

稳态剪切条件下中国南海软黏土的相态转变特性及流变模型

刘杰锋¹, 李 飒¹, 段贵娟², 王奕霖¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 华东勘测设计院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘 要: 海底沉积物在流变剪切过程中相态转变特性的研究和流变模型的建立对海底构筑物的安全评估具有重要意义。以中国南海软黏土为原材料, 制备了 5 组不同含水率的试样, 采用 MCR302 流变仪开展了一系列不同环境温度条件下的流变试验。试验结果表明, 随剪应变的增大, 剪应力呈现先快后慢的增大规律, 而表观黏度呈现先快后慢的减小规律。剪应力和表观黏度随含水率的增加而较小, 随温度的降低而提高。在流变剪切过程中软黏土出现了相态转变, 其相态转变可利用动态和静态屈服应力进行划分, 并根据试验结果建立了动态和静态屈服应力的模型。此外根据试验结果, 还建立了考虑含水率和温度影响的南海软黏土 Dual-Bingham 流变模型, 并验证了模型的可行性。研究结果可以为南海海底构筑物稳定的数值模拟提供基础模型。

关 键 词: 南海软黏土; 相态转变; 含水率; 温度; 流变模型

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 增刊-0341-09

Phase transition properties and rheological model of soft clay in South China Sea in steady rheological tests

LIU Jie-feng¹, LI Sa¹, DUAN Gui-juan², WANG Yi-lin¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311100, China)

Abstract: Study on the phase transition properties and rheological model of submarine sediments during rheological testing is of great significance to the safety assessment for submarine structures. Using the soft clay in South China Sea, five group samples with different water contents were prepared, and a series of rheological tests under different temperature was carried out using the MCR302 rheometer. The results show that shear stress increases rapidly then increases slowly with increasing shear rate, while apparent viscosity decreases rapidly then decreases slowly. The shear stress and apparent viscosity decrease with increase in water content, and they increase with decrease in temperature. Phase transition happens in soft clay during shearing and can be divided into static and dynamic yield stresses, and the models for static and dynamic yield stresses were established on the basis of experimental results. In addition, Dual-Bingham rheological model considering effects of water content and temperature for soft clay from South China Sea was established, and the efficiency of model was verified. The results of this paper can provide basic model for the numerical analysis of submarine structure stability in South China Sea.

Keywords: soft clay in South China Sea; phase transition; water content; temperature; rheological model

1 引 言

海底蕴藏着丰富的石油、天然气和矿物资源, 海底资源的开发受到了越来越多的关注, 世界各国都在加大对海底资源开发的投入^[1]。海底沉积物具

有高含水率、高液限、高塑性、低模量、低强度等特点^[2]。在海流和人类活动等剪切荷载作用下, 海底沉积物会经历从固相到液相的转变, 从而对海底构筑物的稳定和安全造成影响^[3-4]。深入了解海底沉积物在剪切荷载作用下的相态转变特性, 并建立相

收稿日期: 2022-02-16

录用日期: 2022-09-19

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (No.51890911)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51890911).

第一作者简介: 刘杰锋, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: ljf_187@tju.edu.cn

通讯作者: 李飒, 女, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋岩土方面的教学和研究工作。E-mail: lisa@tju.edu.cn

应的流变模型,可为海洋工程结构物的稳定性评估提供科学依据^[5]。

国内外学者针对沉积物在剪切条件下的流变行为和相态转变特性开展了一定的研究。Major 等^[6]用黏度计测量了粒径小于 2 mm 的天然泥石流沉积物浆的流变特性,发现随着沉积物浓度的增加,流变参数变化了约 3 个数量级。Coussot 等^[7]研究了高岭土、黏土以及泥石流材料的流变特性,发现材料类型、含水率和 pH 对流变特性影响明显。Huang 等^[8]采用 RMS-605 流变仪对杭州湾泥石流土体进行了稳态剪切试验研究,验证了 Dual-Bingham 模型的可行性。Jeong 等^[9]研究了低活性黏土、高活性黏土和粉土的流变特性,发现低活性黏土和高活性黏土均表现出剪切稀释行为。Boukpeti 等^[10]进行了落锥、十字板、旋转黏度计、T-bar 等试验来描述不同剪切速率下的土体强度,建立了可适用于土体从固相到液相转变的强度模型。杨闻宇^[11]认为在稳态剪切荷载作用下,高浓度黏性泥沙经历了固相到液相相态转化过程,并分析了试验材料、含水率、粒径组成、泥沙浓度对流变特性的影响。范宁等^[12]利用新型全流动贯入仪和 RST 流变仪,探究了含水率对模拟海底泥流强度、屈服应力和表观黏度的影响,建立了不排水剪切强度模型。Nie 等^[13]根据连云港天然软泥流变曲线的特征,也划分了其在剪切过程中的 3 个不同相阶段。可以看到,目前沉积物流变特性的研究主要集中在天然泥石流材料以及河流湖泊沉积物,关于海底沉积物流变特性的研究还较少;且缺乏定量化描述剪切过程中相态转变特性的方法。

此外,邹大鹏等^[14]指出海底沉积物所处的温度环境与水深相关,表现为随着水深增加,沉积物的温度降低,大陆架表面与水深 1 000 m 处温差可达 20 ℃ 以上。郭兴森^[15]、李家平^[16]等初步的低温流变试验表明,温度对海底沉积物流变特性的影响不可忽略。目前,温度对海底沉积物在稳态剪切条件下流变行为和相态转变特性的影响,还有待于进一步的深入研究。

我国南海海底蕴藏着丰富的矿物资源,研究南海软黏土在稳态剪切条件下的相变特性和流变行为,对于我国南海海底资源的开采有着重要意义。本文将南海软黏土重塑制备了 5 组不同含水率的试样,分别在 7 个不同温度条件下,采用 MCR302 旋转流变仪进行了共计 35 次稳态流变试验,分析了南海深海软黏土在剪切过程中的相态转变特性,研究了含水率和温度对流变特性的影响,建立了考虑含水率和温度影响的南海软黏土 Dual-Bingham 流变模型。

2 试验原理与内容

2.1 试验材料与仪器

试验土样取自南海海底,取样区域水深约 1 000 m。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[17]对土样进行基本物理性质测试,包括颗粒分析试验、液塑限试验和相对密度试验。土样的级配曲线如图 1 所示,基本物理指标见表 1。可以看到,本文土样属于低液限黏土。

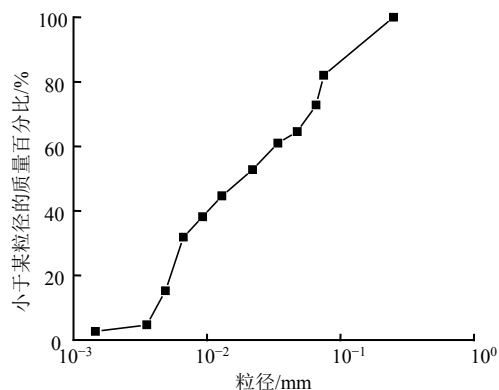


图 1 颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution

表 1 土样的基本物理指标

Table 1 Physical indexes of test soil

含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	土的相对密度	黏粒含量/%	中值粒径/mm
27.1	33	17	16	2.7	8.11	0.018 64

本文试验采用的是 MCR302 高级流变仪,与流变仪配套的仪器包括空气压缩机、低温恒温槽和计算机设备。该套设备来自天津大学化学工程联合重点实验室。图 2(a)所示为 MCR302 高级流变仪的主机及各部分结构示意图。主机部分主要由升降马达、测量头、转子系统、显示屏与控制按键等各部分构成。此外,流变仪转子系统中内嵌有 Peltier 自动控温系统,可以实现-40~200 ℃ 的温度控制,进行不同温度条件下的流变试验。

试验中转子系统采用的是 CC27 同轴圆筒转子系统,该转子系统常被用于黏性液体、黏弹性液体流变特性的测量,适用于中低黏度材料的测量。该转子系统由两个同轴的圆筒构成,一般是外筒固定,内筒转动,样品放置在同轴圆筒之间,其结构见图 2(b)。表 2 所示为本文所用 MCR 302 流变仪的主要技术参数。同轴圆筒间测量材料的剪切应力、剪应变率和表观黏度可以表示为

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 (R - r)} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{r}{R-r} \omega \quad (2)$$

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (3)$$

式中: τ 为剪切应力; M 为扭矩; R 为外筒转子半径; r 为内筒转子半径; $\dot{\gamma}$ 为剪应变率; ω 为转动角速度; η 为表观黏度。

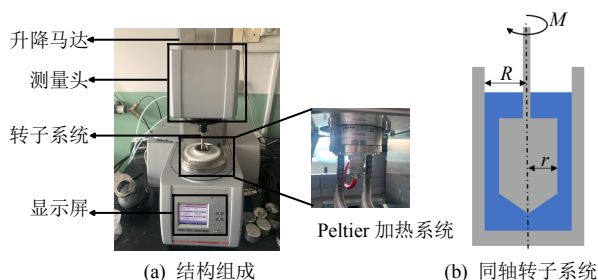


图2 MCR302 高级流变仪
Fig.2 MCR302 rheometer

表2 MCR 302 流变仪的主要技术参数
Table 2 Specifications of MCR 302 rheometer

外筒半径/mm	内筒半径/mm	间隙比	圆筒高度/mm	装样体积/mL
14.46	13.338	1.084	39.996	19

2.2 试验内容与步骤

探究土样在不同的含水率 (40.0%、50.0%、56.7%、66.7%、73.3%)、不同温度 (1、5、9、13、17、21、25 °C) 条件下的流变特性, 在剪切速率范围为 $0.1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$, 共进行 35 组稳态流变剪切试验。试验步骤如下:

(1) 制备不同含水率的土样

为保证试样的均匀性, 已对足量的土样进行烘干、碾碎、去除贝壳类等杂质的操作。为制得特定含水率的土样, 取适量的风干试样加入不同质量的自来水并放在烧杯中进行搅拌, 使土样与水充分混合, 在搅拌的过程中, 土样的微观结构已发生了改变, 需将试样静置 30 min, 使其微观结构进行恢复。

(2) 装样

控制程序使转子上升至一定高度后, 将制备的含有特定含水率的适量土样装入圆筒中, 操控程序使转子下降至测量位置处, 将多余的土样刮去, 避免土样的浪费。

(3) 设置测试程序

该流变仪的主机由计算机控制, 需在计算机上设置特定的试验程序, 方可进行试验。为测定不同温度下不同含水率试样的剪切应力与剪应变率的关系,

调用程序面板上流变曲线模块, 并在该模块上添加“温度”控制项。本试验中共有 7 个温度, 每次试验时为使土样内外部温度均达到目标温度, 设置温度时间上限为 5 min (即设置帕尔贴加热系统达到目标温度后, 保持该温度时间为 5 min, 超过该时间程序自动启动开始试验)。

“温度”控制项后面设置“测试流变曲线”控制项, 在此控制项中, 剪切速率设置从 $0.1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 线性变化, 取点数目为 100 个, 每 2 s 变化一次剪切速率, 每次剪切速率增加 1.01 s^{-1} ; “测试流变曲线”控制项后添加“数据分析”控制项, 利用主机自带的流变模型进行拟合分析, 预判剪切应力与剪应变率的变化关系。“数据分析”控制项后设置“测试报告”控制项, 调用需要输出的数据变量, 如本次试验后需要输出的变量有剪切应力、剪应变率和表观黏度。

(4) 测试及后处理

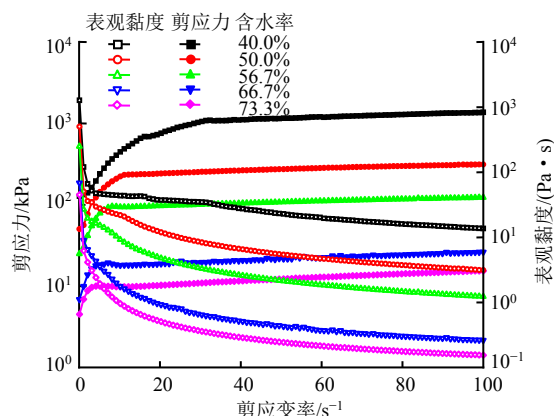
测试程序设定后, 即可开始试验, 注意在试验过程中, 圆筒需处于固定状态。试验结束后, 将剪切应力、剪应变率和表观黏度等数据进行备份。

(5) 测试结束后测定含水率

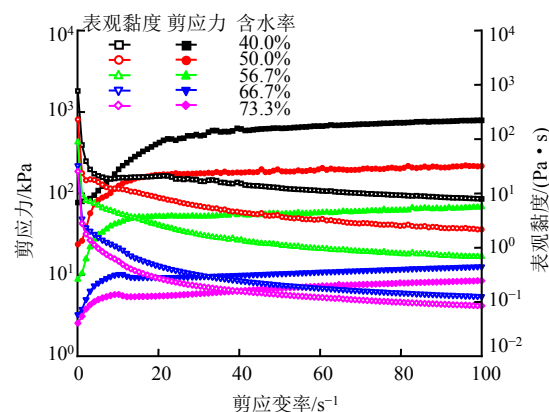
本文试验的最高温度为 25 °C, 即在室温下进行, 最低温度为 1 °C, 温度从高至低依次进行试验, 为避免由于试验时间过长导致水分的蒸发而引起含水率的微小变化, 试验结束后, 分别取 10~20 g 试样放入两个铝盒中, 进行烘干称量。对比每次试验前后含水率, 结果表明含水率仅仅发生 1% 的变化, 可忽略不计。试验结束后, 清洗同轴圆筒和转子并烘干后, 方可进行下一次试验。

3 试验结果分析

不同温度条件下 5 种含水率试样的流动曲线如图 3 所示 (限于篇幅, 只给出温度 1 °C 和 25 °C 温度条件下的流动曲线), 可以看到, 不同含水率的试样表现出非牛顿流体的典型特征, 随着剪应变率的增加, 剪切应力主要呈现出先快后慢的增加趋势, 而表观黏度主要表现出先快后慢的降低趋势, 试样表现出剪切稀释流体的特征, 这与已有的对湖泊沉积物^[11]、天然软泥^[13]、海底沉积物^[15]和黏土^[18]的流变试验结果一致。当含水率从 40.0% (1.2 倍液限) 变化到 73.3% (2.44 倍液限) 时, 剪应力最大可跨越 3 个数量级。当剪应变率从 0.1 s^{-1} 变化到 100 s^{-1} 时, 表观黏度会降低 2~3 个数量级。在同一剪应变率下, 随着含水率的增加, 剪切应力与表观黏度降低, 这与前人的研究结果一致^[13, 15]。



(a) 温度为 1 °C



(b) 温度为 25 °C

图 3 不同温度条件下 5 个含水率试样的流动曲线

Fig.3 Rheological curves of samples for five water contents under different temperatures

从图 3 中可以看到, 土体的流变曲线具有明显的分段性, 这一特征通过对剪应力—剪应变率曲线求一阶导数得到的曲线显示的更加明显。根据一阶导数的曲线特征, 可以将剪切的全过程分为 3 个不同相态(以 40% 含水率试样在 1 °C 条件下的流变曲线为例, 如图 4 所示):

(1) 固相: 试样表现出固体的性质, 试样在该阶段抵抗变形和流动的能力是最强的, 试样内部的结构是相对完整的。该阶段的结束点为一阶导数的最高点, 在该点对应的剪切速率下, 剪切应力的增加速度最快, 相应的剪切应力本文称为动态屈服应力 τ_d 。此阶段剪切应力随着剪应变率的增加主要呈现增加趋势, 而表观黏度则随着剪应变率的增加快速减小。

(2) 固相—液相转化: 试样表现出固体和液体混合体的性质, 在该阶段抵抗变形和流动的能力较固相阶段减弱, 部分内部结构已经被破坏。该阶段的结束点为一阶导数的稳定点, 在该点对应的剪切速率下, 剪应力的增大开始变得平稳, 相应的剪切

应力本文称为静态屈服应力 τ_s 。此阶段剪切应力随着剪应变率的增加快速增加, 表观黏度随着剪应变率的增加继续减小, 但其减小速率较固体阶段降低。

(3) 液相: 试样表现出流体的性质, 在该阶段抵抗变形和流动的能力是最弱, 内部结构已经被完全破坏, 像流体一样流动。此阶段剪切应力随剪应变率的增加基本上呈线性增加, 表观黏度随剪应变率的增加线性减小。

显然, 当剪切应力小于动态屈服应力时, 软黏土表现出固体的特性; 当剪切应力大于静态屈服应力时, 软黏土表现出流体的特性。而当剪切应力介于动态屈服应力和静态屈服应力之间时, 软黏土表现出固体和流体混合体的性质。

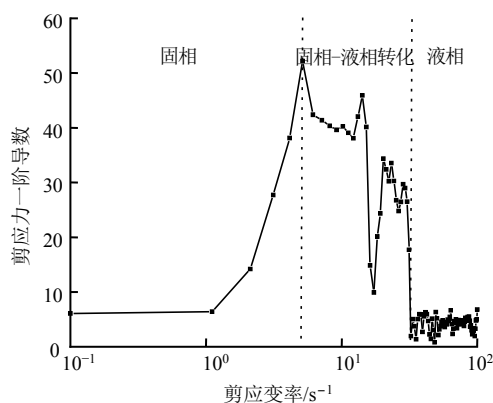
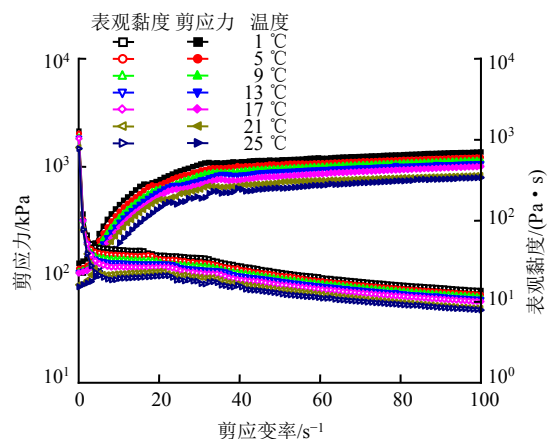


图 4 含水率 40% 试样在温度为 1 °C 时稳态剪切过程中的 3 个相划分

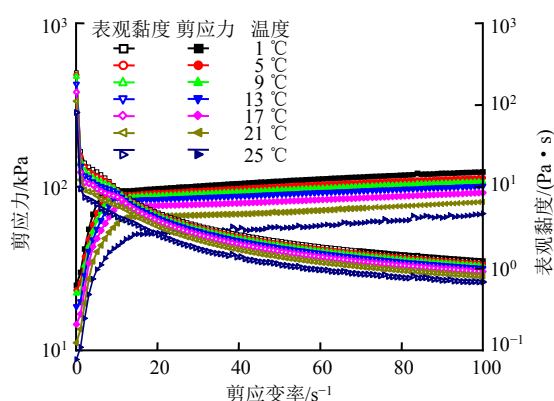
Fig.4 Three phase stages during shearing process for sample with water content 40% under 1 °C

图 5 为不同含水率试样在 7 种不同温度条件下的流动曲线(限于篇幅, 只给出 40.0%, 56.7%, 73.3%, 3 种含水率条件下的曲线)。可以发现, 随着温度的降低, 在同一剪应变率下, 剪切应力和表观黏度增加, 当温度从 25 °C 降低到 1 °C 时, 剪应力和表观黏度最大增加达到 65%。这是因为随着温度的减小, 粒子的热运动减小, 试样中固体颗粒和水分子的动能减少, 导致试样流动的阻力增大, 从而使得流动更加困难, 表现出随温度降低剪切应力和表观黏度增加的现象^[15, 19]。综上所述, 温度和含水率是影响南海软黏土流变特性的两个重要因素。

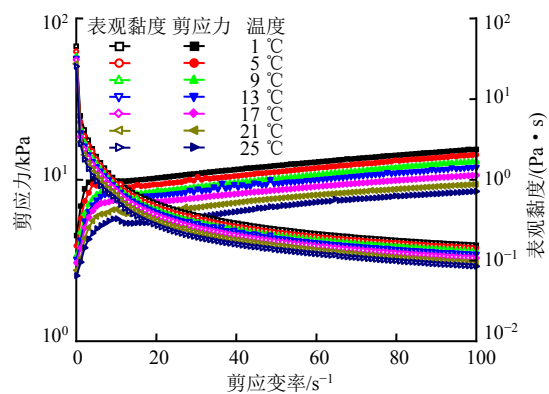
此外, 温度和含水率也影响动态和静态屈服应力的大小。随着含水率的增加和温度的升高, 动态和静态屈服应力均减小。有效地确定动态和静态屈服应力的大小能够为合理判断软黏土的状态提供依据, 从而为海底工程安全服务。因此, 有必要建立



(a) 含水率为 40.0%



(b) 含水率为 56.7%



(c) 含水率为 73.3%

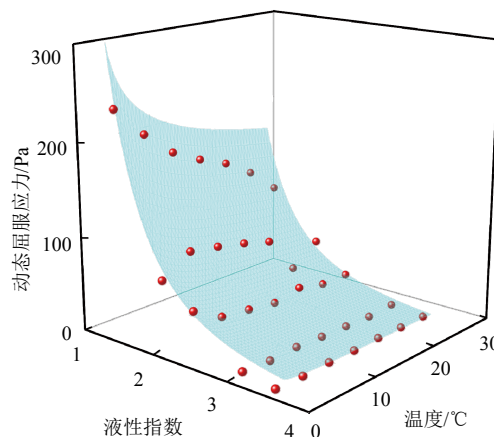
图 5 不同含水率试样在 7 个温度条件下的流动曲线

Fig.5 Rheological curves of samples for seven temperatures under different water contents

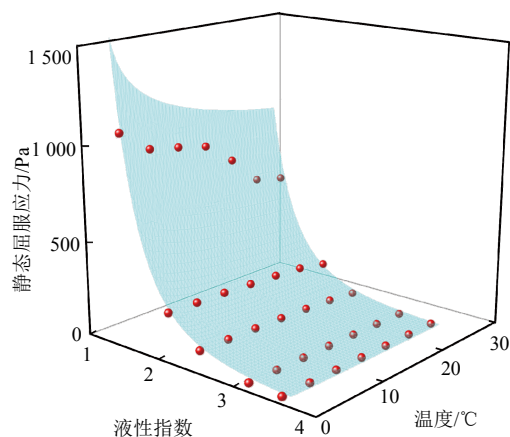
动态和静态屈服应力的模型。图 6 所示为动态和静态屈服应力与温度和液性指数在三维坐标系中的关系, 可以采用非线性曲面拟合, 如下式所示, 动态屈服应力和静态屈服应力的拟合 R^2 分别为 0.952 和 0.980, 拟合效果良好。

$$\tau_d = \frac{718.538}{LI^{2.907} T^{0.174}} \quad (4)$$

$$\tau_s = \frac{5217.499}{LI^{4.167} T^{0.134}} \quad (5)$$



(a) 动屈服应力与液性指数和温度的关系



(b) 静屈服应力与液性指数和温度的关系

图 6 屈服应力与液性指数和温度的关系

Fig.6 Relationship between yield stress and liquidity index and temperature

式中: LI 为液性指数, $LI = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$, w 为试样含水率, w_L 为液限, w_p 为塑限; T 为温度。

4 流变模型

4.1 经典流变模型

流动类材料的剪应力—剪应变率关系通常用流变模型表述, Bingham 模型^[20]是最常见的流变模型之一, 可用下式表示:

$$\tau = \tau_y + \eta_h \dot{\gamma} \quad (6)$$

式中: τ_y 为屈服应力; η_h 为塑性黏度。

该模型被广泛用来描述牛顿流体的流变特性。

Herschel-Bulkley 模型^[21]是 Bingham 模型的一个一般化模型, 可用下式表示:

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n \quad (7)$$

式中: K 为一致性系数; n 为流动指数。

Bingham 模型的另一个一般化模型是 Dual-Bingham 模型^[7], 又称双线性模型, 可用下式表述:

$$\tau = \begin{cases} \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c \\ \tau_\infty + \eta_\infty \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: τ_0 为零剪切应力; η_0 为零表观黏度; τ_∞ 为 Dual-Bingham 屈服应力; η_∞ 为 Dual-Bingham 表观黏度; $\dot{\gamma}_c$ 为临界剪应变率。

此外, 常见的流变模型还有幂律模型^[17]和双曲模型^[12]公式为

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

$$\tau = \tau_y + A \dot{\gamma} / (1 + B \dot{\gamma}) \quad (10)$$

式中: A 、 B 均为拟合参数。

虽然已有的经典流变模型在表述材料的流变特性时有着广泛的应用, 且能够通过考虑含水率对模型中参数的影响进而考虑含水率对流变特性的影响, 但是考虑温度影响的流变模型还很缺乏。本文的试验结果表明 (见图 5), 温度对南海软黏土流变特性的影响不可忽略, 有必要建立同时能够考虑含水率和温度影响的流变模型。

4.2 考虑含水率和温度的南海软黏土流变模型

试验数据显示, 本文各个含水率和温度条件下南海软黏土的流动曲线与 Dual-Bingham 模型 (见式 (8)) 比较接近, 故选用该模型作为南海软黏土流变模型的基础。表 3 所示为采用 Dual-Bingham 模型拟合流变曲线的结果。流变模型中的参数将考虑含水率和温度的影响。

以含水率和温度为自变量, Dual-Bingham 流变模型中的参数为因变量, 在三维坐标系下拟合非线性曲面, 对模型参数 τ_0 、 η_0 、 τ_∞ 、 η_∞ 、 $\dot{\gamma}_c$ 的拟合结果见表 4。拟合方程如下:

$$\tau_0 = \frac{1}{a_1 \cdot w^{b_1} \cdot T^{c_1}} \quad (11)$$

$$\eta_0 = \frac{1}{a_2 \cdot w^{b_2} \cdot T^{c_2}} \quad (12)$$

$$\tau_\infty = \frac{1}{a_3 \cdot w^{b_3} \cdot T^{c_3}} \quad (13)$$

$$\eta_\infty = \frac{1}{a_4 \cdot w^{b_4} \cdot T^{c_4}} \quad (14)$$

$$\dot{\gamma}_c = \frac{1}{a_5 \cdot w^{b_5} \cdot T^{c_5}} \quad (15)$$

式中: $a_1 \sim a_5$ 、 $b_1 \sim b_5$ 、 $c_1 \sim c_5$ 均为拟合参数。

将式 (11) ~ (15) 代入式 (8), 即可得到南海软黏土的流变模型:

$$\tau = \begin{cases} \frac{1}{a_1 \cdot w^{b_1} \cdot T^{c_1}} + \frac{1}{a_2 \cdot w^{b_2} \cdot T^{c_2}} \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} < \frac{1}{a_5 \cdot w^{b_5} \cdot T^{c_5}} \\ \frac{1}{a_3 \cdot w^{b_3} \cdot T^{c_3}} + \frac{1}{a_4 \cdot w^{b_4} \cdot T^{c_4}} \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} \geq \frac{1}{a_5 \cdot w^{b_5} \cdot T^{c_5}} \end{cases} \quad (16)$$

式 (16) 即为考虑含水率和温度影响的南海软黏土 Dual-Bingham 流变模型。

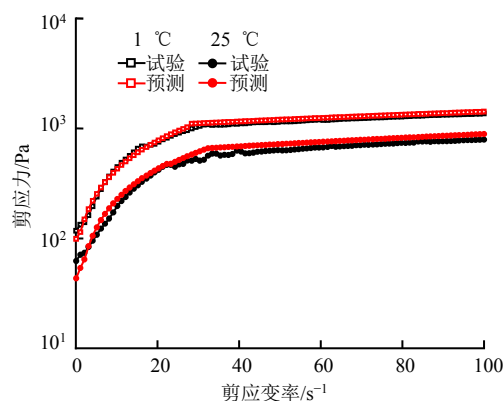
表 3 Dual-Bingham 模型参数拟合

含水率 /%	温度 /°C	τ_0 /Pa	η_0 /(Pa·s)	τ_∞ /Pa	η_∞ /(Pa·s)	$\dot{\gamma}_c$ /s ⁻¹
40.0	1	106.12	32.26	932.50	4.37	29.63
	5	88.97	28.75	852.22	3.75	30.53
	9	88.06	25.46	763.92	3.97	31.45
	13	74.54	23.75	705.36	3.80	31.62
	17	66.93	21.64	602.95	4.10	30.56
	21	43.87	19.38	567.64	2.71	31.42
	25	46.03	16.66	466.09	3.35	31.56
50.0	1	47.96	17.69	225.83	0.91	10.60
	5	44.44	16.00	220.68	0.82	11.61
	9	44.55	14.61	215.72	0.75	12.35
	13	41.18	13.84	209.54	0.69	12.80
	17	37.57	12.82	202.15	0.63	13.50
	21	32.42	11.35	189.02	0.58	14.54
	25	28.26	8.96	156.18	0.61	15.32
56.7	1	20.72	10.94	90.96	0.33	6.62
	5	18.94	9.38	86.35	0.27	7.40
	9	17.00	8.55	83.40	0.24	7.99
	13	15.66	7.50	79.67	0.21	8.78
	17	13.85	6.39	72.72	0.18	9.48
	21	12.10	4.90	61.42	0.18	10.45
	25	10.90	3.36	46.73	0.20	11.34
66.7	1	6.56	3.21	17.27	0.09	3.43
	5	5.74	2.33	15.10	0.08	4.16
	9	4.92	1.98	13.79	0.07	4.64
	13	4.31	1.59	12.72	0.07	5.53
	17	3.73	1.43	11.53	0.06	5.67
	21	3.08	1.15	10.23	0.06	6.56
	25	2.95	1.00	8.50	0.04	5.78
73.3	1	4.38	2.11	9.14	0.06	2.32
	5	3.77	1.72	8.37	0.06	2.77
	9	3.35	1.22	7.49	0.05	3.55
	13	3.25	0.96	7.24	0.05	4.37
	17	2.99	0.87	6.59	0.04	4.34
	21	2.63	0.74	5.75	0.04	4.44
	25	2.53	0.54	4.90	0.04	4.71

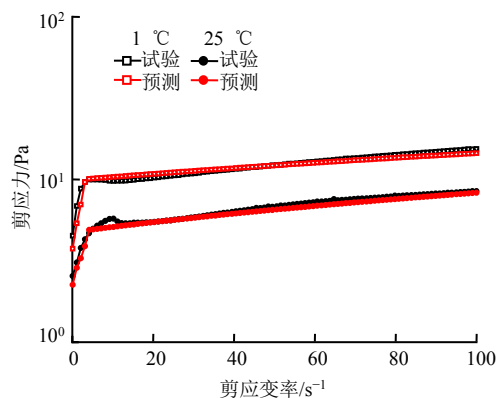
表4 模型参数与含水率和温度关系的拟合结果
Table 4 Fitting results of relationship between model parameters and water content, temperature

模型参数	拟合参数		R^2
	符号	拟合值	
τ_0	a_1	0.365	0.927
	b_1	4.053	
	c_1	0.188	
η_0	a_2	0.758	0.941
	b_2	3.579	
	c_2	0.160	
τ_{∞}	a_3	0.266	0.980
	b_3	6.072	
	c_3	0.157	
η_{∞}	a_4	223.273	0.984
	b_4	7.533	
	c_4	0.083	
$\dot{\gamma}_c$	a_5	0.992	0.989
	b_5	3.620	
	c_5	-0.045	

图7所示是含水率为40.0%和73.3%试样在1℃和25℃时本文试验结果与预测结果的比较,从图中可以看到,在应变率非常小时,预测结果大



(a) 含水率为40.0%



(b) 含水率为73.3%

图7 不同含水率条件下温度为1℃和25℃的试验结果与预测结果比较

Fig.7 Comparison between test results and predictions for samples with different water contents under temperatures of 1℃ and 25℃

于试验结果;其余应变率条件下,预测结果和试验结果之间基本吻合。所提出模型基本能够预测不同含水率和温度条件下试样的剪应力-应变率关系。

4.3 模型验证

Xu 等^[22]开展了不同体积浓度条件下连云港泥流流变特性的研究,采用文献[21]中体积浓度为0.179和0.150(含水率为105.8%和142.7%)的试验数据验证本文所提出的模型,模型中参数取值如表5所示。由于文献[21]在常温下进行试验,没有考虑温度对流变特性的影响,因此模型验证时不考虑温度项。

图8所示为含水率为105.8%和142.7%时模型预测结果与试验结果的比较,可以看到,试验结果与预测结果基本吻合,说明可以通过本文的方法建立软黏土流变模型的可行性。此外,需要说明的是,由于试验数据的缺乏,只验证了含水率对流变行为的影响,未能验证温度对流变行为的影响。因此,后续还需开展不同温度条件下的流变试验,以验证本文模型的合理性。

表5 模型参数取值

Table 5 Values for parameters in model

模型参数	拟合参数		R^2
	符号	拟合值	
τ_0	a_1	0.333	0.988
	b_1	2.131	
η_0	a_2	0.110	0.985
	b_2	2.512	
τ_{∞}	a_3	0.027	0.999
	b_3	2.719	
η_{∞}	a_4	14.925	0.966
	b_4	2.132	
$\dot{\gamma}_c$	a_5	0.205	0.932
	b_5	1.822	

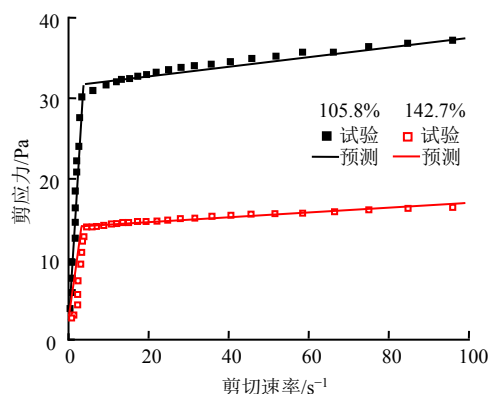


图8 含水率为105.8%和142.7%时试验结果与预测结果的比较
Fig.8 Comparison between test results and predictions of samples with water contents of 105.8% and 142.7%

5 结 论

以中国南海软黏土为试验材料,运用 MCR302 流变仪,探究了 5 种不同含水率试样在 7 种环境温度条件下的流变特性,分析了南海软黏土在流变剪切试验中的相态转变特性,提出了屈服应力的计算方法,建立和考虑温度和含水率影响的流变模型。主要得出以下结论。

(1) 本文试验不同含水率的南海软黏土表现出剪切稀释行为,是一种具有屈服应力的非牛顿流体。在剪切过程中,软黏土会经历 3 个不同的相态:固相,固相-液相转化和液相,其状态界限点为动态屈服应力和静态屈服应力。采用本文提出的利用剪应力-剪应变率曲线一阶导数的方法,可以比较准确的获得上述界限值。

(2) 随着剪应变率的增大,剪应力增大,表观黏度减小,当剪应变率从 0.1 s^{-1} 变化到 100 s^{-1} 时,表观黏度可以跨越 3 个数量级的变化。随着温度的和含水率的降低,剪应力和表观黏度增加,当温度从 25°C 降低到 1°C 时,剪应力和表观黏度最大增加达到 65%。

(3) 通过考虑含水率以及温度对模型参数的影响,建立了 $0.1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 剪应变率范围内考虑含水率和温度共同影响的南海软黏土 Dual-Bingham 流变模型,该模型能够有效反映南海软黏土的流变特性。

本文提出的模型存在 15 个拟合参数,这主要是因为,该模型变量为温度和含水率。在已知温度和含水率的情况下,可获得所需的应力和应变率之间的关系。但由于温度和含水率为物理指标,各个拟合参数的力学意义还有待于对现象背后的机制进行更深入的剖析。

参 考 文 献

- [1] 贾凌霄,马冰,于洋,等. 基于 SWOT 分析的深海采矿发展策略研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(7): 15-22.
JIA Ling-xiao, MA Bing, YU Yang, et al. Research on deep sea mining development strategy based on SWOT analysis[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(7): 15-22.
- [2] 马雯波,饶秋华,吴鸿云,等. 深海稀软底质土宏观性能与显微结构分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1641-1646.
MA Wen-bo, RAO Qiu-hua, WU Hong-yun, et al. Macroscopic properties and microstructure analyses of deep-sea sediment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1641-1646.
- [3] 王立忠,缪成章. 慢速滑动泥流对海底管道的作用力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 982-987.
WANG Li-zhong, MIAO Cheng-zhang. Pressure on submarine pipelines under slowly sliding mud flows[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 982-987.
- [4] 马洪新. 南海超百米水深海底油管道泄露修复实例[J]. 海洋石油, 2010, 30(3): 93-96.
MA Hong-xin. Deep sea pipeline repair practice in the South China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2010, 30(3): 93-96.
- [5] 范宁,年廷凯,焦厚滨,等. 双椭圆流线型海底管线抵御滑坡冲击的减灾效果与降阻机制[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 413-420.
FAN Ning, NIAN Ting-kai, JIAO Hou-bin, et al. Effect and mechanism of disaster reduction of pipelines with double-elliptic streamline contour against impact of submarine landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1): 413-420.
- [6] MAJOR J J, PIERSON T C. Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries[J]. *Water Resource Research*, 1992, 28(3): 841-857.
- [7] COUSSOT P, PIAU J M. On the behavior of fine mud suspensions[J]. *Rheologica Acta*, 1994, 33(3): 175-184.
- [8] HUANG Z H, HUDE A. A laboratory study of rheological properties of mudflows in Hangzhou Bay, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24: 410-424.
- [9] JEONG S W, LOCAT J, LEROUEIL S, et al. Rheological properties of fine-grained sediment: the roles of texture and mineralogy[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47: 1085-1100.
- [10] BOUKPETI N, WHITE D J, RANDOLPH M F, et al. Strength of fine-grained soils at the solid-fluid transition[J]. *Géotechnique*, 2012, 62(3): 213-226.
- [11] 杨闻宇. 剪切载荷作用下高浓度黏性泥沙流变特性的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
YANG Wen-yu. Experimental study on rheological behavior of high viscosity cohesive sediment under shear load[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [12] 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 Ting-kai, ZHAO Wei, et al. Rheological test and strength model of submarine mud

- flow[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3195-3202.
- [13] NIE S H, JIANG Q, CUI L, et al. Investigation on solid-liquid transition of soft mud under steady and oscillatory shear loads[J]. **Sediment Geology**, 2020, 397: 105570.
- [14] 邹大鹏, 卢博, 阎贫, 等. 南海北部海底沉积物在温度变化下的三种声速类型[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1017-1024.
- ZOU Da-peng, LU Bo, YAN Pin, et al. Three types of sound velocity of seafloor sediments in the northern South China Sea under temperature variations[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2012, 55(3): 1017-1024.
- [15] 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 Xing-sen, NIAN Ting-kai, 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.
- [16] 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(增刊 1): 348-356.
- LI Jia-ping, ZHU Ke-chao, ZHOU Xuan, et al. Rheological properties of REY-rich deep-sea sediments[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1):348-356.
- [17] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123 — 2019 Standard for geotechnical method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [18] JEONG S W, LEROUÉIL S, LOCAT J. Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46: 1011-1023.
- [19] NAIR V C, PRASAD S K, SANGWAI J S. Characterization and rheology of Krishna-Godavari basin sediments[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2019, 110: 275-286.
- [20] BINGHAM E C. Fluidity and plasticity[M]. [S. l.]: McGraw-Hill, 1922.
- [21] HERSCHEL W H, BULKLEY R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions[C]// Proceedings of American Society for Test Procedure. [S. l.]: [s. n.], 1926.
- [22] XU J Y, HUHE A. Rheological study of mudflows at Lianyungang in China[J]. **International Journal of Sediment Research**, 2016, 31: 71-78.