

淮河下游冲积平原区软土的固结渗透特性研究

李泽霖¹, 占鑫杰^{2,3}, 许小龙², 李小梅², 朱群峰²

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 南京 210029; 3. 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029)

摘要: 本文以淮入海水道二期工程盐城段典型阜宁软土为研究对象, 采用XRD、SEM等微观测试与宏观力学试验相结合的方法, 对其微观结构、一维固结行为、应力-耦合渗透特性及蠕变规律开展系统研究, 重点探讨结构性、夹薄砂层与水力梯度对渗透性的影响。试验结果表明, 阜宁软土在固结过程中表现出明显的结构性破坏和应力敏感特征, 固结系数、次固结系数及渗透系数均随固结压力增大呈非线性变化, 并受先期固结压力控制显著。在相同孔隙比条件下, 原状软土渗透系数为重塑土的3~4倍, 随着固结压力增大, 两者差异逐渐缩小。夹薄砂层能够减弱固结压力对渗透性的影响, 使渗透系数降低幅度小于纯软土, 说明其在局部排水及应力传递中具有调节作用。水力梯度(19~152)增大会导致原状软土渗透系数小幅下降, 降幅一般不超过10%, 表明其渗流结构在较高梯度条件下仍保持一定稳定性。不同试验方法(变水头渗透、应力-耦合渗透与一维固结反演)所得渗透系数具有较好一致性, 相互验证了测试结果的可靠性。研究表明, 阜宁软土渗透性受结构性和应力历史显著控制, 夹薄砂层与水力梯度为重要调节因素。上述认识可为盐阜软土地区堤防工程的渗流控制、沉降预测与地基处理提供理论参考。

关键词: 冲海积型软土; 固结渗透; 应力-耦合渗透; 蠕变; 结构性; 水力梯度

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0108-10

Consolidation and Permeability Characteristics of Soft Clay in the Lower Huaihe River Alluvial Plain

LI Zelin¹, ZHAN Xinjie^{2,3}, XU Xiaolong², LI Xiaomei², ZHU Qunfeng²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China)

Abstract: This study investigates the typical Funing soft clay along the Yancheng section of Phase II of the Huaihe River to Sea Waterway Project. A comprehensive experimental program combining XRD and SEM microstructural analyses with macroscopic geotechnical tests is conducted to examine the microstructure, one-dimensional consolidation behavior, stress coupled hydraulic conductivity, and creep characteristics of the soft clay. The study focuses on the effects of soil structure, thin interbedded sand layers, and hydraulic gradient on its permeability. The results show that Funing soft clay exhibits pronounced structural degradation and stress sensitivity during

收稿日期: 2025-08-25

修回日期: 2025-11-17

接受日期: 2025-12-03

基金项目: 江苏水利科技项目(2023032, 2023033); 淮入海水道二期工程重大科研项目(RHSD2/FW-2024-01); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费重点项目(Y323002)

作者简介: 李泽霖(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事软弱土宏微观固结特性的试验研究

通信作者: 占鑫杰(1986-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事软弱土和特殊土的地基处理、基础工程和环境岩土工程研究和咨询工作, Email: xjzhan@nhri.cn

引用格式: 李泽霖, 占鑫杰, 许小龙, 等. 淮河下游冲积平原区软土的固结渗透特性研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 108-117.

Li Z L, Zhan X J, Xu X L, et al. Consolidation and permeability characteristics of soft clay in the Lower Huaihe river alluvial plain [J]. Henan Science, 2026, 44(1): 108-117.

consolidation. The coefficient of consolidation, secondary consolidation coefficient, and hydraulic conductivity vary nonlinearly with increasing consolidation pressure and are strongly influenced by the preconsolidation stress. Under the same void ratio, the hydraulic conductivity of undisturbed clay is 3–4 times greater than that of remolded clay, and the difference becomes smaller with increasing consolidation pressure. The presence of thin sand layers reduces the sensitivity of permeability to consolidation pressure, resulting in a smaller decrease in hydraulic conductivity compared with pure soft clay. This suggests that thin sand layers play a regulatory role in local drainage and stress redistribution. Increasing the hydraulic gradient from 19 to 152 causes a slight reduction in the hydraulic conductivity of undisturbed clay, generally within 10%, indicating that the seepage structure remains relatively stable under higher gradients. The permeability values obtained from variable head tests, stress coupled permeability tests, and back-calculation from one-dimensional consolidation are in good agreement, confirming the reliability of the experimental results. Overall, the permeability of Funing soft clay is strongly governed by soil structure and stress history, while thin sand layers and hydraulic gradient act as important modifying factors. The findings provide a scientific basis for seepage control, settlement prediction, and foundation treatment in embankment engineering overlying soft clay in the Yancheng–Funing region.

Key words: marine–fluvial soft soil; consolidation and permeation; stress–permeability coupling; creep; structure; hydraulic gradient

0 引言

受淮河水系历史演变和黄淮海退过程的影响,淮河下游两岸广泛分布冲海积型软土,软土层厚度通常为10~35 m,具有高含水量、高压缩性和低承载力等工程特性^[1]。在淮河入海水道二期工程初步设计阶段,深厚软土段(K56~K83、K93~K107)拟采用施工期分级填筑的施工方案。然而,一期工程资料表明,该类软土段普遍存在沉降稳定期长、工后沉降量大、堤防预留超高难以准确确定等问题^[2-3]。反演分析进一步显示,软土固结过程呈现明显的非线性与流变特征,导致沉降预测结果与实测值之间存在偏差^[2]。因此,准确掌握淮河下游冲海积型软土的固结与渗透特性,是合理开展堤防工后沉降预测和优化工程设计的重要基础。

近年来,国内外学者针对不同区域软土的固结、渗透及流变特性开展了大量研究。Xia等^[4]研究长江下游河漫滩软土的沉积特征与力学性质,并从微观结构角度解释其固结压缩机理;吴宏伟等^[5]基于一系列常规及长期压缩试验,系统分析上海黏土的压缩与次压缩特性;雷华阳等^[6]利用单向固结仪和改进直剪蠕变仪研究滨海软土的蠕变性状及其结构性效应;杨爱武等^[7]通过三轴UU蠕变试验与单轴压缩蠕变试验揭示不同应力水平下吹填软土的蠕变规律;陈立国等^[8-9]围绕洞庭湖等地区原状软土开展固结蠕变研究,提出次固结系数变化规律及相应沉降预测方法;骆以道等^[10]建立了深圳海积软土渗透系数与孔隙比的拟合模型;Liu等^[11]基于深海沉积软土

流变试验发现其具有屈服应力和剪切稀化特征;陈晓平等^[12]开展广东地区软土蠕变固结特性的大量对比试验。这些研究从不同角度丰富了软土固结、渗透与流变机理的认识,但多集中于滨海相、三角洲相等典型软土,其沉积背景较为单一。

相比之下,关于冲海积交互沉积型软土的固结与渗透特性的系统研究仍相对有限。吴昌胜和朱志铎^[13]对比连云港海相软土与苏州冲湖积软土的力学性质差异,指出沉积环境对工程特性具有显著影响;Wang等^[14]研究黄河、海河流域不同沉积背景下土体的颗粒级配与分形特征;高国瑞和韩爱民^[15]对我国典型区域性土体的工程特性及其内在关联规律进行了系统总结。这些成果表明,沉积环境演化及物源条件对软土结构与力学性质具有重要控制作用。数千年来,盐城阜宁地区经历陆相沉积、黄海入侵期间浅海相沉积、海退后的滨海沉积以及近千年受黄河夺淮影响形成的复合沉积过程(图1),沉积环境多次转换,使该区冲海积型软土兼具河流冲积与海洋沉积的复合特征,局部夹砂薄层发育,工程性质复杂,与其他典型软土存在显著差异。针对该类特殊软土的固结与渗透机制仍缺乏系统研究,亟须开展深入分析。

基于此,本研究围绕该区软土的固结与渗透主控机制,结合微观结构特征与宏观力学响应,重点探讨结构性破坏、夹砂薄层发育及水力梯度变化对渗流路径与排水能力的影响。通过对不同试验方法获取的渗透参数进行对比评价,从而建立更符合区域软土实际的固结与渗透行为认识体系。研究成果旨



图1 不同历史时期黄河改道示意图^[16]

Fig.1 Illustration of the changes in the course of the Yellow River in different historical periods

在补充冲海积交互沉积软土固结渗流机理方面的不足,为淮河下游堤防工程的沉降预测与地基设计提供可靠的理论基础。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料及基本性质

试验土样取自淮河入海水道二期工程盐城阜宁段,区域地处冲积平原,软土分布较为广泛。采用活塞薄壁取土器获取原状土样(图2),土体呈灰色淤泥质粉质黏土,其基本物理性质见表1。根据塑性图(图3),该软土属于低液限黏土。

淮河入海水道盐阜段位于淮河下游,历史上长期受河流搬运、沉积与冲刷作用,并经历黄淮海退及淮河水系变迁^[1]。复杂的沉积演化过程使区域软土形成了独特的矿物组成。采用SmartLab SE型X射线衍射仪开展矿物组成测试(图4)。结果表明,该冲海积软土以石英、伊利石、钠长石及水钙沸石为主。其中,黄河改道和河流搬运作用导致石英含量较高;黏土矿物以伊利石为主,较高的伊利石含量使土体阳离子交换量偏高,抗剪强度相对较低。

采用ZEISS Sigma 360 场发射扫描电子显微镜对原状土样微观结构开展观察(图5)。SEM 图像显示,土体以团粒结构为主,大团粒间边界清晰,连接方式以边-面或面-面搭接为主,颗粒呈镶嵌与搭接排列,孔隙结构较为疏松,并具有一定定向性。



图2 原状土取样图

Fig.2 Original soil sampling diagram

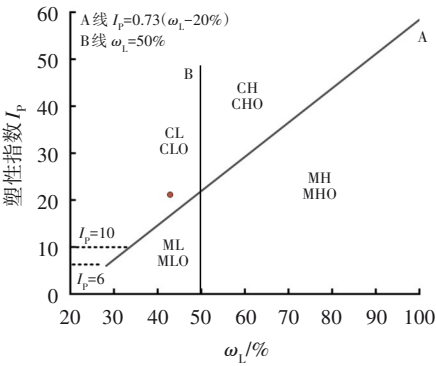


图3 冲海积软土的塑性图

Fig.3 Plasticity diagram of marine-fluvial soft soil

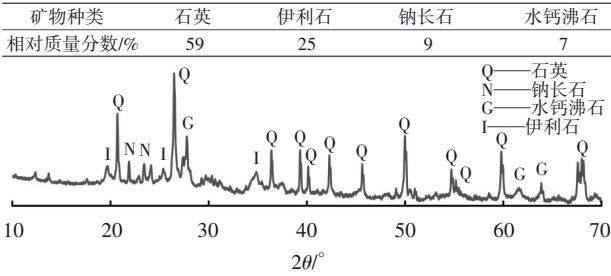


图4 盐城阜宁软土的XRD谱图及矿物组成

Fig.4 XRD spectrum and mineral compositions of soft soil in Funing, Yancheng

1.2 一维固结试验

一维固结试验采用三联式自动固结压缩仪(图6),试样为Φ61.8 mm×20 mm标准尺寸,原状软土采用敞口活塞薄壁取土器取土,重塑软土将原状土烘干后碾碎过筛,并按初始含水率配水搅匀后静置24 h制样。固结试验分为常规固结试验及一维

表1 基本物理性质

Tab.1 Basic physical properties

含水率/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数I _p	颗粒粒径分布占比/%			
					>0.25 mm	0.075~0.25 mm	0.005~0.075 mm	<0.005 mm
38	1.78	43.8	22.1	21.7	0	13.6	58.3	28.1

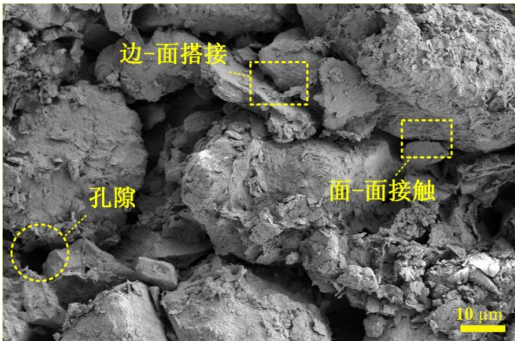


图5 盐阜软土的微观结构
Fig.5 Microstructure of soft soil in Yanfu



图6 三联杠杆式压缩固结仪
Fig.6 Three-lever compression consolidation apparatus

蠕变试验(表2),常规固结试验每级荷载持续1 d(可达到稳定标准),一维蠕变试验每级荷载持续9 d,试验均采用分级加载方式,加荷比(荷载增量/上级荷载)为1,试验依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)开展。

1.3 常规渗透试验

在入海水道二期工程南堤不同孔位取软土试样,采用变水头法对典型软土试样开展常规渗透试验,渗透试验依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行,每组试样设置3组平行试验,取均值作为最终结果。

1.4 应力-渗透耦合试验

采用全自动三轴渗透仪(图7),开展非夹砂软土、夹薄砂层软土的应力-渗透耦合试验,研究软土的非线性渗透特性规律,试验方案见表3。试样

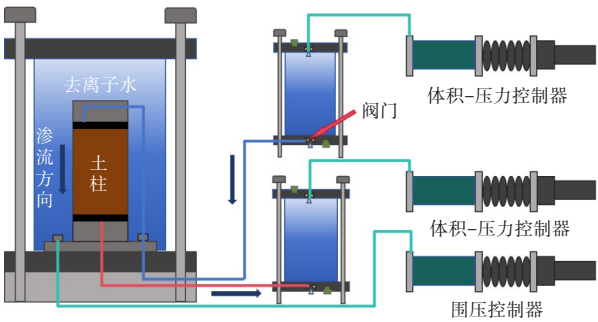


图7 应力-渗透耦合试验示意图
Fig.7 Schematic diagram of stress-permeability coupling test

表3 应力-渗透耦合试验加载方案

Tab.3 Loading scheme of stress-permeability coupling test			
试样编号	取样深度/m	围压/kPa	渗透压力/kPa
1#(非夹砂)	4.2~4.96	50	15→30→60→120
		100	15→30→60→120
		200	15→30→60→120
		400	15→30→60→120
		600	15→30→60→120
2#(夹砂薄层)	4.2~4.96	50	15
		100	15
		200	30
		400	50
		600	50

尺寸为 $\Phi 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$,在反压饱和后首先采用不同围压(50、100、200、400、600 kPa)对试样进行固结,固结完成后对软土试样(非夹砂)逐级施加不同的渗透压力(表3),研究水力梯度对软土渗透特性的影响规律。

2 试验结果及分析

2.1 一维固结试验结果及分析

2.1.1 固结特性对比分析

软土的一维固结曲线如图8(a)所示,重塑土曲线始终位于原状土下方,这表明原状软土具有明显的结构强度,其抗压缩能力更强。根据Casagrande法求得原状土的先期固结压力 σ_{pc} 为89 kPa。压缩系数随压力变化的关系如图8(b)所示,当压力低于

表2 一维固结试验加载方案

Tab.2 Loading scheme of one-dimensional consolidation test				
土样类型	分级加荷过程/kPa	加荷比	每级荷载持续时间/d	备注
原状土样	12.5→25→50→100→200→400→800	1	1	常规固结试验
重塑土样	3→12.5→25→50→100→200→400→800	1	1	
原状土样	12.5→25→50→100→200→400	1	9	一维蠕变试验

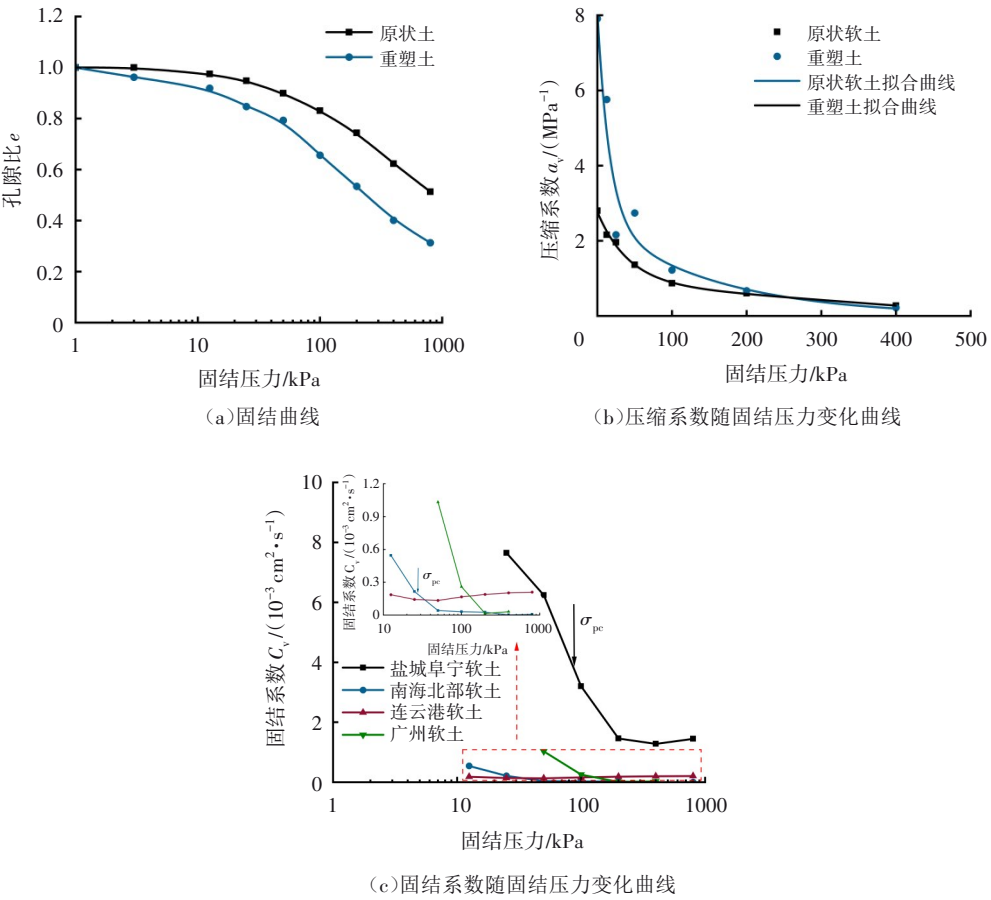


图8 常规固结试验结果

Fig.8 Results of one-dimensional consolidation test

先期固结压力,重塑软土的压缩系数明显高于原状土,当压力达到先期固结压力后,原状土结构强度丧失,两者的压缩系数趋于一致^[17]。

采用时间平方根法计算原状软土的固结系数 C_v ,其随固结压力的变化曲线见图8(c)。当压力低于先期固结压力 σ_{pc} 时,曲线较平缓,而当压力达到 σ_{pc} ,曲线陡然降低,随着压力进一步增长,曲线再次趋于平缓。对比我国不同区域的软土可知,南海北部软土^[18]与广州软土^[19]表现出类似的规律,而连云港软土^[20]在压力较低时,其固结系数随压力增长而缓慢减小,当达到一定压力后,固结系数反而随压力增长而增大。可见不同沉积环境的软土其固结系数随压力的变化规律存在一定差异。本区软土沉积环境经历河流冲积与多次海侵的共同作用,其黏土矿物以吸水性较强的伊利石为主,但河流携带的大量石英颗粒使土体中石英含量较高,赋予其良好的排水性与较快的固结速率。因此,盐城阜宁冲海积软土的固结系数整体上显著高于典型海相和滨海相软

土,其量级通常高出近一个数量级,体现出区域特殊沉积演化对固结特性的显著控制作用。

2.1.2 渗透特性对比分析

将试验得到的固结系数按下式推导可得渗透系数 k_v :

$$k_v = \frac{C_v a_v \gamma_w}{1 + e}, \tag{1}$$

式中: C_v 为固结系数; a_v 为压缩系数; γ_w 为水的重度,取值 10 kN/m^3 ; e 为对应固结应力下的孔隙比。

由式(1)计算得到原状土与重塑土的渗透系数,并绘制其孔隙比-渗透系数关系曲线($e-\lg k_v$),如图9所示。可以看出,渗透系数的对数值与孔隙比之间具有良好的线性相关性,这与已有研究结论一致^[21]。值得注意的是,原状土的 $e-\lg k_v$ 曲线未出现类似 $e-\lg p$ 曲线(图8(a))中的明显屈服点,说明固结过程中结构性的削弱并不会导致渗透性发生突变式变化,渗透系数仍主要受孔隙比变化控制。

对比原状土与重塑土的 $e-\lg k_v$ 曲线可知,相同

孔隙比条件下,原状软土的渗透系数显著高于重塑土,通常为其3~4倍,且该差异在高孔隙比(即低固结压力)阶段更加明显;随着孔隙比减小,两者差异逐渐缩小。其主要原因在于软土渗透性受孔隙结构特征控制^[22-23]:原状土结构未破坏时,以导水性较强的大孔隙为主通道,而重塑过程中结构破坏导致大孔隙被分割为较多的小孔隙^[24],从而显著降低渗透性。随着固结压力增大,原状土内的大孔隙逐渐压缩,其孔隙结构趋于细化,与重塑土更为接近,因此两者渗透系数差异也随之减小。

2.2 应力-渗透耦合试验结果及分析

根据应力-渗透耦合试验结果,可得到冲海积型软土在不同围压作用下的渗透系数变化规律,如图10所示。在双对数坐标下,无论是否夹砂,渗透系数随围压增大均呈较好的线性相关性,表明围压对软土孔隙结构及渗流通道具有显著影响。

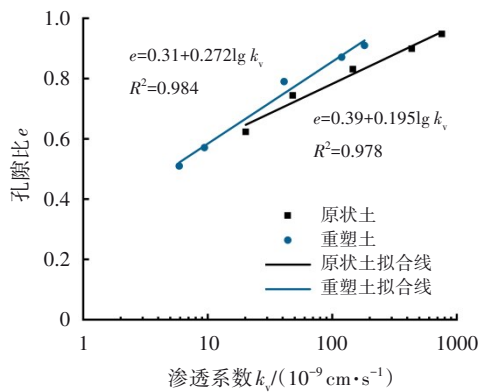


图9 原状土与重塑土的孔隙比e与渗透系数kv关系曲线

Fig.9 The relationship curves between the void ratio e and the permeability coefficient k_v of the original state and remolded soil

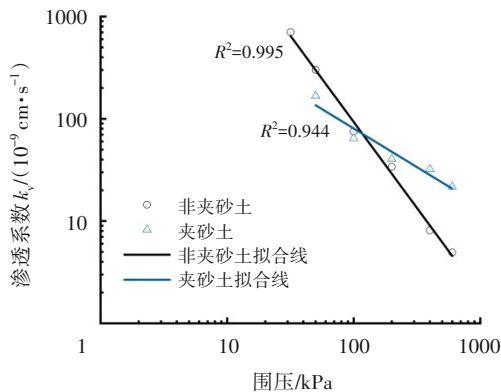


图10 夹砂软土与非夹砂软土的渗透系数随围压变化曲线

Fig.10 The curve of permeability coefficient varying with consolidation pressure

2.2.1 夹砂对软土渗透特性的影响规律

由图10可知,非夹砂软土的渗透系数对围压变化更为敏感。在围压由50 kPa增至600 kPa的过程中,其渗透系数由 10^{-7} 量级降至 10^{-9} 量级,降低幅度近两个数量级。而夹薄砂层软土的渗透系数仅由 10^{-7} 量级降低至 10^{-8} 量级,整体变化幅度明显小于非夹砂软土。对比结果表明,软土中的粉砂薄层能够在固结过程中分担部分围压,形成较为稳定的排水路径,从而削弱围压压缩对孔隙结构的破坏作用,使渗透系数降低幅度显著减小。换言之,夹砂薄层在软土中起到一定的“刚性骨架”和“局部导水通道”作用,使其渗流结构在高围压下保持相对稳定。

2.2.2 水力梯度对软土渗透系数的影响规律

不同渗透压差(水力梯度)作用下软土的渗透系数曲线如图11所示。随着水力梯度*i*增长(*i*为19~152),原状软土的渗透系数出现部分降低(约10%以内),且随着固结压力增大(50~600 kPa),渗透系数的降低幅度减小。水力梯度增加导致软土渗透系数减小可从两个方面解释^[25]:较大的渗透水压力产生一定渗透力,使土骨架受到额外压缩作用,孔隙进一步减小,从而导致渗透系数降低;高水力梯度下土体内部细颗粒易在水流作用下发生迁移,并向较小孔隙集中,造成局部孔隙堵塞,使有效渗流通道数量减少,从而降低渗透能力。二者共同作用,使软土在高梯度下的渗透性表现出一定的衰减特征。因此,围压和水力梯度均会通过改变孔隙结构或堵塞传输通道影响冲海积软土的渗透性,其中围压影响更为显著,而水力梯度主要在低围压条件下产生作用。

2.3 一维蠕变试验结果及分析

图12(a)为冲海积软土一维蠕变试验的*e*-lg *t*曲线。从图中可知,在不同应力水平下,各级荷载的曲

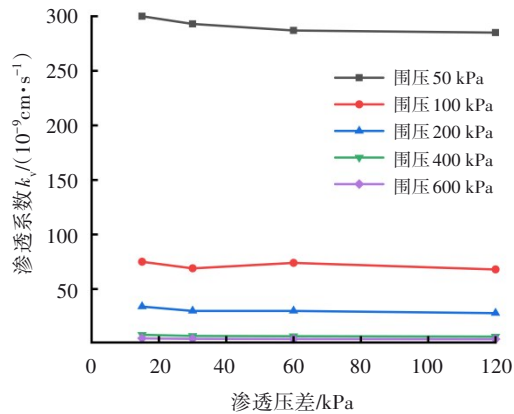


图11 不同渗透压差下的渗透系数kv

Fig.11 Permeation coefficient k_v under various pressure differentials

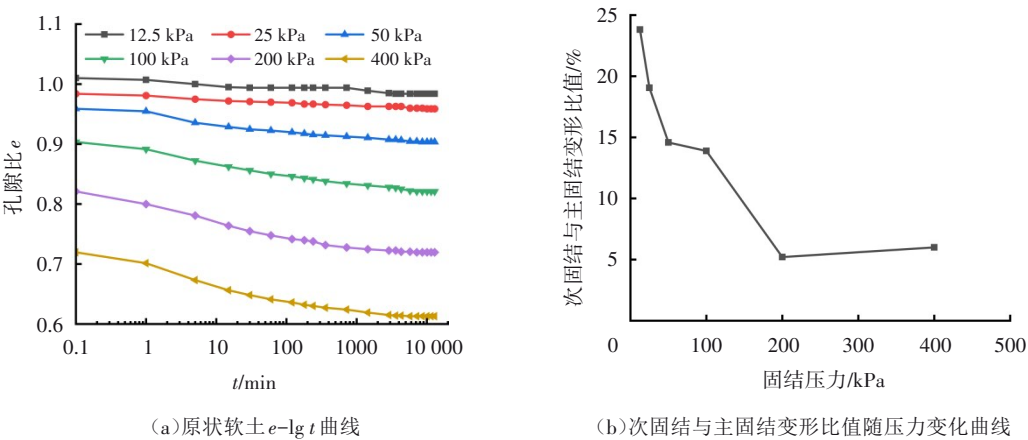


图 12 一维蠕变试验结果

Fig.12 One-dimensional creep test results

线形态具有一致性：初始阶段呈较平缓的抛物线段，随后逐渐过渡为斜直线段，在固结趋于稳定后最终转为近水平直线。依据 Casagrande 经验作图法，通过延长抛物线段与尾部直线段的交点可确定主、次固结分界点，试验中主固结结束时间约为 120 min。对比不同荷载下的孔隙比变化可发现，当应力低于先期固结压力（即处于超固结状态）时，曲线中的抛物线段不明显，整体近似为直线形，主次固结界限模糊，主固结变形量较小；而当压力超过先期固结压力（89 kPa）后，原状结构开始破坏，固结初期孔隙比下降速率明显加快。由图 12(b)可知，在 12.5~400 kPa 范围内，软土的次固结变形占主固结变形的比例约为 5%~20%，且随着固结压力增大，该比例呈递减趋势。这是由于高压下软土孔隙迅速压缩，主固结变形量相应增大，而土体挤密后结合水膜厚度减小，导致其蠕变能力降低，使次固结变形占比减小。

次固结系数是衡量软土次固结变形特性的重要指标，参考前人研究成果建立以时间对数为变量的次固结系数公式如下：

$$C_{\alpha} = -\frac{\Delta e}{\lg(t_2/t_1)}, \tag{2}$$

式中： C_{α} 是次固结系数； Δe 是时间 t_1 到 t_2 对应的孔隙比差值； t_1 、 t_2 是次固结某一时间。

整理次固结系数与固结压力的关系曲线(图 13)表明：当固结压力小于先期固结压力时，土体的结构性逐渐破坏，结合水膜蠕变能力增强，次固结系数相应增大，在先期固结压力附近出现峰值；当固结压力大

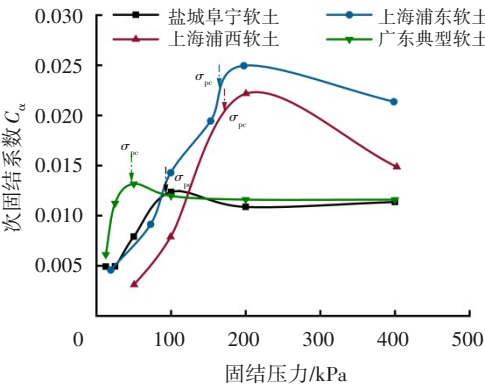


图 13 次固结系数 C_{α} 随固结压力变化曲线

Fig.13 The curve of secondary consolidation coefficient C_{α} varying with consolidation pressure

于先期固结压力时，土体进一步压密，结合水膜厚度减小导致其蠕变能力减弱，次固结系数逐渐减小并趋于稳定。广州软土、上海软土也呈现类似规律^[5,12,26]。

Mesri 提出，同一种原状土的次固结系数与压缩指数比值 C_{α}/C_c 在 0.025~0.10 范围内，且近似为常数^[27]。整理阜宁软土的次固结系数与压缩指数关系见图 14，可见阜宁软土的 C_{α}/C_c 比值大致呈线性关系，拟合直线斜率为 0.025，处于 Mesri 给出的区间范围下限值，且略小于上海软土^[5]。这表明阜宁冲海积软土的次固结变形能力相对较弱，进一步体现出区域沉积环境对软土流变特性的控制作用。

2.4 不同渗透试验结果对比分析

本文获得的软土渗透系数来源于三类试验结果，即常规变水头渗透试验与应力-渗流耦合试验的直接测试值，以及一维固结试验反演得到的间接计算值。为便于对比分析，将不同试验对应的应力状

态统一折算为平均有效应力。其中,应力-渗流耦合试验的平均有效应力等同于围压;一维固结试验与常规渗透试验的平均有效应力 p 按照下式计算:

$$p=\frac{1}{3}(\sigma_v'+K_0\sigma_v'+K_0\sigma_v'),\tag{3}$$

式中: σ_v' 为竖向有效应力; K_0 为水平土压力系数,取值为0.728。

不同试验方法所得渗透系数与平均有效应力的关系如图15所示。可以看出,在本研究所覆盖的应力范围内,三种方法得到的渗透系数具有较好一致性,其变化趋势基本吻合,表明固结反演与直接渗透测试在本区软土上均具有较高的可靠性。对于淮河入海水道二期工程而言,其典型填土荷载约为100 kPa,对应的软土渗透系数相较天然状态下降约80%~90%,说明工程荷载作用下软土的排水能力显著减弱。

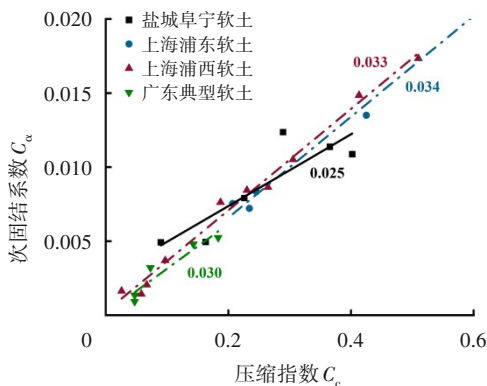


图14 盐城软土及其他软土的 C_α/C_e 关系图

Fig.14 Relationship diagram of C_α/C_e for yancheng soft soil and other soft soils

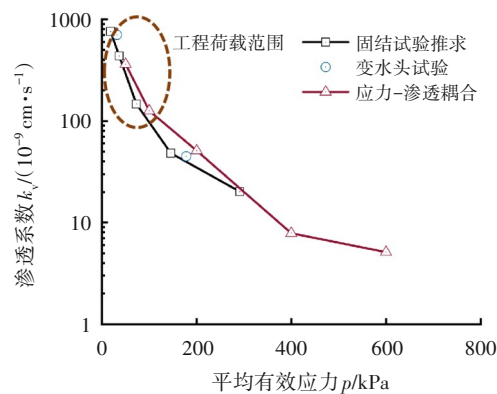


图15 不同试验得到的软土渗透系数对比

Fig.15 Comparison of permeability coefficients for soft soil obtained from various tests

3 结论

本文以淮河入海水道二期工程盐城阜宁段典型冲海积软土为研究对象,通过XRD、SEM微观结构分析,结合一维固结、蠕变试验和应力-渗透耦合试验,系统揭示了其固结、渗透及时间效应特征,并得到以下主要结论:

1)沉积成因主控了阜宁冲海积软土的固结行为。多期海侵与河流冲积使软土兼具高石英含量与伊利石主导的黏土矿物组成,结构性显著,固结速率整体高于典型海相与滨海相软土。固结系数随压力呈非线性变化,在先期固结压力附近出现临界转折,低压段变化缓慢,高压段快速降低并趋于稳定。次固结变形占主固结变形量的5%~20%,且次固结系数在先期固结压力附近达到峰值,之后逐渐减小; C_α 与 C_e 的关系近似线性,斜率约为0.025。

2)阜宁软土渗透性具有强结构性与明显的应力敏感性。在相同孔隙比下,原状土渗透系数为重塑土的3~4倍,并随固结压力增大逐渐趋近;围压增大引起渗透系数呈数量级降低,而夹薄砂层可显著减弱围压对渗流通道压缩的影响,使渗透系数下降幅度明显低于非夹砂软土。水力梯度增加仅造成渗透系数小幅下降($\leq 10\%$),表明渗流结构具有一定稳定性。

3)不同试验方法所得渗透参数一致性良好,工程荷载显著降低软土排水能力。变水头渗透试验、应力-渗流耦合试验与固结反演得到的渗透系数在有效应力统一化后具有较高一致性。对于入海水道二期工程典型填土荷载(约100 kPa),软土渗透系数相较天然状态降低约80%~90%,应在堤防沉降预测与地基处理设计中予以重点考虑。

参考文献:

[1] 李晶,万枫. 淮河复海通道规划及建设历程[J]. 江苏地方志, 2024(3):41-44.
Li J, Wan F. Plan and construction of the waterway relinking Huai River to the sea[J]. Jiangsu Local Chronicles, 2024(3):41-44.
[2] 南京水利科学研究院,江苏省工程勘测设计研究院有限公司. 淮河入海水道二期工程深厚淤土段河堤安全关键技术研究与应用[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2024.
Nanjing Hydraulic Research Institute, Jiangsu Engineering Survey, Design and Research Institute Co. Ltd.

- Research and application of key technologies for river embankment safety in deep and thick soft silt soil sections of the phase II Project of the Huai River Estuary Waterway[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2024.
- [3] 江苏省工程勘测研究院有限责任公司. 淮河入海水道二期工程地质勘察报告[R]. 扬州: 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 2022.
- Jiangsu Engineering Survey & Research Institute Co., Ltd. Geological investigation report of the phase II Project of the Huai River Estuary Waterway[R]. Yangzhou: Jiangsu Engineering Survey & Research Institute Co., Ltd., 2022.
- [4] Xia J, Huang G L, Yan S B. Behaviour and engineering implications of recent floodplain soft soil along lower reaches of the Yangtze River in western Nanjing, China[J]. Engineering Geology, 2006, 87(1/2): 48–59.
- [5] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 上海黏土一维压缩特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 630–636.
- Wu H W, Li Q, Liu G B. Characteristics of one-dimensional compressibility of Shanghai clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 630–636.
- [6] 雷华阳, 贾亚芳, 李肖. 滨海软土非线性蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2806–2816.
- Lei H Y, Jia Y F, Li X. Experimental study of nonlinear creep property of soft soil in littoral area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2806–2816.
- [7] 杨爱武, 张兆杰, 孔令伟. 不同应力状态下软黏土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 53–60.
- Yang A W, Zhang Z J, Kong L W. Experimental study of creep property of soft clay under different stress conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 53–60.
- [8] 陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 等. 洞庭湖冲湖积软土次固结效应研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2362–2369.
- Chen L G, Wu H T, Chen X B, et al. Study on secondary consolidation effect of alluvial soft soil in Dongting Lake[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2362–2369.
- [9] 余湘娟, 殷宗泽, 高磊. 软土的一维次固结双曲线流变模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 320–324.
- Yu X J, Yin Z Z, Gao L. A hyperbolic rheological model for one-dimensional secondary consolidation of soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 320–324.
- [10] 骆以道, 杨光华, 张玉成. 海积软土渗透性变化及固结分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 909–918.
- Luo Y D, Yang G H, Zhang Y C. Analysis on permeability variation and consolidation of marine deposit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 909–918.
- [11] Liu H, Xiu Z X, Liu L J, et al. Rheological properties of deep-sea shallow sediments in the Western Pacific mining area[J]. Soils and Foundations, 2025, 65(3): 101632.
- [12] 陈晓平, 周秋娟, 朱鸿鹄, 等. 软土蠕变固结特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 1–10.
- Chen X P, Zhou Q J, Zhu H H, et al. Research on creep and consolidation characteristics of soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 1–10.
- [13] 吴昌胜, 朱志铎. 考虑沉积环境影响的软土地基工程性质对比研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 424–429.
- Wu C S, Zhu Z D. Comparative study on geotechnical properties of soft soils considering depositional environment[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(3): 424–429.
- [14] Wang Y Y, He Y J, Zhan J, et al. Identification of soil particle size distribution in different sedimentary environments at river basin scale by fractal dimension[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 10960.
- [15] 高国瑞, 韩爱民. 论中国区域性土的分布和岩土性质的形成[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 511–515.
- Gao G R, Han A M. Distribution of regional soils in China and formation of their special geotechnical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 511–515.
- [16] 南京水利科学研究院. 淮河入海水道二期工程入海水道区域海岸线和河海交汇枢纽建筑安全保障关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2024.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. Study on key technologies for ensuring the safety of coastal line and river-sea confluence hub structures in the estuary channel area of the phase II Huai River Estuary Waterway Project[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2024.
- [17] 朱楠, 刘春原, 赵献辉, 等. 湿地湖泊相黏土一维固结压缩特性宏观试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(2): 93–99.
- Zhu N, Liu C Y, Zhao X H, et al. Macroscopic and microscopic experimental research on one-dimensional consolidation compressibility of marshy-lacustrine clay [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(2): 93–99.
- [18] 蒋明镜, 刘阿森, 李光帅. 南海北部陆坡区深海软土宏观特征与力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 618–626.
- Jiang M J, Liu A S, Li G S. Macro-and micro-characteristics and mechanical properties of deep-sea sediment from

- South China Sea [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 618-626.
- [19] 陈晓平,朱鸿鹄,张芳枝,等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142-2148.
- Chen X P, Zhu H H, Zhang F Z, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2142-2148.
- [20] 叶朝良,谢玉芳,曹风旭,等. 饱和状态下海积软土一维渗透固结特征试验研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 28-33.
- Ye C L, Xie Y F, Cao F X, et al. Experimental study on permeability and one-dimensional consolidation characteristics of marine soft soil under saturated state[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 28-33.
- [21] 孙德安,许志良. 结构性软土渗透特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 36-41.
- Sun D A, Xu Z L. Permeability of structural soft soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 36-41.
- [22] 周晖,房营光,曾铖. 压汞法在研究饱和软土孔隙分布中的应用[J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 101-102.
- Zhou H, Fang Y G, Zeng C. Application of mercury intrusion porosimetry in the study of pore distribution of saturated soft soil [J]. Yellow River, 2010, 32(5): 101-102.
- [23] 李栋,彭松,常丹,等. 基于压汞试验的珠海软土微观孔隙特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊2): 4289-4298.
- Li D, Peng S, Chang D, et al. Analysis of microscopic pore characteristics of Zhuhai soft soil based on mercury intrusion porosimetry test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S2): 4289-4298.
- [24] 李泽霖,占鑫杰,许小龙,等. 固结作用下冲积软土微观结构特征试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(4): 161-169.
- Li Z L, Zhan X J, Xu X L, et al. Experimental study on microscopic characteristics of alluvial soft soil under consolidation conditions [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2025, 23(4): 161-169.
- [25] 宋林辉,黄强,闫迪,等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1635-1641.
- Song L H, Huang Q, Yan D, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1635-1641.
- [26] 孙德安,申海娥. 上海软土的流变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 74-78.
- Sun D A, Shen H E. Experimental study on rheology behaviour of Shanghai soft clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 74-78.
- [27] Mesri G, Godlewski P M. Time- and stress-compressibility interrelationship [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(5): 417-430.

(编辑 许军策)