

含水率与静置时间对滩涂土壤流变特性试验

梁喜凤¹, 史延楠¹, 秦叶波², 姚莹², 张慧², 王永维³

(1. 中国计量大学机电工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省农业技术推广中心, 杭州 310000;

3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为了研究贝类养殖的滩涂土壤的流变属性和结构稳定性, 采用旋转流变仪对不同含水率和不同静置时间的滩涂土壤进行了流变试验, 通过单因素试验研究了各因素对滩涂土壤流变特性的影响, 并分析了土壤剪切过程中的变化机理。同时, 通过 Response Surface Methodology 中的 Central Composite Design 试验建立了屈服应力与含水率和静置时间之间的数值模型, 并比较了含水率和静置时间对屈服应力产生的影响。结果表明: 1) 剪切过程中滩涂试样经过了弹塑性阶段、固液转化阶段和流体阶段, 滩涂土壤表现出了静置时间越长, 固液转化阶段就越长的性质, 且剪切过程中表现出剪切稀化的性质。2) 静置时间的增加会导致整体剪切应力和屈服应力同时增加, 含水率的增加会导致整体剪切应力和屈服应力的降低, 且滩涂土壤存在一个含水率分界点, 此含水率分界点在 64.5%~67.0% 之间, 当超过这个含水率分界点的试样的静置时间超过 31 h 时, 试样的屈服应力基本不会再发生较大的波动, 大小在 2 240~4 380 Pa 之间, 此外, 静置时间在 0~53 h 之间且含水率在 62.0%~69.5% 之间的试样的屈服应力在 1 870~5 410 Pa 之间。3) 含水率对屈服应力的影响比静置时间的影响更加显著, 模型的 R^2 为 0.953 4, 并且在验证试验中, 屈服应力的测量值与预测值之间的误差在 15.0% 以内, 都说明了数值模型的可靠性。研究定性和定量地表征了滩涂土壤的流变特性, 为滩涂贝类采收机械的研发和优化提供参考。

关键词: 含水率; 响应面试验; 静置时间; 滩涂土壤; 流变特性; 屈服应力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309143

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0190-09

梁喜凤, 史延楠, 秦叶波, 等. 含水率与静置时间对滩涂土壤流变特性试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 190-198.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309143 <http://www.tcsae.org>

LIANG Xifeng, SHI Yannan, QIN Yebo, et al. Experiment on the rheological properties of tidal flat soil with moisture content and standing time[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 190-198. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309143 <http://www.tcsae.org>

0 引言

贝类不仅可以作为食品, 也可以作为食疗医学领域中的食材, 受到食疗医学领域的高度重视。近年来, 市场对贝类产品的需求量也在逐年攀升, 2020 年中国贝类产品的产量就达到了 1 480 万 t, 占全球总量的 83.7%^[1]。目前贝类的采收主要依靠人工, 劳动强度大, 成本高, 采收效率低, 因此实现滩涂贝类采收机械化是非常必要的。采收机械研究的关键问题在于采收器具与土壤的相互作用, 滩涂土壤独特的力学性质, 尤其是滩涂土壤的流变特性研究, 对解决研发采收机械关键问题十分重要。

目前国内外学者对多种土壤进行了研究, 例如稻田土^[2-3]、泥沙^[4-5]和海相土^[6-7]等, 涉及到影响土壤性质的因素有温度^[8-9]、土壤鼓泡^[10-11]、石灰石^[12]、盐度^[13-14]、振动频率^[15-16]、有机质^[17-19]和粒径^[20-21]等。由于滩涂复杂的环境, 滩涂土壤的流变特性与土壤的湿润程度密切相关, 王金晓等^[22]以壤土和黄绵土为研究对象, 通过流变仪中的振幅扫描测试获得的参数来表征土壤结构稳定

性, 研究表明随着含水率的增加, 土壤的结构强度会逐渐降低。张健乐等^[23]研究了容重和含水率对紫色土坡耕地土壤抗剪强度的影响, 发现土壤黏聚力和内摩擦角随着含水率的增大而减小。LIU 等^[24]探究了不同耕作方式下的含水率对水稻土蠕变特性的量变规律及其相关性, 结果表明在犁耕和免耕的方式下, 含水率对水稻土流变特性参数有显著影响。梁志超等^[25]采用流变仪对不同含水率的伊犁黄土类土进行了稳态和动态流变试验, 讨论了含水率对流变参数的影响规律, 定量分析了流变参数和各变量之间的关系。张少雄等^[26]使用 RST-SST 流变仪对不同含水率的赤泥浆体进行流变试验, 试验表明赤泥浆产生了剪切稀化的现象, 并且发现 Herschel-Bulkley 模型能很好地反映出赤泥浆流变特性。ZHENG 等^[27]研究人员基于耕层水稻土对其进行试验研究, 结果发现含水率为 15.0%~35.0% 之间, 随着含水率的增加, 黏聚力先增大后减小, 在含水率为 20% 时达到峰值, 含水率与切向黏附力呈正相关。另外, 研究人员提出, 静置时间与土壤流变特性存在相关性, 陈宝等^[28]基于高庙子彭润土采用流变仪测定不同静置龄期试样的剪切强度, 测定结果表明随着静置时间延长, 彭润土的微观结构逐渐趋向均匀, 钟翼进等^[29]采用了赫切尔-巴尔克模型拟合流变曲线, 结果表明建筑渣土泥浆的屈服应力和塑性黏度均随着静置时间的增加而增大。SWAIN 和 GHOSH^[30]

收稿日期: 2023-09-18 修订日期: 2023-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.31971796)

作者简介: 梁喜凤, 博士, 教授, 研究方向为农业机器。

Email: lxfclu@163.com

采用一种通用的直接方法，使用 Prony 级数参数拟合确定土体随时间变化的应力-应变行为，利用土体松弛试验得到的流变应力-应变数据，采用非线性曲线拟合方法对 Prony 级数参数进行评价。DING 等^[31]通过参数研究研究了流变参数和自重参数对固结沉降和固结速率的影响。刘晓磊等^[32]利用 R/S 流变仪对高浓度泥沙进行全剪切速率流变试验，分析了固结时间对流变特性的影响，结果表明屈服应力会在固结 120 min 后增加 35%。虽然研究人员探究了含水率和静置时间对多种土体的结构稳定性和流变特性的影响，但对滩涂土壤的研究却很少，此外，很多研究者并没有关注各因素之间是否存在交互作用对土壤结构稳定性和流变特性产生的影响，尤其是对滩涂土壤。因此，需要对滩涂土壤进行综合分析，来模拟滩涂复杂的环境，为研究不同环境下的滩涂机械的力学特性提供依据。

为了探究滩涂土壤的流变性质以及含水率和静置时间对土壤结构稳定性的交互作用，本论文通过获得不同剪切速率下的剪切应力和表观黏度的动态变化规律，模拟不同条件下土壤的流变特性；通过数值模型量化屈服应力与滩涂土壤含水率和静置时间的关系，以此来表达结构稳定性，为后续将流变参数引入现有的流变模型中为解决滩涂机械研究问题提供数据支撑，对于研究滩涂贝类采收机械适应不同环境的滩涂土壤具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的滩涂土壤取自宁波市镇江县的贝类养殖滩涂，在研究区选取两个取样点，取样点之间的距离为 20 km，根据农业标准（NY/T 1 121.3-2006）测定土壤的机械组成，根据《土工试验方法标准》确定滩涂土壤的液塑限，通过上述试验获得两种试样基本物理性质如表 1。

表 1 滩涂土壤基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of tidal flat soil

指标 index	1 号土 Soil grade 1	2 号土 Soil grade 2
有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	16.6	16.9
水分 Moisture content/%	22.9	22.0
pH 值 pH value	8.4	8.3
黏粒质量分数 Clay mass fraction/%	4.0	5.8
粉砂粒 Silt/%	54.4	54.2
砂粒 Sand/%	41.5	40.0
水分（风干后） Moisture content/%	2.3	2.0
液限 Liquid limit/mm	47.7	51.8
塑限 Plastic limit/mm	26.3	20.2

1.2 试验设计

1.2.1 单因素试验设计

为避免采样时由滩涂土体结构的破坏和重塑而引起的滩涂土与原滩涂土之间的土壤空间结构、土体颗粒之间的黏结力、土体颗粒之间的内摩擦角等物理性质的不同而引起的差异，本次试验全程采用重塑土进行流变剪切试验以一号土液限（47.7%）和二号土液限（51.8%）为基准，设计单因素滩涂土壤含水率分别为：62.0%、

64.5%、67.0% 和 69.5%，贝类的采收一般会在滩涂退潮时进行，通过调研当前宁波市镇江滩涂潮汐规律，同一天会出现两次退潮现象，每次退潮和涨潮的区域范围都会出现差异，从而导致部分区域持续处于静置的状态；因此设置试验中滩涂土壤的 4 个静置时长分别为：0、9、31 和 53 h，每组处理进行三组重复试验。

1.2.2 响应面试验设计

选用 RSM(response surface methodology) 中的 Central Composite Design 试验设计，针对不同的影响因素含水率 A 和静置时间 B，将滩涂土壤分为 5 个不同的编码水平，设置了 13 个土壤样本试验，其中有 5 个重复试验用于估计试验误差。RSM 试验因素水平及水平编码如表 2 所示。

表 2 RSM 试验影响因素及水平编码
Table 2 Influencing factors and level coding of RSM test

因素 Factor	编号 Factor number	编号值 Numbering value				
		-1.414	-1	0	1	1.414
含水率 Moisture content/%	A	61	62	64.5	67	68
静置时间 Standing time/h	B	0	9	31	53	62

1.3 样品制备

不同土壤含水率的样品制备：将滩涂土壤均匀混合烘干后，然后碾碎并且去除试样中的小石块和贝壳等杂质，过孔径为 2 mm 的筛，通过精密电子秤称取定量的试样，将称取的样品均匀地平铺在盘中，均匀的将水喷洒在样品上；不同的含水率（61.0%、62.0%、64.5%、67.0%、68.0% 和 69.5%）对应添加水的质量计算如下：

$$m_w = \frac{0.01m_0(W_1 - W_0)}{1 + 0.01W_0} \tag{1}$$

式中 m_w 为对应的含水率所需加的水量，g； m_0 为风干滩涂土的质量，g； W_1 为设定的含水率，%； W_0 为风干的含水率，%。

按计算出的水量，将水均匀地喷洒在样品的表面，使用搅拌棒充分搅拌均匀，将搅拌均匀的样品装入盛土容器中，并且使用保鲜膜进行密封，再经过 24 h 的时间，使得样品充分湿润，从而配置成不同含水率梯度的试样。

相同含水率下，不同静置时间的样品制备：称取过筛后自然风干的滩涂土土样，将上述相应梯度含水率的样品，充分湿润 24 h 后，再经过 5 min 的均匀搅拌，最后静置 3 min（为了使得样品处在相同的初始条件下进行静置），以此作为静置时间计时起点 0 h，然后将装有试样的盛土容器再次封装，根据设计的试验，制作相应静置时间（0、9、31、53 和 62 h）的样品，样品的制备均按照《土工试验方法标准》。

1.4 流变试验仪器与方法

采用 RheolabQC , Anton Paar , AT 流变仪测试滩涂土壤的流变特性，搭配十字剪切头如图 1 所示。试验时，将流变仪的剪切头平稳地插入制好的盛土容器静置 1 min，以减小由于插入转子而产生的扰动带来的误差，然后启动流变仪进行剪切试验，与流变仪搭配的智能控制软件会自动采集数据，得到不同剪切速率下的屈服应力和表观黏度。测量中是通过线性加速的方式控制剪切速率达到设定的目标值，设定转子以 0.01 s⁻¹ 的剪切速率开始旋

转, 通过线性加速到 120 s^{-1} , 然后以相同大小的加速度线性减小到 0.01 s^{-1} , 整个过程持续 480s。

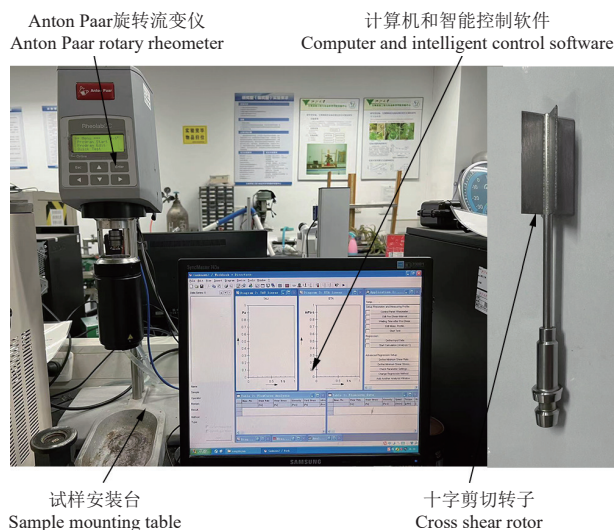


图 1 流变测试试验平台
Fig.1 Rheological test platform

2 剪切流变试验结果与分析

2.1 剪切流变特性

制备的滩涂试样包含结合水, 游离水, 固体颗粒,

固体颗粒因表面的结合水以及颗粒与颗粒之间的摩擦力形成稳定结构的水颗粒, 水颗粒之间由于水的毛细管力以及水界面的收缩水膜的作用力相互聚集形成絮凝体, 随着絮凝体的数量的增加, 会形成相对稳定的三维网状结构, 游离水游离于絮凝体的内部以及絮凝体之间。

图 2 为不同含水率的滩涂土壤在 4 种静置时间分别为 0、9、31 和 53 h 下的剪切应力与剪切速率曲线, 由图可以看出, 静置时间相同的情况下, 流变曲线变化规律大致相同, 当剪切速率在 $10 \sim 60 \text{ s}^{-1}$ 时, 含水率对滩涂土壤的剪切应力影响最为显著, 为了清晰表达滩涂土壤剪切应力在不同含水率和静置时间下的变化规律, 选取剪切速率为 $10 \sim 60 \text{ s}^{-1}$ 之间的平均剪切应力进行分析, 如图 3 所示, 相同静置时间下滩涂土壤剪切应力随着含水率的增加逐渐降低, 原因是由于随着含水率的增加, 滩涂试样中的结合水占比减少, 游离水占比增加, 使得颗粒之间的水膜厚度增加, 颗粒之间的摩擦力降低, 形成的三维网状结构变得松散, 降低了滩涂试样的抗剪切能力。此外, 图 3 中显示, 相同含水率下, 随着静置时间的增加滩涂土壤的剪切应力逐渐增加, 此现象是由于静置时间的增加, 滩涂试样内部结构三维网状结构的稳定性逐渐增加, 试样抗剪切能力也会有所提升。

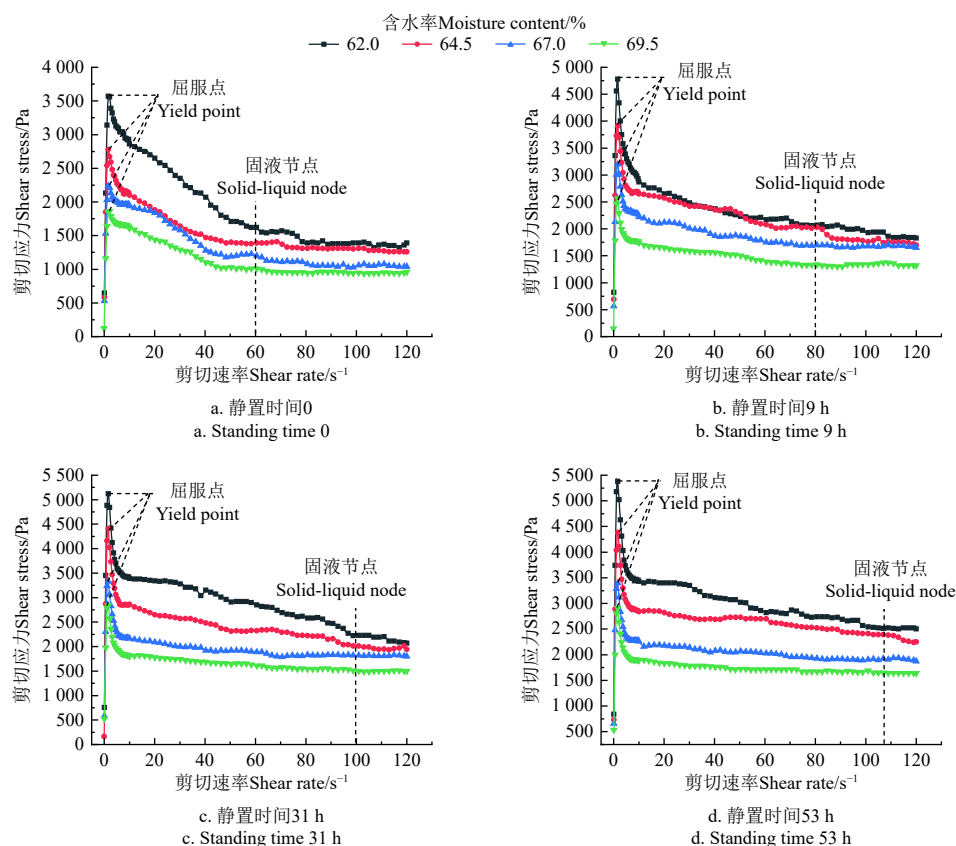


图 2 不同含水率下剪切应力与剪切速率的关系
Fig.2 Shear stress and shear rate at different water content

对比图 2 中的多条流变曲线还可知不同含水率及静置时间的流变曲线变化规律基本相同, 可将滩涂土壤在剪切载荷作用下的破坏过程分为 3 个流变阶段: 1) 屈服

点之前为弹塑性变形阶段, 剪切应力随着剪切速率的增加线性上升至屈服点, 此阶段滩涂试样表现了塑性变形的特征, 因其固态属性只发生变形不产生流动特性, 表

现出明显的土体强度, 且具有较高的能量, 所以具有较高抵抗变形的能力, 仅发生了塑性变形; 2) 屈服点与虚线之间为固液共存阶段, 屈服点后, 随着剪切速率的逐渐增加, 剪切应力迅速降低随后平稳下降。此阶段滩涂试样开始出现流动现象, 试样内部的能量被消耗, 并且滩涂试样的内部结构同时发生剪切破坏和重组, 破坏速度高于重组恢复速度, 这一现象通过剪切应力的降低宏观的表现出来, 所以此阶段固体和液体同时存在, 即显示了滩涂试样的固体属性又显示出了它的流体属性; 3) 虚线之后为流体阶段, 随着剪切速率的增加, 此阶段滩涂试样内部结构的破坏速度和重组速度非常接近, 剪切应力趋于稳定, 滩涂试样由固态向液态转化的过程基本完成, 滩涂试样获得了较大的流动特性。

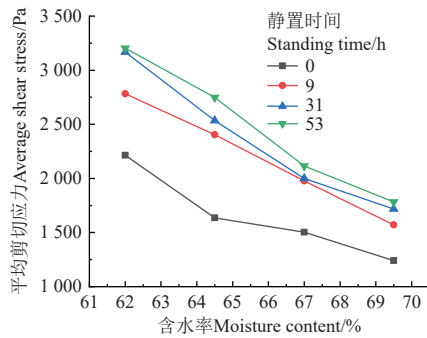


图3 不同静置时间下平均剪切应力与含水率的关系

Fig.3 Average shear stress and moisture content at different standing time

当静置时间不同, 流变曲线也存在差异, 从图3可

以看出, 随着静置时间的增加, 滩涂试样的固液转化阶段会越长, 达到平衡阶段就会越晚, 0、9、31和53h对应的固液转化阶段结束点(固液节点)分别出现在剪切速率为60, 90, 100, 107 s^{-1} 的附近, 可见静置时间越大, 固液节点出现时的剪切速率就会越大, 滩涂试样的固液转化阶段就会越长, 原因在于静置时间越长, 滩涂试样内部由水颗粒和絮凝体形成的三维网状结构就越稳定。

2.2 滩涂土壤剪切稀化特性

表观黏度是流体黏度的一种度量, 也是作用在流体上的剪切应力与剪切速率的比值, 表征流体流动时分子间产生的内聚力和内摩擦力, 也是区分牛顿流体和非牛顿流体的一个重要参数^[33], 反应了滩涂试样内部结构抵抗变形和阻碍试样流动的一种性质, 表观黏度越小试样越容易流动。通过滩涂土壤基本物理性质可知, 土壤中的黏粒和粉砂粒的组成占总共的58.4%, 由于粒径很小, 滩涂土壤中的颗粒会由于颗粒之间的结合水和摩擦力结合成稳定结构的水颗粒, 大量的水颗粒由于絮凝作用会逐渐连接成絮凝体, 随着絮凝体结构数量的增加, 絮凝体之间会发生连接, 形成一种稳定的三维网状结构, 具有一定的抗剪切能力。

图4为不同静置时间的滩涂土壤在4种含水率下的表观黏度与剪切速率的关系曲线, 从图中可以看出, 不同含水率及不同静置时间下的表观黏度与剪切速率曲线形状相似, 在低剪切速率下, 表观黏度会急剧降低, 随着剪切速率的进一步增大, 表观黏度呈线性关系减小。因此, 能够看出滩涂土壤属于非牛顿流体。表观黏度随着剪切速率增加不断降低, 故滩涂土壤具有剪切稀化的特性。

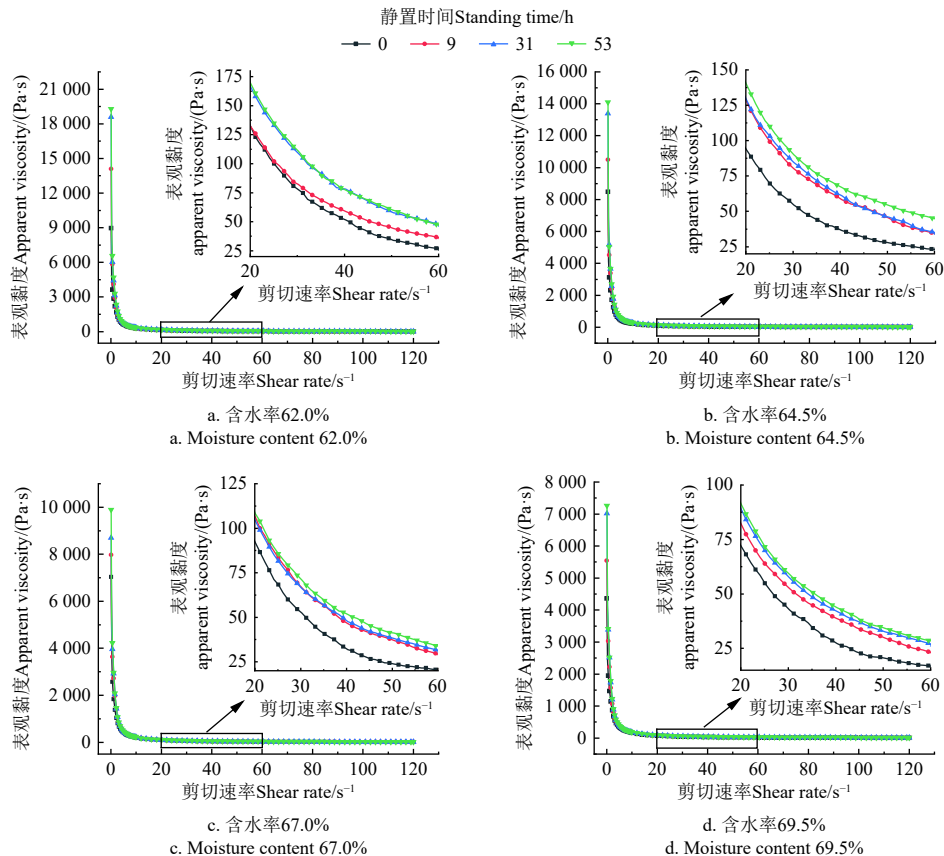


图4 不同静置时间下表观黏度与剪切速率的关系

Fig.4 Apparent viscosity and shear rate at different standing times

剪切稀化现象出现的原因：当滩涂试样开始受到外部载荷剪切时，滩涂试样的三维网状结构会因为外部载荷而发生破坏，导致三维网状结构整体变的非结构化，会导致剪切稀化现象。此外，滩涂试样内部的三维网状结构和絮凝体会因剪切作用而产生破坏，网状结构和絮凝体内部的结合水会发生脱离，此时，失去了稳定试样结构作用的结合水变成了具有润滑作用的游离水，随着游离水的增加，颗粒之间的水膜厚度增加，颗粒与颗粒之间的摩擦力降低，滩涂试样也会出现明显的剪切稀化现象。

由图4可以看出，相同含水率下，静置时间越大，黏度曲线会向上移动，黏度有上升的趋势，取剪切速率为 $20\sim 60\text{ s}^{-1}$ 时对应的表观黏度变化较为明显。此外，取静置时间为 0 h ，剪切速率为 $0.1\sim 120\text{ s}^{-1}$ 时， 62.0% 含水率试样黏度范围为 $11.1\sim 8\,950\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， 69.5% 含水率试样黏度范围为 $8.01\sim 4\,360\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，含水率对黏度的影响较为明显，同一静置时间下，含水率越高，表观黏度越小。整个剪切速率范围内，表观黏度在 $8.01\sim 19\,280\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 内变化。

2.3 单因素对屈服应力的影响

考虑到滩涂机械在滩涂上多次运行，每次运行会对滩涂土壤造成较大的扰动，扰动后的滩涂土壤经过自然沉静，沉静时，滩涂土壤会因触变性而恢复由颗粒形成的三维网状结构，随着三维网状结构的恢复，滩涂试样的流动性降低，黏性增加，这对于滩涂机械运行有较大的影响。因此需要研究沉静时间对滩涂土壤的剪切屈服应力的影响，以此作为研究设计滩涂机械的理论依据。在不同含水率下，测定了不同静置时间下的屈服应力，如图5所示。

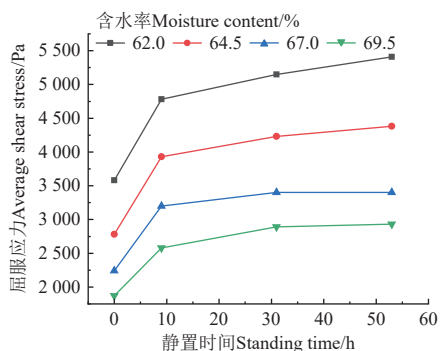


图5 不同含水率下屈服应力与静置时间的关系

Fig.5 Yield stress and resting time at different moisture content

静置时间在 $0\sim 9\text{ h}$ 之间时，含水率分别为 62.0% 、 64.5% 、 67.0% 和 69.5% 的试样对应的屈服应力随静置时间的平均变化率分别为： 133.3 、 127.8 、 106.7 和 78.9 Pa/h ，可见滩涂试样的屈服应力急剧增加，且含水率越低，屈服应力增长的越快，当静置时间为 $9\sim 31\text{ h}$ 时，含水率 62.0% 、 64.5% 、 67.0% 和 69.5% 对应的屈服应力随静置时间的平均变化率分别为： 16.8 、 13.6 、 9.1 和 8.3 Pa/h ，可见所有含水率试样的屈服应力增长的趋势明显降低，静置时间在 $31\sim 53\text{ h}$ 之间时，含水率 62.0% 、

64.5% 、 67.0% 和 69.5% 对应的屈服应力随静置时间的平均变化率分别为： 11.8 、 6.8 、 0 和 1.8 Pa/h ，可见含水率为 62.0% 和 64.5% 试样的屈服应力还在继续增加，但增长趋势与之前相比进一步下降；含水率为 67.0% 和 69.5% 的滩涂试样的屈服应力基本保持稳定。因此，可以推断存在一个含水率的分界点，此含水率分界点在 $64.5\%\sim 67.0\%$ 之间，当超过这个含水率分界点的试样在静置时间超过 31 h 时屈服应力随静置时间的变化率将保持稳定，屈服应力基本不会再发生较大的波动，且屈服应力在 $2\,240\sim 4\,380\text{ Pa}$ 之间，此外，不同静置时间下试样在含水率为 $62.0\%\sim 69.5\%$ 范围内，屈服应力在 $1\,870\sim 5\,410\text{ Pa}$ 之间。

此外，从图5中还可以看出，随着静置时间的增加，试样内部微观结构变的更加稳定，静置时间对屈服应力的影响逐渐减弱。原因是由于刚制备好的试样内部结构处于破坏状态中，由于试样的触变性试样内部的絮凝体和三维网状结构会随着静置时间而逐渐恢复。静置时间在 $0\sim 9\text{ h}$ 内的时候，由于试样内部结构大部分处于破坏状态，所以试样内部颗粒快速集结成絮凝体，大多数絮凝体迅速通过絮凝作用快速集结，形成三维网状结构，使得试样短时间内形成较为稳定的三维网状结构；静置时间在 $9\sim 31\text{ h}$ 的时候，前期大部分絮凝体已经形成的三维网状结构，随着静置时间的继续增加，试样内部自由絮凝体数量大大降低，絮凝速度降低，但依旧会增加试样的稳定性，并且三维网状结构会随着静置时间增加，变的更加紧实，增加了试样抵抗剪切破坏的能力，但屈服应力变化幅度相比较 $0\sim 9\text{ h}$ 显著降低；

最后图5还能显示出屈服应力会随着含水率的增加而逐渐降低，原因是由于随着含水率的增加，颗粒之间的水膜厚度增加，降低了颗粒之间的摩擦力，并且结合水的占比逐渐降低，游离水的占比逐渐增加，游离水在颗粒之间起到润滑的作用，进一步降低了颗粒之间的摩擦力，使得试样的黏度和屈服应力也随之降低；此外，随着含水率的增加，颗粒数量相对减少，形成的絮凝体数量降低，絮凝体形成三维网状结构变的松散，从而进一步降低了滩涂试样抵抗变形的能力。

2.4 响应面试验结果

按照 RSM (response surface methodology) 中的 Central Composite Design 试验设计的13组试验开展屈服应力的测试，试验方案和试验结果如表3所示。含水率(A)和静置时间(B)为影响因素，屈服应力(Y)为主要响应值的二次回归方程如(1)所示。

$$Y = 4334 - 970.24A + 407.81B - 107.5AB + 131.75A^2 - 280.75B^2 \quad (2)$$

式中Y为滩涂土壤的屈服应力的响应预测值，(Pa)；A和B分别为含水率和静置时间的实际值。根据回归方程结果，屈服应力(Y)与含水率(A)和静置时间(B)两个因素的二次回归方程拟合系数 $R^2=0.9202$ 接近于1，说明拟合度较高。

表 3 RSM 试验结果
Table 3 RSM test results

序号 Serial number	分类编号 Classify and code		屈服应力 Yield stress/Pa		误差 Error/%
	含水率 Moisture content A/%	静置时间 Resting time B/h	实际值 Actual value	预测值 Predicted value	
1	62.0	9	4 780	4 639.94	2.9
2	67.0	9	3 200	2 914.45	8.9
3	62.0	53	5 410	5 670.55	4.8
4	67.0	53	3 400	3 515.06	3.4
5	61.0	31	6 060	5 969.63	1.5
6	68.0	31	3 110	3 225.37	3.7
7	64.5	0	2 900	3 195.78	10.1
8	64.5	62	4 620	4 349.22	5.9
9	64.5	31	4 380	4 334.00	1.1
10	64.5	31	4 110	4 334.00	5.5
11	64.5	31	4 520	4 334.00	4.1
12	64.5	31	4 230	4 334.00	2.5
13	64.5	31	4 430	4 334.00	2.2

根据表 3 试验结果中的实际值与预测值生成如图 6 所示的滩涂土壤屈服应力实际值与预测值对比关系图，从图中可以发现滩涂土壤测量的屈服应力的实际值都分布在模型预测值的直线附近，所得的屈服应力实际值与预测值之间的最大误差为 10.1%，结果表明回归模型具有较高的可靠性。

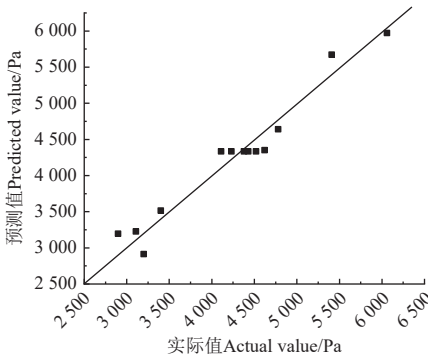


图 6 回归模型屈服应力的预测值与实际值对比
Fig.6 Comparison of predicted yield stress and actual yield stress in regression model

由表 4 可知，方程回归模型的决定系数 $R^2=0.953\ 4$ ， $P=0.000\ 2$ ，模型显著。失拟项 $P=0.088\ 8>0.05$ ，可知模型与纯误差失拟不显著，说明二次回归方程的拟合效果较好，响应面试验得到的回归方程能够有效的预测实际的滩涂土壤屈服应力值；数值模型的变异系数 CV 为 $6.12\%<10\%$ ，说明回归模型具有较高的可信性和精确性。由含水率（A）和静置时间（B）的 P 值可以判断两个试验因素对滩涂屈服应力有显著影响，且对屈服应力影响显著性大小为 $A>B$ ；AB 交互作用对应的 P 值为： $P=0.434\ 8>0.05$ ，所以 AB 的交互作用对屈服应力的影响不显著。

2.5 模型验证

单因素试验与响应面试验均采用相同的测量方法，通过单因素试验得到不同水平组合下的屈服应力值，并记录为实测值。将试验水平带入回归模型进行分析，通过模型计算得到的屈服应力值记录为预测值，结果见表 5。

表 4 回归模型方差分析
Table 4 Regression model analysis of variance

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	P 值 P-value	显著性 Significance
模型 Model	9.657×10^6	5	1.931×10^6	0.000 2	**
A	7.531×10^6	1	7.531×10^6	< 0.000 1	**
B	1.330×10^6	1	1.330×10^6	0.003 0	**
AB	46 225.00	1	46 225.00	0.434 8	
A ²	1.208×10^5	1	1.208×10^5	0.222 4	
B ²	5.483×10^5	1	5.483×10^5	0.024 6	**
残差 Residuals	4.715×10^5	7	67 354.29		
失拟项 Misfit	3.646×10^5	3	1.215×10^5	0.088 8	
纯误差 Pure error	1.069×10^5	4	26 730.00		
总和 Sum	1.013×10^7	12			

注：**说明影响显著（ $P<0.05$ ）； $R^2=0.953\ 4$ ； $CV=6.1\%$ 。
Note: **indicates that the item is significant（ $P<0.05$ ）； $R^2=0.953\ 4$ ； $CV=6.1\%$ 。

表 5 验证试验结果
Table 5 Verify test results

序号 Serial number	含水率 Moisture content/%	静置时间 Standing time/h	测量值 Measured value/Pa	预测值 Predicted value/Pa	误差 Error/%
1	62.0	31	5 150	5 434.82	5.5
2	64.5	9	3 930	3 645.44	7.3
3	67.0	31	3 400	3 494.00	2.8

由表 5 可知，总共验证三组数据点，滩涂土壤屈服应力测量值与预测值之间的误差为 5.5%、7.3% 和 2.8%，可见屈服应力的预测误差均在 15.0% 以内。通过上述测量评估可知，该试验模型能够较好地预测不同条件下滩涂土壤屈服应力的大小和变化规律，进一步说明回归模型的可靠性。

3 结 论

本文基于滩涂土壤制备高浓度试样进行了流变试验，得到不同含水率和静置时间下的流变曲线，研究了滩涂土壤的流变特性及各影响因素对屈服应力的影响，并且通过响应面试验得到预测屈服应力的数值模型。结论如下：

- 1) 剪切过程中，同一剪切速率下，整体剪切应力会随着含水率的增加逐渐降低，随着静置时间的增加而逐渐增加；此外，滩涂土壤具有固结的特性，静置时间越长，固液转化的过程就会越长，固液节点就会越晚到达。
- 2) 线性加速剪切下，不同静置时间滩涂土壤在四种不同含水率下的剪切应力随着剪切速率的增大呈先增大后减小的趋势。屈服应力随着含水率的增大而减小，随着静置时间的增大而增大，且存在一个含水率分界点，此含水率分界点在 64.5%~67.0% 之间，当超过这个含水率分界点的试样的静置时间超过 31 h 时，试样的屈服应力基本不会再发生较大的波动，且屈服应力在 2 240~4 380 Pa 之间，此外，静置时间在 0~53 h 之间且含水率在 62.0%~69.5% 之间的试样的屈服应力在 1 870~5 410 Pa

之间;表观黏度随着剪切速率的增大而减小,滩涂土壤表现出剪切稀化的特性,表观黏度变化范围为 8.01~19 280 Pa·s。

3) 通过 Response Surface Methodology 试验建立了用于预估屈服应力与含水率和静置时间之间的数值模型,模型的失拟项 P 值在 0.05 水平以上,且回归模型的决定系数 R^2 为 0.953 4,表明建立的数值模型具有较高的可靠性,并且含水率对屈服应力的影响相比较静置时间更加显著,但含水率与静置时间的交互作用对屈服应力的影响并不显著。在验证试验中,屈服应力的实测值与预测值基本吻合,误差低于 15.0%,进一步表明数值模型的可靠性。

本研究表明,土壤流变特性和结构稳定性与含水率和静置时间的交互作用并不显著,今后,研究人员可以进一步探究含水率、温度、盐度、有机质和粒径等因素之间的交互作用,来更好地反映滩涂土壤在各种环境下的流变特性和结构稳定性,为滩涂机械参数优化提供更加完善的数据支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 周井娟. 中国海洋贝类产业发展特征及技术变迁[J]. *中国渔业经济*, 2022, 40(2): 66-74.
ZHOU Jingjuan. Development path and technological changes of China's marine shellfish industry[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2022, 40(2): 66-74. (in Chinese with English abstract)
- [2] SUN L, PAN Y, WANG Y, et al. The effects of multiple parameters on initial apparent viscosity and rheological behavior in a liquid-phase paddy field[J]. *Journal of the Asabe*, 2022, 65(5): 1141-1148.
- [3] JIANG Q, CAO M, WANG Y, et al. Estimation of soil shear strength indicators using soil physical properties of paddy soils in the plastic state[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(12): 5609.
- [4] 蒋勤, 崔莉, 聂思航, 等. 长江口航道淤泥流变特性试验研究[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 79-87.
JIANG Qin, CUI Li, NIE Sihang, et al. Experimental study on rheological properties of soft mud in Yangtze River Estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 79-87. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨闻宇. 剪切载荷作用下高浓度粘性泥沙流变特性的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
YANG Wenyu. Experimental Study on the Rheological Properties of Dense Cohesive Sediments under Shear Loadings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李家平, 朱克超, 周旋, 等. 深海富稀土沉积物的流变特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S1): 348-356.
LI Jiaping, ZHU Kechao, ZHOU Xuan, et al. Rheological properties of REY-rich deep-sea sediments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S1): 348-356. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭兴森, 年廷凯, 范宁, 等. 低温环境下南海海底泥流的流变试验及模型[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(1): 161-167.
GUO Xingsen, NIAN Tingkai, FAN Ning, et al. Rheological tests and model for submarine mud flows in South China Sea under low temperatures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(1): 161-167. (in Chinese with English abstract)
- [8] KEMPER W D, ROSENAU R C, DEXTER A R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(4): 860-867.
- [9] TANAKA N, GRAHAM J, CRILLY T. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures[J]. *Engineering Geology*, 1997, 47(4): 339-350.
- [10] KORENKOVA L, URIK M. Infiltration variability in agricultural soil aggregates caused by air slaking[J]. *Eurasian Soil Science*, 2018, 51(4): 428-433.
- [11] JOZEFACIUK G, ADAMCZUK A, SKIC K, et al. New method for quantifying water stability of soil aggregates from air bubbling after immersion[J]. *Measurement*, 2020, 155: 107569.
- [12] BAYESTEH H, SHARIFI M, HAGHSHENAS A. Effect of stone powder on the rheological and mechanical performance of cement-stabilized marine clay/sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120792.
- [13] NOUREDDINE O, MANSSOURI I, SAHBI H, et al. Rheological and physico-mechanical investigations on the destabilization of unfired clay bricks with almond husk additive by salt[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 375: 130971.
- [14] YIN J, HU M, XU G, et al. Effect of salinity on rheological and strength properties of cement-stabilized clay minerals[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 38(5): 611-620.
- [15] HOLTHUSEN D, PÉRTILE P, AWE G O, et al. Soil density and oscillation frequency effects on viscoelasticity and shear resistance of subtropical oxisols with varying clay content[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 203: 104677.
- [16] DONG C, YU G, ZHANG H, et al. Experimental study on the viscosity of soft cohesive sediments around a vibrating pillar[J]. *China Ocean Engineering*, 2022, 36(2): 289-298.
- [17] KASHANI M M, HIN L S, IBRAHIM S B, et al. An investigation into the effects of particle texture, water content and parallel plates' diameters on rheological behavior of fine sediment[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(2): 120-130.

- [18] MARKGRAF W, WATTS C W, WHALLEY W. R, et al. Influence of organic matter on rheological properties of soil[J]. *Applied Clay Science*, 201264 25-33.
- [19] GUI Y, ZHANG Q, QIN X, et al. Influence of organic matter content on engineering properties of clays[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021((2)): 1-11.
- [20] WANG M, JIN G, XIONG Y. *Advances in Civil Function Structure and Industrial Architecture*[M]. London: CRC Press, 2022: 267-273.
- [21] YUAN J, YE L, HU G, et al. Experimental study on the influence of granulometric and material compositions on soil rheological properties[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, 57(1): 35-42.
- [22] 王金晓, 胡斐南, 许晨阳, 等. 基于流变学法研究容重和含水率对土壤结构力学稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 147-155.
WANG Jinxiao, HU Feinan, XU Chenyang, et al. Effects of soil bulk density and water content on the mechanical stability of soil structure using rheological method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 147-155. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张健乐, 史东梅, 刘义, 等. 土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 162-167.
ZHANG Jianle, SHI Dongmei, LIU Yi, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 162-167. (in Chinese with English abstract)
- [24] LIU G, XIA J, ZHENG K, et al. Effects of moisture content and tillage methods on creep properties of paddy soil[J]. *Plos One*, 2021, 16(6): e0253623.
- [25] 梁志超, 张爱军, 任文渊, 等. 不同含水率高易溶盐含量的伊犁黄土流变特性[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5): 90-99.
LIANG Zhichao, ZHANG Aijun, REN Wenyuan, et al. Rheological properties of the high soluble salt content Ili loess with different water contents[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(5): 90-99. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张少雄, 宋涛, 郝鑫平, 等. 赤泥浆体流变特性和流变模型适用性研究[J]. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 2023, 45(1): 48-53.
ZHANG Shaoxiong, SONG Tao, HAO Xiping, et al. Study on rheological properties of red mud and feasibility of rheological model[J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*, 2023, 45(1): 48-53. (in Chinese with English abstract)
- [27] ZHENG K, CHENG J, XIA J, et al. Effects of soil bulk density and moisture content on the physico-mechanical properties of paddy soil in plough layer[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2290.
- [28] 陈宝, 尚心悦, 束庆霏, 等. 流塑态膨润土凝结强度的时间效应研究[C]// 北京: 科学出版社. 2021 年全国工程地质学术年会论文集, 2021: 45-51.
CHEN Bao, SHANG Xinyue, SHU Qingfei, et al. Study on time effect of the setting strength of flow-plastic bentonite[C] //Beijing: Science Press. *Proceedings of the 2021 National Engineering Geology Annual Conference*, 2021: 45-51. (in Chinese with English abstract)
- [29] 钟翼进, 何倍, 任强, 等. 不同因素对建筑渣土泥浆流变性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(8): 814-822.
ZHONG Yijin, HE Bei, REN Qiang, et al. Influence of different factors on the rheological oroperties of construction waste mud[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8): 814-822. (in Chinese with English abstract)
- [30] ABHIJEET S, PRIYANKA G. Determination of viscoelastic properties of soil and prediction of static and dynamic response[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(7): 1-11.
- [31] DING P, XU R, JU L, et al. Semi - analytical analysis of fractional derivative rheological consolidation considering the effect of self - weight stress[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2021, 45(8): 1049-1066.
- [32] 刘晓磊, 陈安铎, 张红, 等. 黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙流变特性及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2021, 43(5): 127-134.
LIU Xiaolei, CHEN Anduo, ZHANG Hong, et al. Rheological characteristics and its influencing factors of dense cohesive sediments in the Huanghe River subaqueous delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(5): 127-134. (in Chinese with English abstract)
- [33] 范宁, 年廷凯, 赵维, 等. 海底泥流的流变试验及强度模型[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3195-3202.
FAN Ning, NIAN Tingkai, ZHAO Wei, et al. Rheological test and strength model of submarine mud flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3195-3202. (in Chinese with English abstract)

Experiment on the rheological properties of tidal flat soil with moisture content and standing time

LIANG Xifeng¹, SHI Yannan¹, QIN Yebo², YAO Ying², ZHANG Hui², WANG Yongwei³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Agricultural Technical Extension Center, Hangzhou 310000, China;

3. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This study aims to determine the rheological properties and structural stability of the beach soil for shellfish cultivation. A series of rheological tests were carried out on the beach soil with different water content and standing time using a rotary rheometer. A single-factor test was also conducted to explore the influence of water content and standing time on the rheological properties of the beach soil. The soil shear was then analyzed to determine the influence of water content and standing time on yield stress. At the same time, the numerical model was established for the yield stress, water content and resting time after the central composite design (CCD) test in the response surface method (RSM). A comparison was then made on the influence of water content and resting time on yield stress. Finally, the reliability and accuracy of the regression model were further verified to compare the error between the measured and the actual values. The results show as follows: 1) The shear stress gradually decreased with the increase of water content under the same shearing rate in the shearing process, whereas there was a gradual increase with the increase of standing time; In addition, the beach soil was characterized by the consolidation. The longer the static time was, the longer the solid-liquid transformation was, and the later the solid-liquid node was. The static time shared the greatest impact on the solid-liquid node in the early stage. The longer the static time was, the smaller the impact on the solid-liquid node was. 2) When the average shear stress and yield stress were at the shear rate of $10 - 60 \text{ s}^{-1}$ under the same standing time, the overall shear stress of the tidal flat soil gradually decreased with the increase of water content, thus reducing the structural stability of the tidal flat soil. In addition, the overall shear stress of the tidal flat soil gradually increased under the same moisture content with the increase of static time, indicating the increase in the structural stability of tidal flat soil. The change rate of yield stress with the static time showed that there was a cut-off point of moisture content in the beach soil, which was between 64.5% and 67.0%. In the samples exceeding this moisture content cut-off point, the change rate of yield stress with the static time remained stable after the static time exceeded 31 h, where there was no fluctuation in the yield stress. The yield stress ranged from 2 240 to 4 380 Pa. In addition, the yield stress in the sample of 62.0%-69.5% was between the 0-53 h, and the yield stress between 62.0%-69.5% was between 1 870-5 410 Pa. 3) The P and R^2 values of numerical models were above 0.05, and 0.953 4, respectively, indicating the high reliability and accuracy. There was a more significant influence of water content on the yield stress, compared with the resting time. However, the interaction between water content and resting time shared no significant influence on the yield stress. The test verified that the measured yield stress was basically consistent with the predicted one, with an error of less than 15.0%. The rheological properties of beach soil can be better characterized as well. The findings can provide a strong reference for the research and optimization of beach shellfish harvesting machinery.

Keywords: moisture content; response surface methodology; standing time; tidal flat soil; rheological properties; yield stress