

在爆炸载荷作用下连云港海淤的粘性特征*

许连坡

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文研究了连云港海底淤泥的剪应力 F_t 和速度梯度 $\partial u/\partial n$ 的关系, 得到在爆炸载荷下, 它是幂律流体, 而且幂指数 a 很小, 这一点为爆破实验提供了很多方便。

关键词 粘滞力 幂律流体 流变体

一、前言

在爆炸处理海底软基的课题中, 淤泥是被炸介质。显然, 淤泥在爆炸作用下所表现的性质, 是我们所关心的重要问题之一。被炸淤泥, 灰黑或灰绿色, 较软; 天然含水量 W_s 为80%左右, 天然容重 γ 为 1.55 g/cm^3 左右; 固体颗粒中值粒径 d_{50} 为 $2 \sim 4 \mu\text{m}$, 粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的固体占有60—70%。直观上, 其性状如芝麻酱或油脂。土力学常规所给指标为: 内聚力(快剪) C 为 2000 Pa , 内摩擦角 $\varphi = 8^\circ$ 。显然, 和爆炸载荷相比, 淤泥的强度失去意义; 但因它很粘, 故其粘滞力可能起重要作用, 而粘滞力将导致雷诺数 $\text{Re} = \rho u L / \mu$ 的出现。在相似分析中, 这是破坏几何相似律的参数^[1]。众所周知, 在爆破研究和工程爆破中, 几何相似律是被普遍应用的; 一旦它不能成立, 则在小规模下得到的结果, 便不能几何相似地放大应用; 这将遇到很多麻烦。为此, 我们对连云港海淤做了粘度测试。

二、天然扰动淤泥的粘度

当淤泥的含水量 W_s 为80%时, 水和固体颗粒的体积比为2:1左右, 这是长期沉积的结果, 故淤泥可能有固结强度。但和爆炸载荷相比是可以忽略的, 于是我们使用扰动淤泥进行试验; 另一方面, 事实上, 我们也很难进行原状淤泥的粘度测试。所得结果为图1的曲线1, 其纵坐标是图左边的值, 其中“·”点是毛细管粘度计测到的, “○”点是流变仪上测得的。曲线接头处“○”点值较低是仪器引起的。我们看到, 应变率或速度梯度在 10^{-2} s^{-1} 到 10^3 s^{-1} 之间, 剪应力 F_t 可用下式表示

$$F_t = \mu (\dot{\gamma})^a \equiv \mu \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)^a \quad (1)$$

这里 $\dot{\gamma}$ 为应变率, 而 u 是流动速度, $\partial u/\partial n$ 是其法向导数, 即速度梯度, $a = 0.11$, $\mu = 2810 \text{ Pa} \cdot \text{s}^a$ 即为粘度系数。因 $a \ll 1$, 故淤泥是幂律流体, 它和牛顿流体不同, 其粘度系数的量纲不是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。我们将会看到, 由于 a 较小, 这在实验上给我们提供了很多方便; 但在计算上却增加了困难, 失去了 F_t 和 $\dot{\gamma}$ 的线性关系。

首先, 雷诺数——惯性力和粘滞力之比可写成

* 国家自然科学基金资助项目。

1990年1月16日收到。

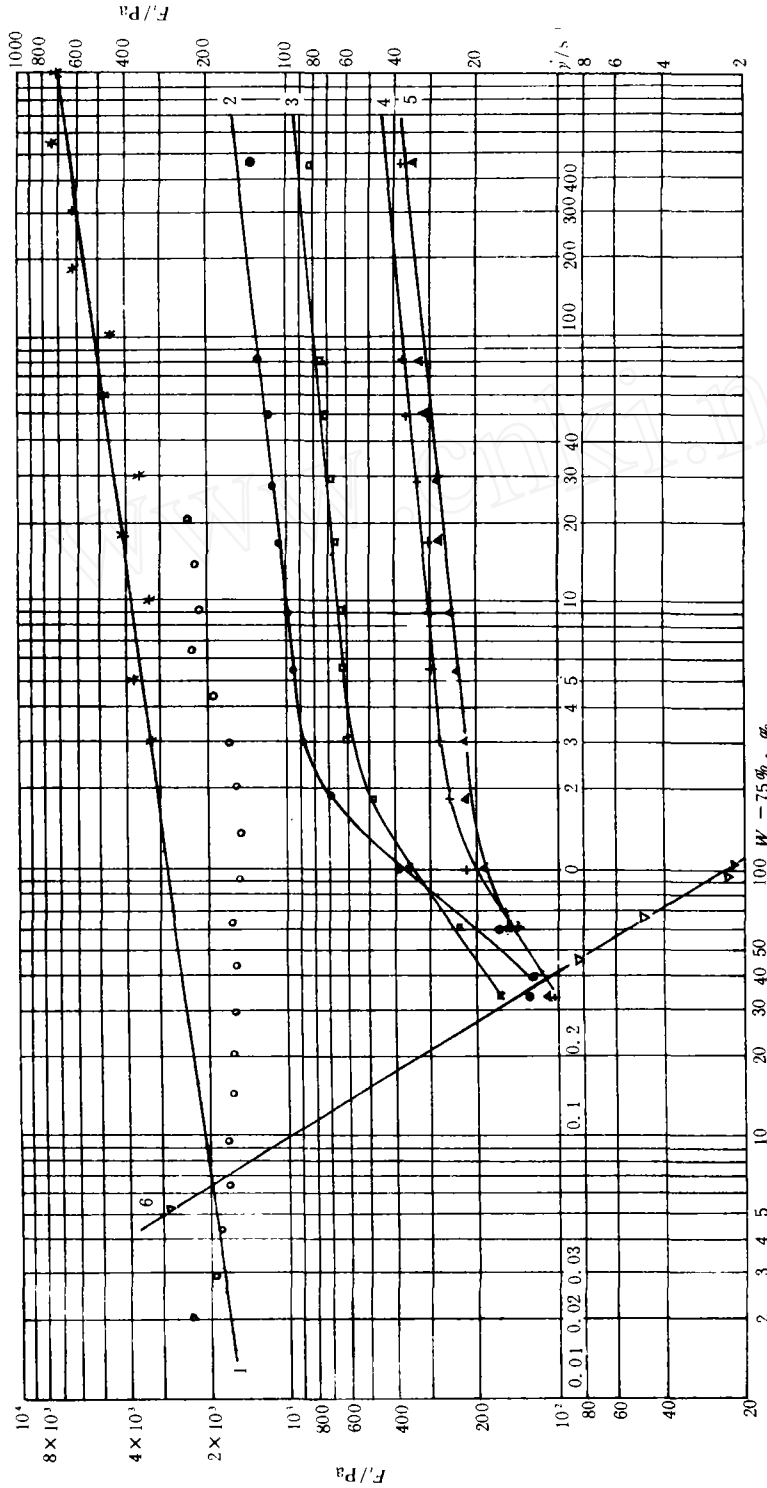


图1 连云港海泥的粘性

1. 天然扰动淤泥 $W_s = 80\%$ 2.—5. 加水扰动淤泥 W_s 为 120%, 140%, 170%, 200%, 6. μ 和含水量 W_s 的关系
 Fig. 1 Viscosity of seaooze at Lianyungang
 1. Disturbed ooze with natural content of water. $W_s = 80\%$ 2.—5. Disturbed ooze with increased content of water. $W_s = 120\%$, 140%, 170% and 200% 6. Relation of the μ with W_s

$$\text{Re} = \frac{\rho D^2}{\mu \left(\frac{D}{L}\right)^a} \quad (2)$$

这里 D 是炸药爆速, ρ 是淤泥的密度。由于 a 较小, 当特征尺度改变一个数量级时, Re 只改变了 30%, 有时这一误差甚至是可以接受的。

其次, 当爆破的最小抵抗线 $W = 10\text{cm}$, 装药量 $Q = 10\text{g}$ 时, 则抛速可达 10^2m/s , 这时 $\dot{\gamma} = 10^3\text{s}^{-1}$, 于是由 (1) 式可得, 这时的 $F_t = 6000\text{Pa}$, 和 C 值接近。因此, 在爆炸载荷作用的绝大部分区域中, 粘滞力都可忽略不计。特别在爆炸冲击波的传播中, 几何相似律是成立的, 这已为实验所证实^[2]。

第三, 在鼓包和空腔运动中, 惯性力为 ρu^2 , 当速度 $u \geq 10\text{m/s}$ 时, 则 $\rho u^2 \gg F_t$, 即粘滞力可忽略。因此, 当运动速度超过 10m/s 时, 淤泥即可呈理流流体的性质; 特别的, 对鼓包顶点的情况, 几何相似律可能成立, 这也为实验^[3] 所证实。

第四, 即使在淤泥中爆破, 10m/s 的鼓包运动速度也不是很小的, 它相当于岩体中一般松动爆破的鼓包运动速度值。计算表明: 当 $u = 1\text{m/s}$ 时, 其惯性力已和粘滞力相等; 由于爆破坑是由抛掷和破坏作用形成的, 抛速值不大, 故我们不能指望爆破坑也能满足几何相似律, 研究^[3] 表明, 影响爆坑几何相似甚至成形的原因, 当爆破规模稍大时 (最小抵抗线 $W > 1\text{m}$), 是重力起主要作用。

四、加水扰动淤泥的粘性

为了模型实验的需要, 我们在天然淤泥中加水, 使其粘度值 μ 发生改变; 因此测试了不同含水量 W_s (W_s 分别为 120%, 140%, 170% 和 200%) 的淤泥的粘滞特征, 结果如图 1 的曲线 2 ~ 5, 对这一组曲线, 其坐标 F_t 用右边的值。我们看到, 当 $\dot{\gamma}$ 的值在 3s^{-1} 到 450s^{-1} 之间时, 各曲线基本平行, 取 $a = 0.11$ 时, 其误差约为 $\pm 5\%$ 。曲线 2 ~ 5 是旋转粘度计测得的, 曲线 1 是毛细管粘度计测得的, 但 a 值相同。由此我们认为, 曲线 1 ~ 5 基本是可靠的。当 $\dot{\gamma} < 3\text{s}^{-1}$ 时, 曲线 2 ~ 5 的特征改变, 即随 $\dot{\gamma}$ 的减少, F_t 下降的更快。对泥浆来说, 有的著者^[4] 用宾汉体来代表, 这可从 $\dot{\gamma} < 3\text{s}^{-1}$ 的曲线 2 和 3 看出。至于加水扰动淤泥为什么会出这种特性, 我们尚无法解释。对于扰动淤泥, 其颗粒间的固结结构已经消失, 成为悬浮液。由于普通水的粘度很小, 约为 $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$; 连云港海淤的固体颗粒尺寸范围为 $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{mm}$ 。在一倍体积的固体颗粒中分别加 2 倍、3 倍、4 倍、4.6 倍和 5.4 倍的水, 即为曲线 1 ~ 5 所代表的淤泥。显然, 它们的粘性主要取决于固体颗粒的作用, 即上述介质的性质取决于大量的, 粒径在 $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{mm}$ 的固体颗粒在水中的运动, 这属于“精细力学”的问题^[5]。

当 $\dot{\gamma} < 3\text{s}^{-1}$ 时, 测试的误差可能较大, 各曲线看不出统一的规律性; 且曲线 1 似不出现其他曲线的类似现象, 这一结果的出现, 使低速度下的实验工作复杂化。

曲线 1 ~ 5 的 μ 值和含水量 W_s 的关系如图 1 的曲线 6, 其纵坐标在图的左侧。而近似关系可以写成

$$\mu = A(W_s\% - B)^{-n} \quad (3)$$

其中 $A = 3.6 \times 10^4\text{Pa}\cdot\text{s}^a$, $B = 75\%$, $n = 1.58$ 。当然, 这一关系对曲线 2 ~ 5, 即 W_s 为 120%,

140%、170%和200%时, $\dot{\gamma}$ 应大于 3s^{-1} , 小于 10^3s^{-1} 。

$\mu-W_s$ 关系表明, 当 $W_s > 120\%$ 时, μ 的变化不敏感; 而当 $W_s \leq 120\%$ 时, μ 对 W_s 的变化很敏感。不仅如此, 当我们用关系 (3) 外推时, 当 $W_s \rightarrow 75\%$ 时, $\mu \rightarrow \infty$, 即这时关系 (1) 可能不再适用, 介质出现新的特征。实际上, 当淤泥的含水量再降低时, 仍可产生流动, 同时在淤泥中还可有波动传播, 这一点甚至当 $W_s = 80\%$ 的扰动淤泥中也可看见。这样, 也许用麦克斯威尔体, 或再复杂一些的如图 2 所示的介质来描述淤泥的特征, 可能更合理。

显然, 含水量增加时 μ_2 变小, 流动性增大; 而当 W_s 减少时, μ_2 增加。当 μ_2 足够大时, 弹簧 E 便起作用了, 介质的性质即发生变化。当小幅高频载荷作用时, 应力波通过 E 可传播, 这就是弹簧的作用; 其振动阻尼就是 μ_1 引起的。

实际上, 在旋转粘度计上测粘度时, 当 $\dot{\gamma} > 9 \sim 16\text{s}^{-1}$ 时, 曾发现振荡现象出现。图 1 中的取值是稳定后的值。由于弹簧 E 的存在, 故在突加载荷时, 粘度计上转子和杯之间的淤泥有弹性, 从而引起振荡出现; 另一个原因是, 当 E 较小, 而 μ_1 较大时, 该系统对突加载荷不能响应, 从而引起测力计中弹性系统起作用, 形成振震。但无论哪种原因, 取 F_t 的稳定值都是正确的。对大变形, 自然是 μ_2 起作用。

参加本工作的还有章培德同志。

参 考 文 献

- [1] 许连坡, 爆炸与冲击, 5(4)(1985), 1.
- [2] 杨振声等, 冲击波在淤泥中的传播规律, 第四届全国工程爆破学术会议论文汇编, (五)(1989), 西安, 1001.
- [3] 许连坡等, 爆炸与冲击 9(4)(1989), 328.
- [4] Шищенко, Р.И., 袁恩熙等译, 泥浆水力学, 石油工业出版社, 北京, (1957).
- [5] 钱学森, 写在前面, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, 北京, (1980).

THE VISCOUS CHARACTERISTICS OF SEA OOZE UNDER EXPLOSIVE LOADING AT LIANYUNGANG PORT

Xu Lianpo

(Institute of Mechanics Academia Sinica)

ABSTRACT The viscosities of sea ooze at Lianyungang port have been measured and described in this paper. The water content W_s of the natural ooze is about

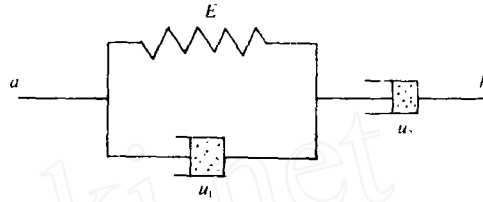


图 2 流变体
Fig.2 Rheid

80%; the cohesive force C under rapid shear is 2000 Pa; the internal friction angle $\varphi=8^\circ$ and the solid particle size ranges over $10^{-2}\sim 10^{-3}$ mm. The test results for the natural ooze are shown in Fig.1. by curve 1 which indicates that the ooze behaves as a power-law fluid. The relationship between the shear force F_t and the velocity gradient $\partial u/\partial n$ is given by Eq.(1) Because of the small value of α , when $\partial u/\partial n$ approaches 10^3s^{-1} , F_t reaches only about the level of C and is far below that under the explosive loading. Therefore, for intense explosive loading the viscous force can be neglected, the geometrical similarity may hold and greatly convenient to the blasting model tests.

The viscosity test results for the natural ooze added with water up to W , being 120%, 140%, 170% and 200% are shown in Fig.1 by curves 2~5 respectively, they indicate that for $\partial u/\partial n 3\text{s}^{-1}$; Eq.(1) is still available and α keeps unchanged. However μ decreases with increasing of W , as shown by the curve 6 in Fig.1; and the fitting of which could be expressed as Eq.(3).

Since the wave propagation may occur in the natural ooze, it may be more reasonable to take the rheid model for the analysis as shown in Fig.2.

KEY WORDS viscous force, power-law fluid, rheid.