底泥移動に関する粘弾塑性体モデルの波流れ場への適用

柴山 知也*・奥野 雅量**・An N. Nguyen***・佐藤 慎司*

1. 緒 論

波による底泥の移動については最近、自然状態の底泥をより忠実に再現するために粘性流体多層モデル（中野ら，1987），粘弾塑性体多層モデル（柴山ら，1989）など物理モデルに基づいた数値解法が提案されるようになってきた．本研究では高波時に底泥表面付近に形成されるいわゆる「Fluid Mud」（流動状態の泥）を高含水比の底泥層として捉え，泥層内の質量輸送として解析している．ここでの目的は，自然状態の底泥をより忠実に再現していると考えられる粘弾塑性体多層モデルを取り上げ，その基本的な性質，現実への適用性を検討すると共に，このモデルを波流れ場に拡張し，実験と比較してその妥当性を検討しようとするものである．波流れ場への拡張については過去に粘性流体多層モデルに対する試み（中野，1989）があるが，そこでは水層にのみ波流れの効果があらわに考慮されており，泥層に対しても本格的に流れの効果を直接導入したという点では本研究が初め

ての試みといえる．

底泥の移動に関しては泥層内の質量輸送を見積る他に従来から浮遊泥に注目した研究が多くみられる（例えば三村ら，1989）．このような浮遊輸送に対して層内質量輸送が多くの場合において量的にはるかに大きいことを示すのもこの研究の目的の一つである．

2. 室内実験

（1）実験方法

実験には幅 0.6 m，深さ 0.55 m の規則波造波水路を用い，順流，逆流可変式の循環流発生装置を設けて定常流を発生させた．図-1 に実験装置の概要を示す．底泥試料にはカオリナイトを用い，水路中央部（水深 35 cm）に観測部を設置し，底泥を厚さ 10 cm，長さ 2 m にわたって敷き詰めた．底泥の層内質量輸送の測定にはビデオカメラを用い，トレーサの動きをガラス側面から観測した．トレーサとしては長さが水路幅に等しく，比重も底泥にほぼ等しいアクリル棒を用いた．トレーサが

図-1 実験装置の概要

* 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 修 横浜役所

*** 学生会員 工 修 横浜国立大学大学院 工学研究科

底泥の動きを代表するようにアクリル棒を二重構造とし、内部中央部にスプリングを配置して常にガラス面に微小な圧力で接するように工夫してある。計測に当たっては今回の条件では流れのみによっては底泥が移動しないことを利用して、まず流れを発生させて定常状態に達した後、波を作用させ、概ね40秒程度で実験を終了させた。これは戻り流れの影響や実験中の含水比変化の影響を軽減するためである。実験では泥層内の質量輸送速度の他に泥粒子の軌道振幅、界面波高なども同時に計測している。

(2) 実験結果

まず室内実験の結果を図-2に示す。図の右側に実験条件を示してある。図より波のみの場合（ケース1）に比べて順流、逆流いずれの場合にも層内質量輸送量が若干増加することが認められた。これは流れが加わることによって粘土層内の流速の勾配が大きくなり、ずり速度の増大によって粘性係数、弾性係数が低下した結果であると考えられる。しかしながら流れを変化させることによって局所的な波高も変化しており、また含水比も若干変化していることを考え合わせると、実験結果のみから一般的な結論を出すことは難しいといえる。そこで以下では数値モデルを用いて実験結果をも合わせ用いながら考察を進めることとする。

3. 粘弾塑性体多層数値モデルの波流れ場への拡張

(1) 数値モデルの拡張

まず数値モデルの概要について述べる。粘弾塑性体モデルでは運動方程式において粘性が卓越するため移流項を無視して方程式を線形化している。この仮定は流速が小さくなる泥層内においては妥当といえる。多層モデルではさらに粘性係数、弾性係数がずり速度によって変化することから底泥層を数層に分割し、各層のずり速度と粘性係数、弾性係数が収束するまで繰り返し計算を行っ

ている。このモデルを波流れ場に拡張するにあたっては波の場、流れの場それぞれにおいて両者を足し合わせたずり速度に対応する粘性係数、弾性係数に対して同様の計算を行い、両計算において共通の粘性係数、弾性係数を持つまで収束計算を繰り返すことにより、泥層内の流速場の最終的な解を求めることができる。ここで、水層における波流れの干渉を考えれば少なくとも水層内において移流項を残して計算することも考えられる（例えば中野ら，1989）がここでは底泥層の解析的を絞って考えることとし、線形化した運動方程式を水層にも適用した場合に付いて述べることとする。

まず波による底泥移動に対する計算については柴山ら（1989）の方法と全く同様であるのでそれを参照されたい。流れの計算に当たっては、定常流を仮定し、さらに泥層内で粘性が卓越することから層流状態を仮定している。図-3に定義図を示す。分割された各層における運動方程式は以下のように置ける。（第*i*層において）

$$\frac{\partial p_i}{\partial x} = \rho_i \nu_{ei} \frac{\partial^2 u_{ci}}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで p : 圧力, ρ : 密度, ν_e : 粘性指標, u_c : x 方向の流速である。ここで、各変数は複素数として扱い、従って、粘性指標の実数部は動粘性係数をまた虚数部は弾性の効果を示している。

等流状態を仮定しているために流速の分布は以下のように表すことができる。

$$u_{ci} = \frac{1}{2 \rho_i \nu_{ei}} \frac{\partial p_i}{\partial x} z^2 + A_i z + B_i \dots\dots\dots (2)$$

静水圧分布を仮定し、さらに等流であることから水層で

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{f}{8g} \frac{U_c^2}{R} \dots\dots\dots (3)$$

ここで U_c : 水層における平均流速, R : 動水半径, f : 摩擦係数で, f は以下の式で与える。

$$f = 0.113 \left(\frac{k_s}{R} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (4)$$

図-2 波流れ場における質量輸送速度の測定結果（室内実験）

Case	Wave Height (cm)	Period (s)	Steady Flow Water Content (cm/s)	Water Content (%)	Symbol
1	6.6	1.24	0.0	163	○
2	8.1	1.26	+2.0	163	△
3	8.1	1.26	+3.8	167	□
4	6.5	1.24	+8.8	165	▽
5	6.0	1.24	-5.0	167	●
6	5.4	1.26	-6.9	167	▲
7	6.0	1.24	-11.9	167	■

ここで k_s (粗度) は波の計算で得られた界面の波高を用いる。質量保存の式から

$$\sum_{i=1}^n \rho_i u_{ci} h_i = \text{constant} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。ここで左辺は底泥床での質量流束を表す。右辺はここでは固定床上での質量流束 $\rho_1 U_c h_1$ で表すこととした。

(2) 式を (5) 式に代入し、さらに以下の境界条件を用いる。

底面で ($z=0$)

$$u_{cn}=0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

水泥界面で ($z = \sum_{i=1}^{n-1} h_i$)

$$u_{ci} = u_{c(i+1)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_i \nu_{ci} \left(\frac{\partial u_{ci}}{\partial z} \right) = \rho_{i+1} \nu_{c(i+1)} \left(\frac{\partial u_{c(i+1)}}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上により導出される連立方程式を波動下の場合と同様に解くことにより、定常流れによる底泥輸送量を計算することができる。

現実の計算に当たってはまず波のみの条件に対して計算を行い、その結果得られた粘性係数、弾性係数の層内分布の結果を用いて流れによる計算を行い、さらに波、流れそれぞれの流速分布を重ね合わせた流速分布に対する粘性係数、弾性係数を求める。以降はこの重ね合わせた流速場に対して求められる粘性係数、弾性係数の分布を用いて波動場、定常流れに対する計算を交互に行い、流速場が最終的に収束するまで計算を行い、数値モデルの結果を求めた。

つぎに泥層内質量輸送量、水層内浮泥輸送量、それぞ

図-3 波流れ場の定義図

れの計算を各種の条件に対して行う方法について述べる。波流れ条件下の底泥飛び出し率に関する資料は少ないため、ここでは波のみの条件での浮遊泥濃度分布を採用することとする。まず泥層内の質量輸送については上記モデルを直接用いた。すなわち底泥層内の流速分布を求め、それを用いて Euler 流, Lagrange 流の質量輸送量を柴山ら (1988) と同様の方法により求めている。また浮遊量については柴山ら (1987) の実験資料から浮遊泥濃度の鉛直分布を求め、さらに本モデルで計算した水層内の水の質量輸送分布と浮泥濃度分布を掛け合わせる

図-4 波流れ場の下での泥層内質量輸送速度の実験値と数値モデルの比較

ことにより水層内輸送量を求めた。ただし Euler 流の質量輸送速度を求める場合、水泥界面での摩擦力を正確に見積るのが困難なため、水層内底層での成分が異常に大きな値となる。本研究では水層内については Lagrange 流成分のみを計算するという便宜的な方法を用いている。

(2) 数値モデルによる計算結果

数値モデルでも実験結果と同様に定性的には流れが加わることによってずり速度が増加し、順流の場合にも逆流の場合にも底泥の流動性が上昇することが確認できた。ここで底泥の流動性が高まるとは粘性係数、弾性係数の値が低下することを示している。図-4 に4つのケースについて実験結果とそれに対応する数値モデルの結果を示す。全体として数値モデルの結果は実験値をよく説明することがわかる。

さて以下では数値モデルの性質を把握するために各種の条件に対して計算を行うこととする。まず波のみの条件に対して底泥層内輸送量と浮泥水層内輸送量を計算しそれぞれの絶対量を比較したものが表-1である。表に掲げたいずれの場合においても、底泥層内輸送が全輸送量に対して大きな割合を占めることがわかった。

次に波流れ条件下での計算について述べる。表-2 においてケース 1-4 は波の条件及び底泥の含水比を一定にして定常流の値を変化させた場合である。定常流の存在によって泥層内の輸送量が若干増加している。しかしながら流れが加わることによって増加する全質量輸送量はわずかであり、量的な意味では流れの果たす役割は層内質量輸送に関する限り余り大きなものではない。

次にケース 5-9 は定常流、波の条件を一定として含水比を変化させたものである。計算結果より、含水比の上昇によって輸送量が飛躍的に上昇することが確認でき

た。すなわち底泥の輸送問題においては含水比を正確に見積ることが非常に重要であるといえる。

4. 結 論

本論文では粘弾塑性体モデルを用いて底泥の運動を論じた。その結果、(a) 粘弾塑性体モデルを波流れ場に拡張し、層内質量輸送量などを評価したところ、底泥の流動性が大きくなるなどの点が実験結果と一致した。次に粘弾塑性体モデルを各種の条件に適用し、その妥当性について検討した。また (b) 泥層内の質量輸送量については波流れが作用した場合、波の作用が主要な要因となり、流れは2次的な作用しかしないことが数値実験、室内実験の結果から解った。さらに、(c) 含水比の上昇によって輸送量が飛躍的に上昇することも解った。

以上より底泥の輸送問題では流れの条件ではなく、波の条件、底泥の含水比の方がより支配的な要因となることを結論としたい。

本研究は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。

表-2 数値モデルの計算結果

	定常流速 cm/s	波高 cm	周期 s	含水比 %	泥層内 質量輸送 g/s/cm	水層内 浮泥輸送 g/s/cm
1	5	8.1	1.26	200	46.3(52)	0.178
2	10	8.1	1.26	200	46.3(55)	0.283
3	15	8.1	1.26	200	46.3(56)	0.380
4	20	8.1	1.26	200	46.3(57)	0.472
5	3.75	8.1	1.26	150	8.2	0.054
6	3.75	8.1	1.26	166.6	14.2	0.086
7	3.75	8.1	1.26	175	18.8	0.103
8	3.75	8.1	1.26	200	46.4	0.151
9	3.75	8.1	1.26	225	68.3	0.195

(水層厚 35cm, 泥層厚 10cm)

表-1 泥層内質量輸送量と水層内浮泥輸送量の比較

波高 6.6(cm)		周期 1.24(sec)			降伏状況
含水比 (%)	浮泥濃度 (g/cm ³)	泥層内質量輸送量 (g/cm ² s)	水層内質量輸送量 (g/cm ² s)		
100	150×10 ⁻⁶	1.82×10 ⁻²	4.99×10 ⁻³		0/10
139	400×10 ⁻⁶	2.12	1.32×10 ⁻²		上 9/10
221	3000×10 ⁻⁶	37.49	9.24×10 ⁻²		上 9/10
波高 10.0(cm)		周期 1.50(sec)			降伏状況
含水比 (%)	浮泥濃度 (g/cm ³)	泥層内質量輸送量 (g/cm ² s)	水層内質量輸送量 (g/cm ² s)		
100	150×10 ⁻⁶	3.40×10	1.09×10 ⁻³		上 3/10
139	400×10 ⁻⁶	5.27	2.90×10 ⁻²		上 9/10
221	3000×10 ⁻⁶	101.55	1.98×10 ⁻¹		上 9/10

(降伏状況: 底泥 10 層の内上位何層が降伏し粘塑性体として扱うかを示す)。

参 考 文 献

- 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司 (1987): 波による底質粘土の浮遊機構に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275.
- 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, 36 巻, pp. 334~338.
- 中野 晋・鶴谷広一・廣瀨 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.
- 中野 晋・伊東信幸・藤平依彦 (1989): 流れの中での波と底泥の相互干渉, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 339~343.
- 三村信男・田口 智・加藤 始 (1989): 波による底泥の巻き上げ沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 309~313.