

# 底泥の粘弾性特性の計測と数値モデルへの応用

An Ngoc Nguyen\*, 柴山 知也\*\*, 佐藤 慎司\*\*, 岡 安章夫\*\*\*

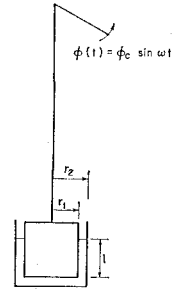
## 1. 緒 論

波による底泥移動量を算定するためのモデル化が現在までに粘性流体多層モデル (中野ら, 1987), 粘弾性体多層モデル (柴山ら, 1988), 粘弾塑性体多層モデル (柴山ら, 1989) などいくつか行われている。しかし底泥の物理的性質の把握が不十分なために底泥の性質を正確に反映したモデルとはなっていない。本研究では、底泥を粘弾塑性体として仮定した場合の数値モデルに用いることを目的として、底泥物性の計測を波動 (正弦振動) 場に関して広範な条件のもとで正確に行い、計測結果を基に底泥物性を評価するための方法を示した。計測に当たっては正弦振動型粘弾性測定器 (柴山ら, 1989) を用いた。

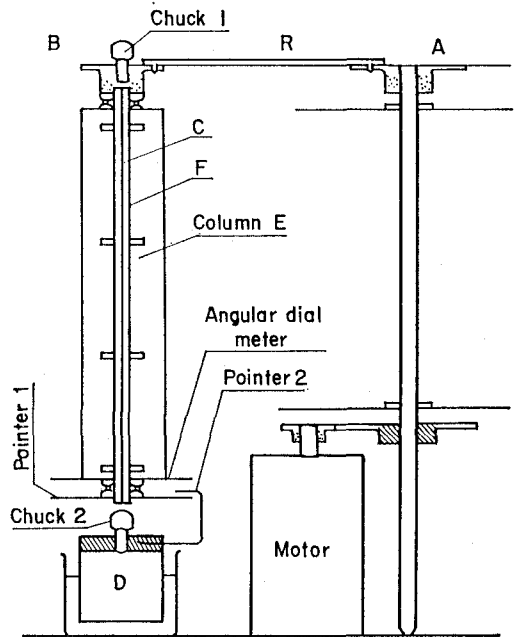
従来底泥物性の評価に関する研究としては、大坪, 村岡 (1985), 鶴谷ら (1986) の回転粘度計を用いた結果があるが、回転運動から得られる物性と振動から得られる物性は違うと考えられる。また, Trien ら (1990) の任意運動が可能な円筒型粘土計を用いた計測は振動に関する結果を取り扱っており、彼らの結果からも含水比が大きく、周期が短い場合、おおまかには底泥を正弦振動下で粘弾性体と仮定することが妥当と思われる。

## 2. 実 験

本研究では波動場での底泥の移動状況と底泥物性を把握するために柴山ら (1989) のものを改良して正弦振動型の粘弾性測定器を新たに作成し、含水比 100—300%, 振動周期 0.4—3.9 s, Shear Rate 0.3—7.0 s<sup>-1</sup>, 総ケース数 216 ケースと非常に広範囲の条件にわたって底泥の粘弾性測定を行った。その際、内円筒、外円筒の表面を粗面として no-slip 条件を確保するよう努める、内円筒と外円筒を結ぶ弾性棒を数種類用意し、ねじり弾性率を広範囲に変化させるなど、過去の回転円筒型あるいは振動型の測定器からの経験を用いて多くの改良を行っている。図—1 に計測器の概念図を、また 図—2 に今回用い



図—1 振動型粘弾性測定装置概念図



図—2 測定装置概略図

た装置の概略図を示す。測定の原理については、Nakagawa (1952) あるいは青木ら (1989) を参照されたい。なお今回の測定では非共振状態における条件を用いて係数の算定を行っている。

計測結果から含水比, ずり速度, ずり変形, 振動周期などを変数として粘性係数, 弾性係数の値の変化を調べ

\* 学生会員 工修 横浜国立大学大学院 工学研究科

\*\* 正 会 員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

\*\*\* 正 会 員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

た。物理的な検討からは粘性係数に関しては含水比，ずり速度が，また弾性係数に関しては含水比，ずり変形，振動周期などが重要なパラメーターとなることが予測できる。以下では実験値に関してこれらのパラメーターとの相関を種々検討する。

### 3. 実験結果と物性の評価法

まず粘性係数の検討について述べる。図-3に粘性係数とずり速度の関係を含水比別に示す。図から明らかなように粘性係数を含水比別にずり速度の関数として扱うことが可能である。この実験結果から含水比別に回帰式を求めると以下の式が得られる。

$$\text{Water content 300\%} \quad \log \eta = -0.328 \log D + 1.887 \quad \dots (1)$$

$$\text{Water content 275\%} \quad \log \eta = -0.792 \log D + 1.949 \quad \dots (2)$$

$$\text{Water content 250\%} \quad \log \eta = -0.711 \log D + 2.25 \quad \dots (3)$$

$$\text{Water content 225\%} \quad \log \eta = -0.857 \log D + 2.51 \quad \dots (4)$$

$$\text{Water content 200\%} \quad \log \eta = -0.880 \log D + 2.63 \quad \dots (5)$$

$$\text{Water content 175\%} \quad \log \eta = -1.000 \log D + 2.77 \quad \dots (6)$$

$$\text{Water content 150\%} \quad \log \eta = -1.052 \log D + 2.94 \quad \dots (7)$$

$$\text{Water content 125\%} \quad \log \eta = -1.078 \log D + 3.32 \quad \dots (8)$$

$$\text{Water content 100\%} \quad \log \eta = -1.105 \log D + 3.78 \quad \dots (9)$$

$\eta$ : 粘性係数 (ポワズ),  $D$ : ずり速度,  $W$ : 含水比 (%) である。

以上の式は一般に以下の形式で表すことができる。

$$\log \eta = a \log D + b \quad \dots (10)$$

さらにここではこれらの係数  $a$  と切辺  $b$  について含水比の係数として表すことを試みる。図-4は係数  $a$  について含水比 ( $W$ , %) の関数として整理したもので，回帰式は

$$a = 0.174 \times 10^{-4} W^2 - 0.377 \times 10^{-2} W - 0.882 \quad \dots (11)$$

で表すことができる。また切片  $b$  について同様の試みをしたのが 図-5 であり，回帰式は

$$b = 4.45 - 0.888 \times 10^{-2} W \quad \dots (12)$$

となる。ここで含水比が低いほど，ずり速度の増加に応じて粘性係数が急速に減少することは重要な結果である。以上より，粘性係数は含水比，ずり速度の関数として整理できた。図-4，図-5における点のばらつきが

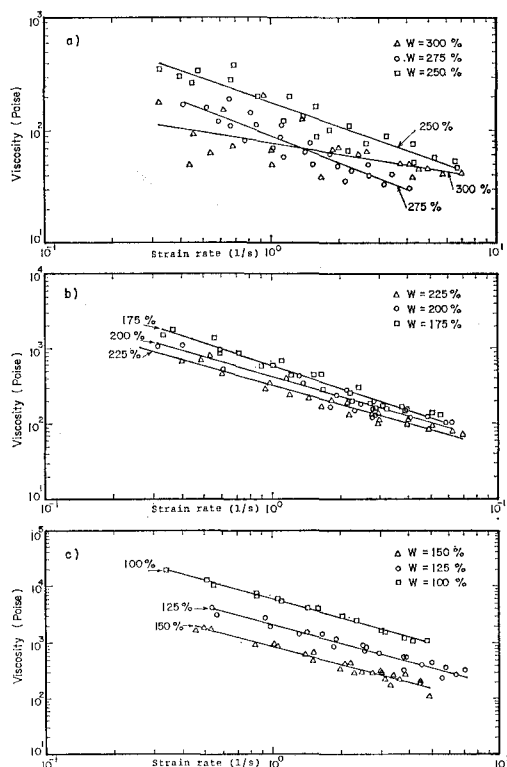


図-3 粘性係数とずり速度の関係

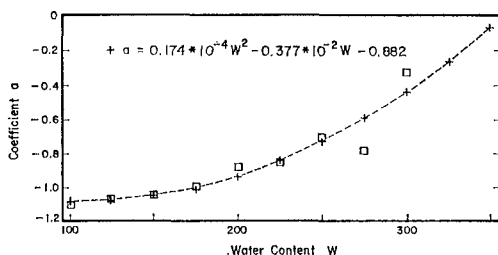


図-4 係数  $a$  の回帰曲線

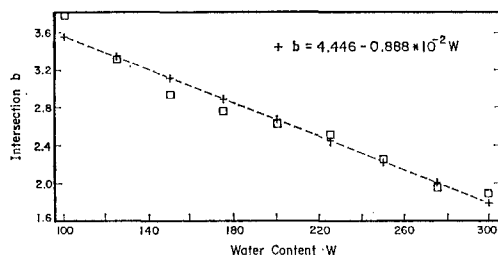


図-5 切辺  $b$  の回帰曲線

小さいことから以上の方法が粘性係数の計算法として適切であることが推察できる。

次に弾性係数については，まず含水比とずり変形の関数として表すことを試みた。図-6は含水比別に弾性係

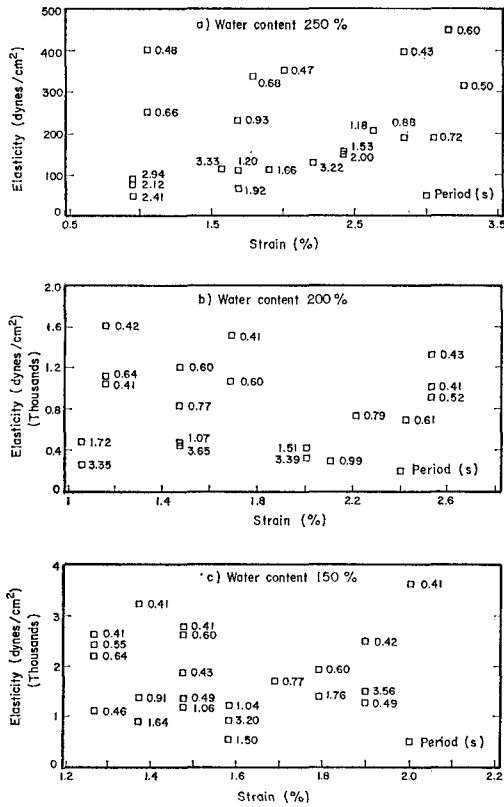


図-6 弾性係数とずり変形の関係 (図中の数字は周期 s)

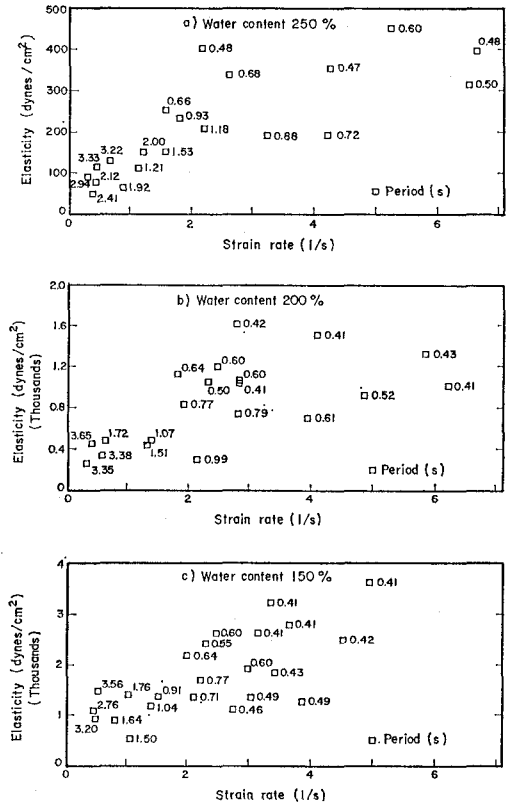


図-7 弾性係数とずり速度の関係 (図中の数字は周期 s)

数をずり変形の関数として表そうと描いたものであるが 2 量の間に相関を見いだすことはできない。次に 図-7 は含水比別に弾性係数をずり速度の関数として表そうとしたものであるが、ここでも明確な相関を得ることはできなかった。さらに 図-8 は弾性係数を含水比別に 275% 以下のものについて振動周期の関数として表したものである。この場合にはかなり明確な相関を得ることができる。図-8 から得られる回帰式は含水比別に以下のようになる。

$$\text{Water content 275\% } \log G = 2.2 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{Water content 250\% } \log G = 2.3 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{Water content 225\% } \log G = 2.6 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{Water content 200\% } \log G = 2.8 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{Water content 175\% } \log G = 2.95 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{Water content 150\% } \log G = 3.15 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{Water content 125\% } \log G = 3.5 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\text{Water content 100\% } \log G = 3.9 - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで  $G$ : 弾性係数 (dyne/cm²),  $T$ : 波の周期 (s) である。

上記の式よりまとめると弾性係数については

$$\log G = c - 0.80 \log T \quad \dots\dots\dots (21)$$

で表せる。

さらに係数  $c$  の値について 図-9 に含水比について整理した値を示す。図より回帰分析の結果

$$c = 4.66 - 0.00927 W \quad \dots\dots\dots (22)$$

を得る。また図より、実験値のばらつきは小さく、上記の回帰式は実験結果をよく再現しているといえる。

図-10 に示したのは含水比 300% の場合について同様の整理をしたものであるが弾性係数の値は小さく、含水比が 300% を超えるような底泥についてはほぼニュートン流体として取り扱えるようである。

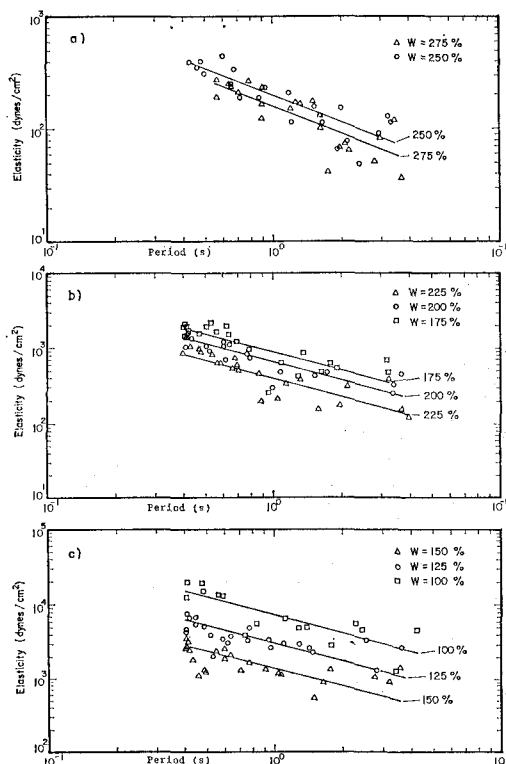


図-8 弾性係数と周期の関係

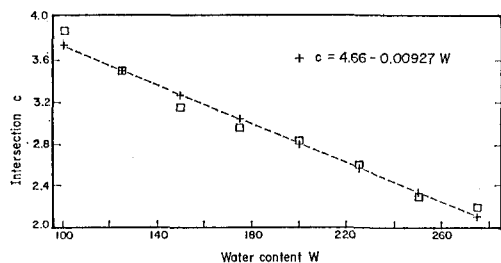
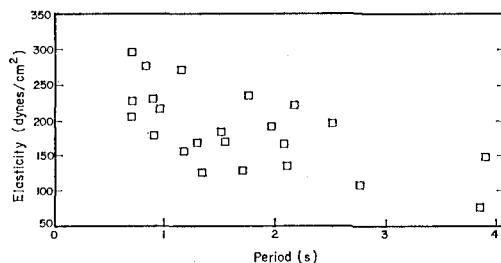
図-9 係数  $c$  の回帰曲線

図-10 含水比300%の場合の弾性係数と周期の関係

#### 4. 数値モデルへの応用

今回の計測で得られた粘性係数と弾性係数の値を非降伏領域における底泥の物性を与えるものと考えて、柴山ら(1989)の粘弾性体モデルを改良した。具体的には、粘弾性体における粘弾性特性を今回の結果で与え、降伏値は柴山ら(1989)と同様に与えた。さらに、降伏後の粘塑性体については、ビンガム流体に対する中野ら(1987)の相当粘度を用いて粘弾塑性体モデルにおける底泥物性値を変更している。

図-11は柴山らのモデルと今回のモデルの計算結果を比較したものである。本モデルで計算された速度分布について、下層の速度勾配の大きい領域は底泥がすでに降伏している領域に対応し、上層はshearが小さく、底泥が粘弾性体として計算されている領域である。このような分布形状は他の例についても一般的にみられ、今回の改良モデルではshearが底面に集中する傾向にある。

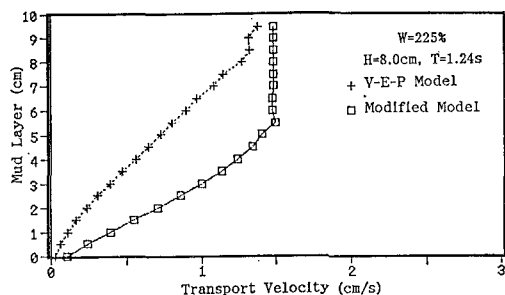
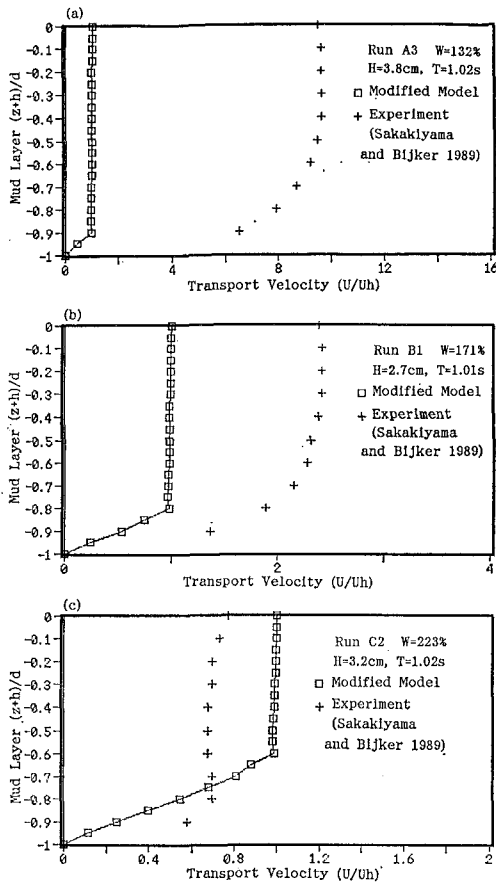


図-11 粘弾塑性体モデル(柴山ら, 1989)と改良モデルの比較

さらに本モデルと Sakakiyama・Bijker (1989)の実験結果を比較したのが図-12である。図中  $x$  軸は、本モデルを用いて計算された上部境界面における底泥移動速度  $U_b$  で無次元化した流速値をとってある。Sakakiyama・Bijkerの実験結果では、いずれの場合も底面付近にshearが集中し、上層における速度勾配が小さくなるが、本モデルはその傾向を説明しているといえる。また、特に低含水比の場合に輸送量の絶対値にモデルと実験値の差がみられるが、これは底面での境界条件を単純に no-slip で与えてよいのかという点も含めて、今後の課題と考えている。

#### 5. 結 論

波動(振動)条件における底泥の物性を実験結果より検討した。その結果、粘性係数については含水比とずり速度、弾性係数については含水比と振動周期をパラメータとして用いることにより、広範囲な条件について正確に評価可能となった。この底泥物性の定量化により、さ



図—12 本モデルと Sakakiyama・Bijker (1989) の実験値との比較

きに開発した底泥移動量予測のための数値モデルによる算定を、より広範囲な条件について現実に近づけることができる。

本研究は、文部省科研費一般C（代表者 柴山知也，No. 03650417）および五洋建設株式会社よりの研究費による研究であることを付記する。

## 参考文献

- 青木 徹・柴山知也・佐藤慎司 (1989): 正弦振動型同心二重円筒を用いた底泥の粘弾性係数の測定例, 第44回年講概要集, 2, pp. 800-801.
- 大坪国順・村岡浩爾 (1986): 底泥の物性及び限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 393, II-4, pp. 225-234.
- 柴山知也・佐藤慎司・平出和也・青木 徹 (1988): 波による底泥の質量輸送速度, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 347-351.
- 柴山知也・青木 徹・佐藤慎司 (1989): 粘弾塑性体モデルによる底泥移動量の評価法, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 334-338.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹浜 潤 (1986): 回転粘土計による底泥の流動特性の検討, 港研資料, No. 566, 29 p.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹浜 潤 (1987): 相当粘度を用いた波と底泥の相互干渉に付いての計算, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 266-270.
- Huynh Ngoc Trien・磯部雅彦・小林智尚・渡辺 晃 (1990): 底泥のレオロジー特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 225-229.
- Nakagawa, T. (1952): Spinnability of liquid, A visco-elastic state II, Spinnability and visco-elastic property, Bull. of Chemical Society of Japan, Vol. 25, pp. 93-97.
- Sakakiyama, T. and Bijker, E.W. (1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves, J. of WW, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 614-633.