

2.透明砂を用いた河岸侵食の進行過程の実験的研究

井上 卓也

Takuya INOUE

広島大学大学院 先進理工系科学研究科 准教授

要 旨

近年の気候変動に伴う豪雨の増加により、流路変動が橋梁被災を引き起こす事例が多発している。特に、洪水下降期における河川水位と地下水位の差が河岸侵食を促進する可能性が指摘されているが、その詳細なメカニズムの解明は進んでいない。本研究では、透明砂（トランスパレントソイル）を用いた光切断計測法（LIF法）による河岸侵食の進行過程の可視化と計測を試みた。本研究では、まず透明砂の基礎特性を整理し、LIF法と組み合わせた計測手法（LIFiTS法）を開発した。次に、水理模型実験を通じて、地下水位の変化が河岸侵食に与える影響を検討した。予備実験により適切な実験条件を設定し、本実験では地下水位の有無による河岸侵食の進行速度やパターンの違いを明らかにした。その結果、地下水位が高い場合、侵食速度が大きくなり、崩落が急激に進行する可能性が示唆された。本研究の成果は、河岸侵食メカニズムの理解を深めるとともに、河川管理や橋梁防災対策の基礎資料となる。今後は、取得したデータを基に光切断法による詳細な解析を行い、地下水位と水位の関係性についてさらに検討を進める予定である。

《キーワード：透明砂；河岸侵食；水理実験；地下水位》

1. はじめに

洪水時における橋梁被災による交通ネットワークの寸断は、避難行動を阻害するだけでなく、その後の経済活動にも大きな影響を及ぼす。近年、気候変動に伴う豪雨の増加により、河川の流路がダイナミックに変動し、橋台が被災するケースが増えている（図-1）。例えば、2016年の北海道豪雨では、中小河川を中心に100を超える橋梁が流路変動によって被災した。また、2019年の東日本台風では、長野県の千曲川に架かる鉄橋が崩落したことも記憶に新しい。



図-1 流路変動による橋台被災の例

流路変動は、洪水下降期に進行しやすい。その要因として、①流量の低下に伴い砂州が発達し、偏倚流速が増加すること、②河川水位と河岸内部の地下水位の差が拡大し、間隙水圧が上昇することが挙げられる。これまで①の影響に着目し、実験的・数値解析的な研究を行ってきた^{1),2)}。しかし、2021年7月の広島県三津大川における洪水では、砂州の発達が限定的であったにもかかわらず、河岸崩落が発生した。この洪水時、三津大川では流量の下降期と瀬戸内海の引潮のタイミングが重なっていた。その影響で河川水位が急激に低下し、地下水位との差が拡大した結果、河岸崩落が発生した可能性が高い。このような、地下水位と河川水位の差によって引き起こされる河岸崩落は、他の河川においても発生する可能性がある。

流路変動発生時の地下水面形の計測は、極めて困難である。山地斜面の崩落や破堤の場合、浸透流と斜面崩壊の方向が一致しているため、図-2aのように側面のガラス面から地下水面を視認できる。一方、流路変動時には、河川流の主流方向と河岸の崩落方向が異なるため、図-2bのように崩落方向の地下水面を直接観察することができない。さらに、河床や河岸では侵食と堆積に伴い土粒子間隙が変化する。この影響により、浸透流や地下水面形が空間的に変動し、河岸の不安定化を引き起こす。地下水面や間隙構造は時間とともに変化するため、3次元のリアルタイム計測が求められる。

そこで、本研究では、地下水位と河川水位の差が河岸侵食に与える影響を把握することを目的とし、従来の計測手法では困難であった動的環境における地下水の挙動や地形変化を、LIF法（光切断計測法の一つ）と透明砂（トランスパレントソイル）を併用してリアルタイムに可視化する計測手法の開発を試み、水理模型実験を実施した。

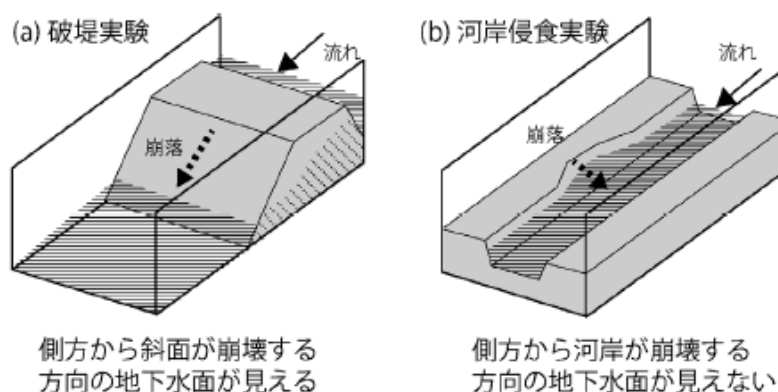


図-2 破堤実験と流路変動実験の違い

2. 透明砂実験の概要

(1) 計測手法

本研究では、光切断計測法的一种であるLIF法（Laser Induced Fluorescence法）と透明砂（トランスパレントソイル）を併用し、地下水面形と土粒子間隙の時空間変化を計測する手法を開発する（図-3a）。

透明砂と屈折率が等しいヨウ化ナトリウム水溶液を注水することで、砂内部を透過した可視化が可能となる^{3),4)}。次に、この水溶液にフルオレセインを少量添加し、暗室内で水路底面からレーザーシートを照射、さらに光学フィルタを装着したカメラを斜め下方から撮影する。すると、フルオレセインを含む水だけが蛍光し、透明砂や大気は蛍光しないため黒く映る（図-3a 右下）。この撮影を水路軸方向に移動させながら連続的に行うことで（図-3b）、時空間的に変化する地下水面・間隙構造・地形を同時計測するLIFiTS法（Laser Induced Fluorescence in Transparent Soil法）の開発を試みる。

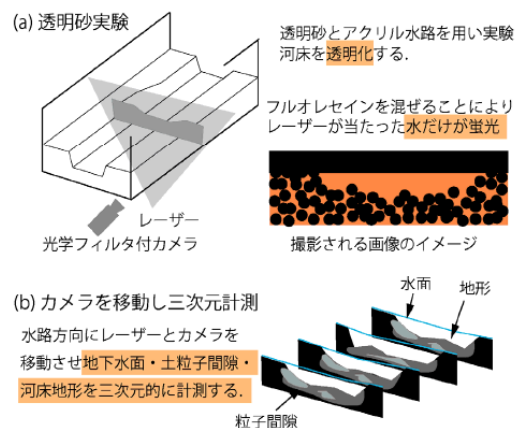


図-3 LIFiTSを用いた3次元計測の概念図

(2) 透明砂に関する基本事項

透明砂は、地盤工学の分野で利用されており、透水係数やせん断強度などの基本的特性を調べることで、天然砂の性質に近いことが確認されている⁴⁾。河床材料に使用する透明砂は、石英（ソリスSiO₂グレードS）の粒径0.4–1.0mmの針形状除去品を使用した（図-4）。石英の屈折率が1.458であり、屈折率が等しいヨウ化ナトリウム水溶液（23℃）を準備した。事前準備により、水1Lに対してヨウ化ナトリウム1.19kgの濃度に設定することで、石英が透過することを確認した（図-5）。また、濃度を調整したヨウ化ナトリウム水溶液にチオ硫酸ナトリウムを加え、チオ硫酸陰イオンが水溶液中のヨウ素と反応することにより変色を防ぐ処理を行った。

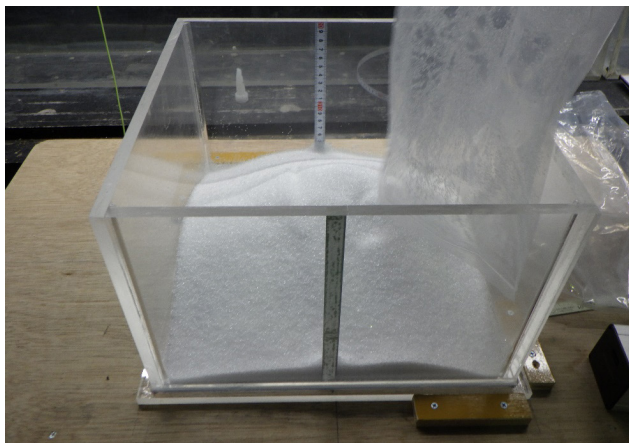


図-4 使用した石英

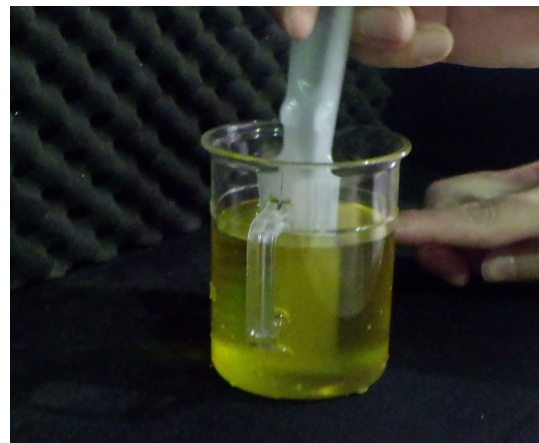


図-5 攪拌直後の石英とヨウ化ナトリウム水溶液

3. 水理模型実験

(1) 実験準備

実験水路は、上下流助走区間30cm、河道区間50cm、水路幅は上下流5cm、河道区間の水路幅は河岸侵食を把握するため30cmとした（図-6,7）。中央の河道区間は光切断計測を行うため、アクリル板を使用した。上流側に水槽を2段設け、下部の水槽には整流するためヘチマロンを敷設した。下流端には水受け用の水槽を設け、ポンプでくみ上げて上流に水を循環させる構造とした。河床勾配は適宜変更できるよう実験水路の下に板を敷いて可動式に設定した。地下水位は、下流から河道区間右岸際にコンバーター付きポンプで小流量をくみ上げアクリル板の側壁から水位を調節することとした。



図-6 実験水路

光切断法計測は、暗室内でアクリル水路底面からレーザーシートを照射し、さらに光学フィルタを装着したカメラを斜め下方から撮影する。そのため、水路下の下流側にカメラを設置し、横断方向にレーザーをシート状に照射した状態で写真撮影できるように設定した。また、レーザー照射による撮影の際、撮影の邪魔となる波長域をカットするためシャープカットフィルター（シグマ光機株式会社製：SCF-50S-580）を使用した。レーザー照射断面の撮影を行うにあたり、ヨウ化ナトリウム水溶液にフルオレセインナトリウムを加えた。フルオレセインの濃度は水溶液の1/30,000倍とし、レーザー装置の出力値は「30A」とした。河岸侵食状況を平面的に把握するため、水路上方にビデオカメラを設置した。

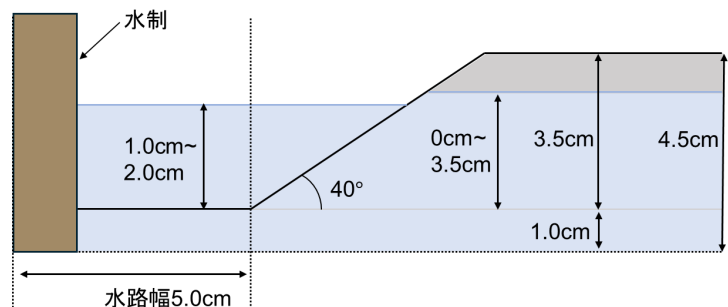


図-7 河床断面図

(2) 予備実験による実験条件の選定

ヨウ化ナトリウム水溶液を使用した本実験を行う前に、実験条件を選定するための予備実験を実施した（表-1）。アクリル板で製作した河道区間に、河床部は2cm、右岸の高水敷は4.5cm透明砂を敷設した。河岸の法面勾配は40°とした。選定する実験条件は、河床勾配、水深、地下水位である。河床勾配は、1/200及び1/400の2パターン、水深は1.0cm、2.0cmの3パターン、河岸侵食を促すための水制（縦断方向に

表-1 水理条件

S=1/200

川幅 (cm)	粒径 (cm)	流量 (L/s)	粗度係数	勾配	水深 (cm)	流速 (m/s)	u^* (cm/s)	u^*c (cm/s)	τ^*	Fr	給砂量 (L/min)
5	1	0.11	0.015	0.005	1	0.22	0.022	0.023	0.03	0.69	
5	1	0.21	0.015	0.005	1.5	0.28	0.027	0.023	0.045	0.74	0.012
5	1	0.34	0.015	0.005	2	0.34	0.031	0.023	0.06	0.78	0.044

S=1/400

川幅 (cm)	粒径 (cm)	流量 (L/s)	粗度係数	勾配	水深 (cm)	流速 (m/s)	u^* (cm/s)	u^*c (cm/s)	τ^*	Fr	給砂量 (L/min)
5	1	0.07	0.015	0.0025	1	0.15	0.015	0.023	0.015	0.49	
5	1	0.15	0.015	0.0025	1.5	0.20	0.019	0.023	0.022	0.52	
5	1	0.24	0.015	0.0025	2	0.24	0.022	0.023	0.03	0.55	

3cm, 横断方向に2.4cm) の設置位置は水路上方から10cm, 20cmの2パターンの条件から選定を行った。

予備実験の結果(図-8), 勾配が1/400の場合, 水制を設置したにも関わらず河岸の侵食は発生せず, 勾配1/200の場合は, 水制周辺の砂礫が掃流することによる河岸の崩落がみられた。水制位置は, 河道区間から10cm下流に設置した場合, 水制が上流端に近いと上流側の水位が上昇し堰上げが発生した。そのため, 流況の影響の妨げになりにくい20cm下流位置に水制を設置することとした。設定水深を2.0cmで通水を実施した場合, 河岸の侵食は横断方向ではなく下流側に進行し下流側壁に到達した。以上の予備実験から, 本実験では, 河床勾配1/200, 設定水深1.5cm, 水制位置上流端から20cmとし, 地下水位を変更させることで地下水位が河岸侵食に及ぼす影響を把握することとした。

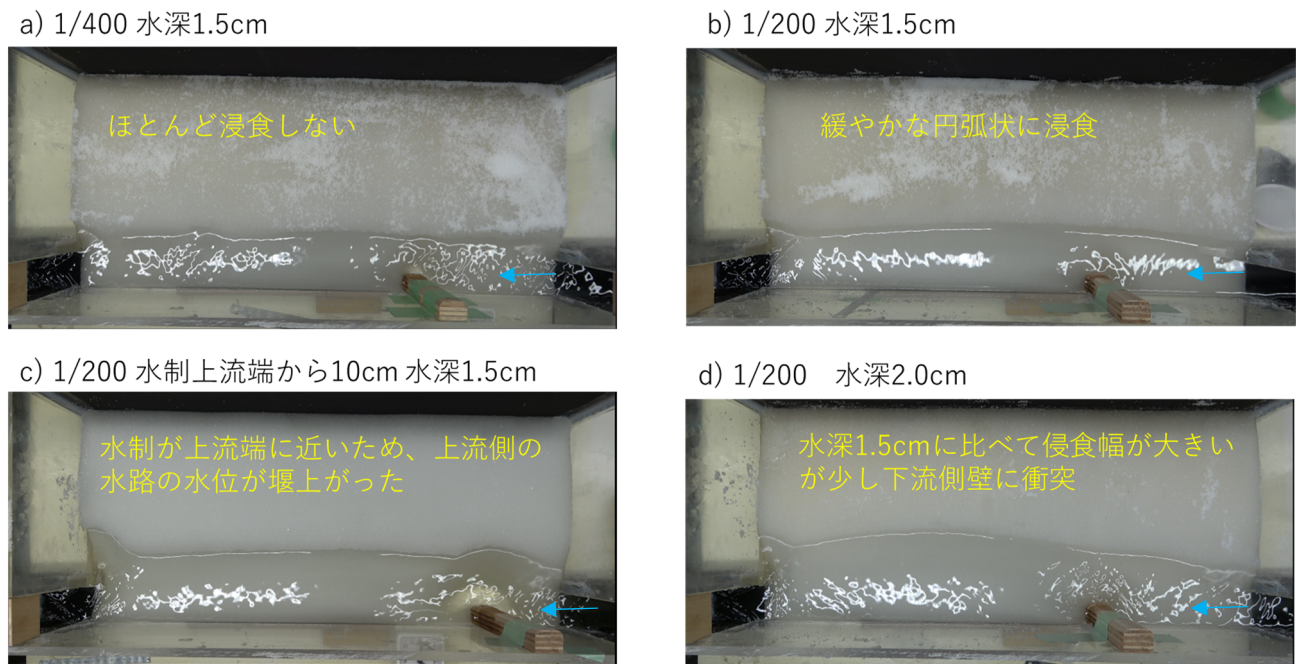


図-8 予備実験の実験結果

(3) 本実験

本実験にあたり, 地下水位を一定に管理するため, アクリル河道右側壁から5cm離れた位置にスリットを設けた。実験条件は, 予備実験で選定した条件の他に, 地下水位は0cm(地下水位なし)及び4.5cmの2ケースとした。通水時間は20分とした。実験中の計測は, 水路上方からシャープカットフィルター付きのビデオカメラで河岸侵食状況の撮影, 光切断法計測用の一眼レフカメラから5秒間隔からの撮影, 水路上方, 中流, 下流および地下水位用スリットの4箇所に設置した量水標による水位計測とした。また, 給砂量は予備実験から52ml/minとし, 上流側助走区間から連続して給砂を行った。実験終了後は, 流砂量の計測を実施した。地下水位が4.5cmのケースの場合, 河岸の透明砂にヨウ化ナトリウム水溶液を湿潤した状態を初期河床とした。通水前に水路と高水敷の間に仕切り板を設け, ポンプを起動し水路の水深が安定した状態で仕切り板を引き抜き, 通水開始とした。

地下水位0cm(ケース名case200_1.5_0)場合, 通水5分後までは一定の速度で河岸が崩落し12cmまで侵食が進行した。15分後で河岸の侵食は停止し, 最終的な河岸侵食幅は14cmであった。地下水位4.5cm(ケース名case200_1.5_4.5)場合, 通水10分後まで一気に侵食が進行し, 河岸の侵食は停止した。最終的な河岸侵食幅は, 地下水位がないケースと同じ14cmであった。地下水位によって河岸が湿潤状態にあるcase200_1.5_4.5は, 侵食開始から侵食停止まで一定の速度でかつ, 地下水位なしのcase200_1.5_0に比べて侵食速度が大きいことが確認された。

各ケースの水位の時間変化を図-9に示す。Case200_1.5_0は、水路から浸透した水溶液が地下水位のスリットに流れ込み5分後には水位が40mmを示しており、河岸は約40mm高で湿潤状態であったことがわかる。Case200_1.5_4.5の場合、地下水位45mmを維持するよう管理しており、水位は45mmで一定であった。

水路下方からアクリル水路に垂直にレーザーを当てたCase200_1.5_0の断面写真（図-10）をみると、通水直後（図-10a）では、水路と高水敷が仕切り版で仕切られており、水路には透明砂河床と水溶液の境界が確認された。通水25秒後では、水路幅が拡大しており、河岸侵食が進行していることがわかる。また、河床高が通水直後に比べて高くなっている。Case200_1.5_0の流砂量は給砂量とほぼ同量であったことを鑑みると、侵食した河岸の土砂は下流に掃流されずに水路に堆積した可能性が高い。今後は、この写真に屈折率を考慮した補正を行い、河床高や水位、水路幅変化について整理を行う予定である。

本研究の本実験の結果、地下水位の有無が河岸侵食の進行に影響を及ぼす可能性を示唆した。今後は光切断法計測によるデータ分析及び地下水位と水位の関係性について更なる検討を行っていく。

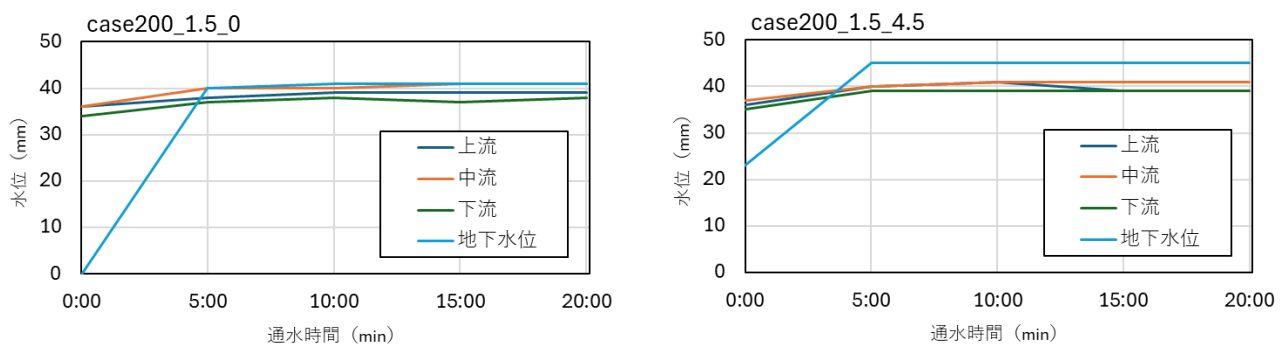


図-9 水位の時間変化

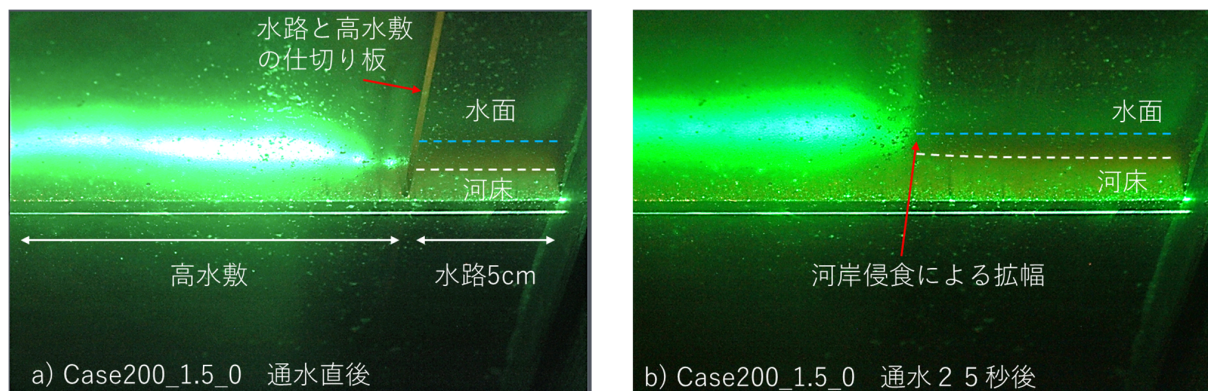


図-10 光切断法用の通水直前a)と通水25秒後b)の写真

参考文献

- 1) Inoue et al.: Supplied Sediment Tracking for Bridge Collapse with Large-Scale Channel Migration, *Water*, 2020.
- 2) Inoue et al.: Numerical Simulations of Meanders Migrating Laterally as They Incise Into Bedrock, *WRR*, 2021.
- 3) Carvalho, T., Suescun-Florez, E., Omidvar, M., and Iskander, M.: A Nonviscous Water-Based Pore Fluid for Modeling With Transparent Soils, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.38, No.5, pp.1-7, 2015.
- 4) 音田慎一郎, 加納隆伸, 肥後陽介, 山口凌大, 高野大樹: トランスパレントソイルを用いた堤防決壊プロセスの可視化に関する試み: 土木学会論文集B1 (水工学), vol77, 第2号, pp.I_643-I_648, 2021.