

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.05.001

引文格式: 邵泽斐, 马青山, 葛伟亚, 雷廷, 邢怀学. 2024. 杭州市地面沉降重点区土体压缩和固结特性研究——以试验孔 HZ22J06 为例[J]. 华东地质, 45(4): 430-439. (SHAO Z F, MA Q S, GE W Y, LEI T, XING H X. 2024. Study on the compression and consolidation properties of soil in the key area of land subsidence in Hangzhou: a case study of test hole HZ22J06[J]. East China Geology, 45(4): 430-439.)

杭州市地面沉降重点区土体压缩和固结特性研究 ——以试验孔 HZ22J06 为例

邵泽斐^{1,2}, 马青山², 葛伟亚², 雷廷², 邢怀学²

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074;
2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要:开展土体压缩固结特性研究,从宏观上分析土体变形影响因素,是探究地面沉降成因的重要内容。文章以杭州市地面沉降重点区水文地质工程地质综合试验孔 HZ22J06 土样为研究对象,通过室内试验对土体的物理力学性质、压缩变形及固结特征进行分析研究。结果表明:试验孔土体各物理指标之间存在显著的相关性,土体含水率、土粒比重、孔隙比、塑性指数、液性指数和压缩系数等指标随深度的增加总体上呈现先增大后减小的趋势;土样压缩系数随压力的增大呈现减小的趋势,且浅部土样压缩系数高于深部土样;土体固结系数与渗透系数之间存在密切的关联性,相同压力下不同类型土样的固结系数大小变化符合粉土>粉质黏土>淤泥质粉质黏土>淤泥质黏土的规律,这与土体渗透系数大小变化规律相一致;试验孔大多数土样处于欠固结状态,在现有自重压力作用下会进一步固结压密,易引发地面沉降。研究成果可为杭州市地面沉降成因规律研究和风险防控提供科学依据。

关键词:地面沉降;土体物理力学性质;压缩变形;固结特征;杭州市

中图分类号: P66; P69

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)04-430-10

地面沉降是指受自然因素或人类工程活动影响,地层固结压缩,导致大面积地表高程降低的一种缓变性地质灾害,具有大规模性、大破坏性、持久性和难防治等特点(雷宏武, 2010; 裴江涛等, 2023; 苏河源, 1981; 袁铭等, 2016)。导致地面沉降发生的影响因素众多,除地下流体资源开采外,还与水文地质条件、结构类型、黏性土层厚度和固结历史等地质因素有关(Bagheri-Gavkosh et al., 2021; 黄德华, 2023; 孔令莹等, 2023; 王明珠等, 2021; 薛禹群和张云, 2016)。目前,国内外许多学者从土体压缩固结特性入手,开展了一系列相关研究。例如:郭海朋等(2014)以沧州地面沉降区

的黏土为研究对象,研究了土体的压缩变形和渗透特征,通过分析土样各物理指标之间的关系,发现其各物理指标之间的相关性强,土样的压缩系数随压力的增大总体上呈先减小而后趋于平缓的趋势。王云龙等(2020)通过常规物理测试和不同压力等级下的高压固结试验,分析了沧州典型地面沉降区土体各物理指标之间的关系以及土体结构与压缩特征的关系,研究了土体在不同深度、不同压力下的变形量和固结参数的变化特征。田利川(2010)通过研究河北省衡水市沉降区不同深度黏土的固结特性,认为地面沉降的发生是由于存在压缩变形较大的厚层黏性土层与含水砂层互

* 收稿日期: 2023-05-05 修订日期: 2024-05-18 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“杭州多要素城市地质调查(编号: DD20190281)”、“全国特大城市与城市群地质安全风险监测评估(编号: DD20221732)”和国家野外科学观测研究站开放基金“沧州平原区地面沉降机理与预测模型研究(编号: CGLOS-2022-02)”项目联合资助。

第一作者简介: 邵泽斐, 1999年生, 女, 研究生, 主要从事地下水数值模拟研究工作。Email: shaozefei2021@163.com。

通信作者简介: 马青山, 1988年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事水工环地质调查研究工作。Email: ssqm2007@163.com。

层。Di et al.(2022)在常规物理力学试验基础上,结合扫描电镜技术对不同固结荷载作用下黏土的微观结构进行了分析,揭示了地面沉降发生发展过程中土体变形和沉降微观结构的演变特征和规律。这些研究成果为探究地面沉降的宏观和微观成因规律提供了数据参考和科学依据。

杭州市位于杭嘉湖平原西南部,经济发达、人口密集,为长江三角洲中心城市之一。自 2002 年杭嘉湖平原全面实施地下水禁采管控措施以来,杭州市地下水位逐步回升,地面沉降速率得到有效控制。然而近些年随着城市化进程的加快,区内出现了多个沉降漏斗区,并有扩大连片的趋势(李雪刚等, 2013)。2019—2021 年,杭州市累计沉降量 > 10 mm 的区域面积约为 144.1 km², 约占区内总面积的 6%, 主要分布于萧山区衙前街道、滨江区长河街道等地,沉降中心累计沉降量最大值达 26.1 mm(浙江省地质勘察院有限公司, 2022^①)。

受控于复杂的古地形地貌,以及第四纪以来古气候的剧烈变化、海平面多次升降和新构造运动的影响,区内第四纪沉积物经历了多次堆积和侵蚀作用的交替,发育了一套复杂的陆相、海陆交互沉积地层(Wang et al., 2014; 李从先和汪品先, 1998)。根据杭州市平原区第四系工程地质层(组)划分结果(浙江省地质勘察院有限公司, 2022^①),区内第四系垂向上分布了 5 层饱和软土层和 4 层硬土层,自上而下分别为第一软土层

(mQ₄²)、第一硬土层(al-IQ₄¹)、第二软土层(mQ₄¹)、第二硬土层(al-IQ₃²⁻²)、第三软土层(mQ₃²⁻²)、第三硬土层(al-IQ₃²⁻¹、lh-Q₃²⁻¹)、第四软土层(mQ₃²⁻¹)、第四硬土层(al-IQ₃¹)和第五软土层(lh-Q₃¹)。这种海相与陆相黏性土互层构成的软硬土相间地层结构,为地面沉降发育提供了良好的地质条件(Xu et al., 2018; 赵建康等, 2006)。已有研究成果表明,区内软土层厚度大小及硬土层缺失与否对地面沉降差异的影响最大,第一、二、三层软土层较发育,且其间硬土层缺失越多的地段,地面沉降现象越明显(浙江省地质调查院, 2009^②)。

为探究杭州市地面沉降的成因规律,本文以杭州市地面沉降重点区水文地质工程地质综合试验孔 HZ22J06 土样为研究对象,通过室内常规物理力学性质和压缩固结试验,对土体的物理力学性质、压缩变形和固结特征进行分析研究,以为杭州市地面沉降成因机制研究提供理论依据。

1 试验内容及方法

试验土样取自杭州市萧山区衙前镇地面沉降中心附近的水文地质工程地质综合试验孔(HZ22J06),该孔于 2022 年 11 月 19 日开始施工,终孔深度为 73.5 m,地层岩性如图 1 所示。试验孔揭穿了整个第四系,具有典型性和代表性。水

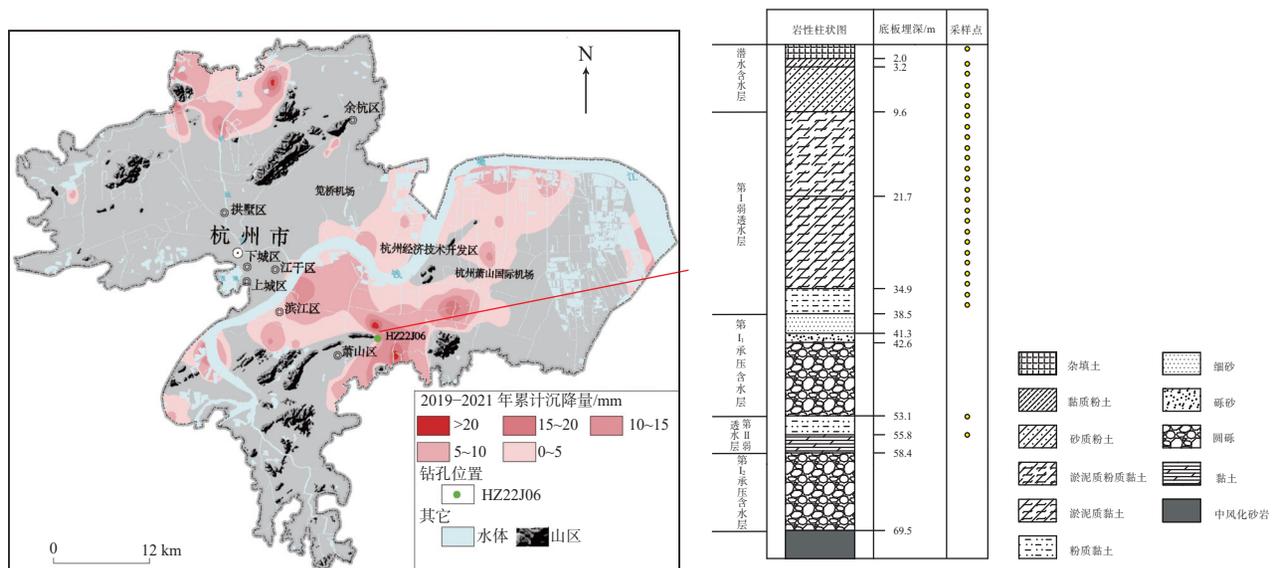


图1 试验孔 HZ22J06 所在位置、岩性柱状图及采样点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of test borehole HZ22J06, stratigraphic column, and distribution of sampling points

准测量结果显示, 2019—2021年该地点地面沉降速率约为5 mm/年。

试验土样采集情况见图1, 本次共采集土样27组(HZ22J06-1T1~HZ22J06-1T27), 所采得的原状土样用保鲜膜密封包裹, 储存过程中避免暴晒和雨淋, 尽量防止土样中水分流失, 运输过程中将土样固定并铺设气泡膜、海绵等来避免土样振动, 进而最大程度地使土样维持原状, 土样尺寸高300 mm, 直径89 mm。所有样品送往浙江省地矿勘察院有限公司进行基本物理参数试验和压缩固结试验。依据《GB/T50123—2019 土工试验方法标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019), 按照原状土室内试验制备要求, 采用快速固结法对前期固结压力、压缩系数和压缩指数等进行测定。

2 土体物理力学特征分析

土体的物理力学指标与土体类型有着很好的

相关性(郭海朋等, 2017; 朱菊艳等, 2014)。为充分了解杭州市地面沉降重点区土体物理性质, 对试验孔(HZ22J06)土体进行基本物理力学试验, 主要测试指标包括含水率、孔隙比、密度、比重、饱和度、塑性指数、液性指数以及压缩系数等。其中含水率、孔隙比和密度可反映土体的三相组成, 塑性指数和比重可反映土体颗粒细微程度以及吸附结合水的能力, 液性指数则能反映土体的软硬程度或者抗剪切能力。

2.1 土体物理力学性质指标

试验孔(HZ22J06)土体物理力学性质指标统计结果如图2所示, 测试土样含水率为19.8%~52.2%, 密度为1.69~2.06 g·cm⁻³, 土粒比重为2.69~2.76, 孔隙比为0.568~1.462, 塑性指数为6.3~21.6, 液性指数为0.29~1.43, 压缩系数为0.09~0.96 MPa⁻¹, 饱和度为93%~99%。试验孔土体物理力学性质指标数据无异常值, 波动较小, 呈现出较稳定的状态。另外, 除密度和液性指数外, 土样

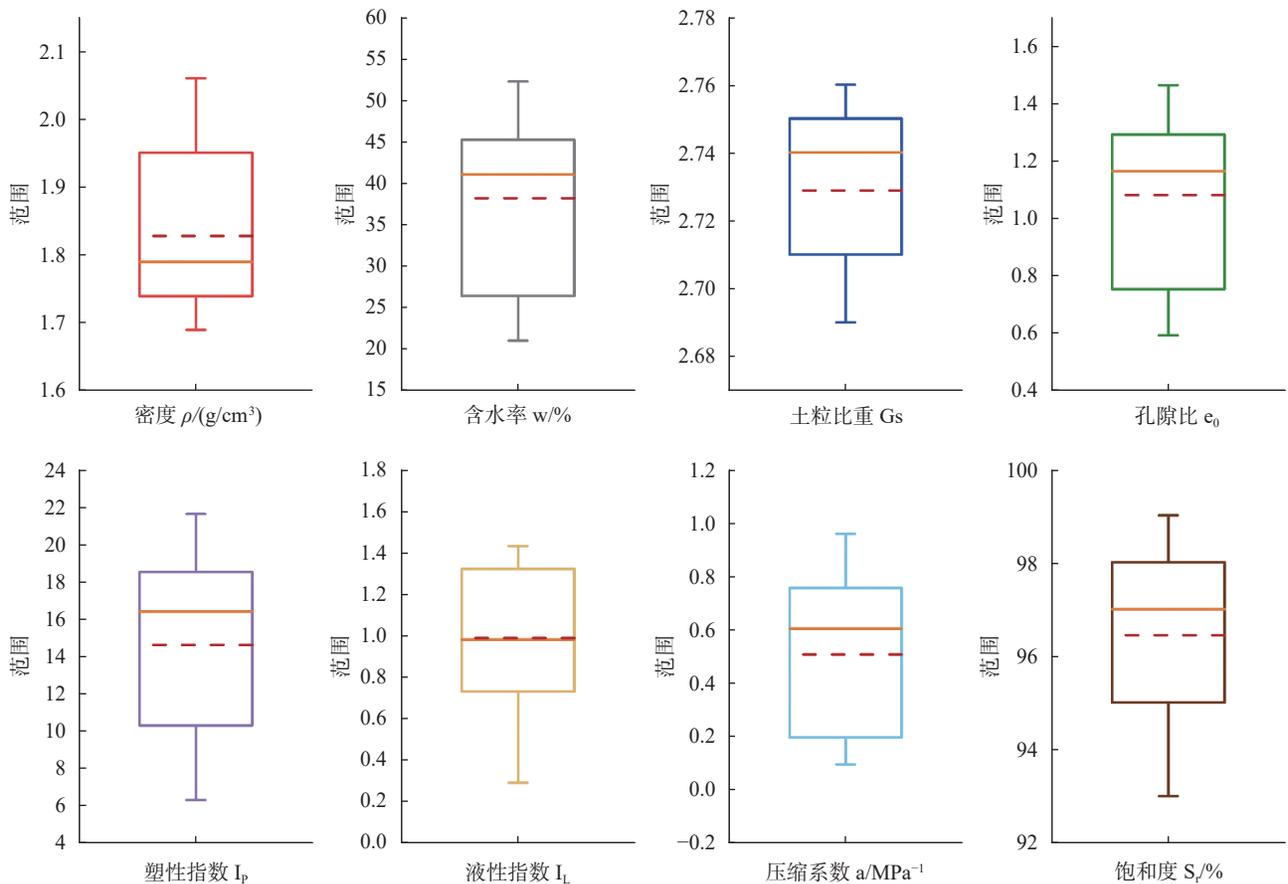


图2 试验孔(HZ22J06)土体物理力学性质指标箱线图

Fig. 2 Box plot of the physical and mechanical properties of soil for test borehole HZ22J06

的含水率、土粒比重、天然孔隙比、饱和度、塑性指数以及压缩系数的中位数均偏上,数据集中在箱线图上半部分,平均值均小于中位数,呈左偏态分布。

土体物理力学性质指标随深度的变化规律见图3。土体的含水率、土粒比重、孔隙比、塑性指数、液性指数和压缩系数随深度的增加总体上呈现出先增大后减小的趋势,密度随深度的增加呈现出先减小后增大的趋势,饱和度则随深度变化呈现出上下波动的特点。埋深8.9 m以内土样的

物理力学性质指标变化幅度小。埋深10.1~28.3 m土样的各物理力学性质指标呈现逐渐增大的趋势,变化幅度较大(除密度和饱和度外)。土样孔隙比与天然含水率呈现较好的正相关性,与密度呈负相关性。天然含水率、孔隙比与压缩系数呈现一定的正相关性,即天然含水率、孔隙比越大,黏性土越容易压缩。土体类型对土体物理性质及压缩性具有较大影响,对试验孔 HZ22J06 而言,不同类型的土体可压缩性基本符合淤泥质黏土>淤泥质粉质黏土>粉质黏土>粉土的规律。

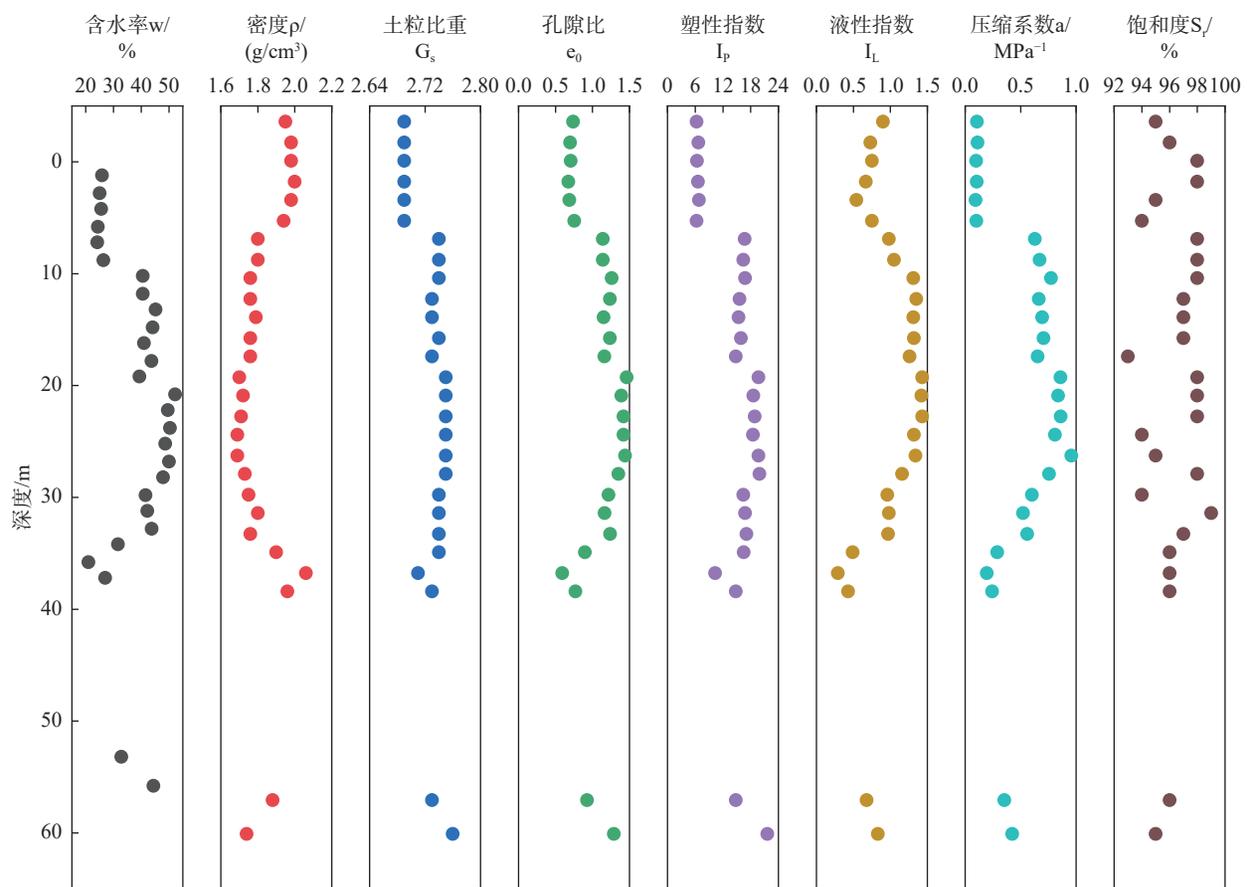


图3 试验孔(HZ22J06)土体物理力学性质指标随深度变化散点图

Fig. 3 Scatter plot of the physical and mechanical properties of soil with depth in test borehole HZ22J06

2.2 软硬状态对土体压缩性的影响

液性指数是判断土体软硬状态的重要指标。通过对试验孔(HZ22J06)土样液性指数与压缩系数之间的关联性进行分析发现,随着深度的增加,液性指数与压缩系数的变化趋势基本一致,且两者呈现出正相关关系(图3)。根据液性指数大小对土体的可压缩性进行统计分析

(表1),可以看出,随着液性指数逐渐增大,压缩系数也随之增大,这表明土体越软越容易压缩,而越硬的土体则越难以压缩。正常状态下,土体的软硬状态和含水率密切相关,含水率越高,土体就越软。此外,试验孔流塑态的土体所占比例最大,这说明沉降中心的土体具有较好的压缩性。

表1 试验孔 HZ22J06 土体软硬程度与压缩系数统计表

Table 1 Statistical table of soil hardness and compression coefficient for test borehole HZ22J06

孔号	土体软硬状态	土样数/个	土样所占比例/%	平均含水率/%	平均液性指数	平均压缩系数/ MPa^{-1}
HZ22J06	$0.25 < I_L \leq 0.75$ 可塑	9	33.3	26.4	0.59	0.18
	$0.75 < I_L \leq 1$ 软塑	6	22.2	39.8	0.94	0.48
	$I_L > 1$ 流塑	12	44.4	46.1	1.31	0.77

3 土体压缩与固结特征

3.1 不同土体类型孔隙比随压力变化特征

土体压缩变形实际上就是孔隙体积压缩,孔隙比减小所致(狄胜同, 2020; 段晓飞等, 2018)。因此,土体孔隙比的变化可以在一定程度上表示土体压缩变形这一过程(方永伦等, 2004; 田园等, 2020)。

选择试验孔(HZ22J06)不同深度典型土样:粉土(HZ22J06-1T3)、淤泥质粉质黏土(HZ22J06-1T10)、淤泥质黏土(HZ22J06-1T18)、粉质黏土(HZ22J06-1T23)为研究对象,分别在 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa 和 800 kPa 不同压力下,对土样孔隙比进行对比分析(图 4)。可以看出,土样孔隙比随压力的增大而逐渐减小,并呈现出阶段性的变化特征,即加压初始阶段孔隙比变化较为明显,后期则趋于平缓。这是因为加压初始阶段,土体的压缩主要是大孔隙向小孔隙转变的过程,随着压力的进一步增加,土体的压缩则主要表现在土体颗粒的移动、重新排列和靠拢挤紧过程,在此过程中外部施加的压力已经超过孔隙中

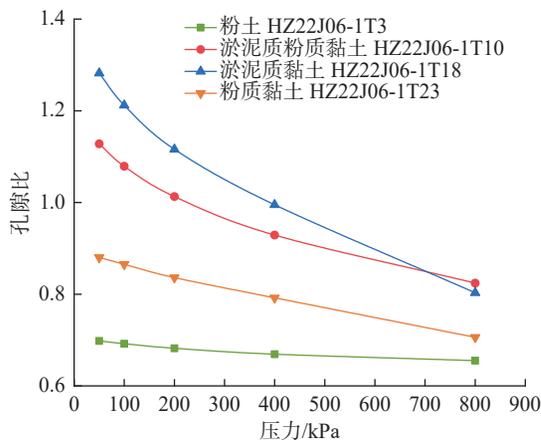


图4 试验孔(HZ22J06)不同土体类型的孔隙比随压力变化的曲线

Fig. 4 Variation curves of void ratio with pressure for different soil types in test borehole HZ22J06

结合水在土体表面的附着力,导致结合水转变为自由水排出,因此土体的变形量较小。从土样孔隙比变化幅度来看,表现为淤泥质黏土>淤泥质粉质黏土>粉质黏土>粉土的规律,这说明孔隙比变化幅度越大,土体越容易压缩变形。

3.2 压缩系数与孔隙比及塑性指数的关系

试验孔(HZ22J06)不同深度土样的压缩系数、孔隙比和塑性指数变化曲线如图 5 所示,压缩系数、孔隙比和塑性指数随深度变化的趋势基本一致,三者之间呈正相关关系。另外,除表层粉土层外(受人类活动破坏严重),浅部地层正相关性要稍好于深部地层,这是因为浅部地层受到的荷载通常较小,土体较松散,其结构屈服力较小,因此土体较容易产生压缩变形,压缩系数、孔隙比和塑性指数之间的相关性较好。相比之下,深部地层受到的荷载较大,土体相对致密,其结构屈服力也较大,这使得深部地层土体更能够抵抗外部施加的压力,因此产生的压缩变形相对较小。与浅部地层相比,深部地层土体的压缩系数、孔隙比和塑性指数之间的相关性稍差。

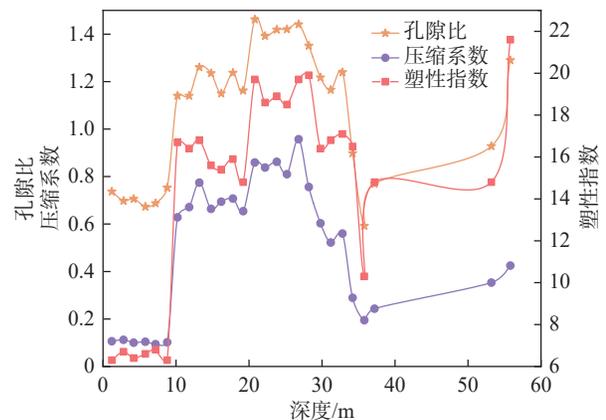


图5 试验孔(HZ22J06)不同深度土样的压缩系数、孔隙比和塑性指数随深度变化的曲线

Fig. 5 Variation curves of the compression coefficient, void ratio and plasticity index of soil samples at different depths in test borehole HZ22J06

3.3 不同土体类型固结系数随压力变化特征

固结系数是表征土体固结速率的重要参数,直接受地层孔隙压力消散速率的影响,宏观上反映了土体固结沉降与时间的关系(江文豪等, 2020; 赵毅斌等, 2022)。根据固结试验结果,绘制出不同类型土样固结系数随压力变化的曲线(图6)。

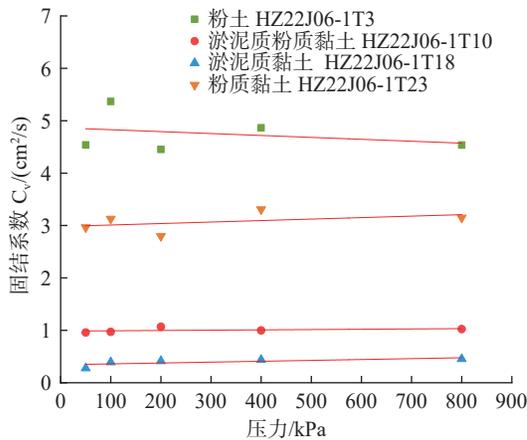


图6 试验孔(HZ22J06)不同类型土样的固结系数随压力变化的曲线

Fig. 6 Variation curves of the consolidation coefficient with pressure for different types of soil samples from test borehole HZ22J06

从图6可以看出,粉土(HZ22J06-1T3)土样由于受到频繁的人类活动干扰,其原有性质已被破坏,因此固结系数没有明显的变化。淤泥质粉质黏土(HZ22J06-1T10)、淤泥质黏土(HZ22J06-1T18)和粉质黏土(HZ22J06-1T23)土样固结系数随压力的增大总体呈上升趋势。但淤泥质粉质黏土(HZ22J06-1T10)和淤泥质黏土(HZ22J06-1T18)土样的固结系数变化幅度较小,这与土体的成分与结构有关。

此外,在相同压力下,不同类型土样固结系数存在较为明显的差异,符合粉土>粉质黏土>淤泥质粉质黏土>淤泥质黏土的规律。这表明在相同压力作用下,粉土中孔隙水排出速度最快,孔隙水压力消散得最快,其固结所需的时间最短,淤泥质黏土固结所需的时间最长。孔隙水排出快慢与土体的透水性密切相关,渗透系数是直接衡量土体透水性强弱的重要指标(党发宁等, 2022)。根据垂直渗透系数对数随深度变化曲线(图7)可以看出,不同类型土体的渗透系数存在较为明显的

差异,特别是在埋深约10 m处,土体渗透系数发生了明显的变化,这是因为土体岩性发生了变化,由粉土转变为淤泥质粉质黏土。在0~10 m埋深,土样渗透系数呈逐渐增大的趋势,经换算其值为(1.3~2.4)E-04 cm/s;在10~55.9 m埋深,渗透系数的变化非常小,换算后其值为(1.0~8.3)E-07 cm/s。土体垂直渗透系数变化符合粉土>粉质黏土>淤泥质粉质黏土>淤泥质黏土的规律,这与相同压力下不同类型土样的固结系数变化规律相一致,表明渗透系数与固结系数之间存在密切的关联性。

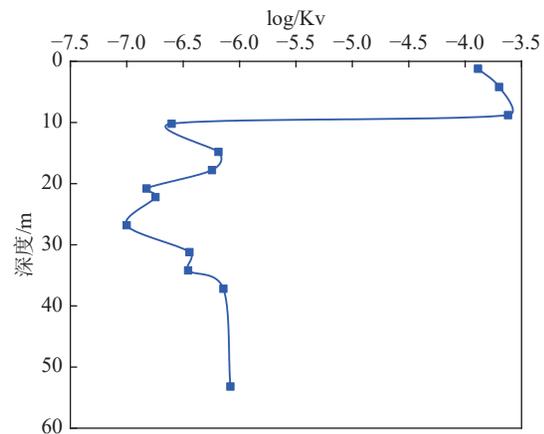


图7 试验孔(HZ22J06)土样的垂直渗透系数对数随深度变化的曲线

Fig. 7 The variation of logarithmic vertical hydraulic conductivity with depth for soil samples from test borehole HZ22J06

3.4 土体固结状态

土体的固结状态可以用前期固结压力 P_c 与土层承受的上覆自重压力 P_s 之间的关系来判断(刘大鹏等, 2005; 乔宇, 2019)。当 $P_c = P_s$ 时,土体为正常固结土,任何外部附加荷载或水位下降都可以引起地层的压密,从而导致地面沉降;当 $P_c > P_s$ 时,土体为超固结土,只有在附加荷载大于前期固结压力与和自重压力的差值时,才产生明显的压密变形;当 $P_c < P_s$ 时,土体为欠固结土,即使没有外部荷载,也会在上覆自重压力的作用下缓慢排水固结,导致地层缓慢压缩并引起地面沉降(居俊等, 2012; 孙东晨, 2016)。

由试验孔(HZ22J06)土体前期固结压力与自重压力关系图(图8)可知,1.1~4.3 m深度的土体前期固结压力值位于自重压力线之上,为超固结

土; 4.3~55.9 m 深度的土体前期固结压力偏离自重压力, 整体位于自重压力线之下, 为欠固结土。总体来说, 该试验孔大部分土体在现有自重压力作用下尚未完全固结, 易发生地面沉降。

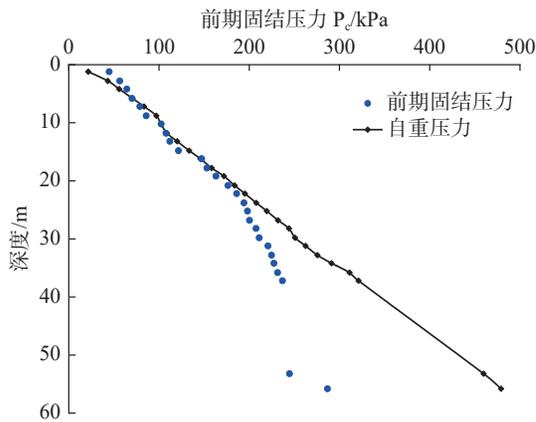


图8 试验孔(HZ22J06)土体前期固结压力与自重压力随深度变化关系

Fig. 8 Relationship between pre-consolidation pressure and overburden pressure with depth in test borehole (HZ22J06)

4 结论

(1) 杭州市地面沉降重点区试验孔(HZ22J06)土体各物理力学性质指标之间存在明显的相关性。含水率、土粒比重、孔隙比、塑性指数、液性指数和压缩系数总体上随着深度的增加呈现出先增大后减小的趋势, 而密度则随着深度的增加呈现出先减小后增大的趋势。从土体软硬状态看, 试验孔内流塑态软黏土占比最多, 容易形成永久性沉降。

(2) 试验孔(HZ22J06)土体压缩性随压力和深度的变化表现出很强的规律性。土样的压缩系数随压力的增大总体上呈现减小趋势, 且浅部土样压缩系数高于深部土样, 这与土样的密实程度有关。

(3) 试验孔(HZ22J06)土体的渗透系数变化符合粉土>粉质黏土>淤泥质粉质黏土>淤泥质黏土的规律, 这与相同压力下不同类型土样的固结系数大小变化规律相一致, 表明渗透系数与固结系数之间存在密切的关联性。试验孔中的土体大部分处于欠固结状态, 会进一步产生固结压密, 易

发生地面沉降。

注释

①浙江省地质勘察院有限公司. 2022. 浙江省杭州市地面沉降风险评估与区划报告[R]. 杭州: 浙江省地质勘察院有限公司, 52-55.

②浙江省地质调查院. 2009. 杭州城市地质调查成果报告[R]. 杭州: 浙江省地质调查院, 115-145.

References

- BAGHERI-GAVKOSH M, HOSSEINI S M, ATAIE-ASH-TIANI B, SOHANI Y, EBRAHIMIAN H, MOROVAT F, ASHRAFI S. 2021. Land subsidence: a global challenge[J]. *Science of the Total Environment*, 778: 146193.
- DANG F N, SONG J Y, ZHOU M, ZHANG L. 2022. Consolidation theory of saturated soil considering permeability coefficient variation and its rationality verification[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 20(6): 506-515 (in Chinese with English abstract).
- DI S T. 2020. Research on macro-mesoscopic evolution mechanism of whole process and trend prediction of land subsidence caused by groundwater exploitation[D]. Ji'nan: Shandong University (in Chinese with English abstract).
- DI S T, JIA C, DING P P, ZHU X. 2022. Microstructural variation of clay during land subsidence and the correlation between macroscopic and microscopic parameters[J]. *Materials*, 15(5): 1817.
- DUAN X F, SUN X X, YANG Y B, LIU Y. 2018. Present condition and mechanism analysis on land subsidence in northern Shandong Plain[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(10): 86-92 (in Chinese with English abstract).
- FANG Y L, REN J W, LI Y P, BAI H J. 2004. Empirical relationship between compression coefficient and pore ratio of soils in Kaifeng area[J]. *Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute*, 16(1): 43-44 (in Chinese with English abstract).
- GUO H P, BAI J B, ZHANG Y Q, WANG L Y, SHI J S, LI W P, ZHANG Z C, WANG Y L, ZHU J Y, WANG H G. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6): 1115-1127 (in Chinese with English abstract).
- HUANG D H. 2023. Land subsidence monitoring in Yungang mining area in Datong City based on InSAR technology[J].

- East China Geology*, 44(4): 476-484 (in Chinese with English abstract).
- GUO H P, DING G P, ZHU J Y, TIAN X W, LEI J T, WANG Y L. 2014. Compression deformation and permeability characteristics of clay in land subsidence area of Cangzhou[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 36(5): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- JIANG W H, ZHAN L T, YANG C. 2020. Analytical solution for one-dimensional large strain consolidation of saturated soft soils with continuous drainage boundary[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51(5): 1289-1298 (in Chinese with English abstract).
- JU J, LIU S Y, LIU Z B, CAI G J. 2012. Degree of underconsolidation determination method of in-situ soft soil through pore pressure dissipation test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(3): 957-960 (in Chinese with English abstract).
- KONG L Y, XU Y Z, ZHAO G Z, LIU W H, XIE S M. 2023. Study on the structural characteristics of riverbed lithology based on the joint inversion of multiple methods[J]. *East China Geology*, 44(2): 150-159.
- LEI H W. 2010. Study on characteristics, mechanism and numerical simulation of land subsidence in XX City[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese).
- LI C X, WANG P X. 1998. The study of the estuarine stratigraphy of the late Quaternary in the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- LI X G, XU R Q, WANG X C, RONG X N. 2013. Assessment of engineering properties for marine and lacustrine soft soil in Hangzhou[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 47(8): 1346-1352 (in Chinese with English abstract).
- LIU D P, YOU X W, BAI B. 2005. *Geotechnics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press (in Chinese).
- MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. 2019. GB/T 50123-2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 85-91 (in Chinese).
- PEI J T, YANG L, LUO Z J. 2023. Cause analysis of land subsidence in Haimen area of Jiangsu Province[J]. *East China Geology*, 44(4): 467-475 (in Chinese with English abstract).
- QIAO Y. 2019. Erodibility of bed sediments in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University (in Chinese).
- SU H Y. 1981. Study on deformation characteristics and deformation mechanism of soil layer in land subsidence in Shanghai[J]. *Shanghai Land and Resources*, (2): 56-69 (in Chinese with English abstract).
- SUN D C. 2016. The dynamic analysis on the pearl marine with different degree of consolidation[D]. Guangzhou: Guangzhou University (in Chinese with English abstract).
- TIAN L C. 2010. Research on consolidation of different depths clay in Hengshui[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 8(2): 31-34 (in Chinese with English abstract).
- TIAN Y, ZHANG J B, MA L. 2020. Experimental study on variation law of tailings sand consolidation coefficient[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 52(1): 92-97 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y L, GUO H P, MENG J, CHEN Y, ZANG X S, ZHU J Y, FAN G D. 2020. A study on compression and consolidation behaviors of soils in typical landsubside area in Cangzhou[J]. *Geological Survey and Research*, 43(3): 246-250,278 (in Chinese with English abstract).
- WANG M Z, WAN J W, BAI T, LIU Y, SHEN F. 2021. The influence of geothermal resources exploitation of sandstone thermal reservoir on land subsidence in Decheng District, Dezhou City[J]. *East China Geology*, 42(2): 202-209 (in Chinese with English abstract).
- WANG Z B, YANG S Y, WANG Q, ZHANG Z X, ZHANG X H, LAN X H, LI R H, HUANG L. 2014. Late Quaternary stratigraphic evolution on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 90: 5-16.
- XU Y S, SHEN J S, ZHOU A N, ARULRAJAH A. 2018. Geological and hydrogeological environment with geohazards during underground construction in Hangzhou: a review[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(18): 544.
- XUE Y Q, ZHANG Y. 2016. Land subsidence and land fissures in the southern Yangtze River Delta[J]. *East China Geology*, 37(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- YUAN M, BAI J W, QIN Y K. 2016. A review on land subsidence research[J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science)*, 33(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO J K, WU M J, LIU S X, SHEN H Z. 2006. The relation between groundwater exploitation and land subsidence in the coast plain of Zhejiang Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(2): 185-194 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Y B, LIU Q J, HUANG X J. 2022. Characteristics of

karst development and the law of groundwater enrichment in Shazhouba area of Ruijin City[J]. East China Geology, 43(2): 227-234(in Chinese with English abstract).

ZHU J Y, GUO H P, LI W P, TIAN X W. 2014. Relationship between land subsidence and deep groundwater yield in the North China Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 12(3): 165-169 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 党发宁, 宋靖宇, 周玫, 张乐. 2022. 饱和土的变渗透系数固结理论及其合理性验证[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 20(6): 506-515.
- 狄胜同. 2020. 地下水开采导致地面沉降全过程宏观细观演化机理及趋势预测研究[D]. 济南: 山东大学.
- 段晓飞, 孙晓晓, 杨亚宾, 刘毅. 2018. 鲁北平原地面沉降现状与机理分析[J]. 山东国土资源, 34(10): 86-92.
- 方永伦, 任建伟, 李亚平, 白宏洁. 2004. 开封地区土的压缩系数和孔隙比的经验关系[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 16(1): 43-44.
- 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松, 李文鹏, 张作辰, 王云龙, 朱菊艳, 王海刚. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 44(6): 1115-1127.
- 郭海朋, 丁国平, 朱菊艳, 田小伟, 雷建涛, 王云龙. 2014. 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, 36(5): 111-117.
- 黄德华. 2023. 基于 InSAR 技术的大同市云冈矿区地面沉降监测[J]. 华东地质, 44(4): 476-484.
- 江文豪, 詹良通, 杨策. 2020. 连续排水边界条件下饱和软土一维大变形固结解析解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 51(5): 1289-1298.
- 居俊, 刘松玉, 刘志彬, 蔡国军. 2012. 现场软土欠固结程度孔压消散试验评价方法[J]. 岩土力学, 33(3): 957-960.
- 孔令莹, 徐远志, 赵贵章, 刘文辉, 谢思敏. 2023. 基于多种方法联合反演的河床岩性结构特征研究[J]. 华东地质, 44(2): 150-159.
- 雷宏武. 2010. XX 城地面沉降特征与机理分析及数值模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 李从先, 汪品先. 1998. 长江晚第四纪河口地层学研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 李雪刚, 徐日庆, 王兴陈, 荣雪宁. 2013. 杭州地区海、湖相软土的工程特性评价[J]. 浙江大学学报(工学版), 47(8): 1346-1352.
- 刘大鹏, 尤晓暉, 白冰. 2005. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 裴江涛, 杨璐, 骆祖江. 2023. 江苏海门地区地面沉降成因分析[J]. 华东地质, 44(4): 467-475.
- 乔宇. 2019. 长江口表层沉积物侵蚀特性研究[D]. 上海: 华东师范大学.
- 苏河源. 1981. 上海地面沉降中土层变形特征与变形机理的研究[J]. 上海地质, (2): 56-69.
- 孙东晨. 2016. 不同固结程度珠江海洋土动力特性分析[D]. 广州: 广州大学.
- 田利川. 2010. 衡水沉降区不同深度黏土固结特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 8(2): 31-34.
- 田园, 张敬博, 马林. 2020. 尾矿砂固结系数变化规律试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 52(1): 92-97.
- 王云龙, 郭海朋, 孟静, 陈晔, 臧西胜, 朱菊艳, 樊高栋. 2020. 沧州典型地面沉降区土体压缩与固结特征研究[J]. 地质调查与研究, 43(3): 246-250, 278.
- 王明珠, 万军伟, 白通, 刘毅, 沈芳. 2021. 德州市德城区砂岩热储地热资源开采对地面沉降的影响[J]. 华东地质, 42(2): 202-209.
- 薛禹群, 张云. 2016. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J]. 华东地质, 37(1): 1-9.
- 袁铭, 白俊武, 秦永宽. 2016. 国内外地面沉降研究综述[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 33(1): 1-5.
- 赵建康, 吴孟杰, 刘思秀, 沈慧珍. 2006. 浙江省滨海平原地下水开采与地面沉降[J]. 高校地质学报, 12(2): 185-194.
- 赵毅斌, 刘前进, 黄旭娟. 2022. 瑞金市沙洲坝地区岩溶发育特征与地下水富集规律[J]. 华东地质, 43(2): 227-234.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 85-91.
- 朱菊艳, 郭海朋, 李文鹏, 田小伟. 2014. 华北平原地面沉降与深层地下水开采关系[J]. 南水北调与水利科技, 12(3): 165-169.

Study on the compression and consolidation properties of soil in the key area of land subsidence in Hangzhou: a case study of test hole HZ22J06

SHAO Zefei^{1,2}, MA Qingshan², GE Weiya², LEI Ting², XING Huaixue²

(1. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;*

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the soil compression and consolidation properties and analyze the influencing factors of soil deformation from a macro perspective is an important aspect for exploring the causes of land subsidence. Taking soil samples from the hydrogeology and engineering geological comprehensive test hole HZ22J06 in the key area of land subsidence in Hangzhou as an example, and the physical properties, compression deformation and consolidation characteristics of the soil were analyzed and studied by indoor testing. The results reveal a significant correlation among the physical indexes of the soil in the test holes, and the parameters of water content, specific gravity of soil grains, void ratio, plasticity index, liquidity index and compression coefficient show an overall trend of first increasing and then decreasing with the increase of depth. The compression coefficient of the soil samples generally decreases with increasing pressure, with shallow samples having higher compression coefficients compared to deeper ones. Furthermore, there is a close correlation between the consolidation coefficient and hydraulic conductivity of soil. Under the same pressure, the variation of the consolidation coefficient of different types of soil samples follows the law of silt>silty clay>muddy silty clay>soft clay, which is consistent with the variation law of hydraulic conductivity. Additionally, most of the soil samples in the test holes are in an under-consolidated state, which may cause further consolidation and compaction, leading to land subsidence. The research results could provide scientific basis for the study of the causes of land subsidence and risk prevention and control in Hangzhou city.

Key words: Land subsidence; Physical and mechanical properties of soil; Compressive deformation; Consolidation characteristics; Hangzhou City