

1.はじめに 木曾川では、土砂供給量減少に起因する現象として複数個所で局所的に大規模深掘れが形成されている。特に37km地点では最大深度で20mに達し、さらに上流側へと進行する可能性があり洗掘域拡大を抑制する必要がある。同様の深掘れは周辺構造物に影響が懸念され、対策立案のため形成要因の解明が必要であり、これまでも様々な観測で研究が行われている¹²⁾。河床の地層構造と関連した洗掘の過程は理解が進んだ一方、洗掘孔に発生する渦構造を伴う大規模な深掘れ形成のメカニズムは不明な点が存在する。本研究では深掘れ周辺の流れ構造の解明のため、現地 ADCP 観測と実験室スケールでの模型水路を用いた流速計測と数値計算による検討を行った。

2.実験・観測概要 木曾川37km地点の深掘れ形状を実験室スケールで再現し流れの計測を行った。模型は深掘れ部分のみを取り出して水平縮尺1/259、鉛直縮尺1/173とし、側岸は直線とした。取り出した範囲は実河川250mのうち深掘れ範囲を含む152mである。実験水路は長さ12m、幅0.6mの勾配可変水路を使用し、水路勾配 $I=1/3000$ とした。模型設置位置を図-1に、模型の河床高コンターを図-2に示す。実験は固定床実験で、水路上流から6~8m地点に模型をはめ込んで流量を3通りに変化させ流速計測を行った。実験条件を表-1に示す。流速計測は、2成分電磁流速計を用い、サンプリング周波数100Hzで4096個のデータを取得して解析を行った。一定高さで縦断方向に5cm、横断方向に3~6cmで平面的に計測を行い、順次高さを下げていき計測を行った。

現地深掘れ周辺の流れ構造の把握のため、国土交通省中部地方整備局木曾川上流河川事務所ではADCP (RiverPro, Teledyne RD Instruments社製)を用いて37km地点の深掘れ周辺の観測を実施した。観測は縦横断方向それぞれ10m~20m間隔で実施し、ADCPを捜査艇(トリマランB型:高速低揺動型)に設置し、観測船で曳航して計測した。観測時の流量は約 $1,200\text{m}^3/\text{s}$ の小規模出水であった。

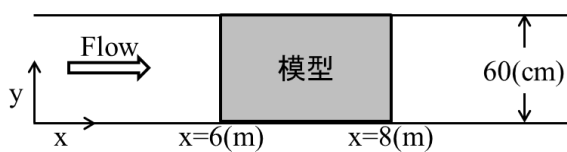


図-1 模型設置位置

表-1 実験条件

	流量 $Q(\text{l/s})$	水深 $h(\text{cm})$	平均流速 $U(\text{cm/s})$	フルード数 Fr	水路勾配
case1	3.30	2.31	16.78	0.35	0.0003
case2	4.50	2.73	18.76	0.36	
case3	5.70	3.01	20.39	0.38	

3.実験・観測結果

(1)流速計測, 現地観測ベクトル図

水平、鉛直縮尺が異なる歪み模型であることと、現地河道250mのうち152mをモデル化した点を考慮して、実験流量を現地流量に換算すると $3200, 4300, 5500\text{m}^3/\text{s}$ 程度になる。現地観測結果の流速ベクトルを図-3に、深掘れ模型上のcase2の計測結果の流速ベクトルを図-4示す。

観測結果を見ると、ほとんどの断面で深掘れ箇所を鉛直渦構造を確認できる。深掘れ右岸側に沿って流れ込む高速域が存在し、その補償流として左岸側に逆流域が形成されている。この鉛直渦によって河床形状に沿って流れが誘導され、河床近くでも比較的速い流速が現れており、深掘れ孔内においても流れが存在することが示された。深掘れ箇所以外では左岸側へ偏流しており、これは右岸側の砂州の張り出しにより流れの方向が変化することによるものである。実験においてもほとんど全ての断面で鉛直渦構造を確認できる。

流れ構造は概ね現地観測と一致するが、実験では右岸側への偏流の傾向が見られる。実使用した模型は現地の砂州による流路の狭窄部分は再現していないため現地結果と差異が現れたと考えられる。しかし、砂州による張り出しは渦の発生の決定的要因ではなく、深掘れ周辺の流れ構造は再現できている。現地観測と同様に、深掘れ孔内部で比較的高い流速が示された。

次に、深掘れ周辺の3次元的な流れを把握するためにU-W流速計測を渦の左端、右端、中央部分で行った。現地観測の流速を図-5に、実験流速ベクトルを図-6に示す。 $y=200\text{m}$ では、表層近くでは流下方向の流れが卓越した高速域が存在し、河床に近づくにつれ鉛直下向き速度成分が現れる。 $y=225\text{m}$ では $x=600\text{m}$ で沸き上がり、 $x=650\text{m}$ で深掘れ深部に向かって落ち込む流れが確認でき、水平方向の軸を持つ横断渦のような流れ構造となっている。この沸き上がりの流れは

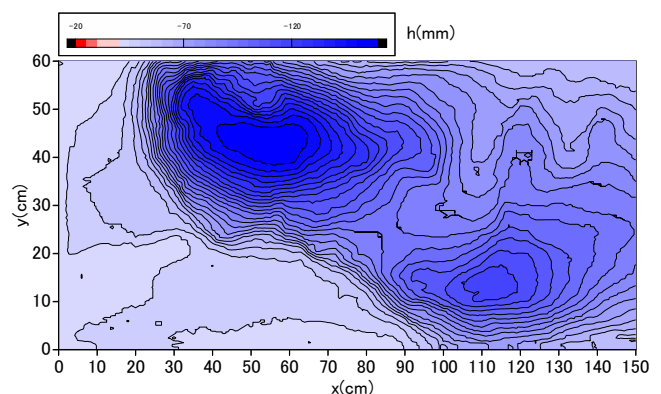


図-2 模型河床高

鉛直渦による堆積を抑制し、洗掘の維持に寄与していると推定できる。 $y=240\text{m}$ では $x=575\text{m}$ で沸き上がりの流れが発生し、 $x=650\text{m}$ でわずかに落ち込む流れが見られるが横断渦の形成までには至っていない。

次に実験結果に着目すると、 $y=39\text{cm}$ では表層から底層に渡って河床より浅い角度で穴に流れ込む流れが支配的で、表層において現地観測とは差異が現れた。 $y=48\text{cm}$ では $x=80\text{cm}$ で流下方向の流れ方向が変化する点は現地と類似しているが、横断渦は確認できない。 $y=54\text{cm}$ では現地と同様に $x=25\text{cm}$ で流下、逆流の流

れ共に下方に落ち込む流れが存在するが、深掘れ下流部での沸き上がりの流れは発生していない。

全体的に U-V ベクトル図よりも実験と現地では差異が大きく出た。深掘れのある左岸側は張り出しの影響を受ける箇所であるので、水はねにより加速された流れによる影響を今回の実験では評価できないことや、模型壁面が滑面であることが影響していると考えられる。鉛直渦中央部での横断渦は発生しなかったが、右岸側から深掘れ穴に流れ込む流れが存在することや、深掘れによる段落ち流れは模型実験によって再現することができたと言える。

(2) 流速の鉛直、横断分布と底面流速

次に、深掘れ位置に形成されている鉛直渦の構造を詳細に検討するため、case2の渦発生域における主流速の鉛直分布を図-7に示す。鉛直分布は深掘れ穴に流れ込む加速域付近を横断方向に数点プロットした。

どの地点においても表層近くにおいて高い流速を示し、底層に近づくにつれて流速は減少していく傾向が見られる。しかし、深掘れ最深部地点である $y=200\text{m}$ においては、底面付近で表層よりも高い流速を示す。実験においても深掘れ穴に流れ込む $z=1\sim 0\text{cm}$ で最大流速を示し、深掘れ深部地点では底層近くまで比較的高い流速を維持している。流速分布の傾向はよく類似しており、現地観測、模型実験ともに深掘れ穴内では大規模な鉛直渦構造によって底層付近まで流れが誘導され、高い流速を保っていることが示された。横断分布に着目すると、渦の中心である $y=200\text{m}$ 、 $y=48\text{cm}$ で流れの方向が入れ替わり、左岸側の領域において逆流域が形成されている。このことから流速0の点を中心として反時計回りに回転する鉛直渦構造が明らか

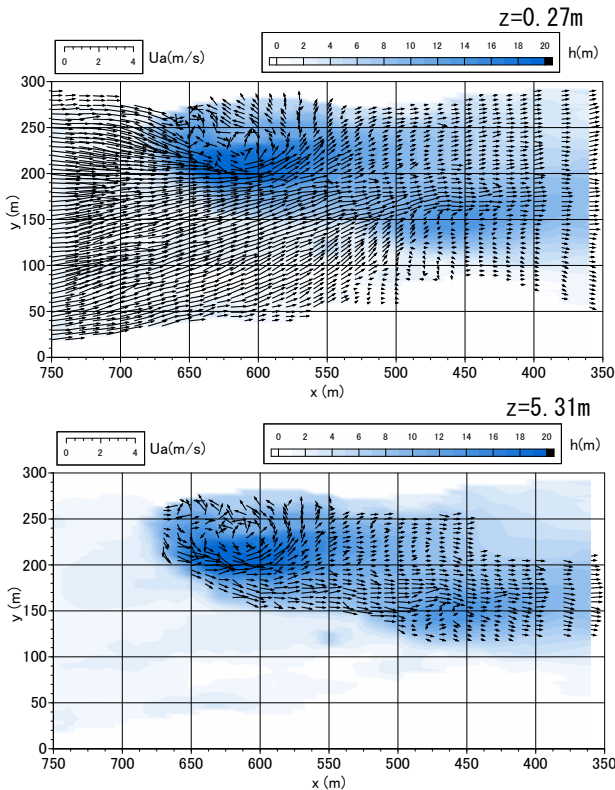


図-3 現地観測流速ベクトル

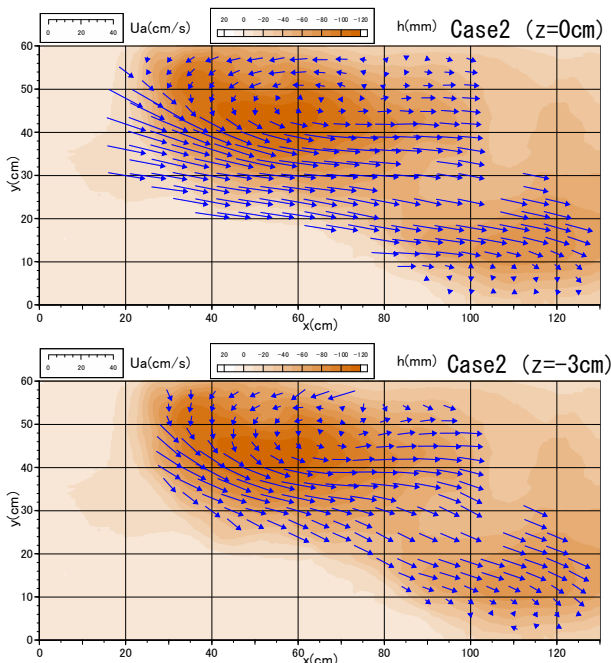


図-4 実験流速ベクトル

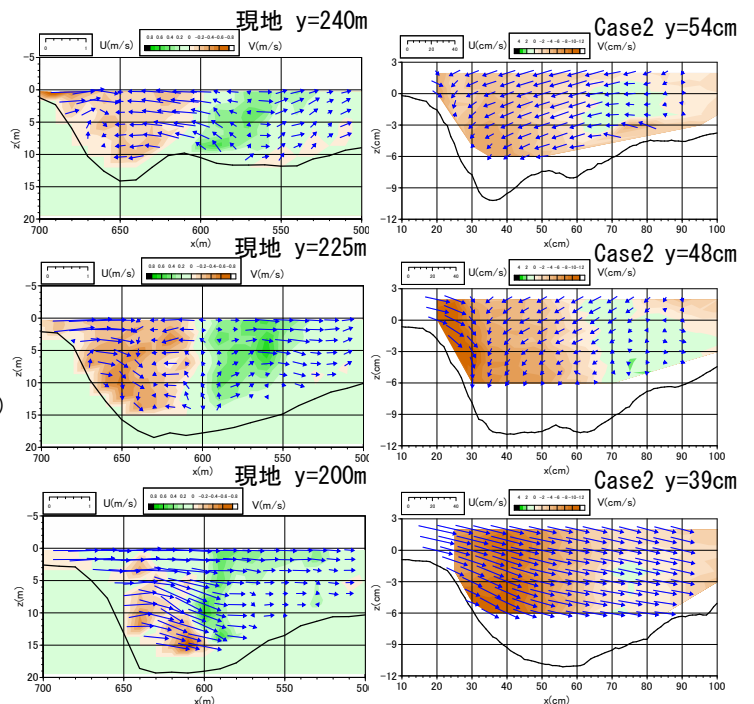


図-5 現地 U-W 流速ベクトル 図-6 実験 U-W 流速ベクトル

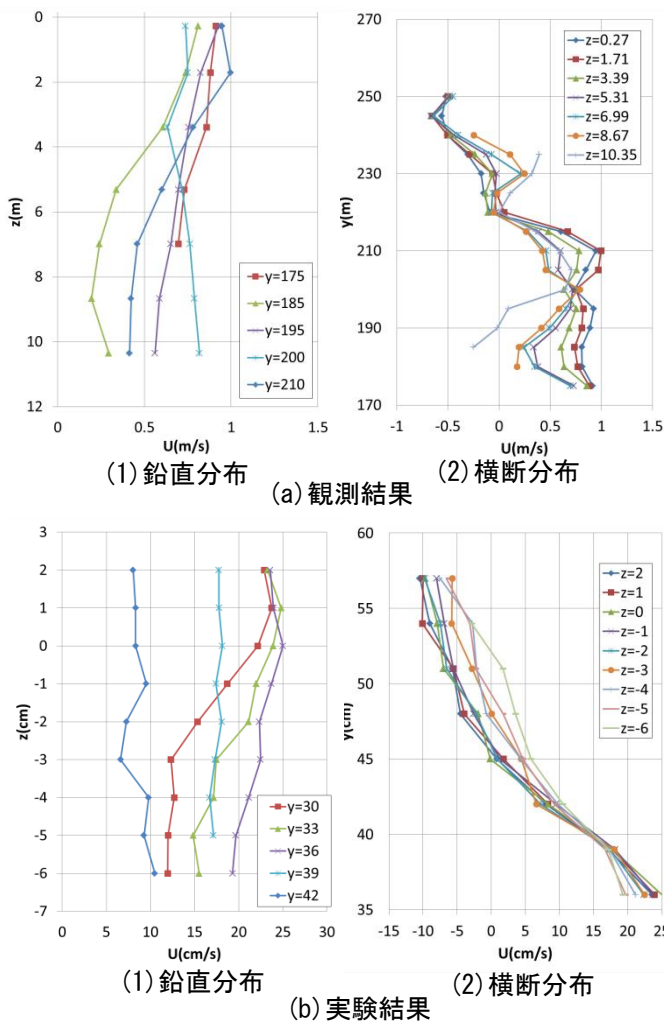


図-7 主流速の鉛直、横断分布

である。深掘れ右岸側の領域では底層付近まで流速が変化せず円筒形の渦であることが分かる。

渦の形成に関しては深掘れ部で急激な水深の増加により圧力勾配が逆転するため、側岸付近が減速されることにより中央への流向変化が起こり、結果的に側壁付近で逆流が発生したものと推測される。今回の実験では兩岸の砂州による張り出しをモデル化していないが、張り出しの影響は支配要因ではないと推察される。実験により現地の流速分布の傾向は概ね再現できており、両結果共にこの渦構造は鉛直方向に一樣であり、深掘れ深部の地点では河床近くまで比較的高い流速を保っている傾向が示された。

前述の結果より、底面流速が洗掘維持に寄与する可能性が高いと推測し、底面流速を平均流速で無次元化し、検討を行った。無次元化した底面流速の流下方向分布を図-8に示す。実験結果は水理条件からマニング式により算出した上流側の平均流速を U_m とし、各ケースで $z=6\text{cm}$ の高さ断面の流速に対し無次元化を行った。現地観測は深掘れより上流側である $x=1000\text{m}$ 、 $z=0.27\text{m}$ の断面の平均流速を U_m とし、 $z=10.35\text{m}$ の高さ断面の流速に対し無次元化を行った。y断面は渦左端、中央、右端と対応する現地断面をプロットした。

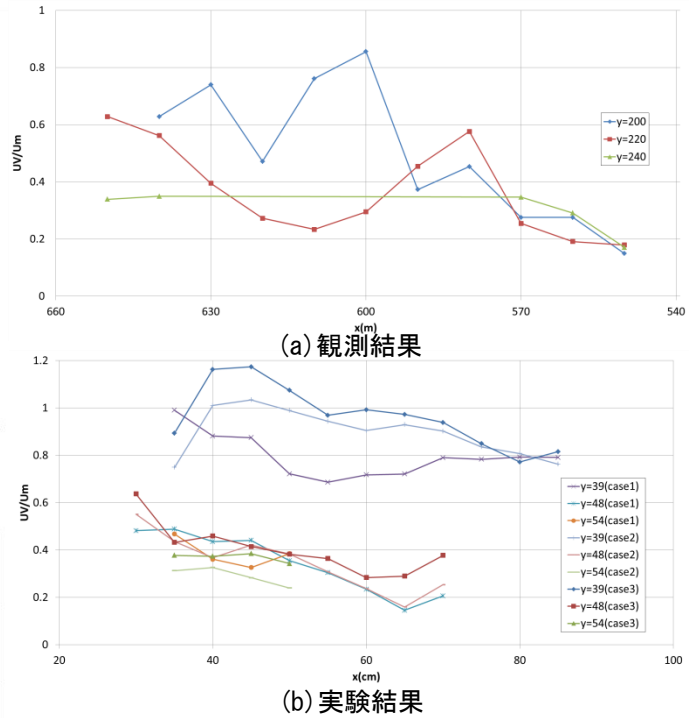


図-8 無次元化底面流速

観測結果を見ると、 $y=225\text{m}$ 、 $y=240\text{m}$ では U_m の半分以下の流速を示しており、緩やかな流れとなっている。しかし、深掘れ最深部 ($x=600\text{m}$ 付近) が存在する $y=200\text{m}$ では高い流速が保たれている。実験でも同様に $y=54\text{cm}$ 、 $y=48\text{cm}$ では U_m の半分以下となる低い流速を示すが、 $y=39\text{cm}$ では深掘れ部のみ局所的ではなく広い範囲に渡って U_m と同等の流速を示しており、下流側にまで流れの誘導の影響を伺うことができる。

実験結果と比較すると現地流速は低い値を示す。しかし、現地観測から算出した $U_m=1.24\text{m/s}$ で、現地河床砂粒径 $d_m=0.5\text{mm}$ ¹⁾ を考慮すると、限界掃流力が働く流速は約 0.2m/s で、砂を輸送できる流速を保っている。また、その時の流量を概算すると約 $130\text{m}^3/\text{s}$ で、平水時においても河床の砂は輸送されることが推測される。実験では最深部において U_m よりも大きい流速を保つケースも見られ、実河川の出水時には今回観測された流速より高い流速を示す可能性がある。

実験によって深掘れ孔右岸側の斜面に沿って存在する高速域や大規模な鉛直渦構造は再現することができたと言える。兩岸の砂州による張り出しは渦の形成に対して決定的ではないが、渦の発生範囲や、横断方向流速に影響を与えている可能性がある。

(3) 移動床実験

底層流速が実際に洗掘維持に寄与することを確認するため、移動床実験により砂の遷移の観察を行った。模型の深掘れ部に、4センチ程度砂を敷き詰め、120分通水を行った。水理条件は case2 と同様で、砂は平均粒径 $d_m=0.1\text{mm}$ の 8 号砂を使用した。これに限界掃流力が働く流量は $Q=2.21$ で、平均流速 $U_m=15.3\text{cm/s}$ である。砂の遷移の様子を図-9に示す。



図-9 通水後の砂の形状

ゆっくりとした動きではあるが、河床に敷き詰めた砂は確実に動き、下流側へと流されていく様子が確認できた。この結果から、上流側から深掘れ孔へと砂が流れ込んでも、砂は堆積せずに下流側へと輸送されていくと考えられる。実河川ではこれに加えて砂の供給が少なく、横断渦も観測されており、深掘れ孔が埋め戻されづらい環境となっていると考えられる。

(4) 水深を増加させた際の流速分布

実験において、流量による流れ構造の差異は大きく現れなかった。そこで試験的に水位を上昇させたところ、渦が形成されなかった。このことから、流量より水位が渦の形成に関与していると予想し、水路下流端で堰上げを行い、流速計測を行った。実験流量は case2 と同様で、上流側の水位を 2.7cm から 4.3cm に変更した。この水位は実河川で水深 7.5m に相当し、実際の出水時には同程度の水位となっている。

堰上げなしのケースでは表層でも確認できた渦構造がなくなっており、若干の止水域が存在する程度となっている。深掘れ孔以外の箇所の偏流も確認できず、堰上げなしのケースとは異なる様相を呈している。また、深掘れ孔内である $z=-3$ の断面を見ても渦は発生しておらず、ほとんど流下方向の流れのみが存在する。この結果から、渦の形成には流量より下流側の水深が寄与している可能性が高い。水深が大きくなることで流速が遅くなり、河床形状により流れへの影響が減少し、堰上げを行っていないケースで確認できた加速域や偏流といった特性が消失した。現地観測を行った際の流れは小規模出水時の流況であり、中規模出水以上の際には観測結果で見られたような深掘れ孔周辺での鉛直渦が発生しない可能性がある。

4. 数値計算 再現性の確認のため、三次元ソルバーの iRicNaysCUBE を用いて数値計算を行った。水理条件を模型実験と同様に設定したところ、鉛直渦構造は形成されず、実験の流れは再現されなかった。そこで、下流端水深を実験より 1cm 程度小さく与え、鉛直格子数を減らすと、深掘れ箇所でも渦が確認できた。その結果を図-10 に示す。

実験より流速は早くなっているが、渦が形成されるように下流端水深を低く設定した影響としては妥当である。表層近くの流れは再現できているものの、

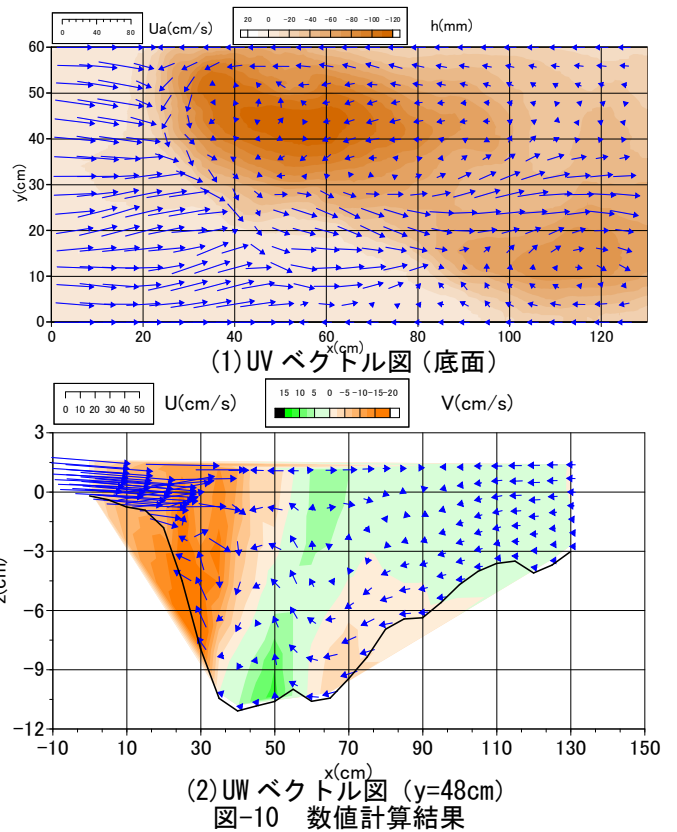


図-10 数値計算結果

実験より現地の流れ構造に類似した横断渦が確認でき、深掘れ孔内の流れの再現には課題が残った。

今回の数値計算では下流端水深を低く与えたことで水面変動が激しく、深掘れ手前で跳水が発生し、流速が速く計算され、流下方向の流れが卓越した。鉛直渦の存在は認められるが、深掘れ孔内の流れの再現性が悪く、洗掘維持に寄与している鉛直渦による深掘れ深部への流れの誘導は見られなかった。

5. 終わりに

本研究から得られた結論を以下に示す。
(1) 模型実験により、現地と同様の流れ構造が再現できた。現地観測の深掘れ孔内で見られた横断渦や、深掘れ箇所を含めた横断方向流速等、詳細な流れ構造の把握のためには現地に存在する兩岸の砂州をモデル化が効果的だと考えられる。

(2) 深掘れ箇所では鉛直渦の流れが支配的である。この渦が底層に流れを誘導し、高い流速を持つ流れが存在する。移動床実験により、この流れにより砂が下流側へと輸送されていくことが裏付けられた。また、深掘れ箇所でも発生している鉛直渦は下流側の水深が発生の支配要因となっていると考えられる。現地ではこの流れに加えて渦中心部で横断渦が存在している。これらの要因により河床付近で浮遊砂輸送が活発化し、深掘れが維持されていると考えられる。

参考文献

- 1) 木曾川の局所洗掘箇所における発生要因の分析
栗原太郎ら、河川技術論文集、第 19 巻、2013 年 6 月
- 2) 木曾川大規模深掘れにおける渦構造と深掘れ拡大要因の推定
岩見収二ら、河川技術論文集、第 21 巻、2015 年 6 月