

表-1 実験ケース一覧

ケース	中央粒径 (μm)	含水比 (%)	比スラン プ値	降伏値 (Pa)	波高 (cm)	流速 (cm/s)	E^*
A-1	31	140.1	0.705	4.42	4.3	0.0	0.49
A-2	31	134.8	0.766	3.24	5.8	0.0	9.41
A-3	31	136.5	0.703	4.48	4.7	9.5	0.38
A-4	31	140.3	0.734	3.83	5.9	12.7	5.20
A-5	31	139.6	0.734	3.83	3.2	25.7	0.41
A-6	31	139.6	0.754	3.45	4.7	23.5	3.55
B-1	31	179.3	0.895	1.07	2.6	0.0	0.12
B-2	31	181.0	0.896	1.06	4.0	0.0	1.43
B-3	31	175.8	0.890	1.14	2.2	7.4	0.12
B-4	31	181.0	0.896	1.06	4.1	13.3	0.95
B-5	31	176.8	0.891	1.13	2.0	20.9	0.61
B-6	31	177.6	0.892	1.12	4.1	24.4	2.46
C-1	18	172.3	0.770	4.03	4.2	10.7	1.10
C-2	18	175.7	0.716	3.02	7.6	9.1	65.5
C-3	18	177.8	0.743	3.50	2.8	22.8	0.22
C-4	18	181.4	0.743	3.49	6.3	22.7	105.0

*) E は巻き上げフラックス ($\times 10^{-4} \text{kg/m}^2/\text{s}$) を表す。

2.2 現地泥の強度

A, B シリーズの実験に用いた福島泥の強度を明らかにするため、含水比 4 レベル (107, 129, 177, 407%) に対して回転粘度計による流動試験を実施した。波作用下での巻き上げが、泥層が波動運動を生じた後に生じていることから、降伏値としては、鶴谷ら (1989) と同様、2 回目以降のサイクルで得られる乱された状態での値 τ_{y2} を用いるのが妥当であると判断した。ただし、本試験では 1 回目のサイクルの τ_{y1} しか得られていないので、鶴谷ら (1989) の試験結果を参考に $\tau_{y2} = \tau_{y1}/2$ とした。降伏値は、 $\tau_y (\text{Pa}) = \tau_{y2} = 1.35 \times 10^{10} w^{-4.5}$ で含水比 w (%) と関連付けられる。

一方、底泥の強度を簡便に測定する方法としてスランプ試験があり、比スランプ値と降伏値の関係式が理論的に導かれている (鶴谷ら, 1989)。円錐状のコーンにも適用できるよう拡張すると次式が得られる。

$$\exp(-x) = (\beta a/y + 1)^{y/a/2.72} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $x = S/H$, $y = \tau_y/\rho g H$, $a = (1-k)/2$, $\beta = \{1 + (b_0/a_0) + (b_0/a_0)^2\}/3$ であり、 S : スランプ値, H : コーン高さ, ρ : 底泥の密度, g : 重力加速度, k : 定数, b_0 , a_0 : 下面と上面の直径である。本実験のコーン形状に対しては $\beta = 2.89$ であり、 $\beta = 1$ のとき鶴谷らの式に一致する。鶴谷ら (1989) によれば、 k は 0.9~0.95 であるが、福島泥に対しては $k = 0.89$ が適合した。

2.3 巻き上げ形態

流れの有無にかかわらず実験中にみられた一般的な底

泥の巻き上げ形態について述べる。巻き上げに先立ち必ず底泥の波動運動が観察された。巻き上げは、強度の最も弱いと思われる所で水路横断方向に亀裂が生じた後発生し、時間と共に幾筋もの亀裂が泥床部全体に広がった。実験後の泥床表面には、2~3 mm 間隔で無数のひび割れの痕跡がみられた。このように波作用下での巻き上げがひび割れの発生・成長に伴って進行することは、既往の実験でもすでに報告されている (例えば楠田ら, 1988)。

2.4 巻き上げフラックス

初期の巻き上げフラックスは、基本的には水路内の平均濃度の上昇率により算定した。各ケースの結果は表-1 に示されている。既往の研究と同様、式 (2) で表される巻き上げフラックス E と泥層の波動運動を考えない固定床底面剪断応力 τ_f の関係をべき乗回帰により求めた。その結果は既往の実験の再整理結果とともに表-2 に示されている。なお、波・流れ共存場の固定床の底面剪断応力の評価には、田中・首藤 (1980) の評価式を用いた。流速の有無により若干ばらつきはみられたものの、底泥の強度が同じであれば概ね式 (2) で評価できることを確認した。

$$E = \alpha_1 (\tau_f / \tau_{fe} - 1)^{n_1} \quad (\text{kg/m}^2/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 τ_{fe} : 巻き上げ限界剪断応力, n_1 : 指数, α_1 : 定数である。

3. 底泥の波動運動モデル

3.1 モデルの概要

底泥の波動運動モデルとしては、相当粘度の概念を導入してビンガム流体としての取り扱いを可能にした中野ら (1987) の粘性流体多層モデルを基本とした。波・流れ共存場への拡張は中野ら (1989) により既に行われているが、水層を完全流体と仮定しているため水と底泥との境界面に働く接線応力が無視されている。そこで、本研究では、水と底泥の相対運動を考慮した上で田中・首藤の摩擦則を適用し、泥層表面に働く剪断応力を評価した。ただし、波動運動により周期的に変動する剪断応力のみが泥層内に影響すると仮定している。このような改良を加えることにより固定床の場合も含めて統一的に底面剪断応力を評価できる。

3.2 泥層内部応力の算定

波動運動時の泥層内の最大応力 τ_s は次式で表される。

$$\tau_s = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2/4 + \tau_{xz}^2} = \sqrt{\mu_{eq} \cdot \varepsilon} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\mu_{eq} = \mu + \tau_y/\sqrt{4\Pi\dot{\varepsilon}}$, $\varepsilon = 4\Pi\dot{\varepsilon}$ であり、 σ_x , σ_z : 直応力, τ_{xz} : 剪断応力, μ_{eq} : 相当粘度, μ : 粘性係数, τ_y : 降伏値, $\Pi\dot{\varepsilon}$: 変形速度テンソルの不変量, ε : エネルギー逸散率である。

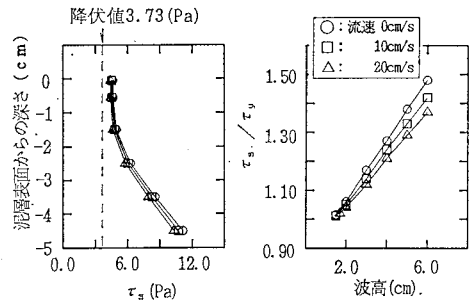
A, C シリーズの実験条件を対象に、底泥層を 6 分割

し、表層から第1, 2層をそれぞれ 0.1, 0.9 cm, 第3層以深を 1.0 cm に分割して、種々のモデル計算を行った。図-2 (a) は泥層内最大応力の鉛直分布の計算例を示したものであり、泥層の底面で最大となることがわかる。また、図-2 (b) は、波高の増大に伴う泥層表面での最大応力と降伏値の比 τ_s/τ_y の変化を計算した例である。泥層表面で τ_s/τ_y が1となると、泥層全体で降伏値を越えるため、これを「全層波動運動限界」と定義することができる。相当粘度を用いた粘性流体モデルは、泥層の波動運動を前提としているため、 τ_s/τ_y が1以下の条件に対しては計算不能で、直接、波動運動限界を求めることはできない。しかし、図-2 (b) に示すように、1を越えると波高の増大と共に概ね単調に増加する傾向がみられるので、 τ_s/τ_y が1となる波動限界波高を外挿して推定することが可能である。また、順流条件では波長が長くなるため速度勾配が小さくなり、泥層の最大応力は波のみの場合に比べて小さくなる傾向がみられる。

4. 巻き上げ限界の検討

4.1 既往の巻き上げ実験結果の再整理

波作用下での巻き上げは、泥層表面でのひびがれの発生を契機として生じたことから、巻き上げ限界に割しては泥層表面での接線方向の剪断応力ではなく、式(3)で表される最大応力が直接の起因力になると考えて、既往の実験データの再整理を行った。既往の波による巻き上げ実験データとしては、楠田ら(1988)、鶴谷ら(1990)ならびに三村ら(1990)の実験結果を用いた。各実験の



(a) 最大応力の鉛直分布 (b) 表層最大応力

図-2 泥層内応力の計算例

実験条件を再整理した結果をまとめて表-2に示す。

再整理に当たっては、まず、各実験とも底面剪断応力の評価法が異なるため、田中・首藤の摩擦則を用いて固定床底面剪断応力 τ_f を再評価し、巻き上げフラックス E との関係式(2)でべき乗回帰し、相関係数が最も高くなる場合の巻き上げ限界剪断応力 τ_{fc} を求めた。次に、巻き上げ限界時の波高を実験毎に求め、粘性流体多層モデルにより波動運動を考慮した底面剪断応力の限界値 τ_m と泥層表面での最大応力の限界値 τ_{sc} を評価した。なお、楠田ら(1988)と三村ら(1990)は周期の異なる条件でも実験を行っているが、底泥の波動運動には周期の影響が大きいと考えられるため、表-2に示す周期以外のデータはべき乗回帰の対象から外した。また、降伏値はスランプ試験が行われているものについては式(1)の関係式を、また、粘性係数は全ケースとも大坪・

表-2 既往の巻き上げ実験結果の再整理

	泥の種類	使用データ数	含水比 (%)	比スランプ値 S/H	降伏値 τ_y (Pa)	泥層厚 (cm)	水 深 (cm)	周 期 (s)	巻き上げ限界条件					巻き上げフラックス E ($\times 10^{-4}$ kg/m ² /s)		備 考
									波高 (cm)	τ_{fc} (Pa)	τ_{mc} (Pa)	τ_{sc} (Pa)	τ_{sc}/τ_y	α ($\times 10^{-1}$)	n	
本研究	福島泥	6	139	0.737	3.73	5	25	1.5	3.68	0.20	0.18	4.62	1.24	9.34	2.03	31 μ m 18 μ m
		4	177													
	福島泥	6	179	0.893	1.10	5	25	1.5	2.21	0.12	0.05	1.40	1.27	1.02	1.24	
三村ら	福島泥	3	127	0.617	6.36	10	20	0.9	1.70	0.11	0.10	7.81	1.23	2.83	1.04	
(1990)	カオリン	3	160	0.655	5.28	10	20	1.3	2.00	0.13	0.10	7.03	1.33	2.53	2.45	
楠田ら (1988)	カオリン	5	98	0.650	10.2	5	26.7	1.1	6.84	0.36	0.35	12.4	1.22	6.04	1.11	
鶴谷ら (1990)	カオリン	4	154	—	9.06	9	30	1.2	2.86	0.13	0.13	9.86	1.09	1.67	2.04	実験38
	カオリン	3	193	—	3.89	9	30	1.2	3.63	0.17	0.10	5.69	1.46	1.03	0.43	29
	カオリン	8	218	—	2.47	9	30	1.2	1.73	0.08	0.05	3.00	1.22	0.15	1.57	25, 30
	カオリン	4	227	—	2.13	9	30	1.2	1.77	0.08	0.04	2.62	1.23	0.12	2.36	31
	カオリン	12	247	—	1.53	9	30	1.2	1.71	0.08	0.03	1.87	1.23	0.13	2.14	27, 32
	カオリン	3	286	—	0.88	9	30	1.2	2.77	0.13	0.03	1.19	1.35	0.40	1.22	28
	カオリン	3	328	—	0.53	9	30	1.2	2.13	0.10	0.02	0.67	1.26	0.27	1.07	33

ただし、巻き上げフラックス欄には、固定床剪断応力 τ_f を用いた場合の回帰式: $E = \alpha_1 (\tau_f/\tau_{fc} - 1)^{\alpha_2}$ の係数と指数を示す。

村岡(1985)による降伏値との関係式を用いて評価した。

4.2 巻き上げ限界の統一表示

巻き上げ限界時の泥層表面での最大応力 τ_{sc} と降伏値 τ_y の関係を 図-3 に示す。 τ_{sc}/τ_y は、全ケース単純平均で 1.25、標準偏差 0.08 ではば一定であり、底泥の強度によらず巻き上げ限界条件は、次式で評価できるものと考えられる。

$$\tau_{sc}/\tau_y = 1.25 \text{ (巻き上げ限界条件)} \quad \cdots \cdots (4)$$

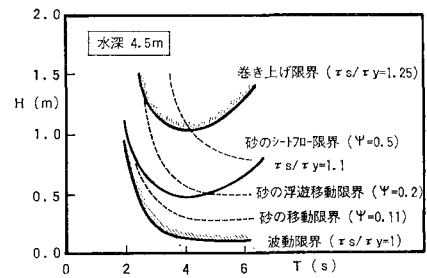
また、本研究の実験での目視観察によれば、 τ_s/τ_y が 1.2 足らずとやや小さい応力レベルでひび割れの発生が確認されたが、この目視観察によるひび割れ発生限界は、巻き上げ量そのものは極めて少なく、無視し得る程度であると判断される。

4.3 現地条件下での巻き上げ限界

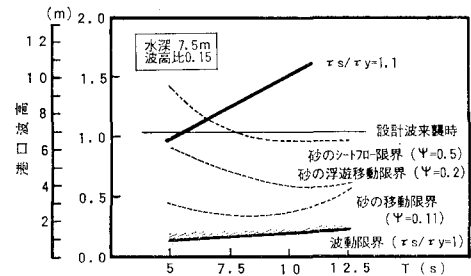
熊本泥と福島泥を対象に現地条件下での巻き上げ発生条件について検討した。図-4 には縦軸に波高、横軸に周期をとって、 τ_s/τ_y が 1.0 (波動限界), 1.1, 1.25 (巻き上げ限界) となる条件が示されている。また、図中には 0.1mm の砂を対象に、移動限界条件 (シールズ数 $\phi=0.11$)、浮遊移動条件 ($\phi=0.2$)、シートフロー条件 ($\phi=0.5$) も併せて示されている。浮遊条件とシートフロー条件は清水ら (1990) を参考に便宜的に設定した。なお、底泥強度としては、熊本泥に対しては中野ら (1987) の結果に基づき含水比 200% 相当の降伏値 4.6 (Pa) を、福島泥に対しては含水比 140% 相当の降伏値 3.7 (Pa) を対象とした。また、水深はそれぞれ 4.5m, 7.5m で一定とし、波高・周期は地点特性を考慮して実際に起こり得る範囲で条件設定した。

いずれの地点も、底泥の波動運動はかなり小さい外力条件でも生じるが、巻き上げは容易には発生しないことがわかる。また、周期の影響が大きく、短周期のときは圧力が泥層に伝播せず波動運動も生じにくくなり、また逆に周期が長くなると圧力勾配が小さくなって最大応力が小さくなり、巻き上げにくくなる傾向がみられる。

熊本地点の現地観測結果によれば、昭和62年8月31日に有義波高 1.5m、周期 4秒程度の高波浪が来襲し、波高がおおよそ 1m を越えたときに急激に底泥の巻き上げによる SS 濃度の増加が観測されている (鶴谷、



(a) 熊本泥 ($\tau_y=4.6$ Pa)



(b) 福島泥 ($\tau_y=3.73$ Pa)

図-4 現地条件下での巻き上げ特性

1989)。図-4 (a) によれば周期 4 秒のとき波高 1m 程度で巻き上げ限界となっており、現地観測結果とはほぼ一致する。したがって、現地条件に対しても式 (4) が適用できるものと判断される。

一方、福島地点は水深が深く、しかも周期が長いため、港内奥のシルト堆積域では波動運動は生じるものの、設計波級の高波浪が来襲しても泥層表面のひび割れによる巻き上げは生じないことがわかる。しかしながら、3m 以上の高波浪が来襲した場合には、細砂は移動限界を越えており、砂とシルトの共存域では、静穏時に堆積したシルトが細砂の移動、特に浮遊移動に伴い巻き上げられる可能性がある。砂・シルト共存域での巻き上げについては、別途詳細な検討が必要である。

5. 巻き上げフラックスの評価

底泥の波動運動とひび割れの発生に特徴づけられる巻き上げ形態を考慮した巻き上げフラックス評価式の一例として次式を提案する。

$$E = \alpha_2 (\tau_s/\tau_y - c) (\tau_m/\tau_y)^{n_2} \quad \cdots \cdots (5)$$

ここに、 c : 巻き上げ限界時の τ_{sc}/τ_y で平均的に 1.25、 τ_m : 波動運動を考慮した底面剪断応力と巻き上げ限界剪断応力、 α_2, n_2 は定数である。右辺第 1 項の $(\tau_s/\tau_y - c)$ は、底泥の巻き上げが泥層表面のひび割れに伴い発生することを考慮した項で、底泥の内部応力がどれだけ巻き上げ限界を越えているか、すなわちどれだけ破壊が進んでいるかを表しており、この項が巻き上げ可能量を直接規定するものと考えた。さらに、このように一旦巻き上

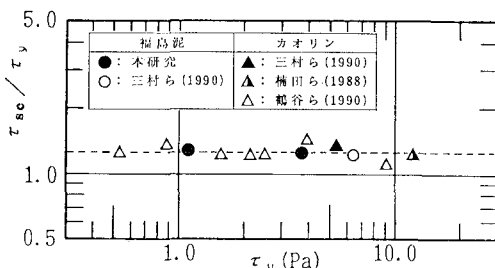


図-3 巻き上げ限界の統一表示

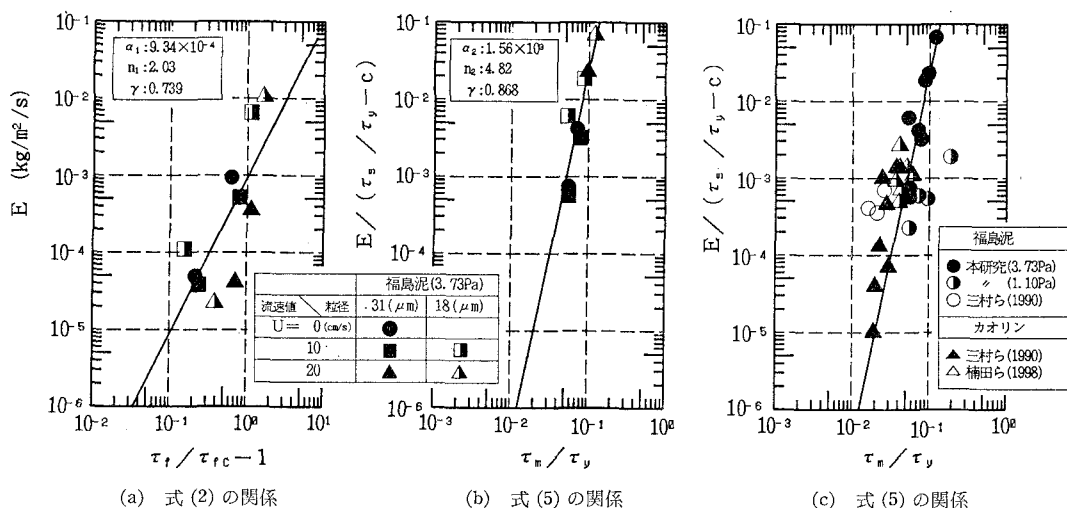


図-5 無次元剪断応力と巻き上げフラックスの関係

限界を越えて表層の破壊が進み、移動状態になった泥を水層に巻き上げる働きをするのは、そのとき泥面に作用する底面剪断応力そのものであると考えてモデル化した。

主としてA, Cシリーズの実験結果(福島泥の降伏値 3.73 Pa)を対象に、式(2)および式(5)の適合性を検討した。その結果を、図-5(a), (b)に示す。固定床剪断応力を用いた式(2)では、ばらつきが大きい、式(5)を用いた場合には流速の有無を問わずデータのまとまりがよかった。さらに、底泥の強度、周期等の外力の異なる楠田ら(1988)と三村ら(1990)の実験結果も合わせて式(5)で評価した結果を図-5(c)に示す。波動運動を考慮した底面剪断応力 τ_m を降伏値 τ_y で無次元化したことによって、底泥の種類によらずデータが概ねまとまっている。しかしながら、巻き上げフラックスそのものの無次元化を行っていないため、底泥の強度毎に整理した場合に比べるとばらつきが大きい。

6. あとがき

本研究では、粘性流体多層モデルを用いて底泥の波動運動による泥層表面での応力状態を評価することにより、底泥の種類によらない一般的な巻き上げ限界評価法を提案した。さらに、波作用下での巻き上げのメカニズムを考慮した巻き上げフラックス評価式についても検討した。今後さらに底泥の種類、外力条件を変えた実験データと底泥層の波動運動や巻き上げに関する現地データを蓄積する必要がある。

最後に、本研究を進めるに当たり、数多くの貴重な御意見を賜るとともに終始温かくご指導戴いた堀川清司東京大学名誉教授、渡辺 晃東京大学教授、三村信男茨城大学助教授ならびに磯部雅彦東京大学助教授をはじめ

とする「発電所専用港湾内堆積防止工に関する研究」検討会(主査: 鹿島第一電力中央研究所主席専門役)の委員の方々に深甚なる謝意を表します。また、既往の実験結果の再整理に際して貴重な実験データを快くお教え戴いた楠田哲也九州大学教授ならびに鶴谷広一運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長のご好意に心より感謝致します。さらには、本研究を進めるに当たり常に熱心に議論して戴いた電力中央研究所榊山勉氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 大坪国順・村岡浩爾(1985): 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp. 225-234.
- 大坪国順・村岡浩爾(1986): 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 43-45.
- 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了(1988): 波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 352-356.
- 清水琢三・坂野雅人・金山 進・阪内茂記・植木一浩・榊山 勉(1990): 取水港湾におけるシルテーションに関する現地調査, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 424-428.
- 清水琢三・近藤浩右・渡辺 晃(1990): 局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 274-278.
- 田中 仁・首藤伸夫(1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 鶴谷広一(1989): シルテーションによる港湾埋没の予測手法, 平成元年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 101-153.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤(1989): ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動境界の検討一回転粘度計との比較, 港湾技研資料, No. 655, 21 p.
- 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊喜(1990): 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界, 港湾技研資料, No. 674, 13 p.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤(1987): 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について, 港研報告, 第26巻, 第2号, pp. 171-212.
- 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(1990): 底泥の波に対する応答と巻き上げ・沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 230-234.