

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.074



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



分选效应作用下疏浚泥的压缩-渗透性状

吕同伟¹, 张勇¹, 翁佳兴², 曾玲玲¹

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 杭州 310023; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210019)

摘要:分选效应在疏浚泥的吹填沉积过程中普遍存在, 导致疏浚泥力学性状的空间分布差异。为探讨分选效应对含砂疏浚泥在吹填沉积过程中压缩与渗透性状的影响, 采用室内沉降柱模型试验沉积分选形成不同状态下的分选土样, 通过一维固结-渗透试验对土体的压缩及渗透性状进行研究。结果表明:分选效应导致疏浚泥形成明显的颗粒分层, 底部土样因粗颗粒积聚、细颗粒减少, 压缩性显著降低, 压缩曲线近似线性, 且在相同孔隙比下渗透系数比顶部土样高多个数量级, 顶部土样以细颗粒为主, 呈现高压缩性和倒“S”型压缩曲线, 渗透性较差;渗透系数与孔隙比和细粒含量密切相关, 当细粒含量大于 30% 时, 渗透系数与液限孔隙比和孔隙比之间呈现出明确的定量关系, 当细粒含量不大于 30% 时, 渗透系数与细粒含量和孔隙比之间存在定量关系;底部土样在较高初始含水率下易形成稳定“砂骨架”, 从而抑制压缩变形、显著提高渗透能力。

关键词:疏浚泥;分选效应;细粒含量;压缩性;渗透系数

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Compressive permeability characteristics of dredged mud under sorting effect

LV Tongwei¹, ZHANG Yong¹, WENG Jiaying², ZENG Lingling¹

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, P. R. China; 2. Jiangsu Water Source Company Ltd. of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project, Nanjing 210019, P. R. China)

Abstract: Sorting effect is common in the process of hydraulic filling of dredged mud, which inevitably leads to differences in the spatial distribution of mechanical properties of dredged mud. To investigate the influence of the sorting effect on the compression and permeability characteristics of sandy dredged mud during hydraulic deposition, laboratory settling column tests were conducted to simulate the formation of sorted soil samples under different conditions. One-dimensional consolidation-permeability tests were performed to study the compression and permeability behavior of the soil. The experimental results demonstrate that: (1) The sorting effect induces distinct particle stratification within the dredged mud: bottom-layer samples, enriched with coarse particles and depleted of fines, exhibit markedly lower compressibility, nearly linear compression curves, and

收稿日期: 2025-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(52178361、52278334); 江苏省南水北调科技研发项目(JSNSBD202205)

作者简介: 吕同伟(1998-), 男, 主要从事疏浚泥物理-力学性状研究, E-mail: tongweilv198@163.com。

曾玲玲(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: linglz413@126.com。

Received: 2025-04-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178361, 52278334); Jiangsu South to North Water Diversion Technology Research and Development Project (No. JSNSBD202205)

Author brief: LV Tongwei (1998-), main research interest: physical-mechanical properties of dredged mud, E-mail: tongweilv198@163.com.

ZENG Lingling (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: linglz413@126.com.

permeability coefficients several orders of magnitude higher than those of top-layer samples at the same void ratio. In contrast, top-layer samples, which are predominantly fine-grained, display high compressibility, an inverted S-shaped compression curve, and low permeability; (2) Permeability is strongly influenced by both void ratio and fine-grained content: when the fine content exceeds 30%, a definitive correlation exists among permeability coefficient, void ratio at the liquid limit, and current void ratio; when fine content is 30% or less, permeability can be quantitatively related to the fine content and void ratio; (3) Under high initial water content conditions, bottom-layer samples develop a stable sandy skeleton that restrains compressive deformation and significantly improves permeability.

Keywords: dredging mud; sorting effect; fine particle content; compressibility; permeability coefficient

近年来,港口与航道等水运基础设施的建设规模持续扩张,出于保障船舶安全通行的考虑,航道需定期开展疏浚维护工作^[1]。在此过程中,会产生数量巨大的疏浚泥^[2-3],以珠江三角洲区域为例,其疏浚泥年产量高达8000万 m^3 ^[4],如何实现这类特殊土体的高效处置已成为工程难题。

当前,水力疏浚凭借连续作业、效率高、成本低等优势,成为最常用的疏浚方式^[5]。但在实际工程作业中,大量水分会掺入疏浚泥,致使其含水率极高,工程性质欠佳,通常只能作为废弃土处理。现阶段,普遍采用就近征地的方式,修筑围堰并吹填高含水量疏浚泥,以此形成疏浚泥堆场,并经进一步进行排水固结处理^[6-7]。值得注意的是,渗透系数是影响疏浚泥固结速率的关键因素^[8],围绕这一关键要素,众多学者已针对不同类型土的渗透系数变化规律展开研究^[8-10]。已有研究表明,黏性土的渗透性会随孔隙比及液限处孔隙比的变化而改变,而砂土的渗透性则会随着细粒含量的增加而降低。

尽管在渗透系数研究方面取得了一定成果,但对于疏浚泥的研究仍存在局限性。大多数研究侧重于土样最终沉积形态的土体特性,忽略了疏浚泥吹填沉积过程中的动态分选效应。特别是含水率较高宽级配疏浚泥,其在吹填以及自重沉降过程中,受土的颗粒组成、初始含水率和吹填速率等因素影响,颗粒分选现象难以避免^[11-12]。因此,对于粗颗粒含量较高的疏浚泥,应当充分考虑颗粒分选对压缩渗透性状产生的影响。开展分选效应作用下疏浚泥压缩渗透性状的研究有助于优化堆场设计,确保堆场设计的合理性与科学性,为疏浚泥的处理提供理论依据。笔者针对不同初始含水率的含砂疏浚泥,运用沉降柱模型开展试验,对自重沉积后形成的不同位置的土样,开展固结-渗透试验,分析

分选效应对疏浚泥压缩及渗透特性的影响规律。

1 试样与试验方案

1.1 试验试样

试验土样取自于广州地区,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),利用碟式液限仪测定土的液限 w_L ,结合采用搓条法测定土的塑限 w_P ,同时通过比重瓶法测定土粒相对比重 G_s 。其中,使用细筛与H151比重计测定土的颗粒分布曲线,如图1所示。

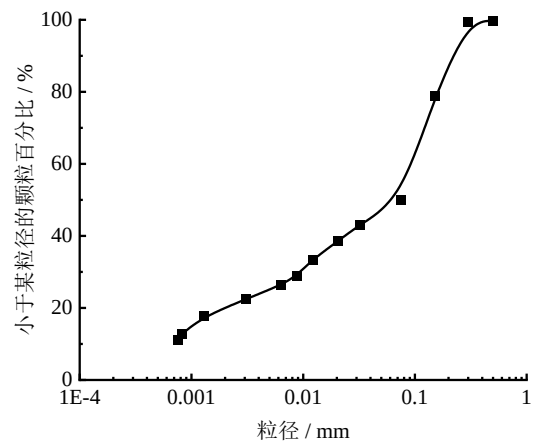


图1 颗粒分布曲线

Fig.1 Particle distribution curve

试验结果表明,广州土的黏粒含量($0.002 \text{ mm} \leq d < 0.005 \text{ mm}$)为24.86%,粉粒含量($0.005 \text{ mm} \leq d < 0.075 \text{ mm}$)为25.24%,砂粒含量($d \geq 0.075 \text{ mm}$)为49.90%,且最大粒径小于1 mm;液限为30.08%,塑限为16.71%。图2为试验土样的塑性图,可以看出广州土则位于A线上方,B线左侧,可判定为低液限黏性土。结合上述试样介绍,试样的基本物理性质指标见表1。

表1 试验土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of test soil samples

土样名称	液限 w_L / %	塑限 w_P / %	塑性指数 I_P / %	土粒相对比重 G_s	黏粒含量 / %	粉粒含量 / %	砂粒含量 / %
广州土	31.04	16.71	14.33	2.68	24.86	25.24	49.90

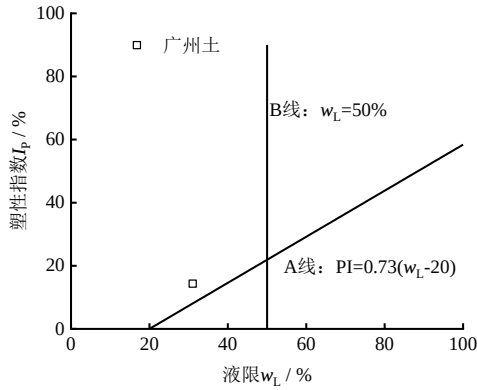


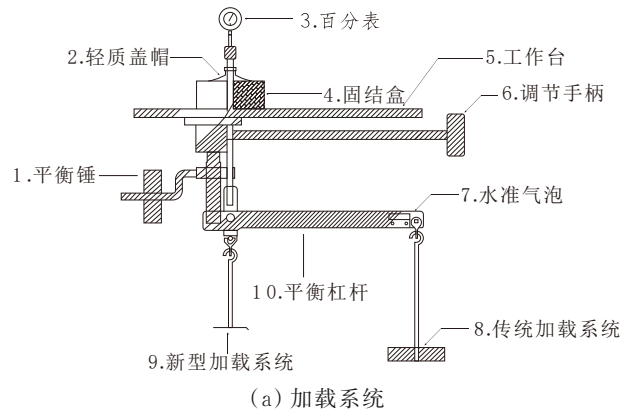
图2 土样塑性图

Fig.2 Soil sample plasticity diagram

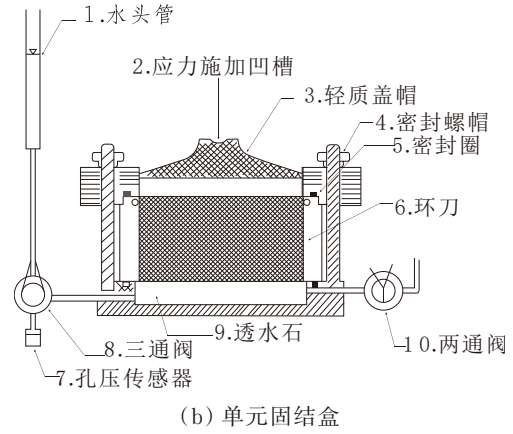
1.2 试验方案

以天然含砂疏浚泥为研究对象,实际工程中疏浚泥沉积的含水率变化范围大且含水率较高,在含水率较高的沉积条件下进行试验,以符合实际工程情况,试验时将其配制成初始含水率 w_0 分别为128.3%、180.8%、246.7%和308.2%的沉积试样,在1 m高的沉降柱中开展自重沉积试验。其中,沉降柱由多个透明有机玻璃分节沉降筒单元组成,每个分节沉降筒单元的内径均为12 cm,高度为5 cm。待试样自重沉积稳定后,以一节沉降筒作为取样单元进行分层取样,并针对所取土样开展一维固结-渗透联合试验。考虑到含水率较高的分层土样在固结试验过程中容易出现挤土现象,同时为了准确获取低荷载下的压缩曲线及渗透系数,试验采用Hong等^[13]研发的低起始应力固结仪,该装置通过改用轻质试样帽和增加1:1的加载系统,可以实现第1级荷载为0.5 kPa,如图3所示。

在固结试验环节,第1级固结荷载大小设定为0.5 kPa,随后按照1:1的比例逐级加载,直至固结荷载达到1 600 kPa。其中,试验采用直径61.8 mm、高度40 mm的环刀。每级荷载施加并达到固结稳定状态后,记录百分表读数。随即开展渗透试验,测定各级有效应力下土样的渗透系数 k_v 。渗透试验根据实际需求,灵活选用常水头和变水头装置,在固结应力小于12.5 kPa时,为防止土样在渗流过程中发生土样破坏现象,需控制渗透压力小于固结压力,此时宜采用常水头渗透试验。对于细颗粒含量较少的土样(如砂性土),由于其渗透性较强,同样适用于常水头渗透试验。而在固结压力大于12.5 kPa时,细颗粒含量较高的黏性土渗透系数较小,采用变水头渗透试验能够通过调节渗透压力,更精确地测定渗透参数并减小测量误差。其中,常水头计算公式如式(1)所示,变水头计算公式如式(2)所示。



(a) 加载系统



(b) 单元固结盒

图3 低起始应力固结仪

Fig.3 Low initial stress consolidation instrument

$$k_T = \frac{QL}{AHt} \quad (1)$$

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{A(t_1 - t_2)} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

式中: k_T 为 $T^\circ\text{C}$ 时试样的渗透系数,cm/s; Q 为时间 t 秒内的渗出量,cm³; L 为渗流路径,cm; A 为试样的断截面积,cm²; H 为水位差,cm; t 为时间,s; a 为变水头管截面积,cm²; 2.3为ln和lg的变换因数; H_1 、 H_2 为起始和终止水头,cm; t_1 、 t_2 分别为测读起始和终止水头所对应的时间,s。

2 试验结果与分析

2.1 自重沉积试验结果

不同初始含水率疏浚泥自重沉积稳定后,其含水率 w 随深度 h 的变化规律如图4所示。由图4可见,沉积稳定后各层土样的含水率随深度增加而逐渐降低,且整体变化趋势呈非线性对数关系。这是由于在达到沉降条件时,疏浚泥中粒径大于0.075 mm的颗粒会以单颗粒沉降的方式,率先在底部堆积。随着深度增加,底部土样承受的自重应力增大,且整体排水性能较强,诸多因素综合作用,使得底部土样的含水率相较于顶部土样显著降低。

为了研究含砂疏浚泥颗粒分选规律变化,绘制

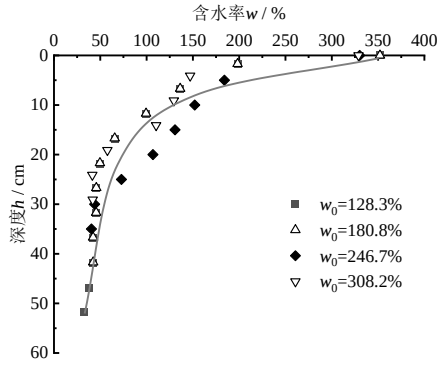


图4 含水率随深度变化曲线

Fig.4 Water content variation curve with depth

了沉积稳定土样中粗颗粒含量 φ_s 随深度 h 的变化曲线,如图5所示。由图5可知,沉积稳定后的各层土样中的粗颗粒含量随深度的增加而非线性增大,且随着沉积试验的初始含水率的增加,整体的变化程度越大,这与源土相差较大。由此可以判断,分选后的土样呈现粗颗粒分层现象且存在显著界面,其确定的主要依据为通过颗粒分析试验确定不同位置大于 0.075 mm 的颗粒含量,对于大于该粒径颗粒的含量显著增加,且其上部不存在大于 0.075 mm 颗粒时对应的土样分界面。分选界面以上土样不含粗颗粒,上部土样均为细颗粒不含粗颗粒,即

$F_c=100\%$;下部土样的细颗粒含量 F_c 则会随着沉积试样初始含水率的增加而降低。

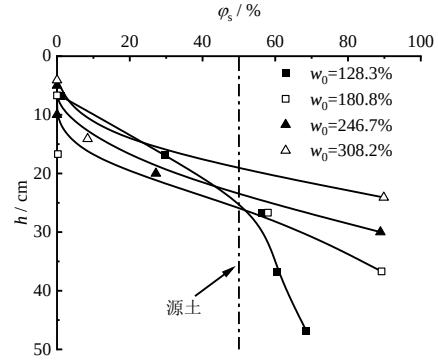


图5 粗颗粒含量随深度变化曲线

Fig.5 Curve of coarse particle content with depth

2.2 压缩-渗透试验结果

2.2.1 有效应力与孔隙比关系变化曲线

图6为天然含砂疏浚泥在自重沉积过程中发生颗粒分选状态下,不同位置土样的 $e \sim \lg \sigma'_v$ 压缩曲线。需要指出的是,第1层表示沉积稳定后最底部的土样,随底部向上土样的层数值不断增加,最顶部土样的层数值最大。以初始含水率为 128.3 % 的沉积试样为例,第1层为沉积稳定后的底部土样,第9层为沉积后的顶部试样。

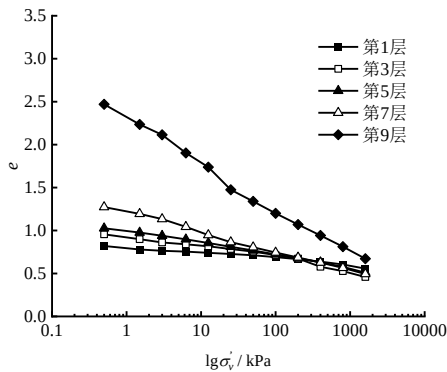
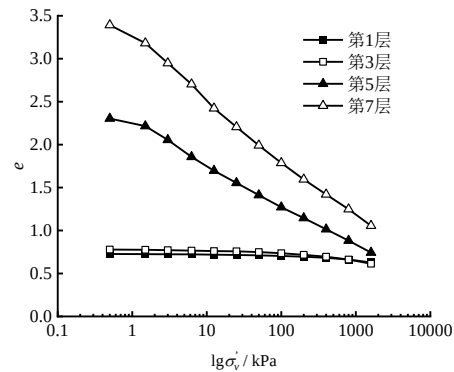
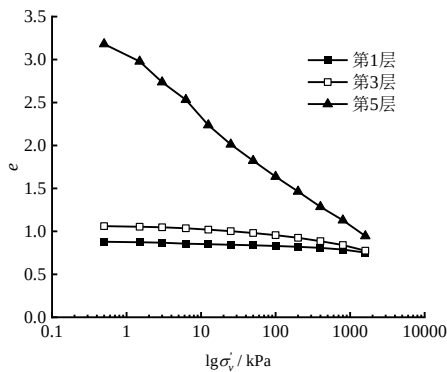
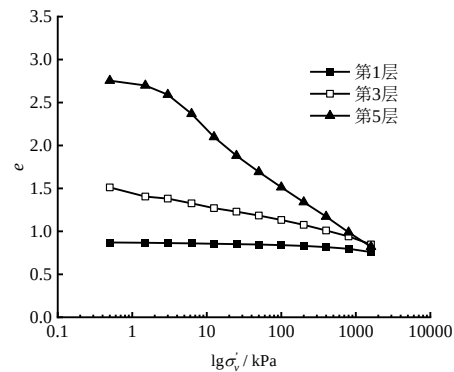
(a) 初始含水率 $w_0=128.3\%$ (b) 初始含水率 $w_0=180.8\%$ (c) 初始含水率 $w_0=246.7\%$ (d) 初始含水率 $w_0=308.2\%$ 图6 不同沉积条件下土样 $e \sim \lg \sigma'_v$ 压缩曲线

Fig.6 Compression curves of soil samples under different sedimentary conditions

从图6可知,沉积后不同位置试样压缩过程中的孔隙比变化存在显著差异,分别表现在以下方面:顶部土样的压缩曲线均位于底部土样的上方,且压缩变形量明显大于底部,这一巨大差异已经超过了由于土样初始孔隙比对压缩曲线影响的范围。此外,压缩曲线的形态也发生了显著的变化:顶部土样存在明显的屈服应力,使压缩曲线呈现倒“S”型,且屈服后压缩曲线的变化梯度极大;而底部土样则未出现这一形态,整体的压缩变形量小且近似线性变化,压缩曲线降低程度明显更小。

2.2.2 渗透系数随孔隙比的变化规律

颗粒分选前土样渗透系数随孔隙比的变化规律曲线,如图7所示。由图7可见,分选前试样的渗透系数随孔隙比增加而逐渐增大,且呈现明显的非线性变化关系。同时,对于初始孔隙比不同试样,其 $e-\lg k_v$ 曲线变化规律一致,且存在明显的重合部分,表明颗粒分选前试样渗透系数主要受孔隙比的影响。在孔隙比相近时,渗透系数的大小也基本一致且没有明显的区别,这一结果与已有黏性土的研究结论一致。

图8(a)~(d)分别展示了不同初始含水率下,含砂疏浚泥自重沉积后各层土样孔隙比与渗透系数的半对数关系曲线。从图8可发现,所有沉积后的

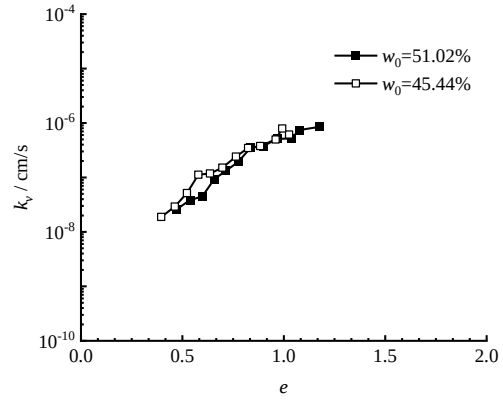


图7 源土 $e-\lg k_v$ 压缩曲线

Fig.7 Source soil compression curves

土样存在共同的规律,即顶部土样的 $e-\lg k_v$ 曲线均位于底部土样的下方,这说明在孔隙比条件相同的情况下,顶部土样的渗透系数相较于底部土样大且相差多个数量级,而且各层土样的 $e-\lg k_v$ 变化曲线均随孔隙比的减小呈现非线性递减的趋势。

3 颗粒分选效应影响机理讨论

3.1 压缩性状影响机理

试验结果表明,含砂疏浚泥在沉积过程中存在颗粒分选效应,分选后的土样呈现分层现象且存在

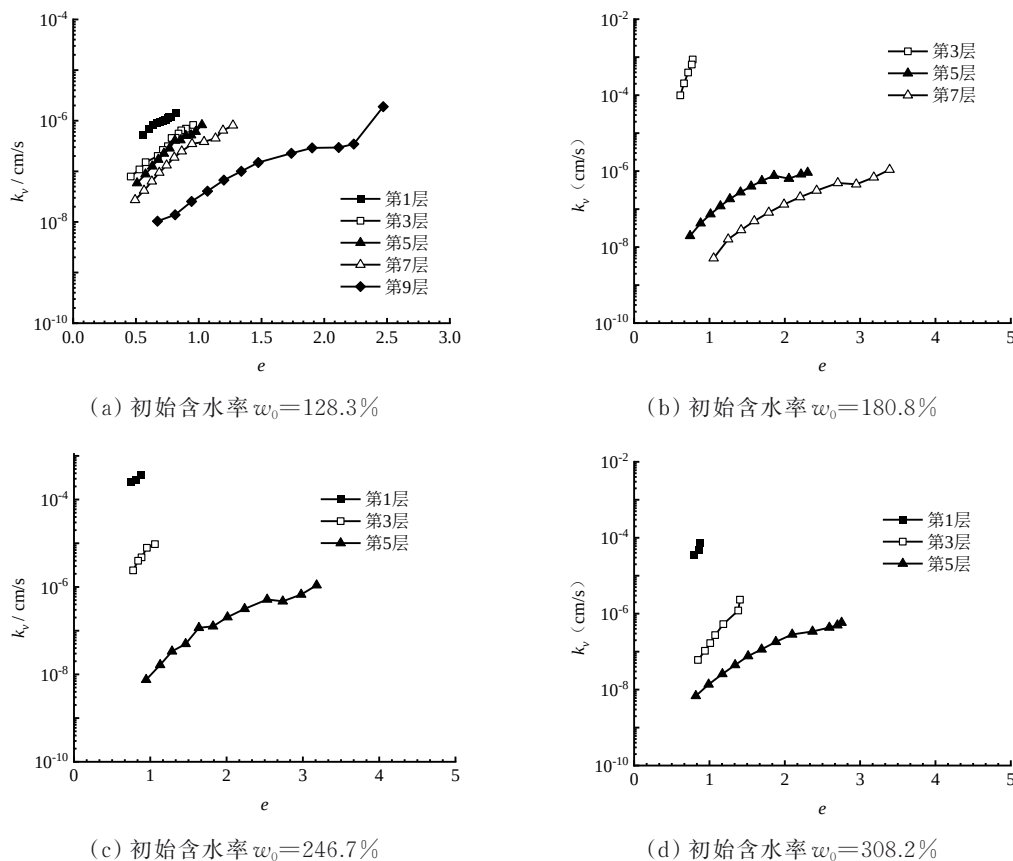


图8 不同沉积条件下土样渗透系数变化曲线

Fig.8 Curve of permeability coefficient variation of soil samples under different sedimentary conditions

显著界面,这对土样整体的压缩特性产生了较大影响。其中,分选界面以上土样不含粗颗粒,其压缩特性主要受初始孔隙比与液限处孔隙比影响;而分选界面以下土样会随着分选程度的加剧而形成沉积含砂层,土样的压缩特性受到粗颗粒与细颗粒含量的共同作用。图9为底部土样的压缩曲线。由图9可以看出,沉积试样底部土样压缩前的孔隙比随着沉积试样含水率的增加先减小后增大;而压缩后底部土样的最终孔隙比随着沉积试样含水率的增加而逐渐增大,最终趋于稳定。

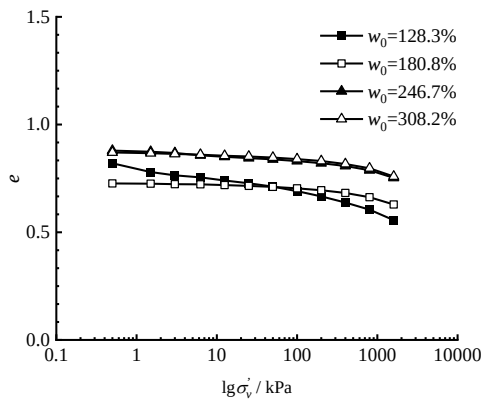


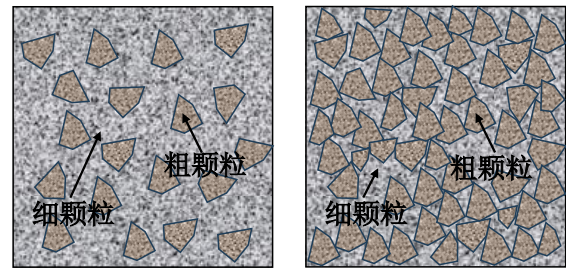
图9 底部土样压缩曲线对比

Fig.9 Comparison of compression curves of bottom soil samples

与此同时,初始含水率 $w_0=128.3\%$ 与 $w_0=180.8\%$ 沉积试样底部土样的压缩曲线之间存在交点,及含水率较低试样沉积稳定后的底部土样压缩前期的孔隙比大于含水率较高试样,而土样压缩后期的孔隙比相对较小。然而,初始含水率大于 128.3% 的沉积试样的压缩曲线平行,压缩曲线的梯度下降相近,对于初始含水率 $w_0=245.6\%$ 和 308.6% 沉积试样底部土样的压缩曲线甚至发生重合,两土样压缩性状表现出高度一致性。

结合上述压缩曲线分析,沉积试样分选后底部土样应存在两种典型状态,如图10所示。当沉积试样含水率较小时,底部土样中的粗颗粒含量少,粗颗粒主要悬浮裹挟在细颗粒之间,粗颗粒间未发生明显的接触,呈现出图10(a)所示的粒间状态,此时土样的压缩性主要受细颗粒影响,压缩变形量来自细颗粒间的孔隙水排出。随着沉积试样含水率的增加,细颗粒含量逐渐减少,最终仅少量细颗粒存在于粗颗粒的孔隙之中,如图10(b)所示,此时土样中粗颗粒间因细颗粒减少而直接接触,粗颗粒便会在底部土样中形成结构相对稳定的“砂骨架”,该结构抑制了细颗粒孔隙在压缩过程中的孔隙比减小,从而减小底部土样的压缩变形量,土样主要的压缩变形主要来自砂颗粒间的孔隙的变化。这体现了

底部土样的压缩曲线与沉积前试样的初始状态存在密切关系,即颗粒分选产生条件对压缩特性的影响。



(a) 分选不显著

(b) 分选显著

图10 底部土样沉积状态机理图

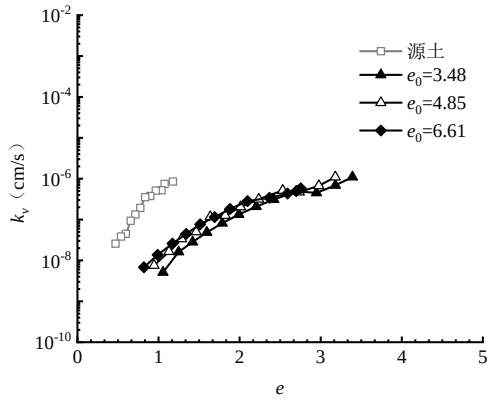
Fig.10 Mechanism diagram of sedimentation state of dredging mud in the first layer

综上所述,受分选效应影响,沉积试样底部土样的孔隙比变化规律受粗颗粒和细颗粒等粒间孔隙比共同影响。分选较弱时,底部土样的孔隙比受细颗粒孔隙比影响,在压缩过程中,细颗粒含量较多,土样初始孔隙比越大,土样中的孔隙水越多,土样的压缩性也相对越大。分选强时,底部土样的孔隙比受粗颗粒孔隙中的细颗粒孔隙的影响,沉积试样的初始含水率越大,细颗粒含量相对越低,土样的压缩性受“砂骨架”影响,整体压缩性越小。

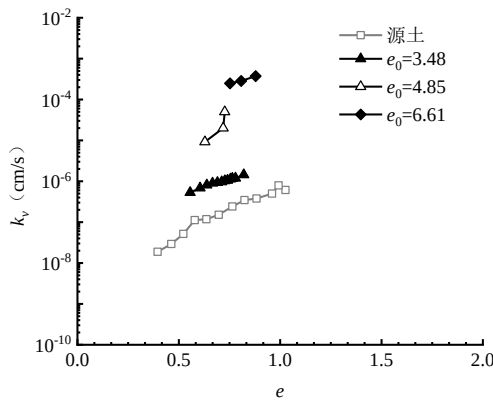
3.2 渗透性状影响机理

图11(a)和(b)分别为沉积稳定后顶部土样与源土以及底部土样与源土比较的孔隙比渗透系数关系曲线。由图11(a)可知,在不同初始孔隙比下自重沉积稳定后的土样,其顶部土样与源土会发生显著变化,其渗透系数会比起源土的渗透系数小2~3个数量级。然而,随着颗粒分选产生后渗透系数的变化将不再显著,在孔隙比相同时,渗透系数大小基本处于同一数量级,且随着沉积试样的含水率不断增加, $e-\lg k_v$ 变化曲线甚至重合。相比于顶部土样,底部土样渗透系数的变化更加明显,由图11(b)可以发现,随着沉积土样的含水率 w_0 增加,底部土样的渗透系数逐渐增大,但这一变化也不具有持续性,当沉积试样的含水率超过一定值时,渗透系数在相同孔隙比下表现出一致性。

由此可见,颗粒分选效应对含砂疏浚泥的渗透性状影响显著,且因土样分布位置而异。在粗颗粒分选界面以上的上部土样,液限变化对土样渗透系数起决定性作用。颗粒分选会使粒径大于 0.01 mm 的颗粒从上部土样中脱离,由于黏性土的液限受整体的粒径分布影响,因此会使上部土样的液限增大,由于渗透系数与液限呈负相关关系,所以上部土样的渗透系数会逐渐减小。而在粗颗粒分选



(a) 顶部土样



(b) 底部土样

图 11 土样 e - $\lg k_v$ 曲线对比

Fig.11 Comparison of permeability coefficient curves of soil samples with changes in void ratio

界面以下的下部土样,由于颗粒分选使细颗粒含量较小,且随粗颗粒接触使其在压缩过程中变形量小,土样整体孔隙比变化较小,所以渗透系数明显较大。

在定量研究含砂疏浚泥在颗粒分选效应影响下的渗透系数时,需要针对各层土样渗透系数不同的控制因素进行分析。对于细颗粒含量高的黏性土的渗透系数研究,已有较为成熟的成果。其中,Zeng 等^[9]通过大量重塑黏土的一维固结-渗透试验数据,基于固有压缩体系,分析得到了渗透系数随孔隙比的变化与压缩行为之间的定量相互关系。其中,竖向渗透系数与孔隙比和液限孔隙比的定量关系见式(3)。

$$\lg k_v = -7.4 + 8.4 \lg(1 + e) - 7.2 \lg(1 + e_L) \quad (3)$$

式中: e 、 e_L 分别为压缩过程中的孔隙比和分选前后不同土样的液限处孔隙比。

随着颗粒分选效应的发生,顶部土样中将不存在粗颗粒,此时可以尝试黏性土进行渗透系数预测。然而,底部土样的细颗粒含量会随之减少,粗颗粒含量增多,且随着细颗粒含量 F_c 的不断减小,

底部土样的液限会不断减小,甚至形成不可塑的砂土,如细颗粒含量 $F_c=10\%$ 和 30% 左右的底部土样。此时,土样整体的渗透系数若通过黏性土的预测模型计算难免产生巨大误差。

对此,当天然含砂疏浚泥分选效应显著时,底部土样的渗透系数分析需考虑粗颗粒和细颗粒的相对含量影响。孔令伟等^[10]在研究砂土渗透性的细颗粒效应时引入了粒间状态参量概念,指出细粒间孔隙比 e_f 反映细颗粒含量对渗透系数的影响,且发现两者存在较好的线性关系。其中,细粒间孔隙比分别定义为式(4)。

$$e_f = \frac{e}{f_c} \quad (4)$$

式中: $f_c=F_c/100$ 。

因此,以粒间状态参量对底部土样渗透系数进行定量研究,分析粉粒间孔隙比 e_f 与渗透系数 k_v 之间的关系。图 12 展示了两者的单对数线性变化关系,由图 12 可以发现,细粒间孔隙比与渗透系数之间在细颗粒含量 $F_c \leq 30\%$,底部土样的渗透系数随着粉粒间孔隙比的增加而呈线性增加的趋势,两者的拟合结果如式(5)所示。

$$\lg k_v = 6.73 + 0.33e_f \quad (5)$$

式中: e_f 为细粒间孔隙比。

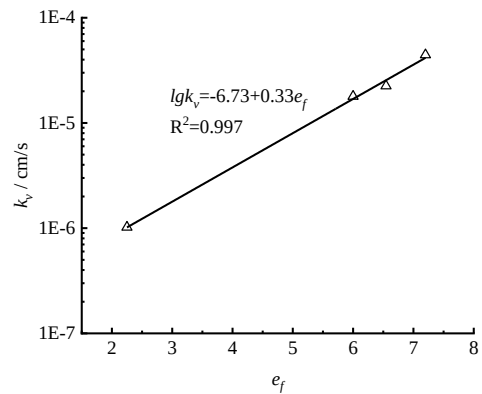


图 12 细粒间孔隙比与渗透系数变化关系

Fig.12 The relationship between the void ratio between powder particles and the variation of permeability coefficient

结合式(4)、式(5)可得式(6)。

$$\lg k_v = 6.73 + 0.33(F_c/100)^{-1}e \quad (6)$$

式中: F_c 为分选后土样的细颗粒百分比含量。 e 为压缩过程中的孔隙比。

通过上述分析可以看出,细粒间孔隙比适宜表征颗粒分选后下部细颗粒含量较少的土样渗透系数。在孔隙比 e 一定时,由于分选效应的影响,底部土样的渗透系数随着细颗粒含量的增加而逐渐减小;在细颗粒含量 F_c 一定时,渗透系数随孔隙比的增加而增加。最终,可以得到一个渗透系数与细粒

含量 F_c 及孔隙比 e 的定量表达式。

疏浚泥颗粒的分选效应主要表现为粒径 $> 0.01 \text{ mm}$ 的颗粒发生单颗粒沉降,且携带部分细颗粒在底部汇集,根据分选程度的差异,各部分土样中的细颗粒含量会随之变化。试验数据显示,受分选效应影响,疏浚泥土样中细颗粒含量 F_c 呈现 $10\% \sim 100\%$ 的宽泛分布特征,这为渗透系数的预测带来了显著的非线性变化挑战,需要根据土样实际状态进行渗透系数预测分析。

基于此,含砂疏浚泥分选土样的渗透系数需要综合考虑多因素影响,当分选效应较强而使下部土样中细颗粒含量 $F_c \leq 30\%$ 时,应该以粗粒土的细粒效应对土样进行分析,采用式(6)进行预测,当分选效应较弱则下部土样中细颗粒含量 $F_c > 30\%$ 时,以黏性土的液限变化对土样进行分析,采用式(3)进行预测。

为了验证综合分析沉积试样各层土样预测的准确性和可行性,图13展示了不同状态下各形成土样根据细颗粒含量差异所测得的试验值与式(3)与式(6)计算所得预测值之间的对比分析。由图13可以看出,分选效应所产生土样的差异引起了渗透性状变化,对此可以通过细颗粒的分布情况采用对应的渗透模型进行预测,预测值的最大误差为 30% 左右,对于以数量级为单位的渗透系数,这个误差对工程计算影响较小。

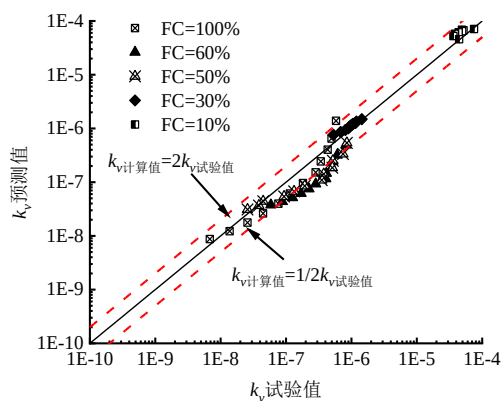


图13 不同土样渗透系数试验值与经验公式预测值之间的关系

Fig.13 The relationship between permeability coefficient test values and empirical formula predicted values

4 结论

选取天然含砂疏浚泥作为研究对象,探讨分选作用对自重沉积稳定后颗粒空间分布变化及其对土样力学性状的影响。得到以下主要结论:

1)颗粒分选会对疏浚泥整体的压缩及渗透性状产生影响。分选后底部土样的压缩性明显小于

顶部土样,而底部土样相同孔隙比下的渗透系数则明显大于顶部土样。

2)压缩性状的变化主要是因为分选程度的加剧,底部土样中的细颗粒含量减少,砂颗粒会由初始的悬浮状态逐渐产生接触,最终形成“砂骨架”。主要表现为分选程度较小时,土样整体的压缩性状由细颗粒控制;分选程度较大时,底部土样的压缩性会逐渐变为砂颗粒控制,土样的压缩指数减小。

3)分选作用后渗透系数的差异与孔隙比以及细颗粒含量相关,渗透系数的预测需要考虑两者的共同作用。具体而言,当土样中细颗粒含量大于 30% 时,渗透系数控制因素为液限孔隙比与孔隙比;而当细颗粒含量小于等于 30% 时,渗透系数控制因素为细粒含量与孔隙比。

参考文献

- [1] 何桂芳, 谢健, 田海涛, 等. 海洋疏浚泥综合利用产业化道路的探索[J]. 海洋开发与管理, 2008, 25(9): 60-62. HE G F, XIE J, TIAN H T, et al. Exploration on industrialization road of comprehensive utilization of marine dredged mud [J]. Ocean Development and Management, 2008, 25(9): 60-62. (in Chinese)
- [2] 曹慧群, 周建军. 我国水利清淤疏浚的发展与展望[J]. 泥沙研究, 2011, 36(5): 67-72. CAO H Q, ZHOU J J. Development and prospect of dredging at water conservancy works in China [J]. Journal of Sediment Research, 2011, 36(5): 67-72. (in Chinese)
- [3] WANG J H, DING J W, WANG H, et al. Large-strain consolidation model considering radial transfer attenuation of vacuum pressure [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103498.
- [4] 杨瑞敏, 丁建文, 周志彦, 等. 堆场疏浚泥颗粒分选特性初步量化方法[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 89-94. YANG R M, DING J W, ZHOU Z Y, et al. Preliminary quantitative method for grain sorting behaviors of dredged slurries in reclaimed land [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 89-94. (in Chinese)
- [5] 李青云. 疏浚工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. LI Q Y. Dredging engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese)
- [6] 吴建奇, 刘祥, 李敏, 等. 土柱半径对疏浚泥真空固结的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 57-65. WU J Q, LIU X, LI M, et al. Influence of soil column radius on vacuum consolidation of dredged slurry [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025,

- 47(2): 57-65. (in Chinese)
- [7] 徐志豪, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝固化联合真空预压处理高含水率淤泥(浆)试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 10-18.
XU Z H, ZHANG R J, ZHENG J J, et al. Experimental study on flocculation-solidification combined with vacuum preloading treatment of dredged mud with high moisture content [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 10-18. (in Chinese)
- [8] 曾玲玲, 洪振舜, 陈福全. 压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1286-1292.
ZENG L L, HONG Z S, CHEN F Q. A law of change in permeability coefficient during compression of remolded clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1286-1292. (in Chinese)
- [9] ZENG L L, CAI Y Q, CUI Y J, et al. Hydraulic conductivity of reconstituted clays based on intrinsic compression [J]. Géotechnique, 2020, 70(3): 268-275.
- [10] 孔令伟, 李新明, 田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 21-26, 41.
KONG L W, LI X M, TIAN H N. Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 2): 21-26, 41. (in Chinese)
- [11] 杨瑞敏, 徐桂中, 丁建文, 等. 堆场疏浚泥颗粒分选规律及机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 639-643.
YANG R M, XU G Z, DING J W, et al. Grain sorting laws and mechanisms in reclaimed land of dredged slurries [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 639-643. (in Chinese)
- [12] 徐桂中, 丁建文, 殷杰, 等. 高含水率疏浚泥自重沉积过程中颗粒分选规律[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 243-248.
XU G Z, DING J W, YIN J, et al. Grain-size sorting behavior of dredged slurry at high initial water content during sedimentation [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(2): 243-248. (in Chinese)
- [13] HONG Z S, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents [J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 691-700.
- (编辑 XXX)