

文章编号:1673-9469(2020)01-0098-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.016

土体压缩-回弹变形特性试验研究

杨星,钱卫*,武立林,卢洪宁,张海涛

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京211100)

摘要: 针对地面沉降中土体变形问题,开展了不同土体(砂土、粉土和黏土)在不同状态下的压缩-回弹试验,结合相关土体变形机理的研究,对不同土体的压缩-回弹特性进行了研究。主要结论如下:砂土的压缩变形最为显著,其次为粉土,最后为黏土。砂土的变形呈现出初期变形小,后期变形大的特点。粉土和黏土则相反,两者的变形主要发生在前期。三种土体的变形均主要为不可逆变形,其中黏土的变形存在着明显的滞后性。砂土的变形主要来源为砂土结构的重塑,黏土则来自于结构的重塑和水分的重分布,粉土则与黏土相似。

关键词: 土体;压缩-回弹;室内试验;变形特性

中图分类号: P642

文献标识码: A

Experimental Research on Compression-Rebound Deformation Characteristics of Soil

YANG Xing, QIAN Wei*, WU Lilin, LU Hongning, ZHANG Haitao

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In view of soil deformation in land subsidence, compression-rebound tests of different soils (sand, silt and clay) in different states were carried out. Based on the study of soil deformation mechanism of relevant soils, the compression-rebound characteristics of different soils were studied. The main conclusions are as follows: the compression deformation of sand is the most significant, followed by silt, and finally clay. The deformation of sand is characterized by small initial deformation and large later deformation. On the contrary, the deformation of silt and clay mainly occurred in the early stage. The deformation of three kinds of soil is mainly irreversible, and the deformation of clay has obvious hysteresis. The deformation of sand mainly comes from the remolding of sand structure, clay comes from the remolding of structure and redistribution of water, and silt is similar to clay.

Key words: soil; compression-rebound; laboratory test; deformation characteristics

地面沉降是由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种不可补偿的永久性环境和资源损失^[1-2]。造成地面沉降最主要的因素是松散土层结构由于地下水过度抽取引起的土层压缩,土体的压缩-回弹特性决定了土体变形的特征。

目前,众多学者认为土体的压缩-回弹特性与土体的变形以及地面沉降有十分重要的联系^[3-13]。而且,目前的研究主要集中于粘性土体,缺少砂性土以及两者之间的对比。本文开展了不同土体在

不同状态下的压缩-回弹试验,研究成果可为地面沉降的防治工作提供一定的参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验采用的砂土来自于江苏省南京市,主要的物理力学参数如表1所示。黏土为长江中下游地区广泛分布的下蜀土,颜色较砂土深,含水率

收稿日期:2019-11-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508501);中央高校基本科研业务费项目(2019B77414);江苏省研究生实践创新计划项目(SJGX19_0152)

作者简介:杨星(1993-),男,江西上饶人,硕士研究生,从事地球物理方面的研究。

* 通讯作者:钱卫(1963-),男,加拿大人,博士,教授,从事地球物理方面的研究。

较高,其主要的物理力学参数如表 2 所示。粉土取自江苏省常州市,其主要的物理力学参数如表 3 所示。

表 1 砂土物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of sand

最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最小干密度 /(g·cm ⁻³)	最大孔 隙率	最小孔 隙率	D ₁₀ /mm	C _c	C _u
1.69	1.35	0.970	0.14	0.30	1.05	2.27

表 2 黏土物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of clay

相对 密度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	天然含 水率/%	内聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
2.72	30.3	17.5	12.8	20~28	15.8	6.3

表 3 粉土的物理力学参数

Tab.3 Physical and mechanical parameters of silty soil

相对 密度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	天然含 水率/%	内聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
2.70	27	18.7	8.3	28~31	24.5	15.7

1.2 试验原理

固结试验(亦称压缩试验)是研究土的压缩性的最基本的方法。固结试验就是将天然状态下的原状土或人工制备的扰动土,制备成一定规格的土样,然后将土样置于固结仪容器内,逐级施加荷载,测定试样在侧限与轴向排水条件下压缩变形,以及变形和压力的关系,孔隙比和压力的关系,变形和时间的关系。

设土样的初始高度为 H_0 ,初始孔隙比为 e_0 ,在荷载 P 作用下,土样稳定后的总压缩量为 ΔH ,假设土粒体积 $V_s = 1$,且不变,根据土的孔隙比的定义 $e = V_v/V_s$,则受压前后土的孔隙体积 V_v 分别为 e_0 和 e ,因为受压前后土粒体积不变,且土样横截面积不变,所有受压前后试样中土粒所占的高度不变,因此,根据荷载作用下土样压缩稳定后的总压缩量 ΔH ,即可得到相应的孔隙比 e 的计算公式:

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0}(1 + e_0) \quad (1)$$

式中, $e_0 = \frac{G_s(1 + w_0)}{\rho_0} \rho_w - 1$, 其中 G_s 为土粒比重; w_0 为土样的初始含水量,%; ρ_0 为土样的初始密度, g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度, g/cm^3 。

1.3 试验方法

为研究试样土的压缩性,本论文设计不同参

数土样的压缩固结试验,通过控制密度、土体性质、含水率等参数研究其对土体压缩回弹性质的影响。试验所用仪器为 WG(GDG)型杠杆式高压固结仪。

根据《土工试验方法标准(GB 50123-1999)》相关要求,选择面积为 30 cm^2 的环刀进行试样的制备,试样的相关参数如表 4 所示。将制备的土样按以上标准进行压缩试验,加载压力依次为 12.5、25、50、100、200、400、600、800 kPa,每一级荷载的施加均需等上次荷载变形完全稳定后再施加下一级荷载。在加载全部完成后,进行回弹试验,回弹时同样逐级卸载,等上一级变形完全稳定后,再进行下一级卸载并记录试验数据。

表 4 试样的基本参数

Tab.4 Basic parameters of samples

试样编号	试样密度/(g·cm ⁻³)	试样含水率/%
砂土 S1	1.65	5
粉土 S2	1.65	30
黏土 C1	1.65	30
黏土 C2	1.75	30
黏土 C3	1.85	30
黏土 C4	1.95	30
黏土 C5	1.95	25

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

对试样进行压缩-回弹试验后,试验结果见表 5 和表 6。根据以上七种土样在不同固结压力下的孔隙比变化,可对土样的压缩-回弹特性与土样密度、土体性质和含水率之间的影响进行分析。

2.1.1 土体压缩-回弹特性与密度的关系

控制含水率、固结压力等其他参数不变,可以得到不同密度土体压缩的 $e-p$ 曲线,由图 1 可知,随着密度的减少,黏土在同一固结应力下的孔隙比等比例增加,分析由于黏土的密度较小,其在相同的体积下颗粒质量小,因此孔隙的占比大,在同样压力作用下,可以更好地压缩孔隙体积,压缩性也更强。此外,在 400 kPa 压力下,四个密度的黏土土样均有应变突增的表现,推测主要是由于前期颗粒的排列重组以及孔隙间自由水的排出,到 300~400 kPa 的压力时,自由水基本排出,黏土颗粒表面的结合水膜相互接触,厚度变薄,而密度较小的黏土土样,颗粒的比表面积越大,可接触并变

表 5 压缩过程中土样孔隙比变化情况

Tab.5 The changes of pore ratio of soil during compression

土样 编号	加载压力/kPa							
	12.5	25	50	100	200	400	600	800
S1	0.994	0.989	0.987	0.982	0.98	0.985	0.98	0.976
S2	1.018	1.019	1.016	1.008	1.005	1.013	1.004	0.998
C1	1.132	1.1	1.081	1.045	1.041	1.068	1.043	1.021
C2	1.003	1.005	0.976	0.941	0.923	0.98	0.952	0.927
C3	0.899	0.897	0.885	0.839	0.821	0.874	0.835	0.81
C4	0.803	0.788	0.77	0.744	0.711	0.762	0.733	0.71
C5	0.733	0.731	0.721	0.72	0.7	0.737	0.723	0.707

表 6 回弹过程中土样孔隙比变化情况

Tab.6 The changes of pore ratio of soil during springback

土样 编号	加载压力/kPa							
	800	600	400	200	100	50	25	12.5
S1	0.976	0.982	0.99	0.992	0.989	0.986	0.992	0.989
S2	0.998	1.009	1.017	1.019	1.014	1.014	1.015	1.015
C1	1.021	1.097	1.133	1.13	1.118	1.129	1.124	1.138
C2	0.927	0.996	1.012	1.014	0.997	0.998	1.007	1.008
C3	0.81	0.88	0.902	0.899	0.898	0.899	0.904	0.906
C4	0.71	0.78	0.804	0.8	0.8	0.799	0.806	0.805
C5	0.707	0.716	0.736	0.735	0.733	0.731	0.732	0.735

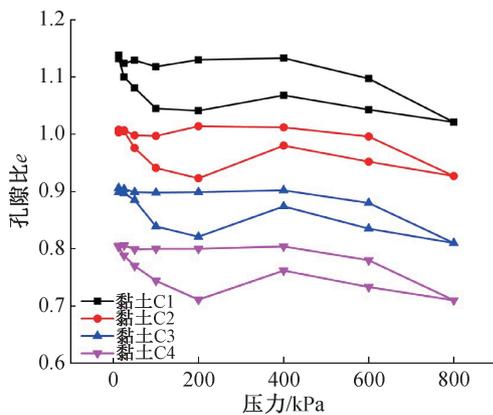


图 1 不同密度黏土在压缩过程中的 $e-p$ 曲线
Fig.1 The $e-p$ curve of clay with different density during compression

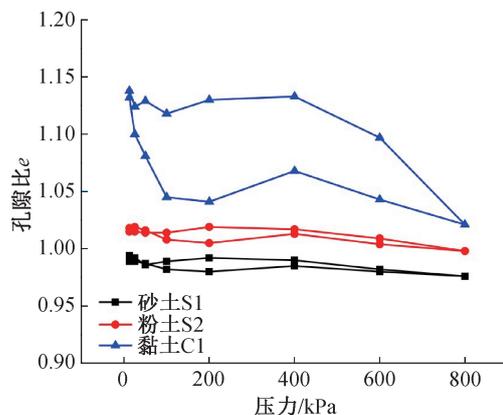


图 2 不同土性土体在压缩过程中的 $e-p$ 曲线
Fig.2 The $e-p$ curve of soil with different soil properties during compression

薄的结合水膜面积越大,因此在相同的固结压力下,其孔隙比越大。

2.1.2 土体压缩性与土体性质的关系

由图 2 可知,在相同固结应力下,砂土、粉土、黏土的压缩性表现为黏土最大,依次为粉土、砂土,分析其原因可知砂土的压缩主要依靠颗粒的移动和结构的重组,而粉土、黏土等土样内还有结合水、自由水的存在,其压缩不仅有颗粒的滑移及重组,还包括有自由水的排出与结合水膜的变形,因此在相同密度的条件下其压缩性高于砂土。此外,砂土颗粒之间主要为点-点接触,而随着土体稠度增加,逐渐变为面-面甚至堆叠式接触,当砂土颗粒的孔隙被填满后,砂土便不再变形,而粉

土、黏土的稠度增加使其接触面的滑动更加轻松,在相同压力作用下,其变形更加显著。

2.1.3 土体压缩性与含水率的关系

如图 3 所示,黏土 C5 的含水率为 25%,黏土 C4 的含水率为 30%,基本上在相同密度和相同固结压力下,随着含水率的增大,土颗粒中自由水与饱和水的含量增多,其可压缩性也随之增大。

在固结压力为 0~200 kPa 时,含水率的增加会大大增加土体的压缩变形量,两者之间的孔隙比差值达到 0.07,分析可知在压缩前期,压缩主要依赖颗粒间的移动和破碎重组,自由水和结合水的存在减少了颗粒间的摩阻力,从而帮助其产生更快更大的压密变形;但到压缩后期即 400~

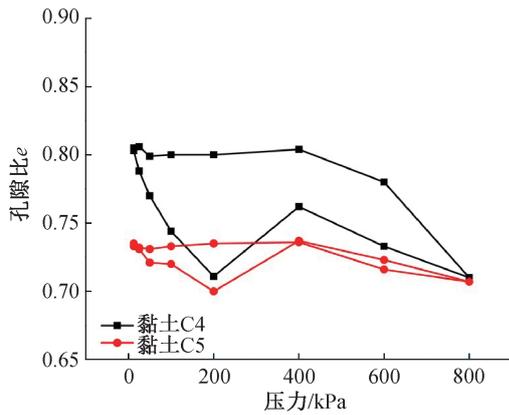


图 3 不同含水率土体在压缩过程中的 $e-p$ 曲线
Fig.3 The $e-p$ curve of soil with different moisture content during compression

800 kPa阶段,黏土颗粒间的自由水基本排出,压缩主要以颗粒结合水膜的变形为主,两者并没有拉开较大的差距,孔隙比差值为 0.02。

2.2 变形特性分析

砂土的颗粒大小不一,形状基本呈几何不规则状,颗粒之间相互接触,接触方式多为点-点、点-面接触,在收到外力作用时,接触点发生应力集中,导致应力大于摩阻力,发生固体颗粒的滑动、孔隙坍塌以及颗粒结构的重组。在回弹过程中,由于颗粒结构的改变是不可逆的,因此砂土的回弹量并不大,变形很少为弹性变形。图 4 为砂土 S1 在固结压力为 0~800 kPa 过程中的 $e-p$ 曲线。

由图 4 可看出,砂土的压缩过程主要分为三个阶段:(1)在受到较小的固结压力时,砂土发生较快的压缩变形,颗粒沿着接触面发生滑动,小颗粒砂土随着位移不断填充进大孔隙中,砂土骨架结构发生弹性变形,应变的速率随压力的增加而增加;(2)在固结压力达到 200 kPa 时,砂土的孔隙比出现小幅度的增加而后减少,这是由于在固结压力达到砂土骨架的极限荷载,颗粒之间的接触面的摩阻力小于有效应力的集中,在外部荷载的作用下,发生骨架坍塌以及颗粒的破碎,颗粒的破碎导致孔隙体积的增大,孔隙比也随之增大,此时变形以塑性变形为主,甚至伴随有一定程度的蠕变变形;(3)在固结应力达到 400 kPa 以后,在荷载作用下砂土的压缩变形达到最大程度,蠕变变形逐渐收敛,砂土的应变速率逐渐减小直至最终稳定。

图 5 为砂土在变形过程中受力示意图, F_1 为外部荷载对砂土结构的力, F_2 为砂土颗粒接触面之间的摩阻力,当收到某一级压力 F_1 时,瞬间 F_2

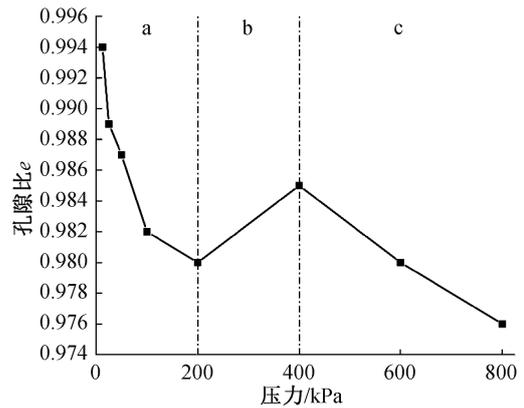


图 4 砂土 S1 压缩过程的 $e-p$ 曲线
Fig.4 The $e-p$ curve of sand S1 compression process

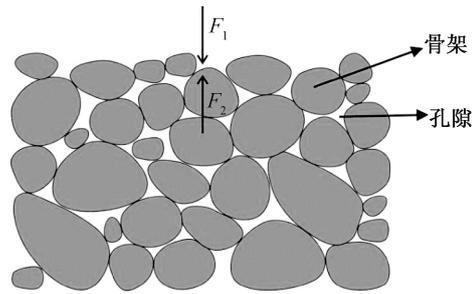


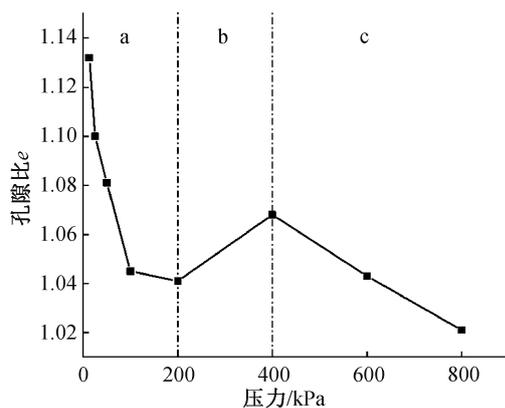
图 5 砂土变形受力示意图
Fig.5 Schematic diagram of sand deformation and stress

小于外部荷载导致颗粒发生移动,孔隙体积减少,甚至颗粒破碎填充在大孔隙间,颗粒之间的接触增加,从而使得 F_2 不断增大与 F_1 趋于平衡,此时这一固结压力 F_1 作用下的压缩变形结束。

砂土的压缩特性主要受砂土颗粒的级配以及颗粒间的接触关系控制,砂土颗粒的粒径差距越大,颗粒形状越复杂越容易产生应力集中,在相同荷载作用下更容易导致颗粒的破碎与结构的重组,因此其压缩变形量也越大;颗粒之间的接触关系若以点-点或点-边类型接触时,结构稳定性较差,更容易发生颗粒的移动,而边-边或边-面接触则更容易维持其结构的稳定性。

黏土颗粒较小,基本呈粒状、片状,因此颗粒间基本呈边-边或面-面接触,黏土颗粒结构以“蜂窝状”为主。此外,由于黏土颗粒本身带电,孔隙间充斥有自由水与结合水,因此也有很多的黏土颗粒呈团块状粘结在一起。黏土颗粒的压缩回弹主要表现为颗粒滑动、孔隙压缩、自由水释出以及结合水膜压缩。图 6 为黏土试样 C1 的压缩过程。

如图 7 所示,黏土颗粒的压缩过程与砂土颗粒类似,基本可分为三个阶段:(1)在受到外力作用时,首先发生黏土颗粒间自由水的释出,此外还包

图6 黏土 C1 压缩过程的 $e-p$ 曲线Fig.6 The $e-p$ curve of clay C1 compression process

括有黏土颗粒的滑移,由于自由水充分润滑了颗粒间的接触,导致颗粒的移动所抵抗的摩阻力变小,因此黏土颗粒在压缩初期呈现较快的压缩变形;(2)在 200 kPa 的固结压力时,黏土颗粒的孔隙比出现了反弹现象,这是由于随着压缩不断进行,自由水充分排出,颗粒孔隙分布逐渐均匀,黏土颗粒间的结合水膜相互接触,团块化分布程度提高,颗粒变形转为由结合水膜的压缩变薄承担;(3)随着固结压力的增加至 400~800 kPa,黏土结合水膜压缩变薄,黏土的饱和度不断增加,孔隙体积减小至临界值,颗粒之间的摩阻力逐渐增加,抗压性也不断增加,因此变形会逐渐趋于稳定。值得注意的是,由于黏土颗粒间的结合水双电子层作用,颗粒逐渐变为近固体状态,回弹量明显小于砂土,且其回弹时间也增加,具有显著的滞后效应。

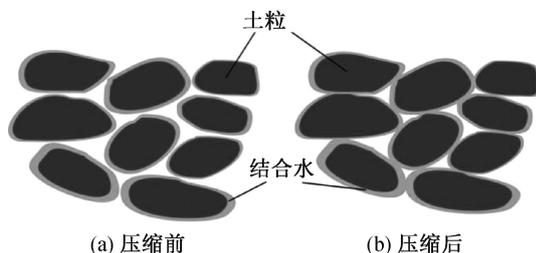


图7 黏土颗粒压缩前后对比示意图

Fig.7 Schematic diagrams of comparison before and after clay particle compression

3 结论

1) 砂土的压缩变形主要是固体颗粒的滑动、孔隙坍塌和颗粒结构的重组,而黏土的压缩包括颗粒滑动、孔隙压缩、自由水释出以及结合水膜压缩,其中,黏土在压缩初期的变形较为显著,而到后期变形较为稳定;砂土呈现出相反的趋势,在压

缩初期的变形较小,而到后期变形较为显著。

2) 砂土与黏土的变形中不可逆变形占较大比例,且黏土的压缩回弹具有滞后性。黏土的压缩特性与其密度、含水率等均有关系,密度越大,孔隙体积越小,可压缩性越小;含水率越大,结合水与自由水的含量越大,颗粒之间的摩阻力越小,可压缩性越大。

3) 粉土的压缩变形性质具有砂土和黏土两种特点。一方面,粉土的压缩变形特点与黏土相似,均为在压缩初期的变形较为显著,而到后期变形较为稳定;另一方面,其压缩性大于黏土,小于砂土,介于砂土与黏土之间。

参考文献:

- [1] 张阿根,刘毅,龚士良.国际地面沉降研究综述[J].上海地质,2000,4(76):1-7.
- [2] 张阿根,杨天亮.国际地面沉降研究最新进展综述[J].上海地质,2010,31(4):57-63.
- [3] 杨艳,王荣,罗勇.北京典型地面沉降区土体压缩特征研究[J].现代地质,2016,30(3):716-722.
- [4] 朱鸿鹄,陈晓平,张芳枝,等.南沙软土固结变形特性试验研究[J].工程勘察,2005(1):1-3.
- [5] 白冰.饱和土体固结变形特征的一种非线性描述[J].岩石力学与工程学报,2004,24(11):1966-1971.
- [6] 赵维炳,施健勇.软土固结与流变[M].南京:河海大学出版社,1996.
- [7] 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(3):1-6.
- [8] WU J H, SHI B, CAO D F, et al. Model Test of Soil Deformation Response to Draining-Recharging Conditions Based on DFOS [J]. Engineering Geology, 2017, 226: 107-121.
- [9] 吴静红,程刚,施斌,等.土层回弹变形特性及回弹潜力试验研究[J].高校地质学报,2019(4):495-501.
- [10] 卢毅,宋泽卓,于军,等.基于BOFDA的砂-黏土互层垂向变形物理模型试验研究[J].高校地质学报,2019(4):481-486.
- [11] 朱菊艳.沧州地区地面沉降成因机理及沉降量预测研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [12] 郭海朋,丁国平,朱菊艳,等.沧州地面沉降区粘土压缩变形和渗透特征研究[J].武汉理工大学学报,2014(5):111-117.
- [13] 陈戈,阎世骏,李铁锋.天津市深层粘性土对地面沉降的影响及其沉降量计算[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(6):804-809.

(责任编辑 王利君)