水位上升，土层所受压力减小，土层产生回弹时其回弹变形性质与固结时间、土层性质、固结压力、卸荷压力有关。相同固结回弹条件下，土样黏粒含量越高，回弹量越大；对于同一种土，固结时间越短，卸荷压力越大，回弹量越大。

(2) 相同初始固结压力下，随着卸荷比 R 的增大，回弹率 λ 先缓慢增长后迅速增大，回弹模量 E 逐渐减小；土层所受固结压力越大，初始卸荷模量越大，其充分回弹后的回弹率越大。

(3) 当卸荷比小于0.5时，固结压力对土层回弹量影响不明显，土样卸荷产生的回弹量较小，随着卸荷比的逐渐增大，同一种土样所受固结压力越大，土样回弹率也越大；而当卸荷比大于0.9时，回弹率迅速增大。

(4) 当土样性质及固结压力确定时，其最大回弹率和固结压力大致呈线性关系，可用于土层最大回弹率的预测。

本研究结果对于掌握地层回弹变形机理、合理预测地层回弹量以及科学制定地下水回灌措施具有一定指导意义。但值得注意的是，影响土层回弹的因素很多，如地下水开采强度、土体成分差异、土层不同应力历史、土层厚度等，并且野外实际条件与实验室模拟条件存在一定差异。因此，对于水位抬升过程中土层的回弹变形特性有待进一步开展原位监测试验研究。

参考文献(References):

胡建平. 2011. 苏锡常地区地下水禁采后的地面沉降效应研究 [D]. 南京：南京大学.

李莎，成建梅，宫辉力. 2018. 基于变渗透系数的地下水开采—地面沉降三维模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 45(3): 20–27.

李建民，滕延京. 2010. 土样回弹及再压缩变形特征的试验研究 [J]. 工程勘察, 38(12): 9–14.

楼晓明，李德宁，杨敏. 2011. 上海地区基坑底部粉质黏土回弹变形参数分析[J]. 同济大学学报（自然科学版），40(4): 535–540.

罗跃，叶淑君，吴吉春，等. 2015. 上海市地下水位大幅抬升条件下土层变形特征分析[J]. 高校地质学报, 21(2): 243–254.

秦同春，程国明，王海刚. 2018. 国际地面沉降研究进展的启示[J]. 地质通报, 37(Z1): 343–349.

施小清，薛禹群，吴吉春，等. 2006. 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, 33(3): 1–6.

吴静红. 2017. 基于 DFOS 的地面沉降机理与土层变形潜力评价研究[D]. 南京：南京大学.

吴静红，施斌，曹鼎峰，等. 2017. 基于 DFOS 的排灌水条件下土体变形响应模型试验研究[J]. 工程地质学报, 25(6): 1455–1464.

薛禹群. 2003. 我国地面沉降模拟现状及需要解决的问题[J]. 水文地质工程地质, 30(5): 1–5.

张淑朝，张建新，张阳，等. 2008. 基坑开挖卸荷土体回弹实验研究 [J]. 岩土工程学报, s(1): 426–429.

张云，薛禹群，叶淑君，等. 2006. 地下水位变化模式下含水砂层变形特征及上海地面沉降特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 17(3): 103–109.

Anzidei M, Bosman A, Carluccio R, et al. 2016. Flooding scenarios due to land subsidence and sealevel rise: a case study for Lipari Island (Italy) [J]. Terra Nova, 29(1) Doi: 10.1111/ter.12246.

Mahmoudpour M, Khamhechiyan M, Nikudel M R, et al. 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence Caused by Groundwater Exploitation in the Southwest Plain of Tehran, Iran [J]. Engineering Geology, 201: 6–28.

Nikos S, Ioannis P, Constantinos L, et al. 2016. Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece [J]. Engineering Geology, 209: 175–186.

Shi X, Xue Y, Wu J, et al. 2008. Characterization of regional land subsidence in Yangtze Delta, China: the example of Su–Xi–Chang area and the city of Shanghai [J]. Hydrogeology Journal, 16(3): 593–607.