

1. はじめに 中部地方を流れる木曽川では、粘性土層露出による深掘れが確認されている。深掘れの発生は、周辺の河川構造物の不安定化や破損を招く可能性があるだけでなく、流れ構造の変化により、生態系のバランスが崩れる恐れがある。また、木曽川をはじめとした沖積河川では、基底層となる礫層の上に粘土層や砂層が重層的に存在する地質構造をしており、他の河川でも深掘れが発生する可能性があるため、早急に原因究明が求められている。本研究では、木曽川河口から37km地点における、洗掘深20mに及ぶ深掘れを対象とした。対象箇所の流路の収縮を形成条件とし、河床の移動条件の非一様性と流量の変化に着目して、移動床実験、流速計測、数値計算により検討した。

2. 実験方法 実験水路は長さ14m、幅 $B=59.3\text{cm}$ の勾配可変型開水路を使用し、水路勾配 $I=1/500$ とした。実験は移動床実験で、平均粒径 $d_m=0.611\text{mm}$ の一樣砂を厚さ11cmで敷き詰め実験を行った。上流からの土砂供給は0としている。図-1、図-2に示すように木曽川河口から37km地点では、左岸の砂州の張り出しと、右岸の突出が特徴的であり、実験ではこれらを水制とみだててことでモデル化した。水制は、高さ20cm厚さ3mmのアルミ板を組み合わせて設置した。流量はインバータモータにより調節し、大規模出水を想定した流量 $Q=8\text{L/s}$ 、移動床区間の上流端で水深 $h=4\text{cm}$ に調節して15分通水した後に、 $Q=1\text{L/s}$ ずつ1分ごとに下限流量 $Q_l=5\text{L/s}$ まで下げ、移動床区間の上流端を水深 $h_l=3\text{cm}$ に調節した状態で120分通水した。本実験では、粘性土層の剥離という点にも着目し、一部の砂にアーバンテック社の簡単固まるくん(以後樹脂固化剤と呼ぶ)を使用し固めることで粘性土層を再現した。樹脂固化剤を使用した位置を変えて2パターン行い、水制と固化させた位置関係を図-3と図-4に示す。それぞれ図の表示順にcase2、caseAとする。粘性土層の剥離についても検討を行うため、水制を設置せず、一部の砂層に樹脂固化剤を使用し実験を行った。この場合をcase nonとする。樹脂固化剤のパターンをそれぞれA、B、水制を使用した場合をCとして各水理条件と実験条件を表-1に示した。通水後の河床の高さをレーザー距離計を用いてx軸方向に1cm間隔、y軸方向に0.5cm間隔で計測した。

3. 実験結果 図-5に各ケースの河床コンターを示す。case2では、右岸側で大きな洗掘がみられた。水制の張り出しが大きいため、剥離流による影響が出たと考えられる。 $Q=8\text{L/s}$ 時に左岸側でも洗掘し始め、流量



図-1 現地写真

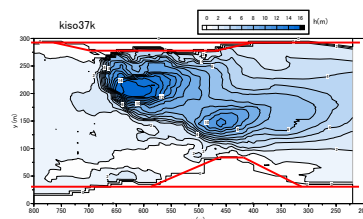


図-2 ADCPによる河床高計測結果  
(木曽川上流河川事務所提供)

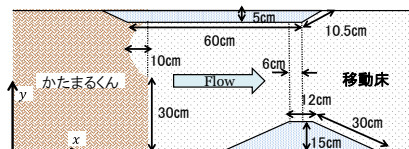


図-3 樹脂固化層Aと水制位置の関係(case2)

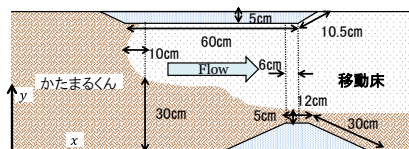


図-4 樹脂固化層Bと水制位置の関係(caseA)

表-1 実験条件と水理条件

		流量 $Q$ (l/s)	水深 $h$ (cm)	フルード数 $Fr$	平均流速 $V$ (cm/s)	通水時間	樹脂固化層と水制
case2	初期状態	8	4	0.532	33.33	15分	A, C
caseA	流量低下後	5	2.5	0.681	33.73	120分	B, C
case non		8	3.9	0.553	34.19	120分	A

低下後も洗掘が進行し、洗掘深は8.02cmとなった。わずかではあるが、 $Q=8\text{L/s}$ 時よりも流速とフルード数が大きくなっており、水制によって流れが集中することで洗掘が進行したと考えられる。

caseAでは $Q=8\text{L/s}$ 時に樹脂固化層が鋭利になった箇所から洗掘が始まり、中央部に洗掘が広がったが、流量を下げた後は左岸側から来た砂により少し埋め戻された。右岸側を固めているため、case2のような大規模な洗掘は発生しなかった。左岸側は $Q=8\text{L/s}$ 時に水制の角と樹脂固化層をきっかけとして洗掘が始まり、流量低下後もかわらず洗掘が続いた。最終的には左岸側最大洗掘深は9.72cmとなった。粘性土層の範囲によって掘れる深さが変わる可能性がみられた。

case nonでは全体として河床低下がみられるが、水制などの障害物は設置していないにも関わらず、左岸側で最大2.45cmの洗掘がみられる。粘性土層を模したくぼみの箇所が床止め下流の洗掘と同様の作用が働き、洗掘したと考えられる。

caseAの最大洗掘深と現地の最大洗掘深の縮尺を合わせ比較したものを図-6に示す。caseAでは、水路模型を水平方向の縮尺 $\lambda_x=3/1250$ 、鉛直方向の縮尺 $\lambda_h=1/200$ の歪み模型とした。結果より、現地の深さを

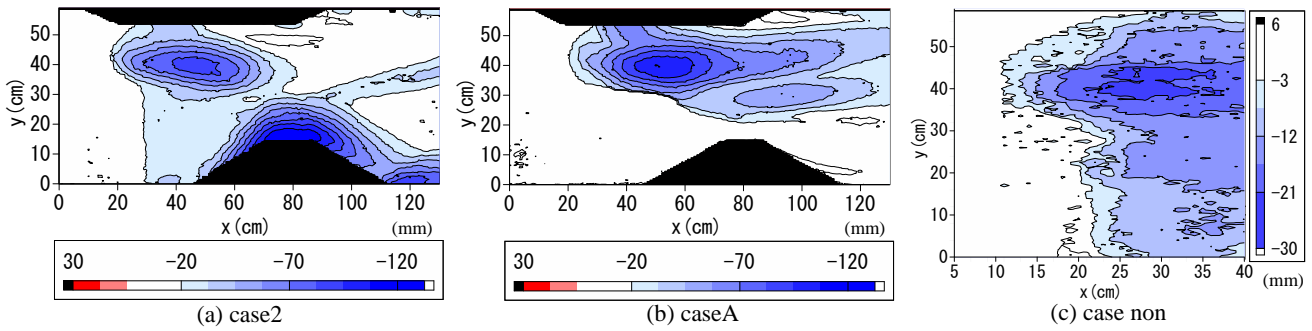


図-5 河床コンター

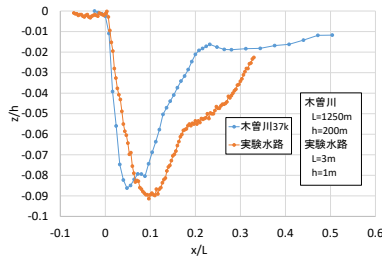


図-6 caseA と現地の最大洗掘深比較

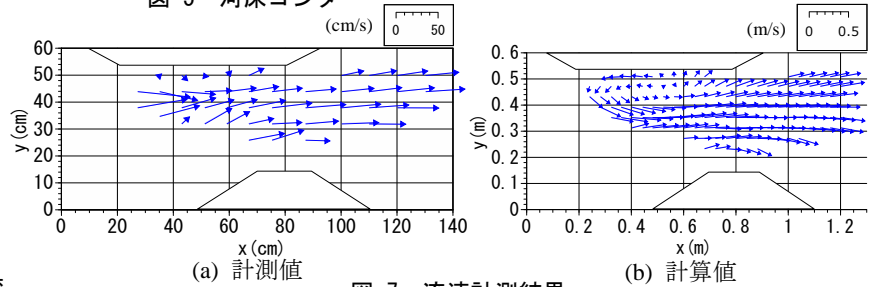


図-7 流速計測結果

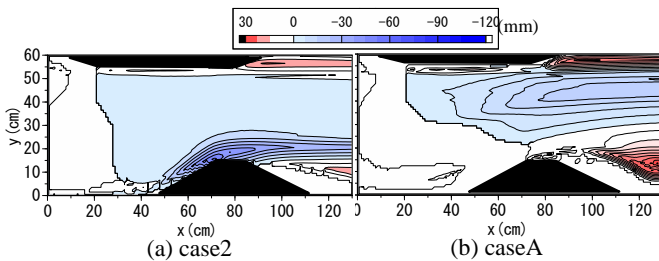


図-8 河床変動計算における河床コンター

上回る結果となった。caseAにおいて、流量低下後も出水を想定した流量であったので、出水状態の継続時間が長すぎ、現地の深さを超える結果となったものと考えられる。現地の深掘れ進行の原因の一つは出水であることが分かったが、現地の完全再現を目指すのであれば、時間もフルード相似則で考慮する必要がある。

本実験では、粘性土層を模した樹脂固化層の一部で剥離や崩落がみられた。出水時は平均流速も速いため、粘性土を模した部分がもろくなりやすく、流量低下後もフルード数が大きくなると下降する流れの集中により剥離しやすくなり、やがて崩落すると考えられる。粘性土層のエッジ部としての働き、粘性土の剥離が深掘れの進行に影響を及ぼしている。

**4. 流速計測と数値計算** 流れ構造を把握し、深掘れ形成との関連性を検討した。caseAの条件のもと通水し、その後水がひいたあとに樹脂固化剤を使用し固定床とした。水理条件は流量  $Q=8$  L/s, 上流端水深  $h=4$  cmである。数値計算では iRICNaysCUBE を使い、3次元の流れをみた。  $z=1$  cm におけるそれぞれの  $x$ - $y$  平面流速ベクトルを図-7に示す。計測値では、左岸側に逆流がみられるが、渦の発生までは確認できない。一方で数値計算では、左岸側の洗掘箇所での渦の発生がみられる。計測値では、洗掘箇所での跳水が発生しているだけでなく、狭窄部の水深が下がっており、数値計

算とは異なる条件であった。実験条件と数値計算ともに条件を変えて検討することが必要である。

移動床実験の再現性を確かめるために水深平均2次元の  $k$ - $\epsilon$  モデルによる数値計算を行った。掃流砂量の計算は Meyer-Peter・Muller の式、無次元掃流力の計算は 芦田・道上 の式を用いた。計算条件は、実験条件と同様に流量  $Q=8$  L/s, 水深  $h=4$  cm で15分通水後に継続計算で流量  $Q=5$  L/s, 水深  $h=3$  cm で120分通水した。樹脂固化層は固定床と設定した。図-8に数値計算で得られた case2 と caseA の河床コンターを示す。case2 では右岸側水制の角の周りで掘れているものの洗掘深が小さく、左岸側での洗掘は見られない。caseA では全体として河床が低下した。実験では、粘性土層がエッジ部となることでその箇所の流速が速くなり、より粘性土層が流出しやすい状況が発生するが、計算ではそのような状況を作り出すことは困難であり、再現ができなかったと考えられる。今後は数値計算を行う上で粘性土層の再現も必要であることが分かった。

**5. おわりに** 本研究では、移動床実験で深掘れの発生を確認することができた。出水時に、左岸側水制の影響を受けて一部の砂層が流出して河床が低下し、流量低下後も河床低下が発生した箇所で洗掘の進行が続く。また、粘性土層がエッジ部となり洗掘が進むこともわかった。3次元的な流れ構造は本研究では見られなかったが、数値計算では渦構造が現れており、深掘れ進行に関係している可能性がある。現地では潜り噴流が発生しているといわれているが、流速計測時は跳水となっており、流量や水深の調整が必要となる。今後は深掘れと現地でみられる渦構造との関係性を明らかにするとともに、数値計算の改善をし、実験での再現性を明らかにする必要がある。