

「黒い津波」の評価に向けた底泥の破壊限界 および移動層厚に関する水理実験

橋本 貴之^{*1}・本田 隆英^{*1}・織田 幸伸^{*1}

Keywords : tsunami, sediment transport, bottom mud, erosion, critical yield, hydraulic experiment

津波、底質移動、底泥、浸食、降伏限界、水理実験

1. はじめに

2011 年東日本大震災や 2024 年能登半島沖地震では、海底に堆積するヘドロや泥等を巻き込んだことで黒くなった津波^{1),2)}が広く確認され、この現象は「黒い津波」と呼ばれている。津波浸水後、気仙沼湾の漁港陸上部で採取された濁水の分析結果では、内容物はシルトと粘土の微粒子で構成されており、平均粒径は約 7 μm であったことが報告されている³⁾。このように黒い津波に含有される底質は粒径が非常に小さいため、水中に長時間浮遊して海水密度を高めることから、津波荷重の増大が懸念される。さらに、海水密度の増加に伴い浮力も上昇するため、重量の大きな家屋やコンテナ等も漂流して衝突し、被害が連鎖的に拡大する可能性がある。そのほか、ヘドロや泥が陸上に堆積することで復旧・復興活動の遅れや衛生上の問題等が考えられる。黒い津波の発生要因は、津波の伝播過程でヘドロや泥等を巻き込むことから、海底にそれらが厚く堆積する都市部沿岸では黒い津波の被災リスクが高いと言える。しかし、津波に関するほとんどの研究は、清澄な水を対象に検討されており、底質の含有による密度や粘性の増加を考慮した研究は限られている。したがって、黒い津波の発生メカニズムを解明することは、現実的な津波の被害を予測することに繋がり、より効果的な防災・減災戦略に貢献することができる。

底泥移動に関する既往研究は、河川のような定常流や波浪を対象にした水理実験が数多く行われている。例えば、大坪・村岡⁴⁾は一方向の流れに対する底泥の巻上実験を実施し、カオリンやベントナイト等を使用した泥の流送形態の特徴から分類した 2 つのグループ

に対して、限界せん断応力の定式化を検討している。また鶴谷ら⁵⁾は、流れ場と波浪場における底泥の巻上実験を実施し、底泥の限界せん断応力と降伏値がほぼ等しいとの結果から、底泥の巻き上げ限界を定義した。一方、津波のように非定常かつ圧力勾配が大きい流れに対する底泥移動の既往研究は限られている。例えば、神保ら⁶⁾はゲート急開により津波を再現してカオリンを用いた巻上実験を実施し、底泥の含水比増加に伴い浸食深が概ね線形的に増加することや、碎波による渦の影響によって水中の高い位置まで底泥が巻き上がる可能性を示唆している。また松富・有川⁷⁾は、高水槽からの急流により津波を模擬して気乾状態のシルトを用いた巻上実験を実施し、氾濫水密度が 1.15 g/cm³ ほどに達することを示した。これらの実験では、いずれも津波による巻上げに着目した底泥移動を検討している。

著者らは、津波による底泥破壊・移動および底泥の含有に伴う流体密度や粘性の変化を考慮した波力評価を目的とし、水理実験での検討を行ってきた^{7),8)}。橋本ら⁷⁾では、津波による底泥の移動実験を実施し、底泥の降伏せん断応力と流れの圧力勾配との関係によって底泥の移動形態が異なり、巻上現象だけでなく、圧力勾配の作用によって底泥が破壊されて流動化し層状に移動する現象があることを報告した。また橋本ら⁸⁾は、その流れの圧力勾配に対する底泥の破壊限界について定量化を試みたが、実験ケースに限りがあった。

本研究では、粒径が数 μm の底泥を対象とした移動床実験を実施し、流れの圧力勾配と底泥の含水比変化を整理することで、津波作用下における底泥の破壊限界および移動層厚の定量的な評価を目的とした。なお、以降では、特に注記のない限り、圧力勾配は水平流れ

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

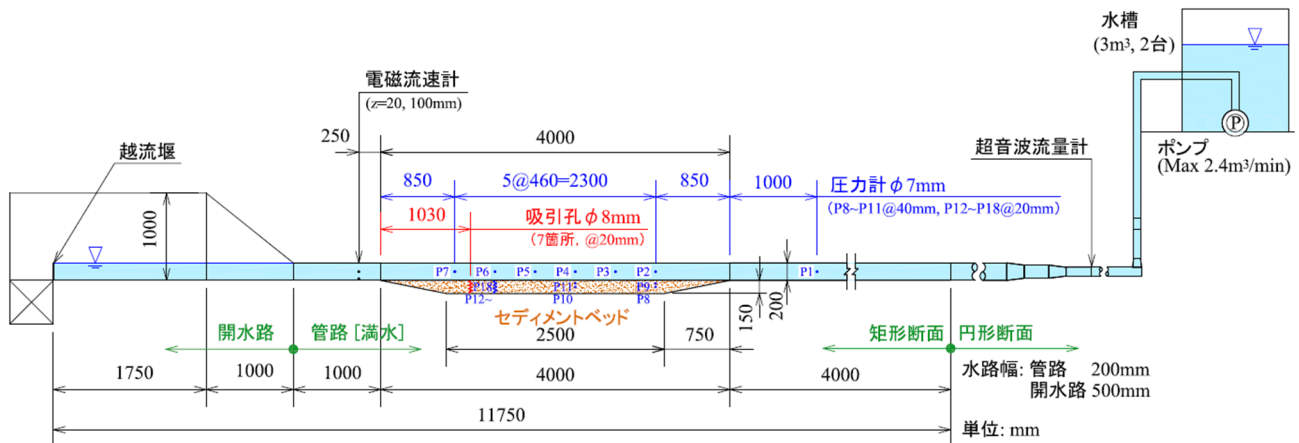


図-1 実験水路縦断面図

Fig.1 Longitudinal section of experimental channel

方向の圧力の空間勾配，移動層厚は破壊されて層状に移動した底泥の厚さを意味する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験は，図-1 に示す矩形管路区間（幅 0.2 m，高さ 0.2 m）と開水路区間（幅 0.5 m，高さ 1.0 m）を有するアクリル製の二次元水路を用いて実施した⁹⁾。管路区間には，水路延長方向の両端が1:5勾配で深さ0.15 mのセディメントベッドを設けた。水路の上流端部には，容量 3 m³の水槽 2 台を設置して水を溜め，ポンプ 2 台により流れを発生させて津波を模擬した。水路内での流速については，円形断面の管路（内径 100 mm）区間に取り付けた超音波流量計（KEYENCE 社製，FD-R125）により流量を計測し，矩形管路区間（幅 0.2 m×高さ 0.2 m）の断面積で除した断面平均流速として取得した。なお流れの検定時に，サンドベッドよりも 250 mm 下流の位置で水路床から高さ 20, 100 mm に設置した電磁流速計（KENEK 社製，VM-802HA）の計測値および PIV (Particle Image Velocimetry)による流速の鉛直分布と，断面平均流速の結果が整合していることを確認している。

2.2 実験条件

流れの条件については，矩形管路区間における断面平均流速 \bar{u} を 1.0, 1.5, 2.0 m/s の 3 ケースとし，これらの流速に到達するまでの加速時間 α を 0.5～5.0 s の範囲で調整した。また底泥模型については，表-1 に示すシリカフェウム，フライアッシュ（以降，SF, FA と称する）の 2 種類を用いて，含水比を変化させた。

2.3 計測項目

2.3.1 流れの圧力勾配および底泥の含水比変化の測定

実験水路の通水時における流れ方向の圧力勾配は，

表-1 底泥模型の諸元

Table 1 Parameters of bottom mud model

材 料 名	中央粒径 d_{50} [μm]	粒子密度 ρ_s [g/cm³]	かさ密度 ρ_d [g/cm³]
シリカフェウム [SF]	0.49	2.28	0.29
フライアッシュ [FA]	3.92	2.38	0.77

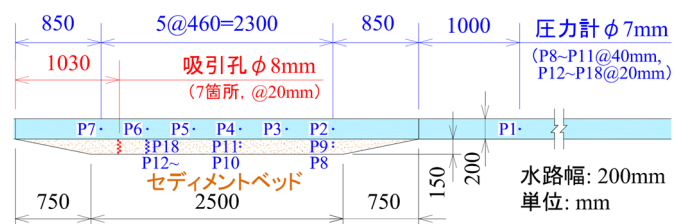


図-2 吸引孔および圧力計の設置位置

Fig.2 Set position of vacuum ports and pressure gauges

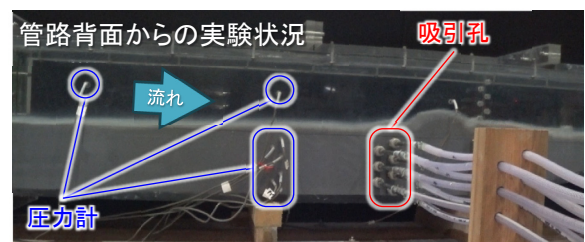


写真-1 底泥採取および圧力計測状況

Photo.1 Snapshot of mud sampling and pressure measurement

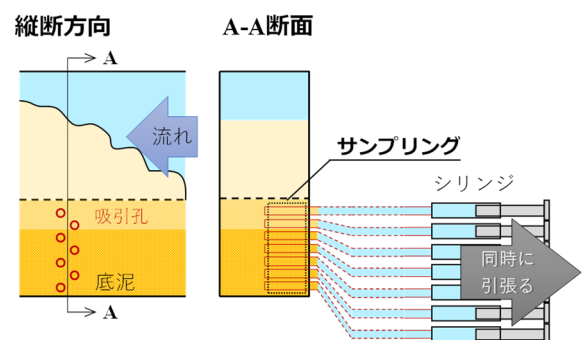


図-3 底泥の採取方法

Fig.3 Sampling method of bottom mud

水路側面から流れ方向 7 箇所（図-2；P1～P7）に設置した圧力計（ $\phi 7$ mm, SSK 社製, P208-02）により測定し、同時刻の P3 と P6 の圧力計における計測値の差 Δp を、P3 と P6 の設置間隔 L （= 1,380 mm）で除して圧力勾配 $\Delta p/L$ を算定した。またセディメントベッドの側壁に 7 台（図-2；P12～P18）の圧力計を鉛直方向に 20 mm 間隔で配置し、底泥模型内における圧力の鉛直分布を取得した。計測状況を写真-1 に示す。

底泥の含水比変化の測定では、セディメントベッドに底泥模型を敷き均し、ポンプにより流れを発生させ、図-2 に示すセディメントベッドの側面に設けた吸引孔（ $\phi 8$ mm；7 箇所）から底泥模型混じりの濁水を採取し、その試料を乾燥させて含水比を取得した。吸引孔は、セディメントベッドの下流端から 1,030 mm 上流の位置に鉛直方向 20 mm 間隔で 7 箇所を設け、内径 8 mm のパイプを水路断面の中央位置まで差し入れ、水路外側のパイプ端部にはチューブを介してシリンジをセットした（図-3、写真-1）。各シリンジを同時に引っ張り、パイプ内から 5 ml の試料を採取した。その後、試料は定温乾燥機内に入れて水分を蒸発させ、電子天びんで計測した乾燥前後の質量 M , M_s から含水比 w （= $(M - M_s) / M_s$ ）を求めた。試料採取のタイミングは、底泥模型の浸食直後とし、事前通水により圧力勾配の最大値が計測された時刻に、断面平均流速によって土粒子が底泥模型区間を通過する時間を加算した時刻とした。例として、圧力計 P3, P6 の計測結果の一例を図-4 に示す。このケースでは、圧力勾配が 20.7 s 後に最大値となり、土粒子が底泥模型の設置区間を通過する推定時間 2.6 s（= 底泥模型延長 4.0 m ÷ 流速 1.5 m/s）を加算した時刻 23.3 s に、図-3 による試料採取を行った。

2.3.2 底泥の降伏せん断応力の取得

表-1 に示す底泥模型(SF, FA)について、レオメーター（Thermo Fisher Scientific 社製, HAAKE Vis-cotenter iQ）によるベーン型粘度計を用いて計測を行い、ひずみが急激に大きくなる直前のせん断応力を底泥模型の降伏せん断応力として取得した。計測結果の一例として、図-5 に示す降伏せん断応力は 35.9 Pa となる。底泥模型(SF, FA)の含水比に対する降伏せん断応力を図-6 に示す。SF, FA とともに含水比が大きくなるほど、降伏せん断応力が低下する関係が確認された。

3. 実験結果

3.1 底泥の含水比変化の鉛直分布と移動層厚

実験は、流れの断面平均流速と加速時間および底泥

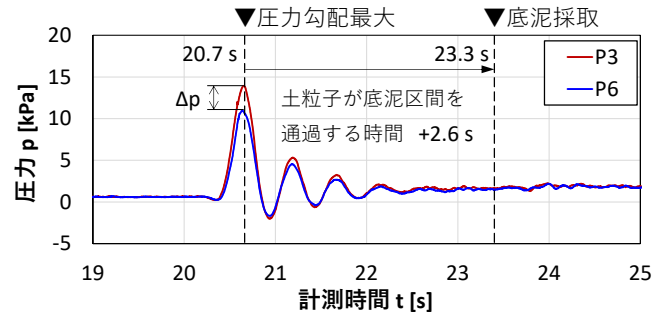


図-4 圧力計 P3, P6 の計測例

Fig.4 Example of measurement at pressure gauges P3 and P6

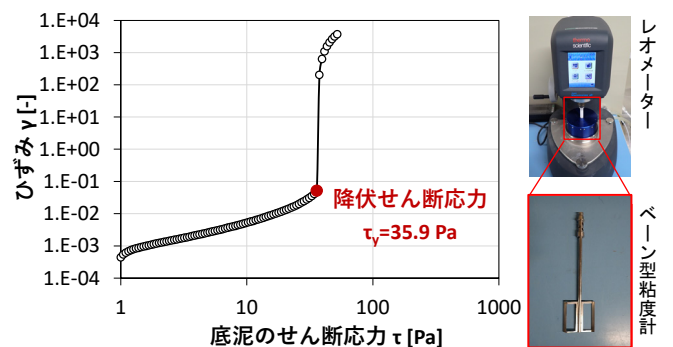


図-5 底泥の降伏せん断応力の計測例

Fig.5 Example of measurement on yield shear stress of bottom mud

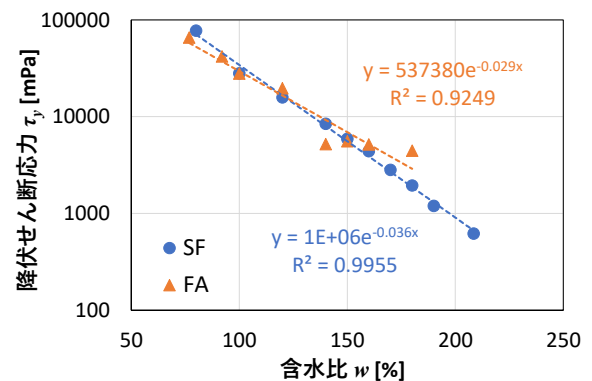


図-6 底泥模型の含水比に対する降伏せん断応力

Fig.6 Yield shear stress of bottom mud models with respect to water content

模型の含水比を表-2 に示す条件で組み合わせ、全 119 ケースを実施した。なお、本実験では底泥移動の定量的な傾向把握のため、できる限り多くのデータ取得を優先し、同一条件での繰返し回数は 1 回とした。

実験結果の一例として、底泥の含水比増加率と圧力増分の鉛直分布を図-7 に示す。ここで、含水比増加率は実験前の静水時における底泥の含水比 w に対して、実験時に採取した試料の含水比 w_s が増加した割合（= $(w_s - w) / w \times 100$ ）であり、圧力増分の鉛直分布は静水時から試料採取時の圧力増分を示す。本研究では、破壊を伴わない掃流砂による浸食は対象外とし、実験時の

表-2 実験ケース一覧

Table 2 List of experimental cases

底泥模型	断面平均流速 \bar{u} [m/s]	加速時間 α [s]	含水比 w [%]
シリカフューム [SF]	1.0, 1.5, 2.0	0.5~5.0	80~160
フライアッシュ [FA]			56~75

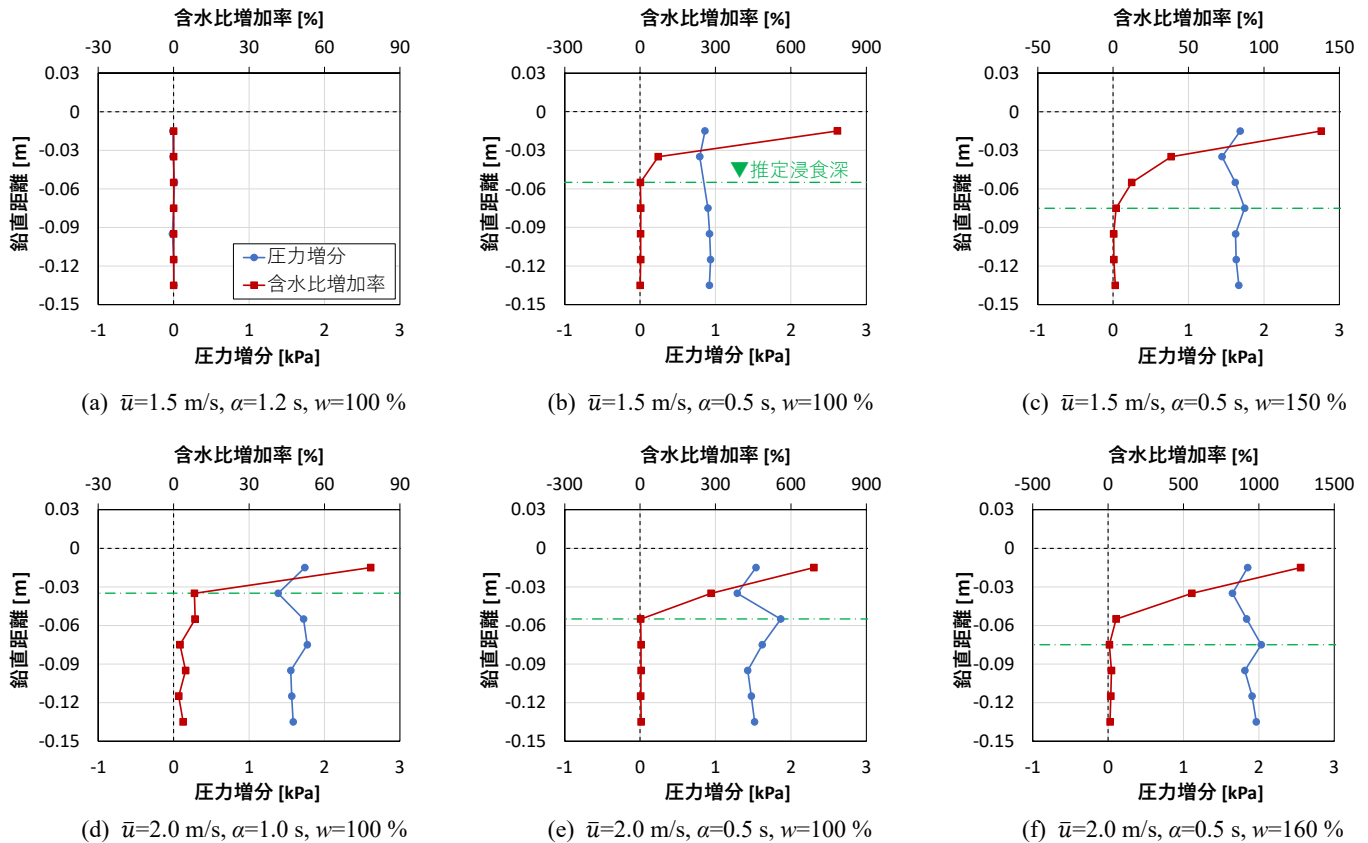


図-7 底泥の含水比増加率と圧力増分の鉛直分布の結果例

Fig.7 Example of results on vertical distribution of water content increase rate and pressure increment in bottom mud

撮影映像による底泥の移動状況と計測結果の傾向から、含水比増加率 10 %が以上となった深さを浸食深と判定し、これを底泥破壊による移動層厚とみなした。

加速時間が 1.2 s と比較的長い図-7 (a)のケースでは、流れによる底泥の浸食や破壊は生じていない。一方、加速時間を 0.5 s に短くすると、写真-2 (b)に示すような底泥の表層が顕著に流動化する破壊が発生し、55 mm の有意な浸食が発生した (図-7 (b))。これは、同じ流速でも圧力勾配によって底泥の移動形態が異なることを報告した橋本ら⁸⁾と整合した結果である。さらに、図-7 (c)では、底泥模型の含水比が大きく、緩く柔らかい状態であるため、75mm とより大きな浸食の発生が確認できる。図-7 (d)~(f)は流速 2.0 m/s の結果であるが、流速 1.5 m/s の図-7 (a)~(c)と同様の傾向が得られている。図-7 (d)は、(a)に対して加速時間および含水比は同等で

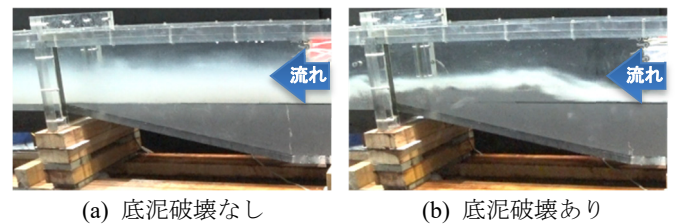


写真-2 底泥破壊の発生状況例

Photo.2 Example of bottom mud fracture

あるが流速が大きく、底泥に作用する圧力勾配が約 1.5 倍と大きいため、底泥破壊が発生したと考えられる。

流速 2.0 m/s の図-7 (d)~(f)について、含水比増加率の表示範囲を-20~60 %に変更し、図-8 (a)~(c)に示す。浸食面より下方の底泥模型内においても一部で含水比増加率が增大しており、圧力勾配の作用に伴って底泥内に緩みが生じたものと推察される。圧力増分の鉛直

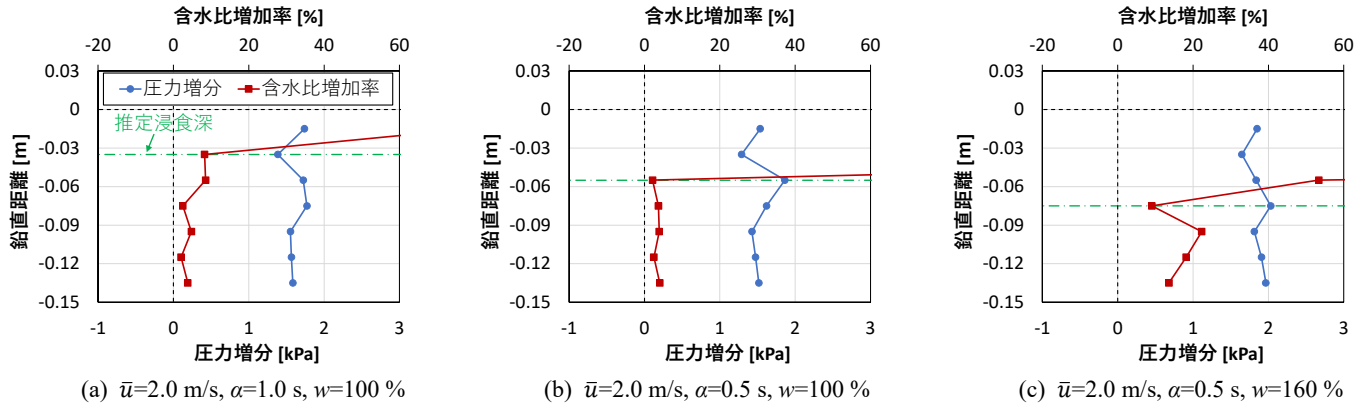


図-8 底泥の含水比増加率と圧力増分の鉛直分布の結果例 (図-7 (d)~(f)に対して図示範囲を変更)

Fig.8 Example of results on vertical distribution of water content increase rate and pressure increment in bottom mud
(Change of graphical range for (d)-(f) in Fig. 7)

分布を見ると、例えば図-8 (a)の鉛直距離-35 mm~-95 mm に圧力増分の増減が生じ、他ケースを含め全体的に、浸食面はこれらの間に位置する傾向が確認できる。図-3 に示すような試料採取による含水比の計測は労力が非常に大きい、地盤内の圧力鉛直分布を計測することで、津波作用時における軟弱地盤の浸食深を簡易に推定できる可能性が示唆された。

3.2 底泥の破壊限界

底泥の破壊限界について図-9 に整理する。横軸に各実験に用いた底泥モデルの降伏せん断応力を、縦軸に圧力勾配の最大値を示す。同図より、流れの圧力勾配が大きいほど、また底泥の降伏せん断応力が小さいほど、底泥の移動層厚（浸食深）が大きくなる傾向が見られ、破壊の発生限界を明瞭に捉えられていることが分かる。つまり、津波の外力である圧力勾配と、底泥の抵抗力である降伏せん断応力から破壊限界を推定できることが示唆された。

3.3 底泥の移動層厚の推定

次に、底泥の移動層厚の推定について定量的な検討を行う。図-9 で示したように、底泥の破壊限界および移動層厚の定量評価には、流れの流速および加速度の考慮が必要であり、津波外力として流れが底泥表層に及ぼす底面せん断応力 τ を用いて評価することが妥当と考えられる。管路に対する一次元漸変流（非定常）の運動方程式^{注1)}は次式で表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} + z^* + \frac{p}{\rho g} \right) = -\frac{\tau_o}{\rho g R} \quad (1)$$

ここで、 t : 時間、 x : 流下方向座標、 v : 断面平均流速、 p : 圧力、 z^* : 基準面からの高さ、 g : 重力加速度、 ρ : 流体密度、 R : 径深 (= 断面積 A / 潤辺 S)、 τ_o : 管路面に作用する平均せん断応力である。図-1 に示す管路区間において x 方向の断面変化は小さいと仮定すると、

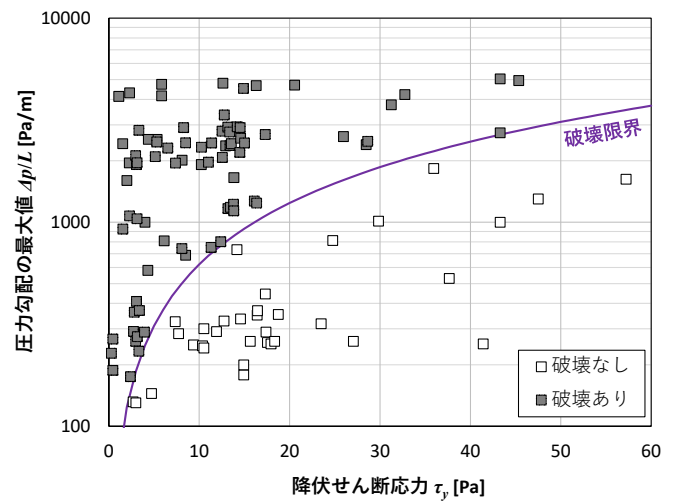


図-9 底泥破壊の発生限界

Fig.9 Critical yield of bottom mud fracture

式(1)の左辺で速度水頭と位置水頭の流下方向における変化は無視できるため、壁面での平均せん断応力 τ_o について変形すると、次式を得る。

$$\tau_o = -R \left(\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2)$$

τ_o は矩形管路の全周に作用する平均せん断応力であるから、底泥に作用する底面のみのせん断応力 τ は、次式より求められる。

$$\tau = \tau_o \frac{B}{2(B+H)} \quad (3)$$

ここで、 B : 水路幅 (= 0.2 m)、 H : 水路高 (= 0.2 m) である。

概略検討として、表-2の実験ケースに示した流れの加速時間に生じる流速変化を式(2)の $\partial v / \partial t$ に、計測で得られた圧力勾配 $\Delta P / L$ の最大値を $\partial p / \partial x$ に代入し、式(2)、(3)から本実験において、管路内の流れが底泥表層に及ぼす底面せん断応力 τ を求めた。

底面せん断応力と降伏せん断応力の比 τ/τ_y を横軸に、移動層厚 δ_z を縦軸に整理して図-10に示す。 $\tau/\tau_y < 1$ では移動層厚はゼロであり有意な破壊は発生していない。つまり、底泥の破壊限界は底面せん断応力と降伏せん断応力の比 τ/τ_y から推定可能であることが確認できる。さらに、底泥の抵抗力である降伏せん断応力 τ_y に対して津波の外力である底面せん断応力 τ が大きくなるほど、移動層厚が大きくなる傾向が確認できる。実験結果に基づき最小二乗法で求めた推定式として、次式を得ることができた。

$$\delta z = 54 \times (\tau/\tau_y - 1)^{0.18} \quad (4)$$

ここで、 δz は移動層厚で単位 [mm]を有する。

4. まとめ

本研究では、津波による底泥破壊と移動特性に着目し、粒径が数 μm の底泥模型を用いた移動床実験を実施した。流れの圧力勾配と底泥の含水比増加率分布から浸食深を整理し、底泥の破壊限界が流れの底面せん断応力と降伏せん断応力の関係により推定可能であることを明らかとした。さらに、流れの底面せん断応力が大きいほど底泥は顕著に浸食する結果が得られ、津波作用下における底泥の移動層厚に関する推定式を提案した。本研究の成果により、津波による底泥の動態を定量的に評価するための基盤が整備されたことから、津波による被害予測の精度向上に寄与することが期待される。

今後は、上記推定式を用いた数値モデルを構築し、底泥破壊による層移動および巻上現象を考慮した数値シミュレーションを行い、黒い津波の再現解析を実施する予定である。最終的には、より現実的な津波被害を予測することで、さらに効果的な防災・減災戦略に貢献したいと考えている。

注

注1) 椿東一郎『水理学 I』森北出版, p.98, 1995.

参考文献

1) NHK : NHK スペシャル連動企画“黒い津波”～知られざ

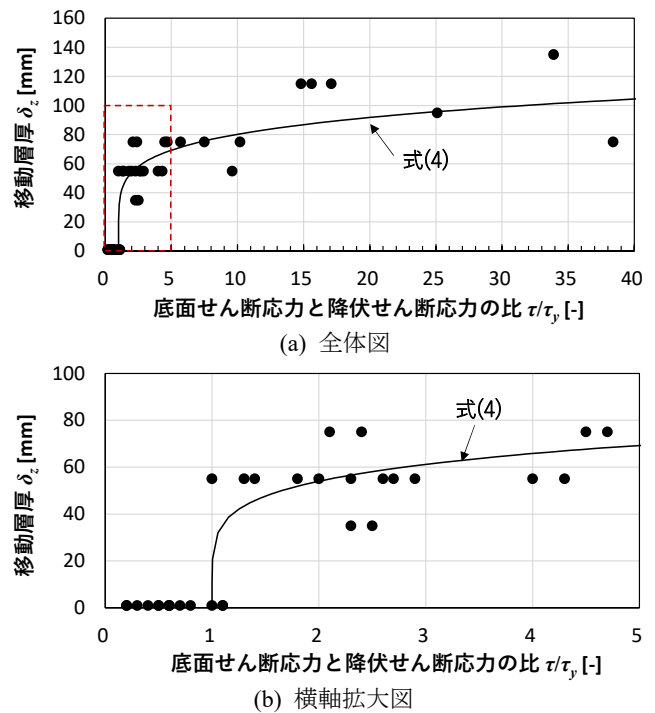


図-10 底泥の底面せん断応力と移動層厚との関係
Fig.10 Relationship between bottom shear stress and moving layer thickness of bottom mud

- る実像～, <https://www3.nhk.or.jp/news/special/shinsai-portal/8/kuroinami/>, (参照 2025-5-9).
- 2) 毎日新聞：黒い波・ごう音、必死に逃げた 奥能登・車載カメラが捉えた津波, <https://mainichi.jp/articles/20240108/k00/00m/040/166000c>, (参照 2025-5-9).
 - 3) 大坪国順, 村岡浩爾：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, 1985.
 - 4) 鶴谷広一, 江口秀二, 佐々木豊喜：流れおよび波による底泥の巻き上げ限界値の検討, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 235-239, 1990.
 - 5) 神保壮平, 山中悠資, 下園武範：津波による底泥の輸送に関する水理実験と数値計算による検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, pp. I_181-I_186, 2022.
 - 6) 松富英夫, 有川太郎：移動床斜面を遡上する津波氾濫流理論の汎用化, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17049, 2024.
 - 7) 橋本貴之, 織田幸伸：底泥を対象とした底質の移動に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, pp. I_187-I_192, 2022.
 - 8) 橋本貴之, 本田隆英, 織田幸伸：圧力勾配を考慮した底泥移動と津波波力に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.79, No.17, 23-17026, 2023.
 - 9) 橋本貴之, 本田隆英, 織田幸伸：津波作用下の軟弱地盤を対象とした水理実験における浸食厚把握の試み, 第 80 回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-17, 22024