

# 水理模型実験・水理解析を活用した砂州掘削路の堆積メカニズム 把握および維持されやすい掘削路形状に関する一考察

にいつまゆう た よしたけひろ き かたやまなお や はかま や ひでゆき みずたけいすけ  
新妻友太<sup>1</sup>・吉武央気<sup>1</sup>・片山直哉<sup>1</sup> 袴谷秀幸<sup>2</sup> 水田圭亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>パシフィックコンサルタンツ（株）つくば技術研究センター（〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1）

<sup>2</sup>（株）P C E R（同上）

<sup>3</sup>パシフィックコンサルタンツ（株）東北支社（〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町一丁目9番1号）

本研究は、seg1 河道の砂州上に設置された掘削路で発生している、土砂堆積による機能消失に対して、維持管理コストの省力化を目的として、「掘削路の堆積メカニズム」を把握し、「維持されやすい掘削路形状」を提案するものである。水理模型実験を利用して掘削路の堆積メカニズムを把握し、平面二次元河床変動解析（数値解析）を利用して、複数の掘削路形状に対する土砂堆積状況の比較解析を行った。その結果、「維持されやすい掘削路形状」は、「掘削路下流からの土砂流出促進を狙い、掃流力の縦断分布が一様となるように掘削路の縦断勾配を途中で変化させること」が効果的であることを示した。

**Key Words** : 掘削路, 砂州, 水理模型実験, 水理解析, 河道管理

## 1. はじめに

わが国の河川では、流路の固定化に伴い、滞筋の深掘れや固定砂州上の樹林化などの河道管理上の課題が生じている。例えば、滞筋の深掘れは、護岸の損傷や魚類の生息・産卵環境である瀬や淵を消失させる可能性がある。河道内樹木は、洪水流下の妨げとなることで堤防からの越流を誘発する可能性がある。このような環境や治水上の課題を解決するために、樹木伐採や土砂掘削等の河道管理が実施されている。その際、維持管理費は、可能な限り抑制することが望まれ、自然営力を活用した効果的な対策が様々な河川で検討されている。

近年では、砂州上の流量分担・流速を増大させ、滞筋の流速・洗掘緩和と砂州上の土砂堆積・樹林化抑制のために、砂州上に掘削路を設ける対策の適用事例<sup>1), 2)</sup>が増えている。本対策は、洪水流が掘削路に流れ込むことによって掘削路自体が自然と拡大する可能性があり、掘削土量を少なくできるため、維持管理費の抑制が期待できる。しかしながら、掘削路の配置や形状に関する明確な基準はなく、種々の条件の中で、掘削路が維持・拡大する事例と消失する事例が報告されているが、堆積メカニズムや適切な掘削路形状は明らかにされていない。このため、掘削路の堆積メカニズムや本対策が適する河道条件、および効果維持が期待できる掘削路形状を明らかにすれば、維持管理コストの省力化が図れるが、これらを現地で把握することは困難である。

以上の背景を踏まえ、本研究では、水理模型実験と水理解析の2つの手法を活用して、掘削路の堆積メカニズムや適切な掘削路形状を明らかにすることを目的とした。まず、掘削路の堆積メカニズムを考察するため、掘削路の堆積状況を観察できる水理模型実験を実施した。次に、維持されやすい掘削路形状の条件を把握するため、平面二次元河床変動解析モデル（以降、水理解析モデル）を構築し、比較解析を実施した。なお、本研究は、seg1 の河道特性を対象としている。

## 2. 水理模型実験を用いた堆積メカニズム把握

本章では、掘削路の堆積メカニズムの把握を目的として実施した水理模型実験について、実験水路模型、実験条件、実験ケース、実験結果を記す。

### (1) 実験水路模型

水理模型実験では、水路長 24.0 m、水路幅 1.0 m、水路勾配 1 / 133 の矩形水路を使用した。上流端には、流量を調整するためのバルブ・給水槽・三角堰を設け、整流槽を設置した。下流端には水位調整ゲートを設けた。河床条件は、移動床とし、水路上に厚さ 75 mm の実験砂を敷設した。

### (2) 実験条件

本節では、初期河床形状、河床材料、通水流量に

ついて述べる。初期河床形状は、平坦河床（以降、濇筋部）上に交互砂州（以降、砂州部）を与えた。砂州部の初期河床形状は、尾崎・林<sup>3)</sup>による砂州波長・池田<sup>4)</sup>による砂州波高の推定式より設定した。水路および砂州諸元を整理した図を図-1に示す。砂州幅は、seg1の実河川の低水路幅に対する砂州幅の比を参考に、0.6 mと設定した。実験砂は、混合粒径とし、濇筋部と砂州部に分けて敷設した。本研究で着目する掘削路の堆積現象以外の要素を除外するため、砂州部は動きにくくなるように、粒径を粗粒化させることによる工夫をした。代表粒径 $D_{60}$ は、濇筋部が2.1 mm程度であり、砂州部が5.0 mm程度である。標準偏差 $(D_{84}/D_{16})^{0.5}$ は、濇筋部が2.7程度であり、砂州部が1.5程度である。

実験での通水流量ヒドログラフを図-2に示す。実験は、砂州周辺の初期河床形状・構成に関して、設置時の人為的影響を小さくすることを考えて、砂州上に掘削路を設置しない「助走実験」と、掘削路を設置した「本実験」の2段階に分けて通水した。ピーク流量は、平均年最大流量相当の無次元掃流力となる流量とし、砂州・濇筋間の比高差を発達させるため、低流量の通水も行った。下流端水位は、流量に応じた等流水位を与えた。

以上の条件を踏まえ、ピーク流量流下時の代表粒径に対する無次元掃流力は、濇筋部が0.070程度であり、砂州部が0.028程度である。濇筋部の無次元掃流力は、seg1やseg2-1における平均年最大流量相当の無次元掃流力と同程度と考えられる<sup>5)</sup>。代表粒径に対する摩擦速度・沈降速度比は0.3程度であり、流砂形態はseg1河道と同様に、土砂の大部分が掃流形態で輸送される。

### (3) 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。実験ケースは、掘削路の深さ・縦断勾配が異なる3ケースを設定した。CASE1では、流量分担が掘削路内で1割となるように掘削路形状を設定した。CASE2およびCASE3では、流量分担が掘削路内で3割となるように掘削路形状を設定した。また、CASE3では、掘削路上流部での土砂堆積の抑制を狙い、掘削路上流部の勾配を急勾配(1/67)に、下流側を緩勾配(1/266)にした。よって、各ケース間の掘削路内掃流力の大小関係は、CASE1 < CASE2 < CASE3となる。実験は、CASE1, CASE2, CASE3の順番で実施した。各実験の終了後、河床形状は実験通水前の状態に戻さずに掘削路のみ整形し、次の実験を実施した。

### (4) 実験結果・考察

本紙では、掘削路の堆積状況に着目し、考察する。掘削路の縦断堆砂率のケース間比較を図-3に示す。堆砂率は、掘削路の埋没状況を表す指標として堆積量と掘削量の比と定義し、100%を上回る場合は完全埋没を示す。河床変動量は、実験通水前後に縦断

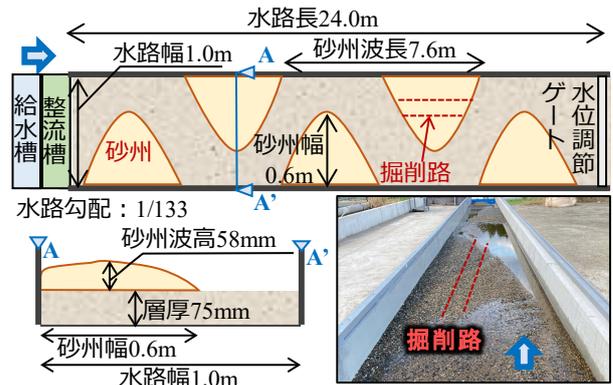


図-1 実験水路模型・河床形状

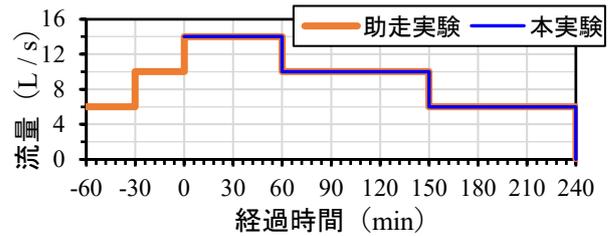


図-2 通水流量ヒドログラフ

表-1 実験ケース

ケース名	掘削路断面 (深さ×幅)	掘削路 延長	掘削路内 流量分担	縦断勾配
CASE1	2cm×15cm	4.0m	1割	勾配一様
CASE2	5cm×15cm	6.4m	3割	勾配一様
CASE3	5cm×15cm	6.4m	3割	勾配変化

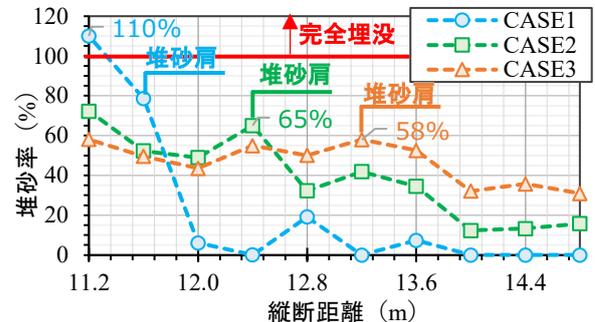


図-3 掘削路の縦断堆砂率（実験結果）

0.4 m 間隔、横断 0.05 m 間隔で計測した。以下では、砂州掘削路付近の状況変化および考察を記す。

通水を開始すると、砂州部の土砂は輸送されないが、濇筋部の土砂は輸送された。掘削路の上流に位置する平瀬において輸送された土砂は、掘削路に流入し、掘削路の下流側へ輸送された。その後、掃流力が低下する掘削路中流部において土砂輸送が停止し、堆砂肩（縦断河床高の変曲点）が形成された。形成された堆砂肩は下流方向へ移動・停止した。堆砂肩の停止位置は、掘削路内での掃流力がケース間で最小である CASE1 が最も上流側であり、最大である CASE3 が最も下流側であった。

その後、掘削路上流部では、形成された堆砂肩により、河床勾配が緩くなるため、掃流力が低下し、主に堆砂肩上流側へ堆砂が進行した。

掘削路内掃流力が最も小さくなる CASE1 では、

最終的に完全埋没に至るまで土砂が堆積した。一方、堆砂肩より下流側では、掘削路中流部で形成された堆砂肩の影響により土砂供給が乏しいため、河床形状の変化はほとんど確認できなかった。

CASE1 と比較して掘削路内掃流力が大きくなる CASE2, CASE3 では、堆砂肩が下流に位置する分、堆砂肩上流側区間が長く、広い範囲にかけて堆砂が生じたため、掘削路は維持された。また、掃流力が大きいケース程、掘削路内の最大堆砂率が小さくなり、その分布も一様に近い傾向が確認できた。

さらに、掘削路が維持された CASE2, CASE3 においては、堆砂肩下流側で斜面崩落が生じたため、掘削路の河床が上昇するとともに、掘削路幅が拡大した。これは、元々の掘削路内掃流力が大きい条件であったことと、掘削路が完全埋没せず、掃流力の低下が生じなかったことが原因と考えられる。

### (5) 掘削路の堆積メカニズム

本実験より、掘削路の堆積は、図-4 に示すように、以下のメカニズムで行われるものと考えられる。

- 1) 掘削路の上流にあたる平瀬において土砂輸送が活発である場合、低水路から掘削路に向かう流れに伴い、土砂が掘削路内に流入する。
- 2) 砂州の下流側では、砂州の上流側と比べて水面勾配が緩く掃流力が低下する。この掃流力の変化点近傍において、掘削路内に堆砂肩が生じ、下流側へ移動する。
- 3) 堆砂肩より上流側では、堆積が進行する。
- 4) 一方、堆砂肩より下流側では、維持傾向となる。ただし、斜面崩落が生じる場合は、河床上昇が生じるとともに、掘削路幅が拡大する。

### (6) 掘削路を維持させるための条件

著者らは、本実験結果を踏まえて、掘削路を維持させるための条件は、次の2点と考えた。

- 条件-1；掘削路上流への土砂流入を抑制する。
- 条件-2；掘削路下流からの土砂流出を促進し、堆砂肩の発生を抑制する。

## 3. 水理解析を用いた掘削路形状の検証

本章では、掘削路が維持されやすい条件の把握を目的として行った水理解析による検証結果を示す。

### (1) 水理解析モデルの概要

水理解析モデルは、様々な実河川で再現・予測計算などに使用されている iRIC-Nays2DH<sup>6)</sup> を用いた。掃流砂量式は、芦田・道上の式を適用した。また、隣り合うメッシュ間の河床勾配が 30 度以上となる場合は、斜面崩落が生じるようにした。

### (2) 水理解析モデルの条件

掘削路の諸元以外は、前章で述べた水理模型実験を再現した。河床高は、実験前の地形測量結果を基

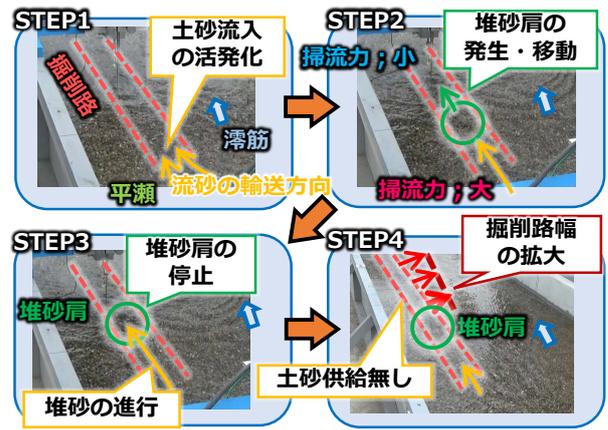


図-4 砂州掘削路の堆積メカニズム概念図

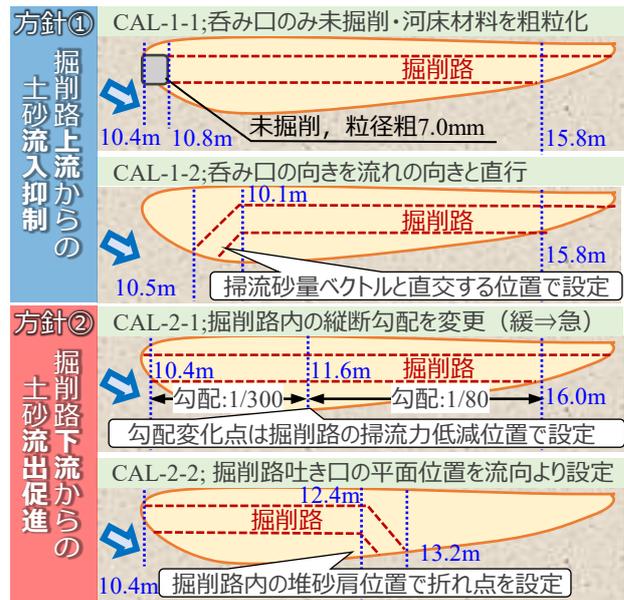


図-5 掘削路の設定方針・解析ケース

に設定した。河床材料は、実験条件と同様の粒度分布を設定した。マンニングの粗度係数は、流況実験を別途実施して逆算粗度を確認し、砂州部で 0.023、湍筋部で 0.021 とした。計算格子は、デカルト座標系とした。格子間隔は、掘削路形状・砂州形状を適切に表現するために横断方向 0.02 m、縦断方向が 0.04 m と設定した。境界条件として、上流端では模型上流端の三角堰で計測した水位より算定した時系列流量を、下流端では模型下流端にある水位調整ゲート付近で計測した時系列水位を与えた。なお、本解析モデルの再現性は、実験の再現計算より確認しており、下述の比較解析にあたって本解析モデルの使用は妥当と判断している。

### (3) 掘削路の比較解析方針

「掘削路を維持させるための条件」を踏まえて、図-5 に示す掘削路の設定方針の下で比較解析を行った。評価は、掘削路の土砂堆積状況および、機能の発揮（湍筋の洗掘緩和効果）に着目して行った。なお、掘削路の標準形状は、実験 CASE1 の掘削路形状とし、通水条件も実験と同一とした。比較のた

め、掘削路を設置しない条件での解析も行った。

a) 設定方針 1 ; 掘削路上流からの土砂流入抑制

CAL-1-1 は、掘削路呑み口部の掘削を行わず、河床材料を粗く（砂州部の  $D_{90}$  粒径程度）設定した。

CAL-1-2 は、掘削前の滞筋部の掃流砂量ベクトルと掘削路呑み口部の向きが直交するように設定した。

b) 設定方針 2 ; 掘削路下流からの土砂流出促進

CAL-2-1 は、掘削前における砂州上の掃流力分布を基に、掘削時に掃流力の縦断勾配が一樣となるように掘削路縦断勾配を途中で変化させて設定した。上流側を緩勾配とし、下流側を急勾配とした。

CAL-2-2 は、掘削路内の堆砂肩の位置に折れ点を設け、掘削前における砂州上の流向に沿うように掘削路吐き口の平面位置を設定した。

(4) 比較解析結果

通水前後の河床高変動量を図-6 に、砂州掘削路の縦断堆砂率を図-7 にそれぞれ示す。掘削路が完全埋没に至らず、滞筋の洗掘が緩和されたケースは、掘削路下流からの土砂流出促進を狙い、掘削路内の縦断勾配を変更した CAL-2-1 のみであった。これは、掘削路上流からの土砂輸送に対して、掘削路内で掃流力が縦断的に大きく低下することがなかったため、下流からスムーズに土砂流出していったことが要因と考えられる。同じく掘削路下流からの土砂流出促進を狙った CAL-2-2 では、滞筋の洗掘緩和には1割程度の効果があったものの、掘削路吐き口部の掘削路線形折れ点付近において掃流力が低下し、完全埋没に至った。掘削路上流からの土砂流入抑制を狙った CAL-1-1, CAL-1-2 では、粗粒化箇所上流からの土砂輸送、掘削路呑み口部の掘削路線形折れ点付近からの土砂生産がそれぞれ生じ、掘削路中流部において掃流力が低下し、完全埋没に至った。また、滞筋の最大洗掘深は、掘削路設置無しの解析結果と殆ど同じ値であった。よって、掘削路上流からの土砂流入抑制は、掘削路内の流量分担も併せて低下するため、洗掘緩和に対しての効果も小さいことが分かった。以上より、維持されやすい掘削路形状の設定には、CAL-2-1 のように「掃流力の縦断分布が一樣となるように掘削路の縦断勾配を途中で変化させること」が効果的であると考えられる。

4. おわりに

本研究により得られた成果を以下に示す。

- 1) 水理模型実験により、seg1 河道における砂州掘削路の土砂堆積メカニズムを明らかにし、掘削路が維持されるための条件を示した。
- 2) 水理解析を用いた比較解析により、維持されやすい掘削路形状の設定には、「掘削路下流からの土砂流出促進を狙い、掃流力の縦断分布が一樣となるように掘削路の縦断勾配を途中で変化させること」が効果的であることを示した。

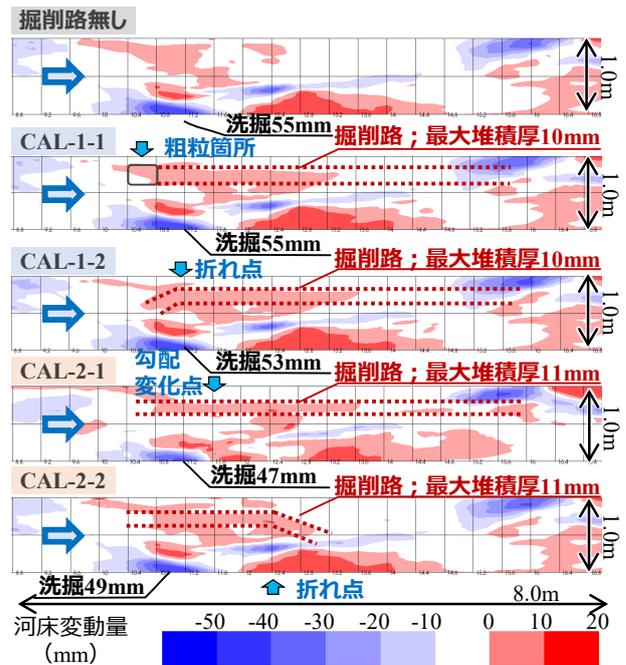


図-6 通水前後の河床高変動量（解析結果）

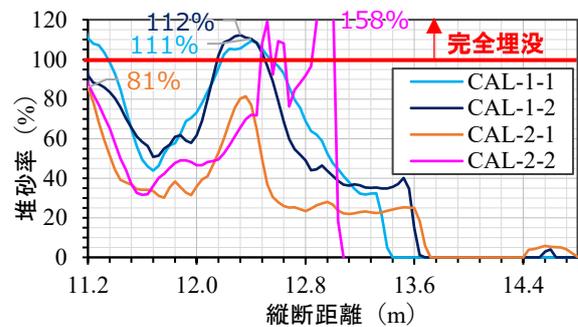


図-7 掘削路の縦断堆砂率（解析結果）

謝辞：本研究における実験および解析は、多くの社内水工系技術者の助言・作業協力による成果である。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口里美, 渡邊康玄, 武田淳史, 住友慶三：流路の固定化が進行した河道における効率的な旧流路回復手法に関する検討, 河川技術論文集, 第21巻, pp.217-222, 2015.
- 2) 松田浩一, 内堀寿美男, 清水義彦, 石原正義, 藤堂正樹：固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究, 河川技術論文集, 第16巻, pp.235-240, 2010.
- 3) 尾崎幸男, 林泰造：中規模河床波の発生と河川の卓越蛇行波長について, 土木学会論文報告集, 第333号, pp.109-118, 1983.
- 4) 池田駿介：単列交互砂州の波高と波長, 第27回水理講演会論文集, pp.689-695, 1983.
- 5) 建設省土木研究所河川部河川研究所：河道特性論, 土木研究所資料, 第2662号, pp.41, 1988.
- 6) iRIC-Nays2DH, <https://i-ric.org/solvers/nays2dh>