

不規則波による底泥移動と波高減衰に関する実験的研究

柴山 知也*・梶谷 有吾**・島谷 学***

不規則な波の下での軟らかい底泥の移動に関して室内実験により検討した。含水比 143-173%の底泥を造波水路中に敷き、不規則波浪下でトレーサー法により層内質量輸送量を計測した。合わせて泥層の前後で波高を計測し、波高の減衰について検討した。その結果、波高減衰については波高周期結合分布の変化を分析することにより、質量輸送については規則波の実験結果および規則波の予測結果との比較によりその傾向を把握することができた。有義波高が大きいほど、また含水比が高いほど、波高の減衰量、減衰率が大きくなる。次に、含水比が大きいほど、また有義波高が大きいほど泥層内の輸送量が大きくなる。

1. はじめに

これまで、底泥の輸送機構を解明するために、底泥物性のモデルが開発され波作用下の泥挙動の解析等が行われてきた。移動量を算定するためのモデル化については、中野ら (1987, 1989) による粘性流体多層モデル、柴山ら (1989, 1991, 1993) の粘弾塑性体モデル、Trienら (1990) のレオロジーモデルなどはその代表例であり、底泥移動の機構解明と輸送量推定精度は大きく向上した。その後、傾斜方向の移動 (Kessel・Kranenburg, 1996) や局所的な勾配の影響をモデルに取り込む (柴山ら, 1998) などの改良が加えられている。しかし、従来行われてきた実験はほとんどが規則波によるものであり、不規則波の下での移動現象の検討は Zhang・Zhao (1999) の実験, Soltanpour・Shibayama (2002) の数値モデルを除いてはほとんど行われていない。

本研究では、不規則波浪下での室内実験を行い、底泥層内でのエネルギー逸散による波高の変化量及び、不規則波作用下での底泥の輸送量を計測し、その傾向を把握し、規則波の結果と比較する事を試みた。

2. 実験の方法

二次元造波水槽を使用し、不規則波を発生させ底泥の質量輸送量を測定するとともに、各測点における波高を測定した。図-1 に示すように、水槽中央部にアクリル板で幅 60 cm, 長さ 1 m, 勾配 1/10 の斜面を作り、長さ 2 m, 幅 60 cm, 高さ 10 cm の泥層を設置した。底泥の含水比は 143% から 172% の間で変化させた。波高計は、斜面前部の一様水深部と、泥層が始まる部分、泥層の中間及び泥層が終了する点に設置した。造波時間はどの場合にも概ね 60 秒である。

単位 (m)

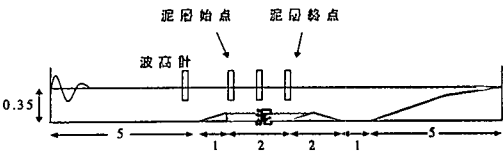


図-1 実験装置の概要

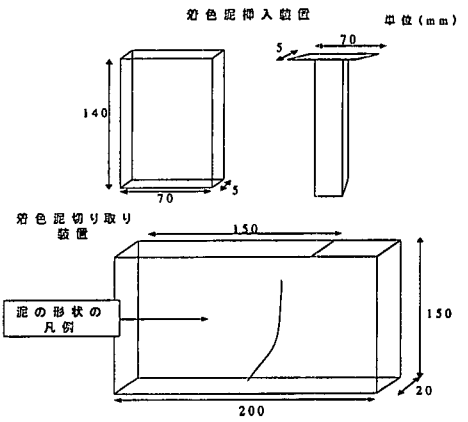


図-2 着色泥注入装置と断面切り取り装置

表-1 実験条件

case	一様水深部 水深 h (cm)	一様水深部 有義波高 H (cm)	一様水深部 有義波周期 T (s)	泥層の含水比 %
1	35.0	4.14	0.78	143
2	35.0	4.10	0.77	155
3	35.0	5.05	0.80	156
4	35.0	5.38	0.81	157
5*	35.0	5.35	0.82	157
6	35.0	5.51	0.82	159
7	35.0	3.53	0.74	164
8	35.0	3.98	0.79	166
9*	35.0	5.31	0.86	167
10	35.0	5.67	0.81	172

* 波高減衰のみ

* フェロー 工 博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門
** 学生会員 学 (工) 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻
*** 正 会 員 修 (工) 横浜国立大学助手 大学院工学研究院システムの創生部門

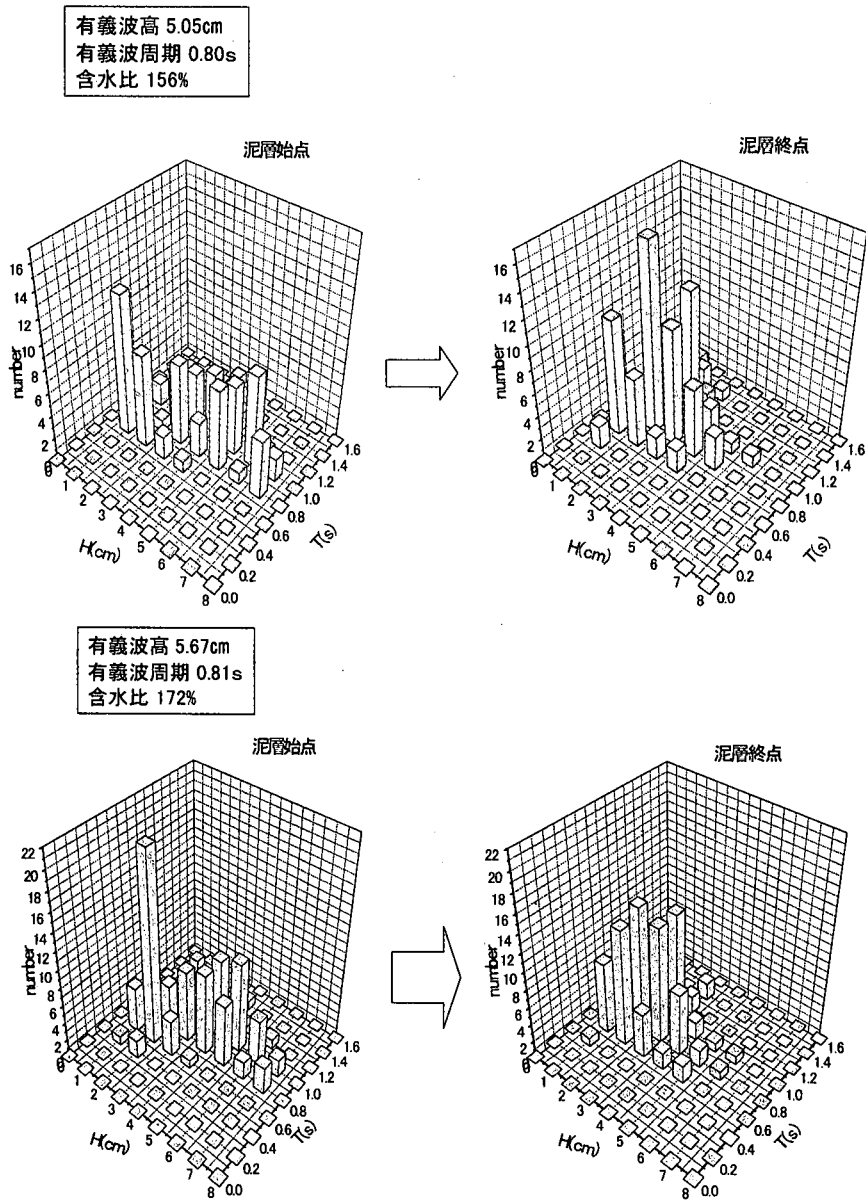


図-3 波高周期の結合分布の変化例 (上は Case 3, 下は Case 10)

表-2 波高減衰の計測結果

	泥層始点における有義波高 (cm)	泥層終点における有義波高 (cm)	波高減衰量 (cm)	波高減衰率
1	4.01	3.98	0.03	0.00
2	3.83	2.95	0.88	0.13
3	4.87	3.32	1.55	0.19
4	5.07	3.60	1.47	0.17
5	5.08	3.57	1.51	0.18
6	5.27	3.73	1.54	0.17
7	3.33	3.02	0.31	0.04
8	3.84	2.71	1.13	0.17
9	5.02	3.02	2.00	0.25
10	5.39	3.35	2.04	0.23

底泥層内の質量輸送速度の計測については Saka-kiyama・Bijker (1989) にならって、実験前に着色した泥層を泥層始点から 1 m の地点に鉛直に注入し、実験後に泥層を切り出して着色泥の断面内における変位から、その移動速度を算定した。図-2 は挿入および切り取りに用いたサンプラーの諸元である。挿入時には図中右上に示すピストンの部分を操作して、周囲の泥層との間に空隙を生じさせないように工夫しながら泥中に着色泥を挿入している。トレーサの移動距離を波作用時間で割ることにより、移動速度を算定している。不規則波は Bretschneider・Mituyasu 型のスペクトル形状を目指し

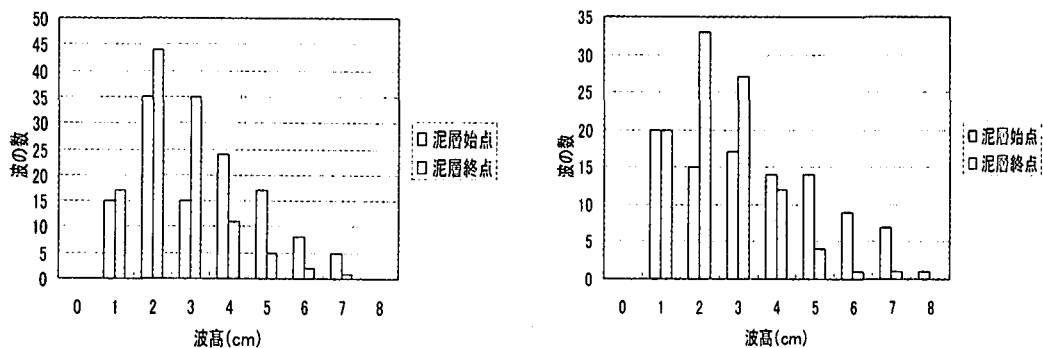


図-4 波高別の波数の変化例 (Case 3, 10)

て造波しており、実験を通じて10種類の不規則波を造波している。表-1に実験条件を示す。

3. 実験の結果

(1) 波高減衰

まず、波高減衰の実験結果について述べる。表-2に示すように、多くのケースで泥層に達した波はエネルギーを失い著しく減衰している。次に、より詳しい減衰の傾向を調べるために、水表面変位の時間変化からゼロダウンクロス法を用いて個々の波を定義し、波高周期の結合分布を用いて不規則波浪の変化を整理した。不規則波のスペクトル変化ではなく、波高周期の結合分布に着目したのは、質量輸送速度に最終的な興味があるため、個々の波による質量輸送速度に還元したいためである。泥層始点と終点における波周期と波高の結合分布の変化例(ケース3と10)を図-3に示す。大きな波高が出現しなくなっていることがわかる。

表-2に示したように、本実験では、全ての場合におい

て泥層に達した波は波高減衰により波高が低下していることが観測されているが、一般には含水比が同じで有義波高が異なる場合は、有義波高が大きい場合ほど、減衰量、減衰率が大きくなる傾向がある。また、有義波高が同じで含水比が異なる場合は、含水比が高いほうが、減衰量、減衰率が大きくなる。

図-4は波高別に波の数の変化を表したものである。実験を通じて、泥層の前後で波数の変化は数パーセント以下でほとんど変化していない。波高減衰はある一定以上の大きさの波(この場合4 cm以上)に著しく減衰を起こさせている。また、同じように周期別に変化を表してみても泥層前後で大きな変化はなく、周期は波高減衰を起こしても変化していない事がわかる。

(2) 質量輸送速度

図-5および図-6にサンプラーによって採取した泥層内の移動の例を示す。いずれの例でも底面のごく近傍では底面摩擦により移動が0であり、上層に向かう分布の様子は進行波による底面境界層内の質量輸送の分布に

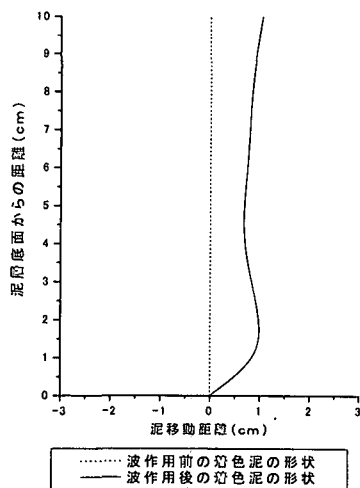


図-5 着色泥移動の例 (Case 4)

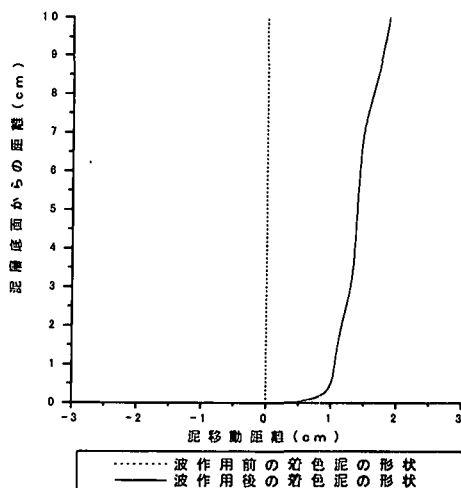


図-6 着色泥移動の例 (Case 10)

類似している。この分布を波作用の継続時間で除すことにより、質量輸送速度を求めている。

次に質量輸送速度について述べる。図-7は含水比がほぼ同程度のグループでの有義波高別質量輸送速度の比較である。実験試料を調整する際に含水比を正確に合わせるのは難しいために155%から157%の範囲で含水比は分布している。有義波高4.10 cmではほとんど移動が見られないが5.05 cmでは急速に速度が増大し、5.51 cmではさらに大きくなっている。4.10 cmでは泥層が降伏しておらず粘弾性体として振舞っていた泥層が波高の増大により降伏し、粘塑性体へと移行したものと考えられる。

図-8は有義波高がほぼ同程度のグループ内での含水比別質量輸送速度の比較である。この場合には、143%ではほとんど質量輸送がないにもかかわらず、166%では質量輸送速度が急激に増加している。この場合にも泥層の降伏がおり、粘弾性体から粘塑性体への変化が155%から166%の間で起こっているものと推定できる。以上により、全体的に見ると、含水比が大きいほど、また有義波高が大きいほど泥の輸送量が大きくなること、その変化はある泥層の降伏に相当するある閾値を境として急激におこることが分かる。

次に図-9は規則波と不規則波の実験結果を比較し、さらに規則波の条件を与えて算定したShibayama・An (1993)による粘弾塑性体モデルの算定結果とも比較したものである。まず有義波高と規則波の波高をほぼ揃えて実験結果を比較すると、周期が異なるため、正確な比較はできないが、輸送量は規則波に比べて不規則波の方が低くなる。波別に輸送量を考えると、不規則波のうち、波高が小さい波については粘弾性体に対応する場合輸送量が小さく、全体の輸送に対する寄与が小さくなる。このようにして輸送に関して有効な波が少なくなるために全体として不規則波の下での輸送量は少なくなる。すなわち底泥の輸送を考える際には不規則波中の大きな波の輸送への寄与が大きくなることが考えられる。

以上により、規則波条件の下で開発された数値モデルの適用に当たっては、波高周期区分ごとに波を分類し、個々の波高周期別に粘弾塑性体モデルを適用し、波高周期の結合分布を用いて重み付けして時間平均を取り、質量輸送量を評価する方向が示唆された。

4. 主要な結論

不規則波浪下での底泥移動実験を行い、波別解析によって波高減衰を検討し、トレーサー法によって質量輸送量を計測した。その結果、波高減衰については波高周期結合分布の変化、質量輸送については規則波との比較によりその傾向を把握することができた。

有義波高別による質量輸送速度

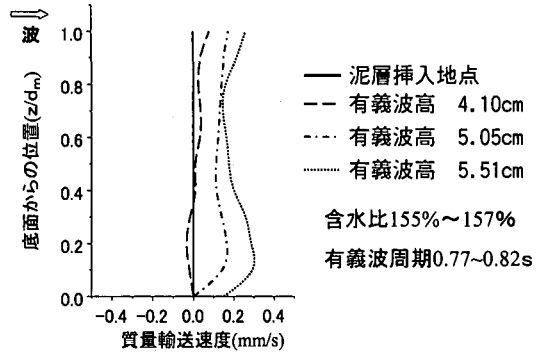


図-7 有義波高による質量輸送量変化

含水比別による質量輸送速度

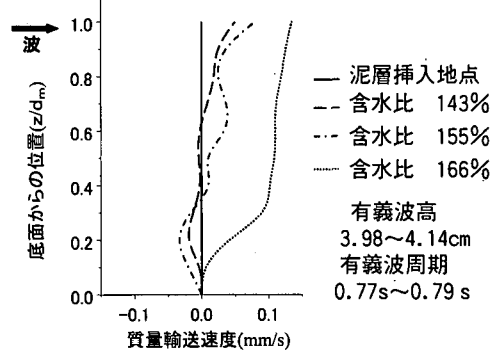


図-8 含水比による質量輸送量変化

規則波と不規則波との比較

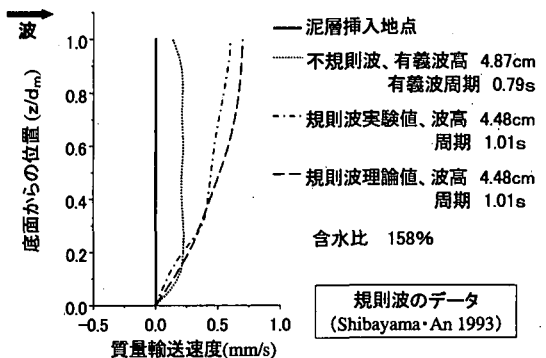


図-9 規則波、不規則波、数値モデルの比較

一般的な傾向としては、有義波高が大きいほど、含水比が高いほど、波高の減衰量、減衰率が大きくなる。また、含水比が大きいほど、また有義波高が大きいほど泥層内の輸送量が大きくなる。また、含水比、有義波高ともに底泥の流動に関しては閾値が存在し、この値は物性の粘弾性体から粘塑性体への変化に対応している。

本研究は五洋建設株式会社からの研究費および日本学術振興会科学研究費 (基盤 B No. 15404016 代表者柴

山知也) により行ったことを付記する。

参 考 文 献

- 柴山知也・Mohsen Soltanpour・野間崇史 (1999): 傾斜泥層の波による輸送量モデルとその実験による検証, 海工論文集, 第46巻, pp. 581-585.
- 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, 海工論文集, 第36巻, pp. 339-343.
- 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回海講論文集, pp. 266-270.
- An Ngoc Nguyen・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, 海工論文集, 第39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, 海工論文集, 第37巻, pp. 225-229.
- Kessel, T. and C. Kranenburg (1996): Gravity current of fluid mud on sloping bed, Jour. of Hydraulic Res., ASCE, Vol. 122, No. 12, pp. 710-717.
- Sakakiyama, T. and E. W. Bijker (1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive wave, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 614-633.
- Shibayama, T. and An Ngoc Nguyen (1993): A visco-elastic-plastic model for wave-mud interaction, Coastal Engineering in Japan, Vol. 36, No. 1, pp. 67-89.
- Soltanpour, M. and T. Shibayama (2002): Wave-mud interaction under irregular waves, Proc. of 28th Coast. Eng., ASCE, pp. 2949-2958.
- Zhang, Q. H. and Z. D. Zhao (1999): Wave-mud interaction - wave attenuation and mud mass transport, Coastal Sediments 99, pp. 1867-1880.
-