

硬い底泥の巻き上げおよび浸食速度に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON COHESIVE MUD DEPOSITS EROSION RATE IN ANNULAR FLUME

渡辺亮一¹・山崎惟義²・楠田哲也³・手計太一⁴・野村哲裕⁵・林 義晃⁶
Ryoichi WATANABE, Koreyoshi YAMASAKI, Testuya KUSUDA, Taichi TEBAKARI
Testuhiro NOMURA and Yoshiaki HAYASHI

¹正会員 博士(工) 福岡大学講師 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

²正会員 工博 福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

³フェロー会員 工博 北九州大学教授 国際環境工学部 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

⁴正会員 博士(工) 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

⁵学生会員 学士 九州大学大学院工学研究院 環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁶正会員 学士 福岡大学技術職員 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

The prediction of cohesive mud deposits erosion rate is important information for civil engineers. However, to calculate an actual amount of erosion at the time of flood, the necessity for considering the effect by cohesive mud deposits formed on the river bed surface has been caused. Cohesive mud deposits formed on the river bed has a major influence on the erosion phenomenon at the time of flood. Therefore, many researchers are grappling from various angles with this problem.

The erosion process of cohesive mud deposits in river channel was studied using annular flume. In this study, it has aimed to clarify how the amount of cohesive mud deposits erosion changes by the water content ratio experimentally. Results of an experimental study on the rate of cohesive mud deposits erosion in the annular flume are described.

Key Words : mud deposits, erosion rate, annular flume, bed shear stress, cohesive sediment

1. はじめに

河川感潮部および浅い湾や湖沼では底部に凝集性の非常に高い粘土やシルトが底泥として堆積していることが少なくない。この堆積した凝集性の強い底泥は潮汐、洪水、吹送流等により巻き上げられ透明度の低下・水中の溶存酸素の低下等の問題を引き起こすとともに、河川感潮域では河口から上流に向かって輸送された凝集性の強い微細粒子が河道断面内に沈降・堆積し、河道の流下阻害の原因にもなっている。その結果、計画洪水流量を流下させる河道断面を満足させるためには、定期的に底泥を浚渫する必要性が生じ、その費用は莫大なものとなっている。また、出水時に凝集性の高い硬い底泥から構成される河床がどの程度変動するのかわからないため、効果的な河道の管理を行っていくためにも、凝集性の強い硬い底泥の巻き上げ、沈降、輸送などの現象を解明す

ることは非常に重要であると考えられる。

これまで、柔らかい底泥(本論では、柔らかいとは室内実験用に調整された底泥のことを指す)の巻き上げおよび浸食速度については大坪・村岡¹⁾、凝集性の強い柔らかい底泥の巻き上げについては、海田ら²⁾によって明らかにされており、これらの論文で定式化された予測式を用いて、底泥の巻き上げ量の算出が可能となっている。しかしながら、実際の水域に存在する底泥は、表層部分のごく薄い層(浮泥)を除く下層の部分は圧密作用を受けて硬くなっている場合がほとんどである。これまでの室内実験では、実験装置の設定限界から柔らかい底泥を巻き上げることは可能であったが、含水比が200%以下のいわゆる硬い底泥(本論では含水比が100~200%程度の現地底泥を指す)を巻き上げ可能なせん断応力は発生させることが不可能であった。このため、洪水フラッシュによってどの程度の底泥が巻き上げられ、河床の浸食速度がどの程度であるかを検証した結果としては、

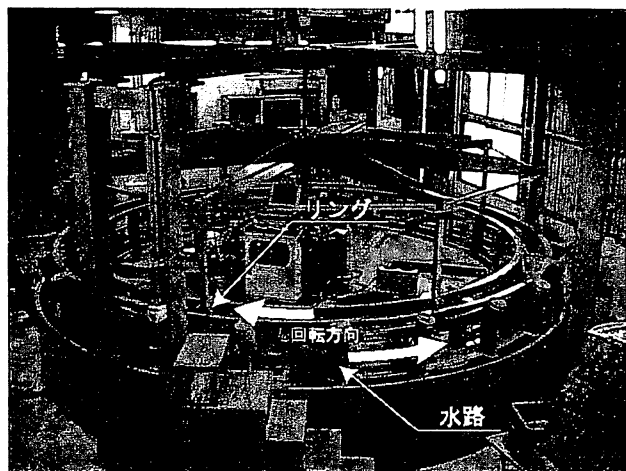


図-1 大型円形回転水路概略

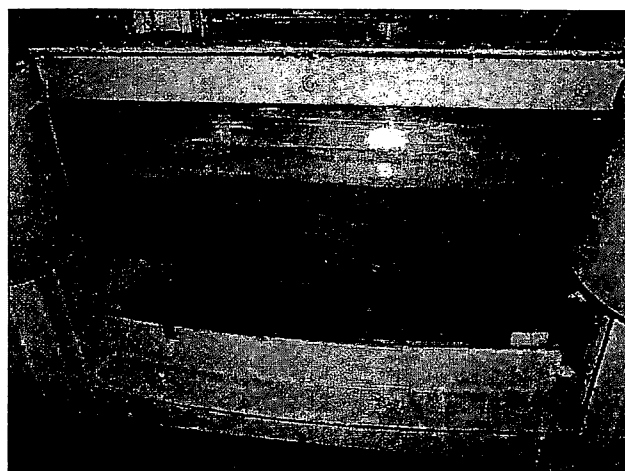


図-3 水路内にトレーを挿入した様子

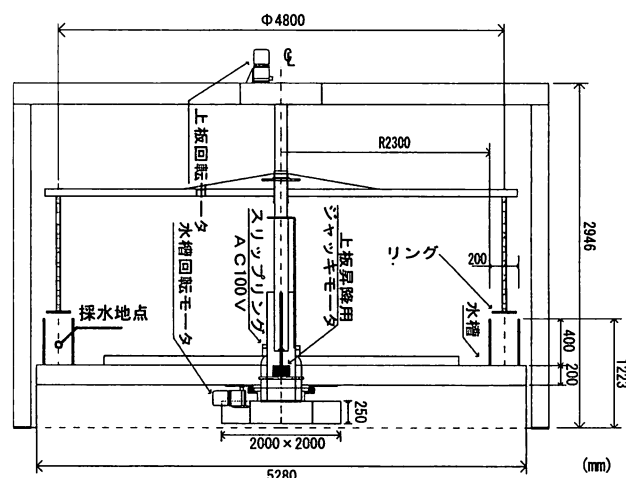


図-2 大型円形回転水路断面



図-4 現地底泥採取手法

横山ら³⁾による現地観測結果が見られる程度である。そこで、本研究では、洪水フラッシュ時のせん断応力が発生可能な大型円形回転水路を用いて、硬い底泥の巻き上げおよび浸食速度に関して実験的な検討を行い、洪水フラッシュ時における底泥の巻き上げ量および浸食速度の予測に用いることが可能なデータを室内実験により明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

(1) 実験装置

図-1および図-2は、今回の巻き上げ実験に用いた内径4.6m、外径5m、深さ0.4m、水路幅0.2mの大型円形回転水路を示している。円形回転水路は回転円盤上に固定されており下側のモーターで所定の回転速度で稼働させることができる。また、円形リングは上部のアームの先端に固定されており、上側に設置されたモーターで所定の速

度で回転させることができる。円形回転水路およびリングは、ともにモーター・回転速度制御装置を有し、中央の2重回転軸を通じて独立で回転できるようになっている。実験時、図-1中に示す様に下側水路と上側リングは双方逆向きに回転し、水路底部での二次流（水路に直角方向の流れ）の発生を最小限に抑える機構となっている。また、円形リングは、昇降機能を有しており、水深を自由に変化できる機構を有している⁴⁾。実験時、円形水路内には、試料底泥を入れたアクリル製のトレー（外周550mm・内幅193mm・深さ30mm・肉厚3mm）を装置底部に挿入できるようになっている（図-3参照）。

(2) 実験に用いた試料

今回の実験に用いた試料は、六角川住之江河口より11km上流六角橋付近の干潮時に露出する河川敷で採取した（図-4参照）。採取時には、可能な限り乱さないように底泥試料を採取するため、トレーに入る形にスコップで切れ目を入れた後、静かにトレー内に挿入している。この後、トレーをラップで包み、研究室に持ち帰り、速

表-1 実験条件

RUN	試料採取地	表層の含水比 (%)	水槽内水深 (cm)
1	六角川	725	28
2	六角川	640	28
3	六角川	625	28
4	六角川	475	20
5	六角川	206	20
6	六角川	200	15
7	六角川	144	15
8	今津干潟	133	20
9	今津干潟	46	20

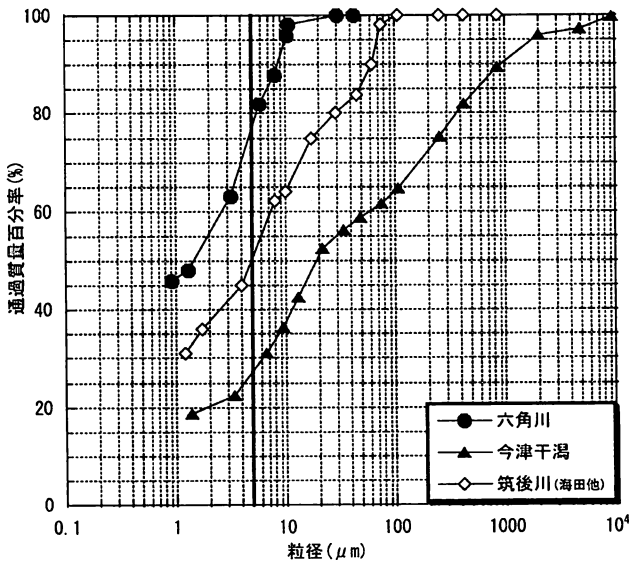


図-5 各底泥の粒径加積曲線

やかに実験を行った。また、同一箇所でも含水比および物性値測定用の底泥試料を別途採取している。六角川で採取した試料の物性値は、密度 2640 kg/m^3 、強熱減量18%、中央粒径 $1.4 \mu\text{m}$ 、粒度組成は粘土分約78%、シルト分約22%であり、地盤工学三角座標分類では粘土に属する。また、今回の実験では比較対照のために博多湾南西部今津干潟でも現地底泥を採取した。現地底泥の採取方法は六角川の場合と同じである。今津干潟で採取した試料の物性値は、密度 2790 kg/m^3 、強熱減量1.3%、中央粒径 $19 \mu\text{m}$ 、粒度組成は粘土分約27%、シルト分約35%であり、地盤工学三角座標分類ではロームに属する。図-5は今回の実験に用いた試料の粒径加積曲線を表している。図中の筑後川泥の粒径加積曲線については海田ら²⁾の観測結果を示している。この図から、六角川の粘土分($5 \mu\text{m}$ 以下)は約78%に達しており、組成のほとんどが凝集性の強い細かな粒子から構成されていることがわかる。これに対して粘土分は筑後川底泥では約50%、今津干潟底泥では約27%であった。また、六角川および筑後川の試料には砂分は含まれていないが、今津干潟の試料には砂分が含まれていることがわかる。

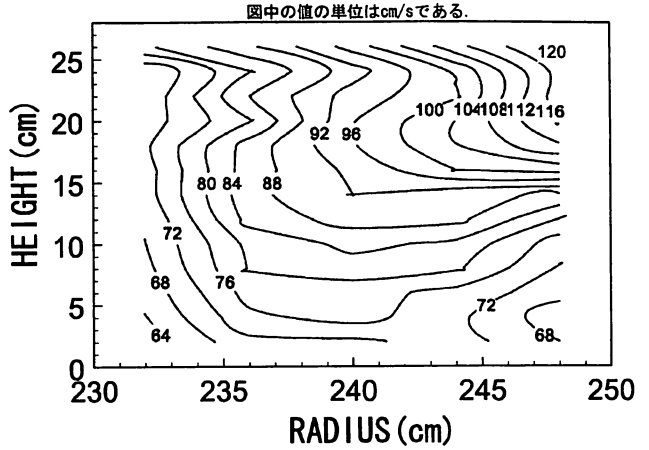


図-6 水路内主流方向流速分布

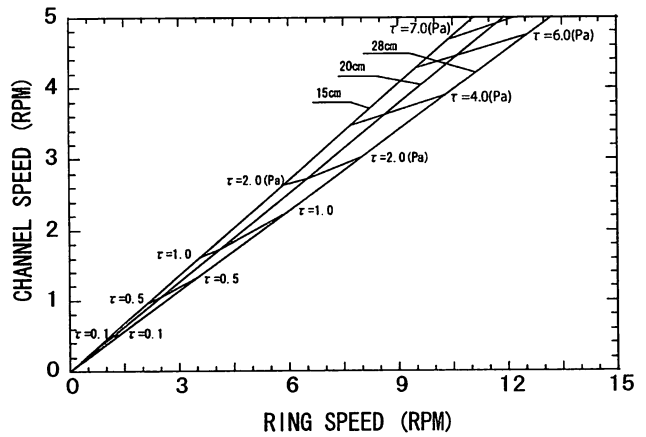


図-7 大型円形回転水路の操作曲線

(3) 実験手法

表-1は実験条件を示している。現地より乱さないよう持ち帰ったトレーを大型円形回転水路底部に設置して、所定のせん断応力において巻き上げ実験を開始した。なお、RUN1~4に関しては含水比が他の実験ケースに比べて高く、持ち帰った試料が乱れていた、このためこの四つのケースに関しては実験室にてもう一度整形した後、実験を行っている。今回の実験では、水路底面におけるせん断応力を 0.1 (Pa) から 7 (Pa) まで変化させて、連続的に巻き上げの実験を行った。図-6は、水路内に三次元電磁流速計 (KENEK製VM-1001型:先端部球形 $\phi 13\text{mm}$) を挿入して実測した水路断面内の主流方向流速分布を表している。この図から、水路底面底部においてはほぼ一様な流速分布となっていることがわかる。水路内底部のせん断応力は、水路内の流速分布および周面摩擦の状態から、算定しているが、今後、センサーを用いてせん断応力の実測を行い、キャリブレーションを行っていく予定である。図-7は算出した底面せん断応力と大型円形回転水路の回転数 (RPM) の関係を示している。この図は大型円形回転水路の操作曲線を示しており、縦軸を円形水路の

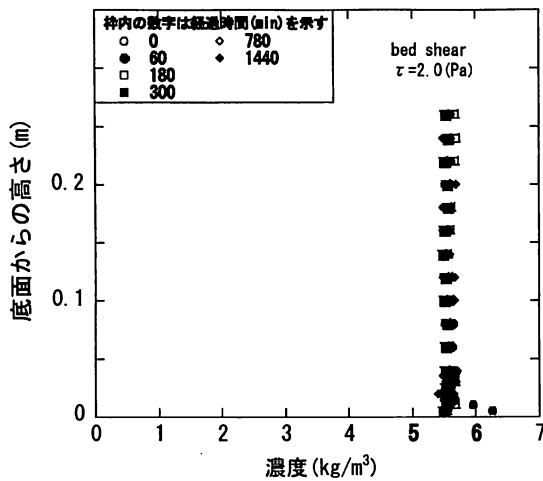


図-8 水路内の懸濁物質濃度分布

速さ (RPM), 横軸をリングの速さ (RPM) としている。この図から、本実験装置は2次流の影響を無視し得る条件で設定可能な範囲が大きく、様々な流れ場における実験が可能となっている。実験中、水路内中央部 (図-2参照) に設置した採水装置によって懸濁液サンプル (約100cc) を採取し、レーザ濁度計 (オルガノ社製・LOR-301) を用いた分析によって水路内の懸濁物質濃度を測定した。水路内の懸濁物質濃度の変化を測定することによって、各せん断応力での巻き上げ速度および侵食速度を算出している。図-8は装置回転時 (底面せん断応力2.0 (Pa)) の水路内の懸濁物質濃度分布を表している。この図から、水路内の中央部で測定された懸濁物質濃度は水路内でほぼ均一の状態となっており、水路内で巻き上げられた底

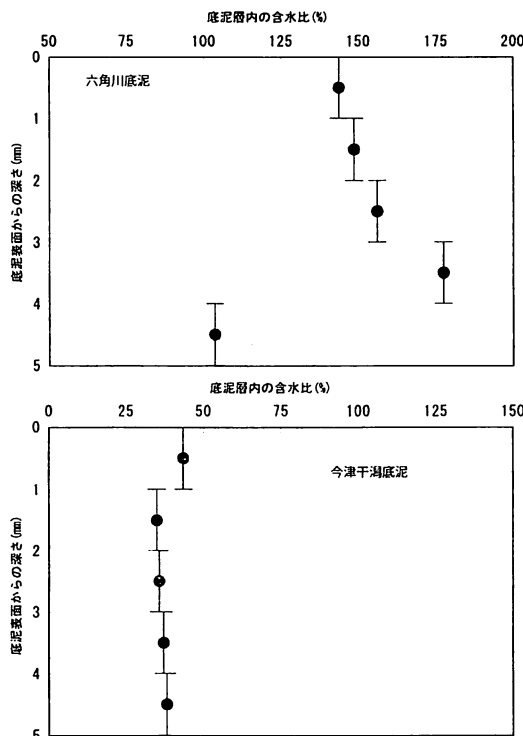


図-9 現地底泥の鉛直方向含水比分布

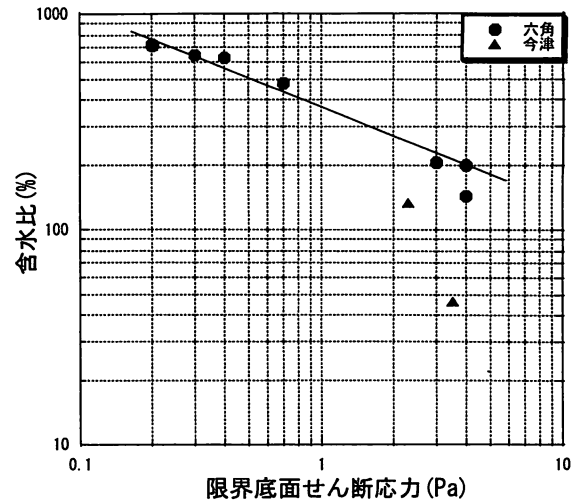


図-10 巻き上げに関する限界底面せん断応力と底泥の含水比の関係

泥量を算出するために用いても差し支えないと考えられる。また、実験に並行して装置内よりビデオ撮影を行い、巻き上げの様子を観察した。

3. 実験結果および考察

(1) 巻き上げ限界せん断応力と底泥含水比の関係

図-9は現地泥採取時に同時に採取したコアサンプルの深さ方向の含水比分布を示している。この図から、深さ3cm (巻き上げ実験に用いているトレーの深さは3cm) までの含水比はほとんど変化していないことから、今回の実験時に示された巻き上げ量は、ほぼ同じ含水比条件での巻き上げ量であると見なしてもよいものと考えている。次に、図-10は、底泥の含水比と限界底面せん断応力の関係を示している。この図より、六角川の底泥の巻き上げに関する限界せん断応力は含水比の低下に伴い指数関数的に低下していることがわかる。また、六角川の底泥の巻き上げに関する限界底面せん断応力は、今津干潟の底泥の限界せん断応力よりも含水比による変化が小さいことがわかる。限界底面せん断応力が4.0 (Pa) のときの両試料の含水比を比較すると、六角川底泥が約170%であるのに対して今津干潟底泥は約35%であり、両者の含水比に100%以上の差が認められた。これは両者の粒度組成の違い (図-5参照) によるものと考えられ、特に粘土分含有量が六角川は約78%であるのに対して、今津干潟では約27%であることが影響しているものと推察される。このことから、同じ含水比の底泥であれば、粘土分を多く含んだ底泥試料は凝集性が強く巻き上げられ難いに対して、粘土成分が少なく比較的凝集性の小さい試料は巻き上げられ易いと考えられる。以上ことより、底泥の含水比と巻き上げに関する限界せん断応力には相関関係が存在し、六角川底泥の巻き上げに関する限界底面せん

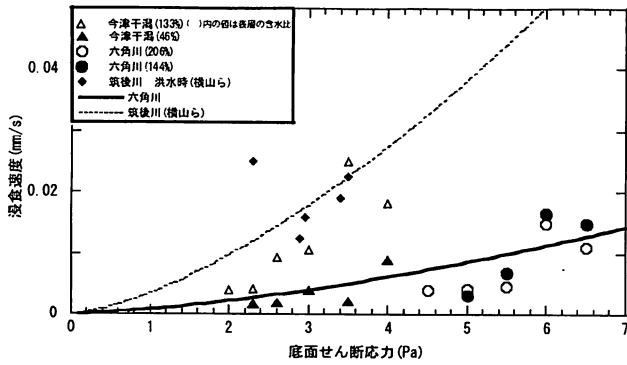


図-11 底面せん断応力と底泥の浸食速度の関係

断応力を τ_{ce} (Pa), 底泥の含水比を w (%) とすると, 両者は両対数紙上で直線関係にあり, 限界底面せん断応力は含水比の関数として次式で示された.

$$\tau_{ce} = 6.95 \times 10^4 w^{-1.9} \quad (1)$$

(2) 底面せん断応力と底泥の浸食速度の関係

図-11は底面せん断応力と底泥の浸食速度の関係を表している. 関根ら⁵⁾は実験水路における粘着性土の浸食速度式

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} \cdot u_*^3 \quad (2)$$

ここで, $\alpha(cm/s)^{-2}$ は粘土の種類や水温に依存する係数であり, $\alpha=0.778 \times 10^{-5} \sim 3.89 \times 10^{-5}$, R_{wc} は水含有率 (粘土含有率100%のとき含水比と等しい) を示している. 図-11中の実線は式(2)をもとに算出した六角川底泥の結果 ($\alpha=0.04 \times 10^{-5}$, $R_{wc}=2.06$) を示しており, 破線は横山ら³⁾が測定した筑後川の洪水時の算出結果 ($\alpha=0.10 \times 10^{-5}$, $R_{wc}=2.61$) を示している. この図より, 含水比がほぼ同程度の六角川底泥と筑後川底泥を比較すると, 六角川底泥の方が筑後川での観測浸食速度よりも小さく, 浸食されにくいことがわかる. また, 関根らの示した粘土の種類と水温に依存する係数 α で比較すると, 六角川底泥の α は, 筑後川における観測結果の半分程度の値となっている. 底泥の含水比で比較すると横山ら³⁾が測定した値は表層付近で200 (%)程度であり, ほぼ本実験で用いている六角川の試料と同じであることから, 図-5に示した, 粒度組成の違いが影響しているものと推察される. 特に六角川底泥の含む粘土成分が約78%であるのに対して, 筑後川底泥の粘土分は約50%であることがそれぞれの底泥の凝集性に影響を与えているものと推察される. ただし, 横山ら³⁾の文献中の組成は粘土・シルト分が97 (%)程度としか示されていないため, 海田ら²⁾が測定した筑後川底泥の粒度分布を用いて比較を行っているが, 粘土・シルト分は97 (%)と同じであることから比較可能であると判断している.

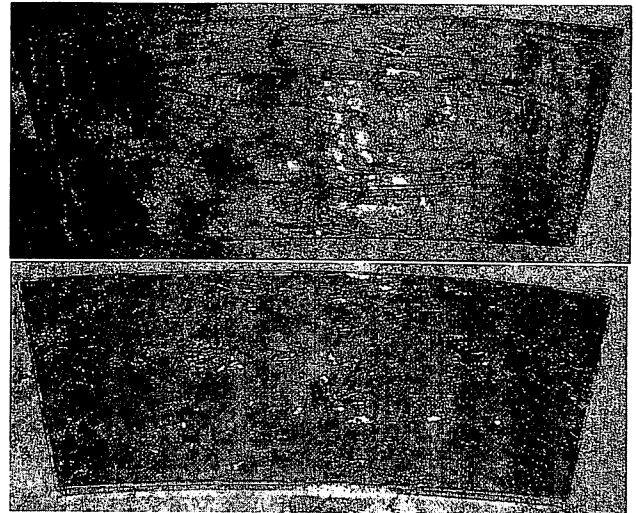


図-10 RUN5における巻き上げ実験開始前(上)と実験終了後(下)の比較

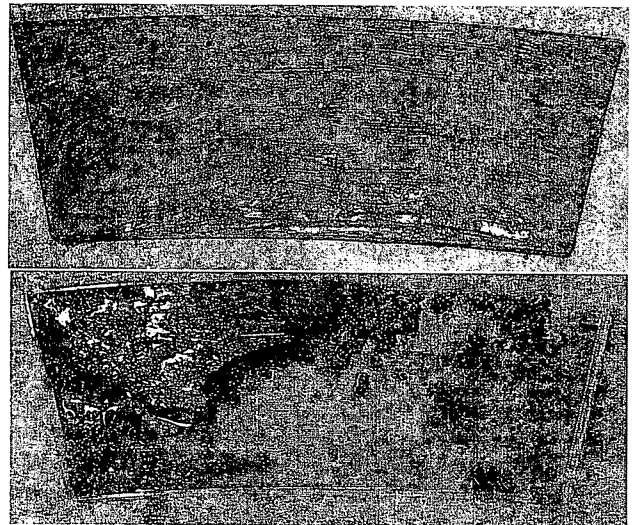


図-11 RUN7における巻き上げ実験開始前(上)と実験終了後(下)の比較

図-12は, RUN5の実験開始前と終了後のトレー内の底泥の様子を示している. RUN5においては徐々に底面せん断応力を増大させていき突発的な破壊の前に巻き上げ実験を終了させている. この図より, 底面せん断応力を徐々に大きくしていくにつれて, 薄い層状に底泥が浸食されていることがわかる. 次に, 図-13は, RUN7の実験開始前と終了後のトレー内の底泥の様子を示している. RUN7においても徐々に底面せん断応力を大きくしていく操作を行っているため, 底泥の浸食初期の段階においてはRUN5と同様に層状に巻き上げられる様子がビデオ撮影による観測結果より確認されている. この図より, せん断応力を徐々に増大させていくと, RUN7においては, 底面せん断応力を7 (Pa) まで増加させた時に, 底泥が突発的にブロック状に破壊していることがビデオ観測

で確認されている。横山ら³⁾の筑後川における観測結果によれば、出水時の底面せん断応力は最大で3.7 (Pa) に達し、河床が1~2 (m) 低下すると報告されている。六角川底泥を用いた今回の実験では、せん断応力が7 (Pa) 未満であれば、層状に浸食されているが、せん断応力が7 (Pa) に達した段階で、一気に底泥が破壊されることが確認された。このことから、実河川においては出水の際に、ある段階を超えるとブロック状に河床が破壊され、一気に底面形状が変化する可能性が示された。

4. まとめ

(1) 巻き上げ限界せん断応力と底泥含水比の関係

底泥の含水比と巻き上げに関する限界せん断応力には相関関係が存在し、六角川底泥の巻き上げに関する限界底面せん断応力と底泥の含水比の関係は、両対数紙上で直線関係にあり、限界底面せん断応力は含水比の関数として式 (1) で示された。また、凝集性の強い成分（粘土）を多く含む底泥の方が同じ含水比における限界せん断応力は大きくなる傾向にあり、含水比の変化に対する限界せん断応力の変化が小さいことがわかった。

(2) 底面せん断応力と底泥の浸食速度の関係

関根ら⁵⁾の示した粘着性土の浸食速度式をもとに、横山ら³⁾の行った筑後川での観測結果と六角川底泥の浸食速度を比較した結果、同じ含水比であれば、六角川底泥の方が巻き上げられ難いことが示された。これは、それぞれの底泥のもつ性状が関係しており、特に凝集性の強さに大きな影響を与える粘土分含有量が因子として大きな影響を与えている可能性が示された。また、底面せん断応力を徐々に大きくしていくと、最終的には底泥の巻き上げ形態は、層状に巻き上げられるのではなく、ブロック状に破壊されていくことがわかった。このことから、現地河川河床においても洪水フラッシュ時には、底泥が一気にブロック状に破壊されている可能性があることが示された。

5. 今後の課題

今回の実験では、同じ装置内で筑後川底泥の巻き上げに関する限界せん断応力や浸食速度の実験を行っていない。このため、横山ら³⁾の示した観測結果をもとに筑後川底泥との比較検討を行っている。現地河川河床における、底泥の浸食速度が底面せん断応力と底泥の性状（特に含水比と粘土含有量）に大きく影響を受けている可能性を示すことができたが、今後、底泥性状の違いによる影響を考慮していくためには、同様な手法でことなる性状の底泥を用いて実験を行い、比較検討する必要があると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B：課題番号18360254、研究代表者：渡辺亮一）の助成を受けて行われた研究であり、また一部の部分は、科学研究費補助金（基盤研究C：課題番号 19560554、研究代表者：山崎惟義）の助成を受けて行われたものである。ここに記して、謝意を表す。また、今回の実験を行うに当たって、現地での底泥採取に関して惜しめない支援をしてくれた福岡大学工学部社会デザイン工学科水圏システム研究室の学部生および大学院生に感謝いたします。

参考文献

- 1) 大坪国順, 村岡浩爾：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, pp43-pp52, 1986.
- 2) 海田輝之, 楠田哲也, 栗原陽一：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 第393号/II-9, pp33-pp37, 1988.
- 3) 横山勝英：強混合型の河川汽水域における底泥の洪水時フラッシュとせん断強度変化に関する調査実験報告書, 河川整備基金助成事業, pp12-25, 2006.
- 4) 渡辺亮一・山崎惟義・楠田哲也：回転円形水路における底泥の巻き上げに及ぼす生物膜の影響に関する実験的検討, 水工学論文集, 第50巻, CD-ROM, 2006.
- 5) 関根正人, 西森研一郎, 藤尾健太, 片桐康博：粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察, 水工学論文集, 第47巻, pp.541-546, 2003.

(2008. 4. 3受付)