

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.004



河道淤泥气泡混合轻质土剪切流变特性及模型

顾然, 顾欢达

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215000)

摘要:利用剪切流变试验对以水泥为固化剂的河道淤泥气泡混合轻质土的流变特性进行了试验研究。试验结果表明,经固化处理的河道淤泥气泡混合轻质土在荷载作用下具有类似于硬粘土的流变特征。剪切流变可以分为 3 个阶段:在剪应力水平较低时,剪切流变曲线呈衰减稳定型;随着剪应力水平的提高,剪切流变曲线呈非稳定的等速型;当剪应力水平增大到一定程度时,剪切流变曲线呈加速型。河道淤泥气泡混合轻质土的流变性随着混合轻质土强度的提高而降低。根据试验所呈现的剪切流变规律,可以发现河道淤泥气泡混合轻质土的剪切流变符合七元件黏弹塑性剪切流变模型,模型能够比较好地描述河道淤泥混合轻质土在各种剪应力水平下的衰减、等速以及加速流变过程。

关键词:河道淤泥;剪切流变;流变特性;剪切流变模型

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0026-09

Shear rheological properties and modelling of air foamed lightweight soil using river sludge

Gu Ran, Gu Huanda

(School of Civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The rheological properties of river sludge mixed with cement and air foam were studied by shear rheological test. The test results showed that under the load the mixed lightweight soil by curing process was similar to the rheological characteristics of hard clay. The soil rheological curve of air foamed soil using river sludge mainly presented three models. When the shear stress level was low, the rheological curve appears as attenuation stable; When the shear stress levels continued to increase, the form of the rheological curve was not stable but constant speed type; When the shear stress increased to a certain extent, the rheological curve type was accelerated. With the improvement of the strength of the mixed lightweight soil, the rheological properties of river sludge mixed with cement and air foam is reduced. According to the test, the mixed lightweight soil shear rheological conformed to the seven-component visco-elastoplastic shear rheological model. Using the model can reasonably and reliably describe the rheological process include attenuation, velocity and acceleration of the mixed lightweight soil under various shear

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家自然科学基金(51378327)

作者简介:顾然(1991-),男,主要从事软土地基处理技术及原理研究,(E-mail)624377031@qq.com。

顾欢达(通信作者),男,教授,博士,(E-mail)ghdgc@163.com。

Received:2016-06-21

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51378327)

Author brief:Gu Ran (1991-), main research interests: the soft soil foundation treatment technology and theory, (E-mail) 624377031@qq.com.

Gu Huanda(corresponding author), professor, PhD, (E-mail) ghdgc@163.com.

stress levels.

Keywords: river sludge; shear rheological; rheological behavior; shear rheological model

中国长江三角洲地区河流交错,池湖密布,经常年积累,在河道湖泊内产生了大量淤泥。这些长期沉积的淤泥不仅影响了水质,也影响了防洪、排涝、通航等各项功能的正常发挥。为了解决这些问题,需定期或不定期地对河道湖泊进行清淤,由此导致了大量疏浚淤泥产生。如何合理有效地循环利用这部分疏浚淤泥是当前环境岩土工程正在兴起和发展的主要研究方向之一。

河道淤泥土属于软粘土范畴,考虑到流变现象广泛存在于各种土体之中,特别是软粘土中流变现象更为显著,随着时间的增长,土体中的应力和变形将产生不容忽视的变化。因此,有必要对软粘土流变特性进行研究。孙钧等^[1]介绍了上海地区几种典型饱和软粘土的主要流变特性,并建立了反映流变和应力松弛统一的非线性流变经验本构关系;雷华阳等^[2]介绍了在不同竖向载荷以及不同加荷条件下,滨海地区软土剪切流变性状的结构效应和影响因素;张先伟等^[3]对黄石地区淤泥质土流变特性进行了研究,并建立了相应的本构方程;Dobrov^[4]对剪切流变引起的粘性土质量参数变化进行了研究;Lei 等^[5]对自然加速流变条件下软土的微观结构进行了分析研究。

目前,参考气泡混凝土技术,利用河道淤泥含水率高及流动性好的特点,将其作为原料土制成具有流动特征的混合轻质土,是疏浚淤泥一种效果比较好的利用方式。对于混合轻质土,学者们已经进行了较多研究,Yajima 等^[6]对经气泡混合处理后轻质土的物理力学特性进行了研究;Takashi 等^[7]、Puppala 等^[8]考察了轻质土在工程领域内的适用性。中国在相关领域的研究开展比较晚,研究的轻质化材料也主要以塑料发泡颗粒为主,对于气泡这种较难加入土体的轻质材料研究较少。顾欢达等对于气泡混合轻质土的制作工艺、物理力学性质及工程应用方面进行了比较深入的研究^[9-14]。基于有效循环利用河道疏浚淤泥的目的,在顾欢达等对河道淤泥气泡混合轻质土研究^[9,12]的基础上,对其在不同条件下的剪切流变特性进行了考察研究。

1 试验方法

1.1 原料土的性质及土样制备

试验原料土取自苏州某河道淤泥质土,选用

5 mm 的网筛过筛,剔除淤泥中的大颗粒和其它异物,用搅拌机将其搅拌均匀,通过试验测得原料土的基本物理性质指标(见表 1)。

表 1 原料土的物理性质指标

Table 1 The physics parameters of raw soil

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量/ %	相对密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%
1.512	93.1	0.783	51.34	30.46

试验用水为自来水,采用 PO42.5 普通硅酸盐水泥作为固化剂,发泡剂采用动物蛋白类复配型发泡剂。根据表 2 所示的配合设计,先将水、水泥依次加入原料土并用搅拌机搅拌均匀;再将气泡加入并用人工搅拌的方式搅拌均匀,采用人工搅拌是为了防止由于机器搅拌太过剧烈而导致气泡结构破坏;最后将搅拌均匀的混合轻质土装入模具(直径 6.18 cm,高 2 cm 底端密封的环刀),待试样硬化后脱模,并按所定养护条件置于养护室养护至试验龄期。

表 2 河道淤泥混合轻质土配和情况

Table 2 The mixture conditions of river sludge mixed soil

原料土/g	水/g	含水 量/%	气泡含 量/%	养护龄 期/d	水泥	
					质量/g	含量/%
				28	95.1	15
1 000	330.8	110	2	7,28,60	158.4	25
				28	221.8	35

注:当养护龄期作为影响影响因素时,统一用 25% 的水泥含量;当水泥含量作为影响因素时,统一养护龄期为 28 d。

1.2 试验方法

试验用的主要仪器有应变控制式 ZJ 型直剪仪及应力控制式 ZLB-1 型三联流变直剪试验仪。

试验步骤:1)对土样进行常规直剪试验,确定其直剪峰值强度 τ_s ;2)流变试验采用分级加载方式,每一级水平剪应力 $\tau = \tau_s/n$,荷载级数 n 选取 5~6 级,试验数据由人工定时采集。

2 试验结果及分析

2.1 不同剪应力条件下剪切流变特性

图 1 为在气泡含量为 2%,含水率为 110%,竖向固结应力为 100 kPa,养护龄期为 28 d,仅改变土样水泥含量的条件下,分级施加剪应力后得到的剪切流变曲线。

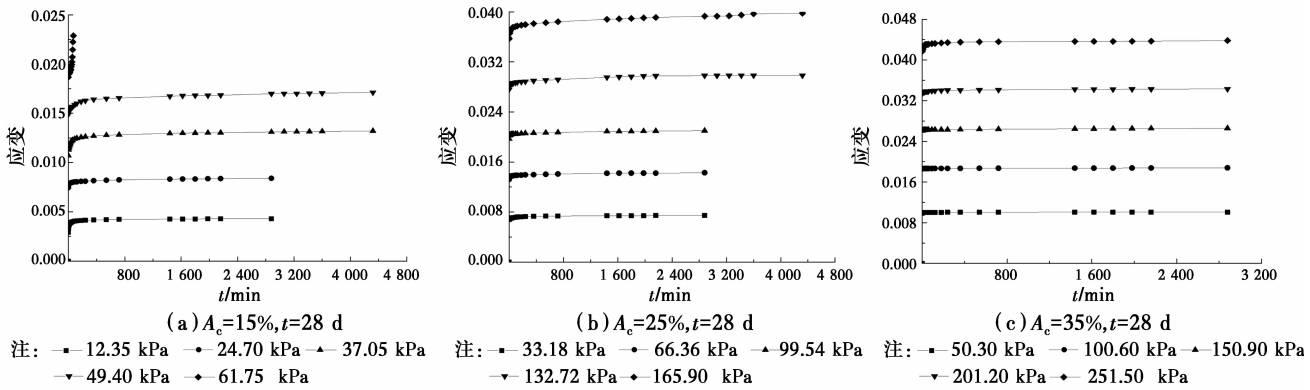


图 1 不同水泥含量条件下直剪流变曲线

Fig. 1 Shear rheological curves under different cement content

从图 1(a)中的剪切流变曲线可以看出:土样在竖向固结稳定以后,施加各级剪应力的瞬间均会产生较大的瞬时剪切变形;在低剪应力水平作用下, $\tau \leq 24.70$ kPa 时,流变变形随时间的增长很快趋于稳定,变形量很小,流变曲线呈现为衰减型;在中等剪应力水平作用下, 24.07 kPa $< \tau \leq 49.40$ kPa 时,流变变形趋于稳定所需的时间有所增长,变形量以稳定速率增加,流变曲线呈现为等速型;在较高剪应力水平作用下, $\tau > 49.40$ kPa 时,短时间内,流变变形就会急剧增长,流变曲线呈现为加速型,土样很快破坏。

为了进一步分析不同剪应力条件下稳定阶段流变速率与等时流变增量,结合图 1(a)中前 4 级载荷水平下剪切流变曲线,绘制出图 2、图 3。由于土样受到荷载作用后,为了抵抗外力,内部土颗粒之间发生了相对位移。而这些位移一方面使部分颗粒间的连结更为紧密,减小了结构缺陷的尺寸和数量,对土体起硬化作用;另一方面使部分颗粒间的连结破坏,产生新的结构缺陷,对土体起软化作用^[1]。这两种作用在土体流变过程中同时进行,结合图 2、图 3 可以发现,流变进入稳定阶段后,当剪应力水平较低时,硬化作用占主导地位,流变速率较小,随时间发展很快衰减,等时流变量较少;当剪应力水平较高时,软化作用很快占主导地位,并且其主导程度随着剪应力水平的提高不断增大,土样的流变速率随剪应力水越高,增加的越快,与之对应的等时流变量也会有大幅增加。

综上所述,随剪应力水平的提高,河道淤泥气泡混合轻质土产生的流变量也会提高。在工程应用上应该注意,所加载的应力水平应该使土样的硬化过程占主导地位,否则随时间的增长,土样会产生较大

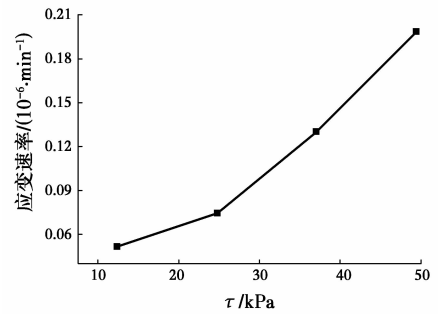


图 2 不同剪应力条件下稳定阶段流变速率曲线

Fig. 2 Stabilization phase rheological rate curve under different shear stress

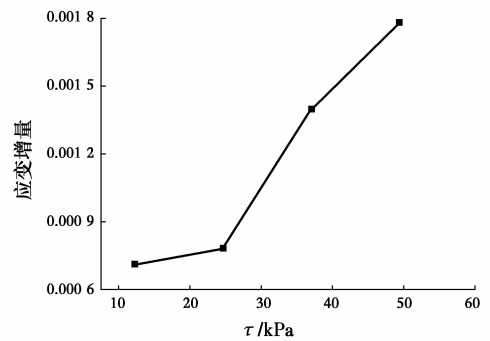


图 3 不同剪应力条件下等时流变增量曲线

Fig. 3 Rheological increment equitime curve under different shear stress

的流变,从而对工程结构产生不利的影响。

2.2 考虑水泥含量因素对剪切流变性质的影响

图 4、图 5 为根据图 1 数据提取出来的不同水泥含量条件下等时流变增量曲线及稳定阶段流变速率曲线。结合图 1、图 4 和图 5 可以看出:1)在低剪应力水平下,当水泥含量较低时,即 $A_c \leq 25\%$ 时,等时流变变形较大;而水泥含量较高时,即 $A_c > 25\%$ 时,等时流变变形则明显减小。2)在高剪应力水平下,

不论水泥含量的高低,土样的流变变形都十分显著。
 3)同等剪应条件下,水泥含量越高,等时流变变形量越小。
 4)水泥含量的增大,首先使得土样流变破坏时所需加载的剪应力有明显的增大,土样破坏形式由塑性破坏向脆性破坏转变,土样的抗剪能力获得较大提高;其次,也使得土样在同等应力条件下,稳定流变速率有明显降低,且减缓了土样稳定流变速率的增长。

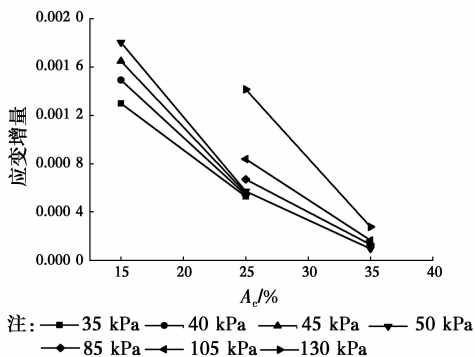


图 4 不同水泥含量条件下等时流变增量曲线
 Fig. 4 Rheological increment equitime curves under different cement content

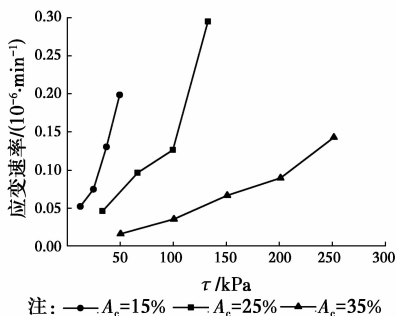


图 5 不同水泥含量条件下稳定阶段流变速率曲线
 Fig. 4 Stabilization phase rheological rate curves under different cement content

由此可见,水泥的掺入,使混合轻质土内部颗粒间的连结更为紧密,结构强度及稳定性明显提高,同时削弱了河道淤泥的高流塑性。从苏州地区河道淤泥质土的工程应用角度来看,选用水泥含量为 25% 左右的混合轻质土最为合适。因为 25% 含量的混合轻质土与水泥含量为 15% 的混合轻质土相比,在具备一定流动性的基础上,具有更高的强度及稳定性;而与水泥含量为 35% 的混合轻质土相比,具有更好的流动性,便于施工,且其延性较好,不容易发生脆性破坏,这符合工程结构的安全设计要求。对于不同土质条件地区的淤泥类软土,最佳水泥掺入量则需要通过试验进一步验证。

2.3 养护龄期对剪切流变性质的影响

图 6 以及图 1(b)为在气泡含量为 2%,含水率为 110%,竖向固结应力为 100 kPa,水泥含量为 25%,仅改变土样养护龄期条件下,分级施加剪应力后得到的剪切流变曲线。

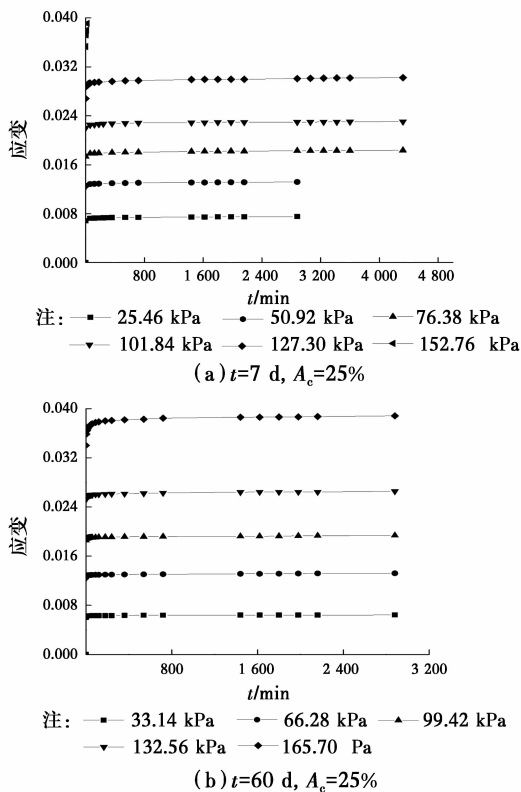


图 6 不同养护龄期条件下直剪流变曲线
 Fig. 6 Shear rheological curves under different curing age

对比图 1(a)及图 6(a)、(b)3 组流变曲线可以看出,随养护龄期的增长,土样流变破坏时所需加载的剪应力也相应的增加,但没有随水泥的含量增加,抗剪能力增加的那么明显,特别是当养护龄期 $T \geq 28$ d 样抗剪能力几乎不再增强。

为了进一步分析养护龄期对土样剪切流变性质的影响,根据图 1(a)及图 6(a)、(b)3 组流变曲线及相关试验数据,绘制出不同养护龄期条件下的等时流变增量曲线,如图 7。图 7 反映了在剪应力水平和水泥含量相同的情况下,随着养护龄期的增长,土样等时流变量有较为明显减少,流变性能降低。

分析导致这一现象的原因可知,养护龄期的增加,会使得河道淤泥混合轻质土中水泥的水化作用逐渐增强。由于水化作用主要沿固体颗粒表面和颗粒孔隙间进行,所以,颗粒间的孔隙变小,孔隙率降低,抗剪能力及抗变形能力提高,从而混合轻质土的流变性能随养护龄期增长而降低了。

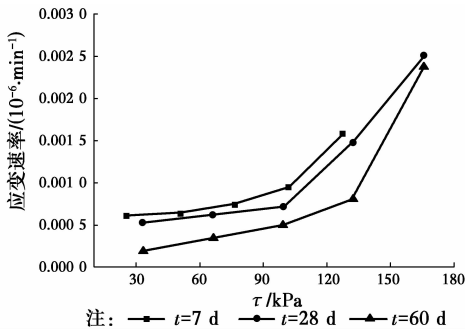


图 7 不同养护龄期条件下等时流变增量曲线

Fig. 7 Rheological increment equitime curves under different curing age

3 剪切流变模型及其参数的确定

3.1 剪切流变模型的选取

对图 1 中混合轻质土流变试验曲线分析可知,土样在剪应力施加的瞬间均出现瞬时应变,说明流变模型中存在弹性元件;在加载的过程中,土样的流变变形量还会随着时间的增长而变大,说明流变模型中存在粘性元件;当剪应力大于某一值时,流变曲线由等速型变为加速型,流变变形迅速增大,说明流变模型中还应存在塑性元件。

通过对现有的剪切流变模型对比分析^[15-18]可知,当施加在土样上的剪应力小于或等于破坏剪应力时,即 $\tau \leq \tau_s$ 时,流变曲线表现出典型的黏弹性特征,此时可选用徐卫亚等提出的五元件黏弹性剪切流变模型^[19](如图 8)来进行描述。当施加在土样上的剪应力大于破坏剪应力时,可进一步选择七元件黏弹塑性剪切流变模型^[20](如图 11)来描述试验结果。

3.2 五元件黏弹性剪切流变模型识别及参数计算方法

当土体处在黏弹性阶段时,采用包含在七元件

模型中的五元件黏弹性剪切流变模型来描述试验结果,该模型包含 3 个弹性元件,2 个粘性元件,组合结构如图 8 所示。

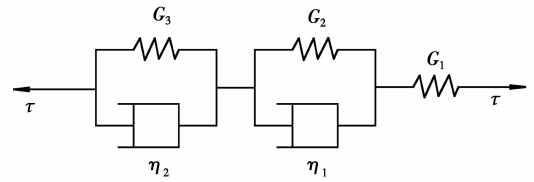


图 8 五元件黏弹性剪切流变模型

Fig. 8 Five-component visco-elastic shear rheological model

五元件黏弹性剪切流变模型的流变本构方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}) + \frac{\tau}{G_3} (1 - e^{-\frac{G_3}{\eta_2} t}) \quad (1)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为河道淤泥混合轻质土的总剪应变; t 为流变经历的时间; G_1 为瞬时弹性剪切模量; G_2 、 G_3 为黏弹性剪切模量; η_1 、 η_2 为粘滞性系数。其中 G_1 、 G_2 、 G_3 、 η_1 、 η_2 5 个参数需要求解确定。具体方法为:首先由式(1)知,当 $t = 0$ 时, $\epsilon(0) = \tau/G_1$, 而 $\epsilon(0)$ 为混合轻质土瞬时弹性变形,可有流变试验曲线上得到,则可知 $G_1 = \tau/\epsilon(0)$;其次,将式(1)中等式右边 τ/G_1 项移到左边,得到形如 $Y = A[1 - \exp(-Ct)] + B[1 - \exp(-Dt)]$ 的算式,基于混合轻质土的剪切流变试验数据,利用最小二乘法与高斯-牛顿法进行非线性回归分析可得参数 A 、 B 、 C 和 D 。其中 $Y = \epsilon(t) - \tau/G_1$; $A = \tau/G_2$; $B = \tau/G_3$; $C = G_2/\eta_1$; $D = G_3/\eta_2$ 。由此可以进一步求出 G_2 、 G_3 、 η_1 和 η_2 。

3.3 五元件黏弹性剪切流变模型的应用

利用五元件黏弹性剪切流变模型对试验所得流变曲线进行拟合,由于拟合曲线较多,选取图 1(a)中前 4 级剪应力水平下的拟合曲线进行研究,拟合结果见表 3。

表 3 河道淤泥混合轻质土五元件黏弹性剪切流变模型参数值

Table 3 Rheological parameter values based on five-component visco-elastic shear rheological model of river sludge mixed soil

τ/kPa	G_1/kPa	G_2/kPa	G_3/kPa	$\eta_1/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	$\eta_2/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	R^2
12.35	4 215.02	12 585.46	33 016.09	110 119.39	7 869 781.13	0.995 7
24.70	3 302.14	55 009.30	56 819.49	413 872.91	26 969 974.38	0.987 8
37.05	3 421.05	24 375.00	47 173.78	463 622.98	37 116 478.23	0.992 0
49.40	3 288.95	39 206.35	49 747.59	3 217 888.16	118 857 764.68	0.997 7

由图 9 可以看出,拟合曲线与试验结果具有较高的拟合度。另外,表 3 中的 R^2 反映的是拟合度,

从其结果看都接近于 1,这也说明了拟合效果非常良好。由此可见,五元件黏弹性模型能够很好的吻

合河道淤泥混合轻质土处于黏弹性阶段时的流变试验曲线。从表 3 中还可以看出,剪切模量 G_1 、 G_2 、 G_3 在同一数量级上变化,波动比较小,但是没有明显的规律性,造成剪切模量波动的原因还有待进一步研究。表 3 中粘滞性系数 η_1 、 η_2 的波动比较大,说明在同一种水泥含量条件下,随着剪应力水平的提高,土样的粘滞性系数明显增大。

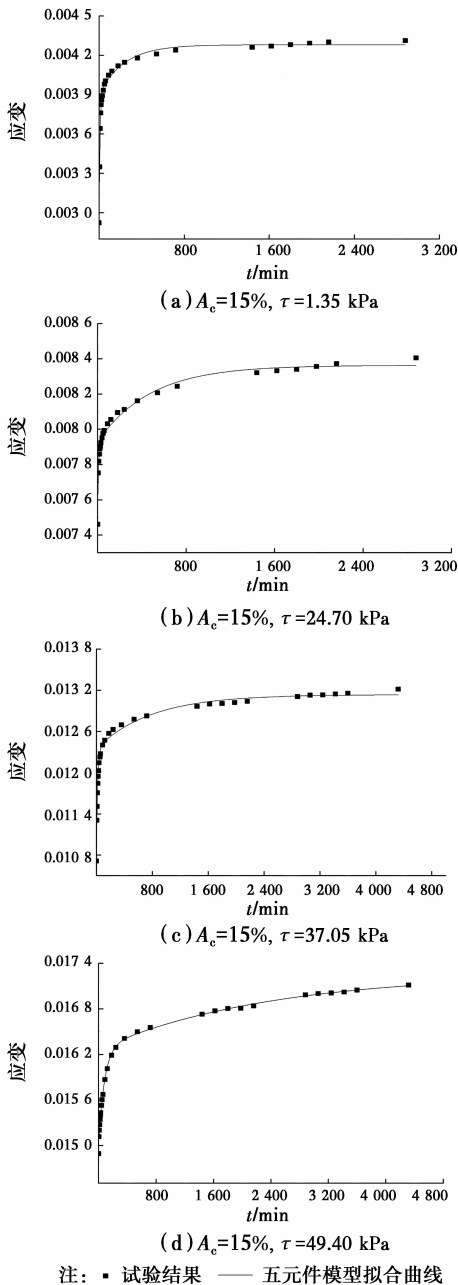


图 9 五元模型拟合结果与试验结果的对比
Fig. 9 Comparison between fitting results and experimental results

3.4 七元件黏弹塑性剪切流变模型的识别

当施加在土样上的剪应力大于破坏剪应力时,

即 $\tau > \tau_s$ 时,土样变形急剧增加,很快被剪坏,如图 1 (a)和图 2。限于篇幅,现选取图 1(a)中的最后一条流变曲线单独分析,见图 10。由图 10 可以看出,土样的 3 个流变阶段很明显。初始剪切流变阶段 AB 段,时间很短,流变速率衰减很快;等速剪切流变阶段 BC 段,时间较长,流变速率基本保持不变;加速剪切流变阶段 CD 段,时间较短,流变速率迅速增大,直至试样发生破坏,这一阶段表现出了明显的非线性塑性特征。

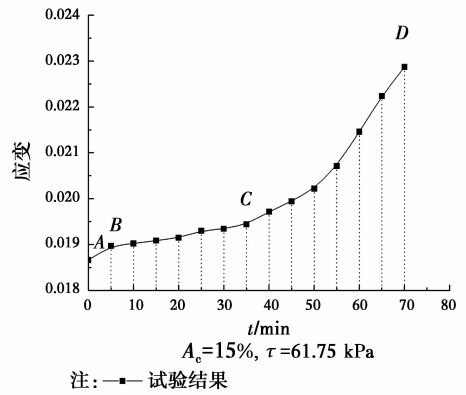


图 10 河道淤泥混合轻质土加速流变曲线
Fig. 10 Accelerated rheological curve of river sludge mixed soil

由于五元件黏弹性模型并不能描述河道淤泥混合轻质土的加速流变阶段,需要采用七元件黏弹塑性剪切流变模型来拟合试验所得加速流变阶段曲线。

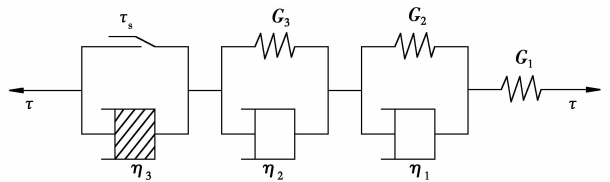


图 11 七元件黏弹塑性剪切流变模型
Fig. 11 Seven-component visco-elastoplastic rheological model

七元件黏弹塑性剪切流变模型包含 3 个弹性元件,3 个粘性元件和 1 个塑性元件。流变本构方程为

$$\epsilon(t) = \begin{cases} \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}) + \frac{\tau}{G_3} (1 - e^{-\frac{G_3}{\eta_2} t}) & t \leq t_g \\ \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}) + \frac{\tau}{G_3} (1 - e^{-\frac{G_3}{\eta_2} t}) + \frac{1}{\eta_3} t^n & t > t_g \end{cases} \quad (2)$$

式中： G_1 、 G_2 、 G_3 、 η_1 、 η_2 的意义同式(1)； η_3 为新增粘滞性系数； n 为流变指数，反应试样加速剪切流变速率的快慢程度； t_g 为流变曲线上的“拐点”，即等速流变阶段向加速流变阶段转变的时刻，图 10 中对应的拐点为 C 点，可知 $t_g = 35 \text{ min}$ 。

3.5 七元件黏弹塑性剪切流变模型参数计算及应用

对于图 10 所示的 3 阶段流变曲线而言，需要进行分段处理，处理及计算过程如下：当 $t \leq t_g$ 时，可采用五元件黏弹性模型对 AC 段流变曲线进行拟合，得到 G_1 、 G_2 、 G_3 和 η_1 、 η_2 5 个流变参数；再利用五元件黏弹性模型和已获得的参数，求出 3 组 $t > t_g$ 时黏弹性条件下剪应变的理论解，进而计算出理论值与试验值之间的差值，计算结果见表 4；最后，对表 4 中剪应变理论值与试验值间的差值及其相对应的时间 t 进行非线性回归分析，得到七元件黏弹塑性剪切流变模型的流变参数 η_3 与 n 。七元件黏弹塑性剪切流变模型的流变参数求解汇总见表 5。

表 4 五元件黏弹性剪切流变模型拟合结果与试验值对比

Table 4 Comparison between the theoretical value and experimental results

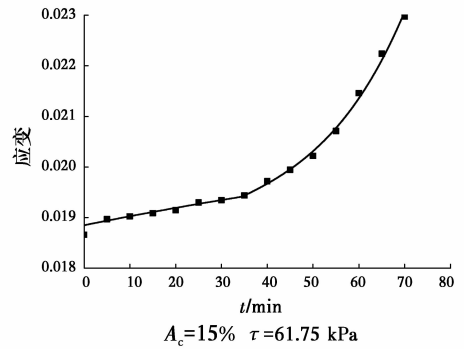
时刻/min	理论值	试验值	试验值与理论值之差
40	0.019 49	0.019 72	0.000 23
55	0.019 69	0.020 71	0.001 02
70	0.019 87	0.022 97	0.003 10

表 5 河道淤泥混合轻质土七元件黏弹塑性剪切流变模型参数值

Table 5 Rheological parameter values based on the seven-component visco-elastoplastic shear rheological model of river sludge mixed soil

τ/kPa	G_1/kPa	G_2/kPa	G_3/kPa
61.75	3 309.22	327 034.50	22 619.05
$\eta_1/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	$\eta_2/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	$\eta_3/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	n
555.96	3 370 370.64	$1.096 1 \times 10^{11}$	4.623 57

利用该方法求得的七元件黏弹塑性剪切流变本构模型对出现加速流变阶段的流变试验曲线进行拟合，结果如图 12 所示， $R^2 = 0.989 3$ ，可以看出，拟合效果良好。这说明七元件黏弹塑性模型对于河道淤泥混合轻质土流变 3 阶段的描述是合理可靠的，具备实用性较高的推广价值。



注：■ 试验结果 — 拟合结果

图 12 试验结果与七元件黏弹塑性剪切流变模型拟合曲线对比

Fig. 12 Comparison between experimental results and fitting results based on the seven-component visco-elastoplastic shear rheological model

4 结论

1) 直剪流变试验结果表明，河道淤泥混合轻质土的流变曲线主要分为 3 种模式：当剪应力水平较低时，流变曲线呈衰减稳定型；当剪应力水平继续增大时，流变曲线呈非稳定的等速型；当剪应力增大到一定程度时，流变变形急剧增加，试样很快就被剪坏，流变曲线呈加速型。

2) 剪应力水平的提高，河道淤泥气泡混合轻质土的等时剪切流变变形量增大。工程应用上要使所加载的应力水平令土样的硬化过程占主导地位，否则随时间的增长，土样会产生较大的流变，从而对工程结构产生不利的影响。

3) 随着水泥含量的提高，在其它同等条件下，土样的流变变形量明显减小，流变达到稳定所需的时间也大幅减小。说明水泥的掺入使混合轻质土的构强度及稳定性明显提高，同时削弱了作为原料土的河道淤泥的高流塑性。苏州地区河道淤泥质土的工程应用方面，选择水泥含量 25% 左右的混合轻质土比较合适，其既具备一定流动性，便于施工，又具有更高的强度及稳定性，且延性也比较好，有利于工程结构的安全。对于土质条件不同的地区，最佳水泥掺入量还需进一步研究。

4) 养护龄期的增加，使得水泥的水化作用得以充分发挥，从而河道淤泥混合轻质土抗剪能力及抗变形能力得到提高，导致了混合轻质土的流变性能的降低。综合流动性、稳定性及时效性 3 方面考虑，28 d 的养护龄期更适合工程应用要求。

5) 采用了包含五元件黏弹性模型的七元件黏弹

塑性剪切流变模型来拟合流变曲线。拟合结果表明该模型能合理可靠地描述河道淤泥混合轻质土在各种剪应力水平下的流变全过程曲线,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京:中国工业出版社,1991.
SUN J. Rheology and application of geotechnical materials [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 雷华阳,贾亚芳. 滨海软土剪切蠕变特性研究[J]. 工程地质学报,2013,21(3):416-421.
LEI H Y, JIA Y F. Shear creep property and constitutive model for soft soil of littoral area in Tianjin [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(3): 416-421. (in Chinese)
- [3] 张先伟,王常明,王钢城,等. 黄石淤泥质土的剪切蠕变特性及模型研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009,39(1):119-125.
ZHANG X W, WANG C M, WANG G C, et al. Study on shearing creep characteristics and constitutive mode of Hangshi muky soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(1): 119-125. (in Chinese)
- [4] DOBROV E M. Prediction of shear creep induced variation in parameters of clayey-soil masses over time [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2003, 40(1): 206-214.
- [5] LEI H Y, LU H B, WANG X C, et al. Changes in soil micro-structure for natural soft clay under accelerated creep condition [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(4): 365-375.
- [6] YAJIMA J, MYDIN S H. Mechanical properties of the unsaturated foam composite light-weight soil [J]. American Society of Civil Engineers, 2006, 4: 2-6.
- [7] TAKASHI T, MINSOO K. Use of lightweight treated soil method in seaport and airport construction project [C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-materials, Tokyo, Japan, 2002: 215-228.
- [8] PUPPALA A, CHITTOORI B, YENIGALLA R, et al. Settlement mitigation using light weight fill embankment system [J]. American Society of Civil Engineers, 2013, 3: 3-7.
- [9] 顾欢达,顾熙. 河道淤泥的轻质化处理及其工程性质 [J]. 环境科学与技术,2010,33(9):63-66.
GU H D, GU X. Air foamed lightweight soil with river sludge and its engineering properties [J]. Environment Science & Technology, 2010, 33(9): 63-66. (in Chinese)
- [10] 郑涛,李海清,蒋瑜阳. 川北重丘区软基层气泡混合轻质土的工程技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016,33(1): 78-81.
ZHENG T, LI H Q, JIANG Y Y. Research on engineering technology of bubble mixed light soil for soft foundation in hilly area of northern Sichuan [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(1): 78-81. (in Chinese)
- [11] 何国杰. 冻融循环对气泡轻质土抗压强度的影响[J]. 后勤工程学院院报,2012,28(4):5-10.
HE G J. Influence of freeze-thaw cycles on compressive strength of bubble light soil [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2012, 28(4): 5-10. (in Chinese)
- [12] 章培培,顾欢达,陈冬青. 河道淤泥气泡混合土微观构造及力学性质相关性[J]. 土木建筑与环境工程,2015, 37(6):78-86.
ZHANG P P, GU H D, CHEN D Q. Correlation analysis of microscopic structure and the mechanical properties about foamed mixture ligheweight soil using river sludge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(6): 78-86. (in Chinese)
- [13] 张智,李明. 气泡混合轻质土的强度性能及应用[J]. 建筑工程技术与设计,2016(5):1810.
ZHANG Z, LI M. Foam cement banking mechanics and its application [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2016(5): 1810. (in Chinese)
- [14] 张立杰. 浅谈气泡混合轻质土在施工中的应用[J]. 科技与创新,2014(19):54-55.
ZHANG L J. Application of foam cement in construction [J]. Science and Technology & Innovation, 2014(19): 54-55. (in Chinese)
- [15] 徐辉,胡斌,唐辉明,等. 饱水砂岩的剪切流变特性试验及模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010, 29 (Sup1):2775-2781.
XU H, HU B, TANG H M, et al. Experiment and model research on shear rheological properties of saturated sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 2775-2781. (in Chinese)
- [16] 吴波,汪东林,程桦. 软土流变特性试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2008,16(5):1-4.
WU B, WANG D L, CHENG H. Tests on rheological behavior soft soil [J]. Journal of Anhui Institute of

- Architecture & Industry, 2008, 16(5): 1-4. (in Chinese)
- [17] ZHAO Y L, CAO P, WANG W J, et al. Viscoelasto-plastic rheological experiment under circular increment step load and unload and nonlinear creep model of soft rocks [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(3): 488-494.
- [18] HELMUT B, PETER B, HEINZ K. Study of the micro-mechanical behaviour of the Opalinus Clay: an example of cooperation across the ground engineering disciplines [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65(2): 195-207.
- [19] 徐卫亚, 杨圣齐. 关于“对‘岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用’的讨论”答复[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 641-646.
- XU W Y, YANG S Q. The answer on “nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application” [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 641-646. (in Chinese)
- [20] 徐卫亚, 杨圣齐, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433-447.
- XU W Y, YANG S Q, ZHU W J. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 433-447. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)