

# 底泥特性の周期依存性に着目したモデルとその検証

柴 山 知 也\*・An Ngoc Ngyuen\*\*

## 1. 緒 論

波による底泥移動量や底泥床上での表面波の減衰率を算定するためのモデル化が、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であったために、底泥の性質を正確に反映したモデルとはなっていないのが現状である。An ら（1991）の研究では、振動型粘弾性測定を用いて Voigt 型のモデルを想定して粘弾性を精密に測定した。彼らは測定結果を基に粘性係数を含水比とずり速度、弾性係数については含水比と振動周期をパラメーターとして整理し、粘弾塑性体数値モデルに応用している。しかしながらこの方法では特に低含水比の場合にモデルの予測値は実験値を大きく下回ってしまう。さらに底泥層内の鉛直方向の速度勾配が小さくなると粘性係数の見積りが実験値からの外挿になってしまい、余りにも過大な粘性係数の値を用いることになり、モデルの確からしさが失われてしまう。そこで本研究では An らの実験データを再検討した。その結果、波による波動運動に対する泥層の応答に関して、粘性係数、弾性係数を含めた底泥の物理特性が波動周期に強く依存することを発見した。さらにこの結果を、底泥を粘弾塑性体として仮定した数値モデルに応用することを目的とした。

## 2. 底泥物性の表現方法

本研究で用いた実験データは An ら（1991）によるものである。このデータは任意に振動周期、振動振幅を変化させることができる正弦振動型粘弾性測定装置（Nakagawa, 1952 あるいは青木ら, 1989）を用いて底泥の粘性係数、弾性係数を計測したものである。含水比を 100% から 300% にわたって 9 段階に変化させて、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、振動周期が、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となることが予測できる。今回の再検討の結果、最終的には粘性係数、弾性係数ともに含水比と振動周期との間に強い相関関係を有していることが解ったので、それぞれを実験値からの回帰式で表した。これらの物性値の周期依存性は以下のように説明できる。現在のモデルでは Voigt 型の粘弾特性を底泥の特性として仮定している。しかしながら現実の物性は Voigt 型のモデルで大半が説明できるものの、Maxwell 型との組合せで説明すべき部分がある。今回の結果は Maxwell 型の影響を粘弾性係数の周期依存性として部分的に取り込むという意味を持ち、十分にうなずけるものである。

図-1 は粘性係数と振動周期の関係を含水比別に表したものである。また、図-2 は弾性係数と振動周期との関係を含水比別に表したものである。どちらの図も両係数が含水比別に振動周期（振動周波数）との間に強い相関を有することを示している。過去に回転型の粘度計を用いた場合にはずり速度を用いて整理することが一般に行われてきたが（大坪, 村岡, 1985 あるいは鶴谷ら, 1986）波動下の移動を考える場合には今回のような周期、振動数に着目した整理をした方が適当であろう。

つぎに実験値から得られた回帰式について示す。まず粘性係数については

$$\eta = aT \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表せる。ここで、 $\eta$ : 粘性係数 (ボワズ),  $T$ : 振動周期 (s), さらに

$$a = 4.17 - 8.55 \times 10^{-3} W \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $W$ : 含水比 (%) である。図-3 に係数  $a$  を求めるのに用いたデータと回帰線を示す。データのばらつきが少なく、この回帰式がかなりよい近似を与えることが解る。

次に、弾性係数については

$$\log G = b + c \log (T - T_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表せると考えた。ここで  $G$ : 弾性係数 (dyne/cm<sup>2</sup>),  $T$ : 波の周期 (s) である。それぞれの含水比についての回帰式は以下になる。

含水比

\* 正 会 員 工 博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

\*\* 学生会員 工 修 横浜国立大学大学院 工学研究科

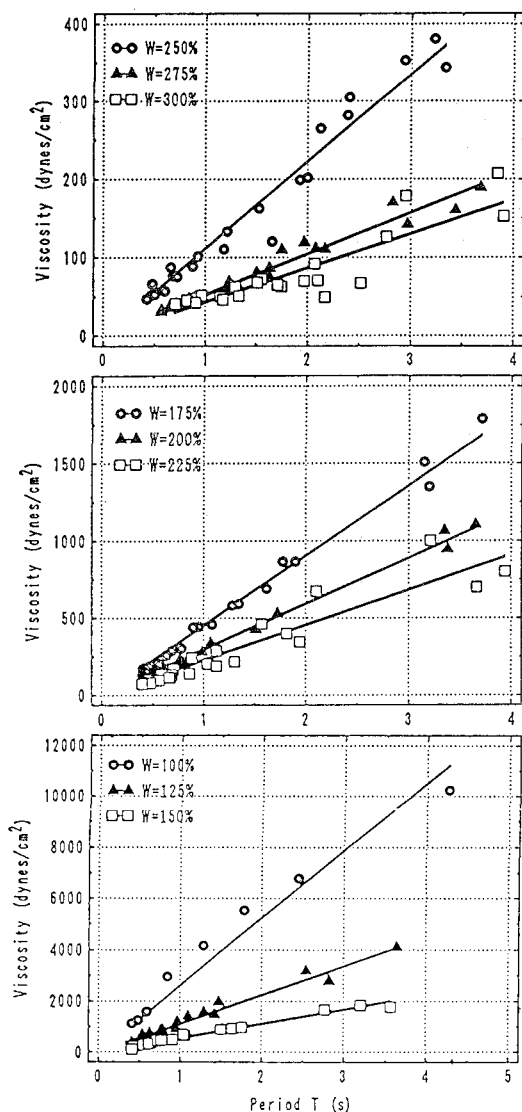


図-1 粘性係数と波の周期の関係 (含水比  $W$  別に整理したもの)

$$\begin{aligned}
 275\% \quad & \log G = 2.13 - 0.732 \log (T - 0.185) \quad \cdots (4) \\
 250\% \quad & \log G = 2.20 - 0.633 \log (T - 0.215) \quad \cdots (5) \\
 225\% \quad & \log G = 2.51 - 0.596 \log (T - 0.245) \quad \cdots (6) \\
 200\% \quad & \log G = 2.72 - 0.458 \log (T - 0.275) \quad \cdots (7) \\
 175\% \quad & \log G = 2.86 - 0.462 \log (T - 0.305) \quad \cdots (8) \\
 150\% \quad & \log G = 3.09 - 0.261 \log (T - 0.335) \quad \cdots (9) \\
 125\% \quad & \log G = 3.44 - 0.229 \log (T - 0.365) \quad \cdots (10) \\
 100\% \quad & \log G = 3.74 - 0.191 \log (T - 0.405) \quad \cdots (11)
 \end{aligned}$$

さらにこれらをまとめて係数を整理すると

$$b = 4.66 - 9.27 \times 10^{-3} W \quad \cdots (12)$$

$$c = 0.162 - 3.24 \times 10^{-3} W \quad \cdots (13)$$

$$T_0 = 0.552 - 1.23 \times 10^{-3} W \quad \cdots (14)$$

である。この場合にもデータのちらばりは小さく、この

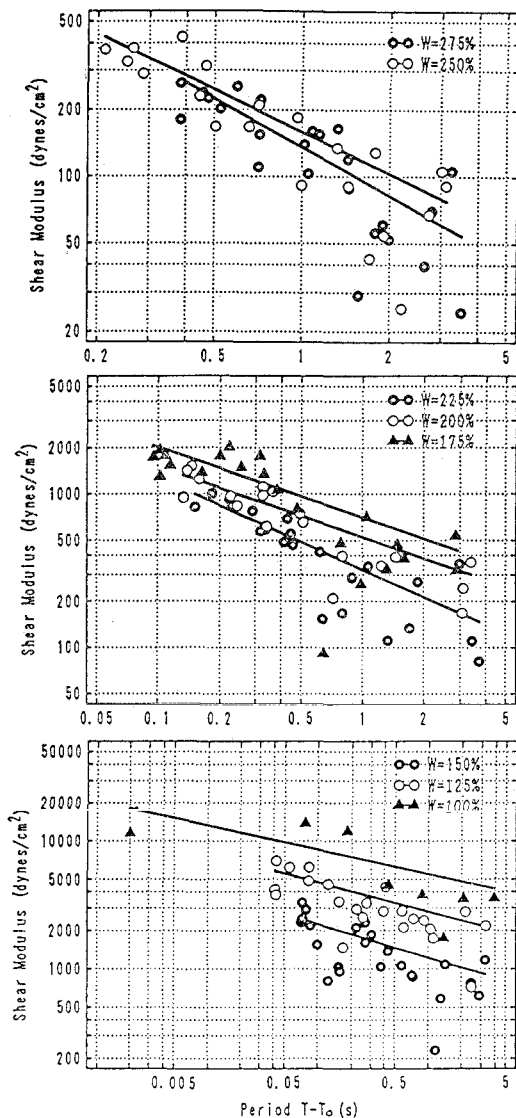


図-2 弾性係数と波の周期の関係

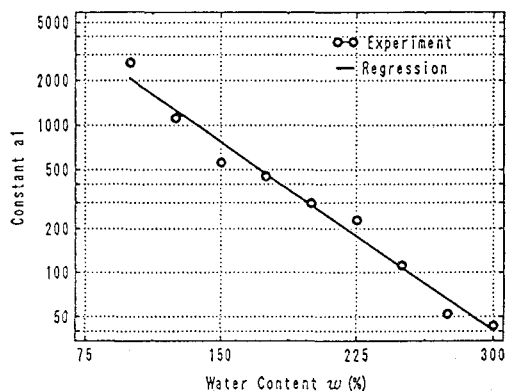


図-3 式(2)における定数の回帰式の求め方

表-1 実験条件 (Sakakiyama・Bijker, 1989)

| Run No. | $\rho_m$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $d_i$<br>(m) | $d_m$<br>(m) | $T$<br>(s) | $H_{w0}$<br>(m) | Measurement |
|---------|----------------------------------|--------------|--------------|------------|-----------------|-------------|
| A3      | 1380                             | 0.30         | 0.090        | 1.02       | 0.038           | $\bar{u}_L$ |
| A7      | 1370                             | 0.30         | 0.090        | 0.70~2.00  | 0.010~0.040     | $k_i$       |
| B1      | 1300                             | 0.30         | 0.093        | 1.01       | 0.027           | $\bar{u}_L$ |
| B2      | 1300                             | 0.30         | 0.090        | 0.60~2.00  | 0.010~0.037     | $k_i$       |
| C2      | 1230                             | 0.30         | 0.093        | 1.02       | 0.032           | $\bar{u}_L$ |
| C4      | 1240                             | 0.30         | 0.090        | 0.60~2.00  | 0.010~0.034     | $k_i$       |
| D2      | 1140                             | 0.30         | 0.092        | 1.02       | 0.032           | $\bar{u}_L$ |
| D4      | 1150                             | 0.30         | 0.090        | 0.60~2.00  | 0.010~0.034     | $k_i$       |

 $\rho_m$ : 底泥密度 $d_i$ : 水層厚さ $d_m$ : 泥層厚さ $H_{w0}$ : 入射波高 $\bar{u}_L$ : 底泥質量輸送量 $k_i$ : 波高減衰率

近似式で実験の範囲内の弾性係数はよく表されている。底泥物性が周期に依存することは Trien ら (1991) の実験結果でも指摘されており、以上のような再整理は十分に意味のあるものである。

### 3. 数値モデルの改良

以上の結果を用いて数値モデル (多層粘弾塑性体モデル, Shibayama et al., 1990) を改良し, より底泥の物性を反映できるようにした。多層粘弾塑性モデルとは粘弾塑性体モデルに降伏値の概念を導入し, 降伏値以上の応力が発生した場合に弾塑性体として扱うというもので, 各パラメータを物性に沿って正確に与えることにより, かなり精度よく底泥の挙動を予測することができる。ここで多層モデルにすることにより含水比の鉛直分布をモデルに取り入れることができる。このことは前述したように底泥物性が含水比に大きく依存している点から重要である。また, 柴山ら (1989) のモデルと異なり, 粘性係数がずり速度の関数ではないため, 粘弾性係数がそれぞれ収束するまでの繰り返し計算の回数は飛躍的に節約されている。

この他にモデルの改良点としては柴山ら (1989) のモデルでは粘塑性状態の計算をする際に粘弾性モデルを用いて便宜的に計算するために見かけの弾性係数 (false shear modulus),  $G_y = -i\omega \frac{\tau_y}{\dot{\epsilon}}$  を用いているがここではこの値を

$$G_y = \frac{\tau_y}{\dot{\epsilon}} \quad (15)$$

で与えている。ここで  $\omega$ : 角周波数,  $\tau_y$ : 降伏値,  $\dot{\epsilon}$ : ひずみ,  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  である。これは粘弾性状態, 粘塑性状態それぞれの場合について摩擦応力を

$$\tau = \begin{cases} \mu_1 \dot{\epsilon} + G \epsilon & \text{if } \tau \leq \tau_y \\ \mu_2 \dot{\epsilon} + G_y \epsilon & \text{if } \tau > \tau_y \end{cases} \quad (16)$$

とおいたことに対応している。これは上記柴山ら (1989) の方法に比べて, 実数型の変数  $\tau_y$  を複素型の変数  $G_y$  に置き換える必要が無い,  $G_y \epsilon$  が物理的に  $\tau$  と同じ意味を持つなどの利点を持っている。

検証用の実験データとしては波高減衰と底泥質量輸送を同時に計測している Sakakiyama and Bijker (1989) のものを用いた。表-1 には彼らの実験ケースを示す。ここで  $\rho_m$  は底泥密度,  $d_i$  は水層厚さ,  $d_m$  は底泥厚さ,  $H_{w0}$  は底泥部に入射する波高である。また表-2 にはこれらの底泥に対して用いるべき降伏値と粘塑性状態における粘性係数値についての検討を掲げる。ここで

表-2 底泥の降伏応力と粘塑性状態の粘性係数

| Case                                | A    | B    | C    |
|-------------------------------------|------|------|------|
| $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )       | 1380 | 1300 | 1225 |
| $w$                                 | 132  | 171  | 223  |
| $\tau_y^*$ (N/m <sup>2</sup> )      | 22   | 19   | 8    |
| $\mu^*$ (Ns/m <sup>2</sup> )        | 2.2  | 2.08 | 0.70 |
| $\tau_y^{**}$ (N/m <sup>2</sup> )   | 9.5  | 5    | 2.6  |
| $\mu^{**}$ (Ns/m <sup>2</sup> )     | 12   | 8.5  | 5.9  |
| $\tau_y^{***}$ (N/m <sup>2</sup> )  | 5.5  | 4.2  | 3    |
| $\mu^{***}$ (Ns/m <sup>2</sup> )    | 1    | 0.8  | 0.5  |
| $\tau_y^{****}$ (N/m <sup>2</sup> ) | 6.8  | 2.5  | 1.7  |
| $\mu^{****}$ (Ns/m <sup>2</sup> )   | 5.7  | 5.0  | 3.0  |

\* from Sakakiyama and Bijker (1989)

\*\* from Tsuruya et al. (1987)

\*\*\* from Trien (1991)

\*\*\*\* chosen values

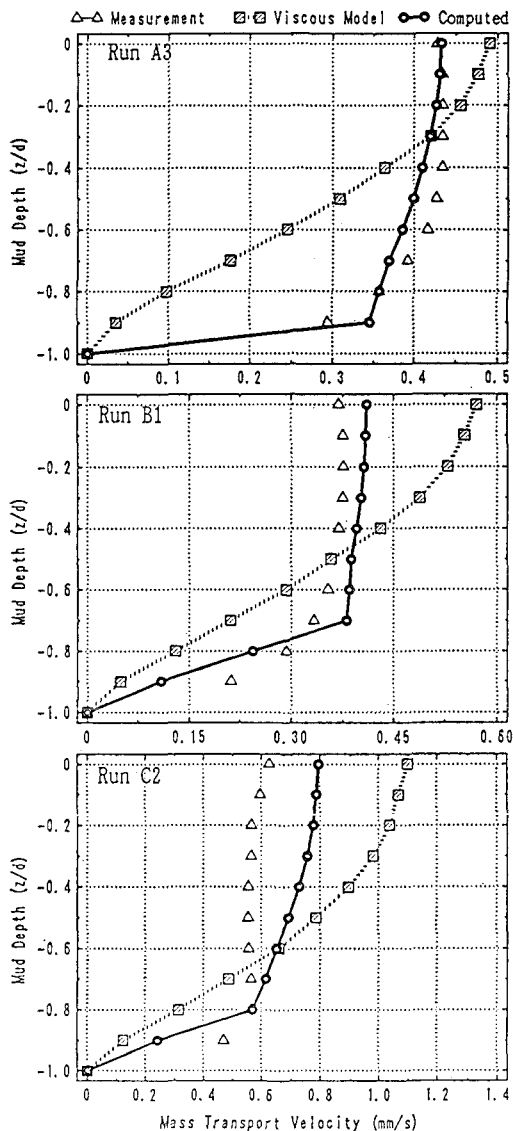


図-4 底泥質量輸送量の計測値と算定値の比較 (計測値, 粘性流体モデルは Sakakiyama・Bijker, 1989 による)

降伏値は粘弾性モデルと粘塑性モデルの境界を与えるものであり, 数値モデルは降伏値に対してかなり敏感と思われた。この表では過去のいくつかの計測例を示し, さらに数値モデルに関して試行の結果最も適当と思われる値を示してある。実際に数値モデルで計算してみると, 例えばケースA3について粘性係数  $\mu$  を固定して降伏値の値を 6.8 から 7.6 に変化させても底泥質量輸送量の最大値は変化せず, 結果としてこれらの係数に関して数値モデルは過敏ではなかった。

改良した数値モデルの計算結果を, Sakakiyama and Bijker (1989) の実験結果および粘性流体モデルによる計算結果と比較したのが図-4である。従来のモデルに

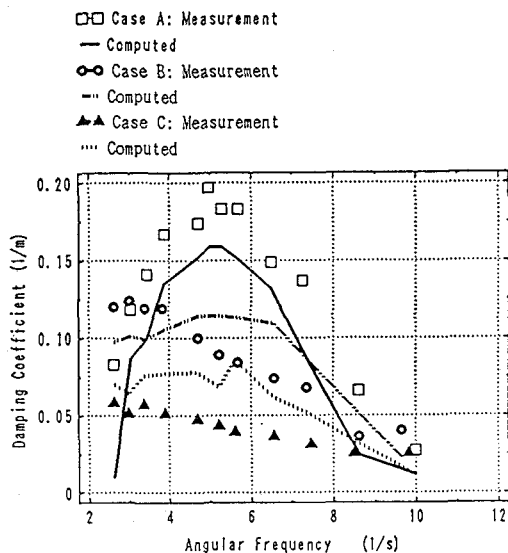


図-5 波高減衰定数の計測値と算定値の比較 (計測値は Sakakiyama・Bijker, 1989 による)

比べて速度の絶対値, 速度勾配ともに予測の精度が格段に向上していることがわかる。従来の粘性流体モデルでは Bingham 流体を仮定して, 粘性係数をずり速度の関数として扱ったものが多く, この場合底面付近の速度勾配の大きな部分で底泥が軟らかくなりすぎて数値モデルが各種のパラメータに対して感度が高すぎるという欠点があった。この点でもこのモデルは極めて合理的な結果を与えている。さらに小型の造波水路を用いた質量輸送速度の鉛直分布の計測結果に特徴的に現れる Plug flow (速度勾配が底面付近に集中し, 中層, 上層では勾配がほとんど無い) をうまく再現している。

図-5 には波高減衰係数についての結果をのせる。この場合にも従来のモデルより精度良く予測している。特に実験条件の範囲内で低含水比ほど高い波高減衰率となる傾向を再現しており, 従来の粘性流体モデルに比較して格段に信頼性が向上していることを示した。

#### 4. 結 論

波動(振動)条件における底泥の物性を検討した。その結果, 粘性係数, 弾性係数について含水比と振動周期をパラメータとして用いて, 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安定化し, さらに予測値を現実に近い値に近づけることができた。また, 従来のモデルは, 1) 速度勾配が非常に小さくなるとさらに粘性係数が大きくなりすぎる, 2) 計算結果が入力データに対して敏感でありすぎる, などの欠点を持っていたが本モデルではそれらの問題点を克服しており, 計算時間が飛

躍的に短くなったことも考え併せて、底泥移動3次元モデルへの適用を現実のものとする大きなステップとなったといえる。

本研究は文部省科学研究費一般研究C(No. 03650417 代表 柴山知也)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, 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, 225-234.
- 柴山知也・佐藤慎司・平出和也・青木 徹(1989): 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, 36 巻, pp. 334-338.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹浜 潤(1986): 回転粘度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.
- An Ngoc Ngyuyen・柴山知也・佐藤慎司・岡安章夫(1991): 底泥の粘弾性特性の計測と数値モデルへの応用, 海岸工学論文集, 38 巻, pp. 471-475.
- 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, 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.
- Shibayama, T., Okuno, M. and Sato, S. (1990): Mud transport rate in mud layer due to wave action, Proc. of 22nd Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 3037-3049.