

高流速域における河川構造物の安定性に関する研究

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、井上卓也、阿部孝章

【要旨】

急流河川では、三角状水面波列と呼ばれる恐竜の背のような巨大な水面波列が、洪水時に発生する場合がある。この水面波列は河床の局所洗掘を引き起こし、結果として護床・護岸の安定性に影響を与える可能性がある。この波は反砂堆上の水面波の一種と考えられているが、その発生条件や特性についてはまだ分かっていない部分が多い。そこで本研究では、水面波列の発生条件と横断方向のモード数を把握するための基礎的な実験を行った。実験結果、水面波列の発生条件はフルード数と無次元掃流力に依存し、モード数は川幅水深比に依存することが確認された。

キーワード：水面波、反砂堆、水路実験

1. はじめに

札幌市街地を流れる豊平川は、大都市を縦貫する河川の中では稀な急流河川である。昭和 56 年 8 月洪水では、扇状地の尖頂部から駆け下るような高速流により、三角状水面波列と呼ばれる波高 2m～3m の巨大な水面波列が発生し、水面波の橋桁への衝突や水面波による越水破堤の可能性が懸念された (図-1a)。

近年、急流河川では集中豪雨の増加に伴って、高速流の発生頻度が増加しており、これに比例するように河岸や構造物の被災事例も増加している。被災が発生箇所の写真を収集すると、平成 22 年の辺別川 (図-1b)、平成 23 年の安倍川、五十嵐川 (図-1c) などで、三角状水面波列が発生していたことが確認できた。なお、この他の河川でも、写真が残っていないだけで巨大な水面波が発生していた可能性は高い。

三角状水面波列は 3 次元的な跳水とも見られ、古くは木下¹⁾が実験水路で発生した波列に「線状跳水」という呼称を与えている。また山本²⁾によると、河床勾配が 1/250 以上の扇状地河川では、出水時に部分的に反砂堆が発生し、その水面形は恐竜の背びれのように水面が盛り上がり、それが流下方向に連続する形をとることが多い。一般にこの発生場所は流速が大きくかつ幾分浅いところと考えられている。ただし、反砂堆は保存性が悪いため、その特性についてまだよく分かっておらず、水面波が構造物に与える影響も未解明

である。そこで本研究では、水面波列の発生条件、発生位置を把握するための基礎的な実験を行った。

a)豊平川の昭和 56 年 8 月洪水での水面波 (出典：石狩川流域誌)



b)辺別川の平成 22 年 8 月洪水での水面波 (撮影：清水康行)



c)五十嵐川の平成 23 年 7 月での水面波 (出典：五十嵐川災害復旧助成事業概要パンフレット)



図-1 三角状水面波列の発生事例

2. 既往研究

反砂堆や砂堆などの河床波は、流れの抵抗に影響を及ぼすことから、河川工学における重要な問題として数多くの研究が行われてきた。反砂堆に関しては、田中ら³⁾、福岡ら⁴⁾によって系統的な実験が行われており、発生条件、波長、波の進行方向などが既に整理されている。しかし、既往実験は反砂堆の鉛直2次元的特点に着目していたため、その川幅水深比は10以下に設定されており、三角状水面波列が観測された豊平川の川幅水深比25~50程度の実験はほとんど行われていない。

反砂堆に関する理論的な研究は、ポテンシャル流を用いた解析と鉛直2次元流れを用いた解析に大きく分けることができる。ポテンシャル流解析は、Kennedy⁵⁾が砂堆・反砂堆の発生領域に関する独創的な研究を発表して以降、急速に発展していった。この解析手法は、Reynolds⁶⁾、Hayashi⁷⁾によって次々と改良が加えられ、最近ではColeman and Fenton⁸⁾によって、それまでのモデルでは定数として加味されていた局所的な流速と流砂量の間が存在する位相遅れを、流れのモデルから陰的に求める新たな手法が提案された。

一方、Engelund⁹⁾によって鉛直2次元流れを考慮した砂堆・反砂堆の線形安定解析が行われると、Fredsoe¹⁰⁾、Colombini¹¹⁾によってその理論は拡張され、近年では泉・Parker¹²⁾が弱非線形安定解析を用いて、成長と破壊を繰り返す遡上反砂堆の不安定性原因について分析し、抵抗係数が大きい場合、強い不安定性が現れることを示した。

反砂堆に関する数値解析手法としては、音田・細田¹³⁾の研究がまず挙げられる。彼らは、非線形分散波理論式(一次元 Boussinesq¹⁴⁾方程式)、局所的な加速・減速効果を考慮した底面せん断応力の評価式¹⁵⁾(ポテンシャル流解析に含まれる位相遅れと類似した役割を持つ)、非平衡流砂量式¹⁶⁾を組み合わせることに成功した。また井上ら¹⁷⁾は、彼らが提案したフレームワークを用いて、豊平川で発生した三角波の波長波高を再現できることを示している。

一方、鉛直2次元流れを考慮した小規模河床波の数値解析としては、Giri and Shimizu¹⁸⁾が提案したモデルがあり、山口ら¹⁹⁾の手によって、反砂堆の計算も徐々に行われはじめています。

上述のように小規模河床波に関する理論解析、数値解析は、1次元流れ(ポテンシャル流も含む)+位相

差というモデルと、鉛直2次元流れを用いたモデルの研究が平行して進められている状況にある。ただし、どちらの手法も、反砂堆や水面波の3次元的特点(横断方向の発生位置や、波が三角錐状になる要因など)については全く着目していない。

水面波の3次元性に着目した研究としてSu²⁰⁾の実験が挙げられる。この実験では、人工的に起こした2次元的水面波が、やがて3次元的な三角錐形状になることが示されている。この結果は、三角状水面波が波自体の持つ不安定性をトリガーとして発生している可能性を示唆している。ただし、彼の実験では河床変動が考慮されておらず、3次元的水面波と反砂堆起伏がどのように干渉するかは触れられていない。

長谷川ら²¹⁾は3次元的水面波(斜め交錯波)が河床における反砂堆起伏に対して共振状態に至った結果、三角状水面波列が発生するものと考え、その発生条件を川幅水深比とフルード数の関係で表している。彼らの理論は、微小振幅波理論から導かれる水面波の波長と、ポテンシャル流解析による反砂堆波長⁷⁾が一致したときに三角状水面波列が発生するという簡便なものであるが、Yokokawa et al.²²⁾によって、実験結果と概ね一致することが確認されている。

長谷川らの理論によると、川幅水深比が大きい場合、横断方向に複数列の水面波が発生する。例えば、昭和56年洪水時の豊平川の川幅水深比であれば、横断方向に3~4列の水面波が発生するはずである。しかし、実際には1列しか発生しなかった。複数列の水面波が発生するような川幅水深比については、Yokokawa et al.の実験でも検証されておらず、この理論で示唆されたとおり、複数列の水面波が本当に発生するのか、なぜ豊平川で複数列の水面波が発生しなかったのかは未解明である。そこで、本研究では、川幅水深比が大きい場合の三角状水面波列の特性に焦点を当てた。

3. 実験方法

3.1 実験条件

実験水路の概観を図-2に、実験条件を表-1にそれぞれ示す。実験水路は、寒地土木研究所にある長さ25mの勾配可変式の直線水路である。Run1~Run10の水路幅は0.5m、Run11~Run17の水路幅は1mである。水路勾配は0.008~0.032の範囲とし、流量は川幅水深比がおおよそ6、11、15、20、50の5パターンになるように設定した。

実験に用いた砂礫は、アサノ珪砂(粒径1.42mm)とろ過砂利(粒径5.00mm)の2種類である。初期河床は平坦(砂堆や反砂堆などの起伏がない状態)とし、

表-1 実験条件

| | 水路幅(m) | 粒径 (mm) | 勾配 | 流量(l/s) | フルード数 | 川幅水深比 | 無次元せん断力 |
|-------|--------|---------|--------|---------|-------|-------|---------|
| Run1 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 15.2 | 1.02 | 11.1 | 0.154 |
| Run2 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 36.8 | 1.04 | 6.3 | 0.273 |
| Run3 | 0.5 | 1.42 | 0.0145 | 8.1 | 1.30 | 20.0 | 0.155 |
| Run4 | 0.5 | 1.42 | 0.0145 | 1.8 | 1.16 | 50.0 | 0.062 |
| Run5 | 0.5 | 5.00 | 0.0180 | 19.5 | 1.31 | 11.1 | 0.098 |
| Run6 | 0.5 | 5.00 | 0.0180 | 26.7 | 1.32 | 9.1 | 0.120 |
| Run7 | 0.5 | 5.00 | 0.0180 | 42.9 | 1.34 | 6.7 | 0.164 |
| Run8 | 0.5 | 5.00 | 0.0320 | 10.3 | 1.66 | 20.0 | 0.097 |
| Run9 | 0.5 | 5.00 | 0.0320 | 21.7 | 1.73 | 12.5 | 0.155 |
| Run10 | 0.5 | 5.00 | 0.0320 | 30.7 | 1.76 | 10.0 | 0.194 |
| Run11 | 1.0 | 5.00 | 0.0150 | 44.6 | 1.27 | 20.0 | 0.091 |
| Run12 | 1.0 | 5.00 | 0.0150 | 113.3 | 1.34 | 11.1 | 0.164 |
| Run13 | 1.0 | 5.00 | 0.0150 | 67.8 | 1.31 | 15.4 | 0.118 |
| Run14 | 1.0 | 5.00 | 0.0250 | 57.5 | 1.64 | 20.0 | 0.152 |
| Run15 | 1.0 | 1.42 | 0.0110 | 44.5 | 1.27 | 20.0 | 0.235 |
| Run16 | 1.0 | 1.42 | 0.0110 | 76.2 | 1.31 | 14.3 | 0.329 |
| Run17 | 1.0 | 1.42 | 0.0250 | 15.1 | 1.71 | 50.0 | 0.213 |

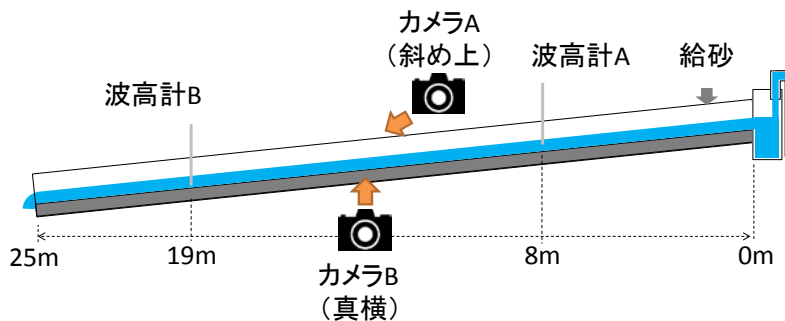


図-2 実験水路の概観

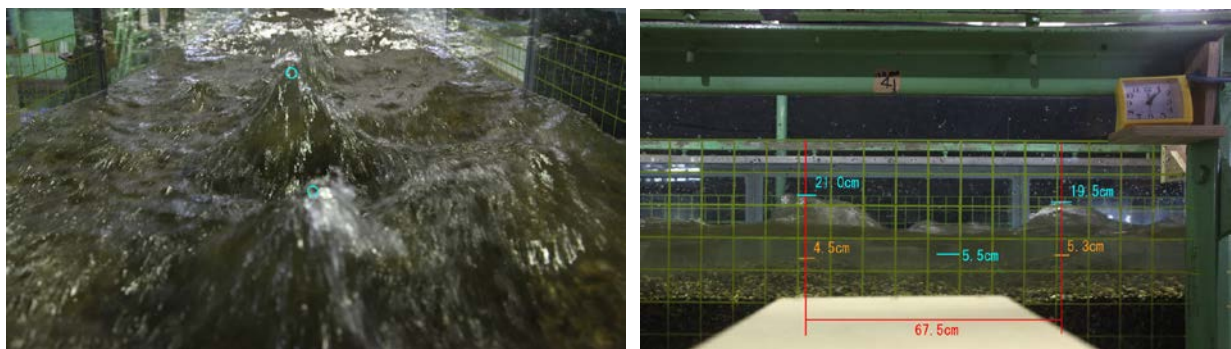


図-3 波高・波長判読の一例（左：カメラAの画像、图中的丸は水面波の発生位置、右：カメラBの画像）

砂礫層の厚さは一律 10cm とした。上流端付近が動的平衡状態になるように給砂を行った。

3.2 観測方法

上流端から8m地点と19t地点に、容量式波高計を設置し(図-2)、水面波の時間的な変化と、水面波の周期を計測した。なお、波高計は横断方向の水路センターに設定した。

水面波の横断方向の発生位置を確認するために水路斜め上から写真撮影を、波長波高を計測するために水路真横から写真撮影をそれぞれ行った。斜め上に設置されたカメラAと真横に設置されたカメラBは同期しており、同じタイミングで水面が撮影される仕組みとなっている。撮影位置は上流から 12m 地点である。撮影は通水 10 分以内に 1 回、その後通水終了までに 1～2 回実施した。

4. 実験結果

4.1 発生有無

実験において三角状水面波列は全 17 ケース中 9 ケースで発生した。水面波列は通水開始から数分で発生し、その際、河床には反砂堆起伏が形成されていた。水面波は上流端付近ではほとんど発生しておらず、下流にいくつれ徐々に波高が大きくなり、10m より下流ではほぼ一定の波高であった。水面波と河床波は同位相のままゆっくり下流に移動していた。

図-4はRun7における波高計による水深の観測値である。上述したように下流側波高は上流側波高より大きく、平均水深と同程度である。フーリエ解析によって求めた下流側の水面波の周期は約60秒であった。その他の水面波が発生したケースでも、波高は水深の70%～120%くらいあり、周期はおおよそ30秒～90秒程度であった。ただし、波高計は水路センターに固定されていたため、水面波の頂部(図-3参照の青丸)が左右岸に寄ったり、水面波が横断方向に偶数列発生した場合は、波高や周期を精度良く観測出来なかった。これを観測する方法については、今後の課題としたい。

図-5a は実験における三角状水面波列の発生有無を、芦田・道上²³⁾の lower regime と upper regime の区分と伴に示している。全ケースとも upper regime に属するが、水深粒径比 h/d が小さい領域で非発生が多かった。

図-5bは発生有無を無次元せん断力とフルード数の関数として示したものである。図中の青線は実験結果から類推した発生非発生の境界である。これによると、

三角状水面波列は無次元掃流力が約0.15以上の領域で発生しやすいが、フルード数が高くなると発生しにくいことが確認された。なお、水面波列が発生しなかったケースでは、河床波も発生しなかった。

表-2 実験結果

| | 水面波列 発生有無 | 平均波高 (cm) | 平均波長 (cm) |
|-------|--------------|--------------|------------------|
| Run1 | 発生 | 3.50 | 22.50 (27.50) |
| Run2 | 発生 | 6.00 | 42.50 |
| Run3 | 発生 | 4.25 | 17.50 |
| Run4 | 非発生 | - | - |
| Run5 | 非発生 | - | - |
| Run6 | 非発生 | - | - |
| Run7 | 発生 | 7.50 | 55.00 (45.33) |
| Run8 | 非発生 | - | - |
| Run9 | 非発生 | - | - |
| Run10 | 非発生 | - | - |
| Run11 | 非発生 | - | - |
| Run12 | 発生 | 11.58 | 68.25 (52.75) |
| Run13 | 非発生 | - | - |
| Run14 | 発生 | 3.97 | 33.83 (35.00) |
| Run15 | 発生 | 5.68 | 32.13 |
| Run16 | 発生 | 7.53 | 42.29 (44.00) |
| Run17 | 発生 | 2.06 | 17.70 (19.50) |

4.2 波高・波長

画像解析より分析した水面波の波長・波高を表-2に示す。ここで、波高および波長は通水中に撮影した2、3回の平均値である。なお、括弧内の波長は、本研究とは別の目的で実験を行ったときに、同様の方法で観測した波長である。

実験において、水面波列の波長と反砂堆の波長は一致しており、概ね同位相であった。そこで、観測された水面波列の波長と Hayashi⁷⁾によって提案された反砂堆の理論波長を長谷川ら²¹⁾が近似した式と比較した(図-6)。これによると、実験結果の波長は Run14 を除き理論値と概ね一致した。なお、反砂堆の理論波長

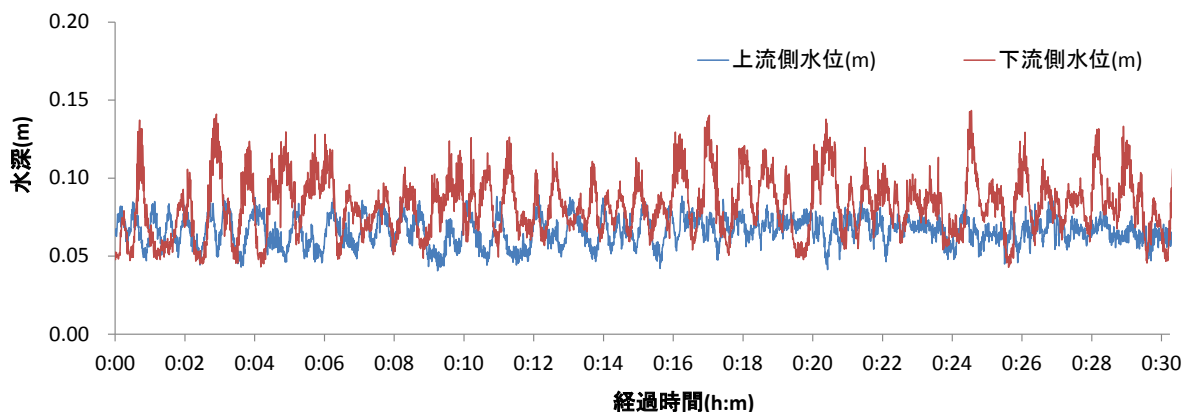


図-4 波高計による水深の観測値 (Run7)

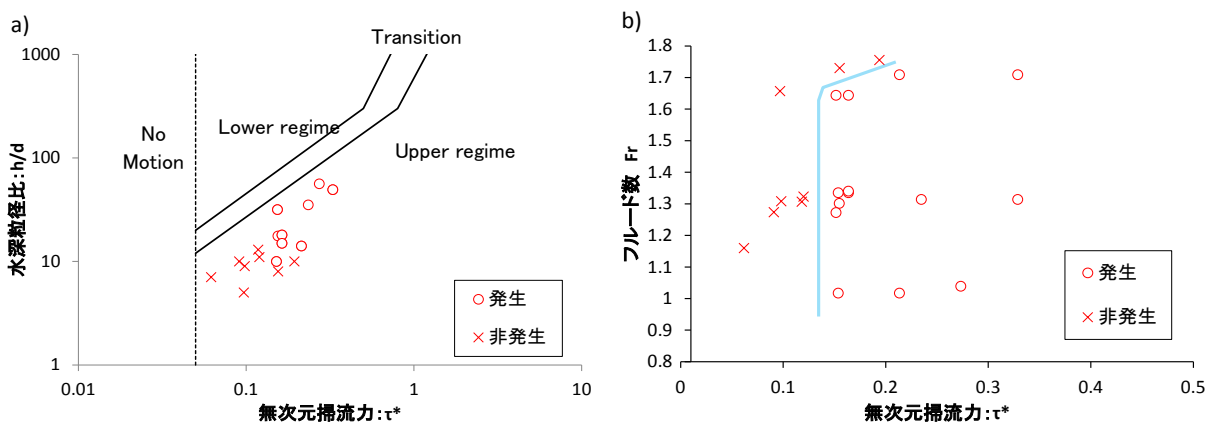


図-5 三角状水面波列の発生有無

は以下の式で表される。

$$\frac{\lambda_b}{h} \cong 2\pi\sqrt{F_r^2 - 1/3} \quad (1)$$

ここで、 λ_b はアンチデューンの波長、 h は水深、 F_r はフルード数である。

4.3 モード数

図-7は実験の初期段階（通水開始5～10分）に観測された三角状水面波の横断方向列数（モード数）と川幅水深比の関係である。モード数は、実験中の目視による確認と斜め写真から判読した。これによると、通水初期に発生する三角状水面波列のモード数は、川幅水深比の増加に伴い増加する傾向にあった。

図-8は通水開始30分後～60分後に観測された水面波のモード数と川幅水深比の関係である。川幅水深比が20以上のRun3、Run14、Run17では、通水初期では4～10程度あったモード数が通水後期では1～2に減少した。一方、それ以外のケースでは±1のゆらぎはあるものの、大きな変化はなかった。

水面波のモード数が大きく減少したRun3、Run14、

Run17は、村本・藤田²⁴⁾の中規模河床形態の領域区分図で、交互砂州の発生領域に位置しており、今回の実験でも時間の経過とともに交互砂州が形成された。この砂州の影響を受け、徐々に三角状水面波のモード数が減少する傾向にあった。例えば、図-9に示したRun3では、実験開始5分後には3～4列の水面波列が観測されたが、実験開始30分後には、砂州が形成され、砂州の瀬に1列の水面波が形成された。

川幅水深比が20でもモード減少が起こらなかったRun15は村本・藤田の中規模河床形態の領域区分図で、交互砂州と準砂州（Semi bar）の境界に位置する。このため明確な砂州地形が発達せず、モード数が実験後期まで維持された。また、その他のケースはRun1、Run12、Run16が準砂州領域、Run2、Run7が短対角州（Short Diagonal Bar）に含まれており、交互砂州は発生せず、三角状水面波のモード数も起こらなかった。

この結果から、昭和56年の豊平川において、川幅水深比が大きいのに水面波列が1列しか観測されなかったのは、河床に砂州が形成され、その影響で水面波列のモード数が減少したためと考えられる。

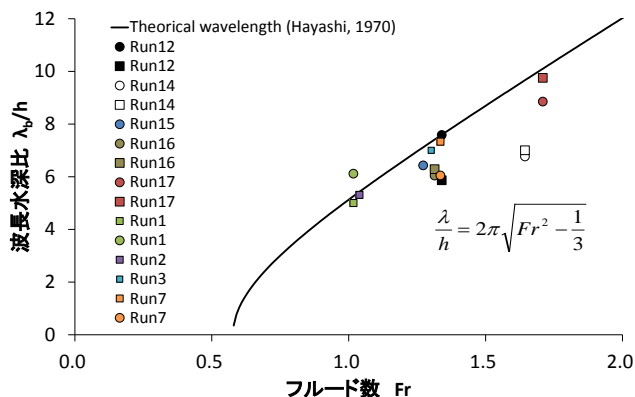


図-6 三角状水面波列の波長と Hayashi の反砂堆理論の比較

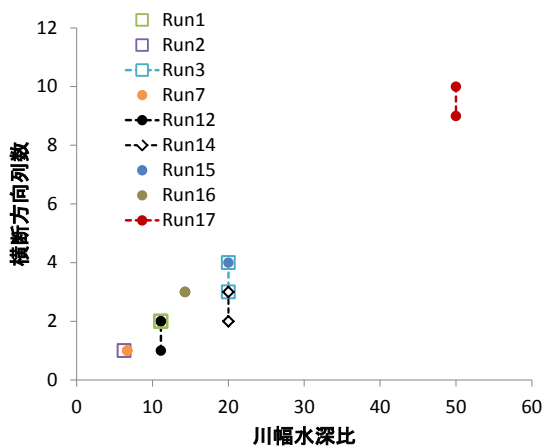


図-7 通水初期の水面波モード数と川幅水深比の関係

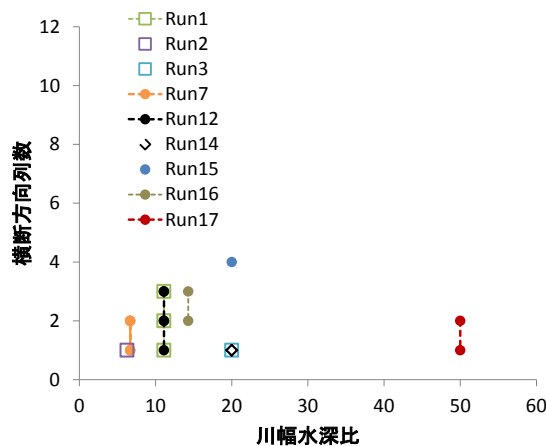


図-8 通水後期の水面波モード数と川幅水深比の関係

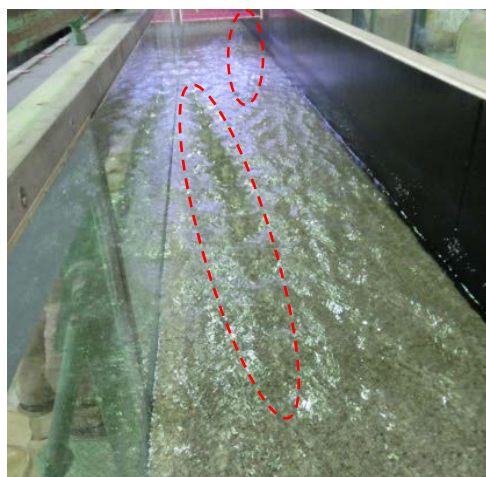
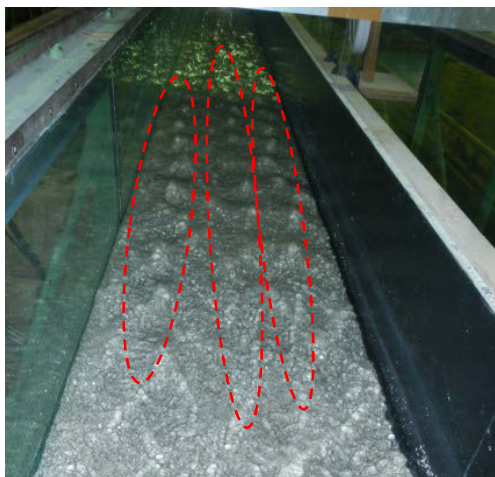


図-9 Run3 における水面波列の様子
(左：通水 5 分後、右：通水 30 分後)

5. 考察

ここでは、長谷川ら²¹⁾が提案した三角状水面波列に関する理論の検証を行う。長谷川・上林²⁵⁾によれば、ステップ&プール地形は、河床の反砂堆波長と三次元的な水

面波の流下方向波長が一致したときに形成される。反砂堆と水面波の波長が一致した場合、鉛直 2 次元的な反砂堆は徐々に 3 次元的になり、水面波は増幅され始める。2 つの波長が異なる場合、互いの波は相殺され、大きな水面波は発生しない。

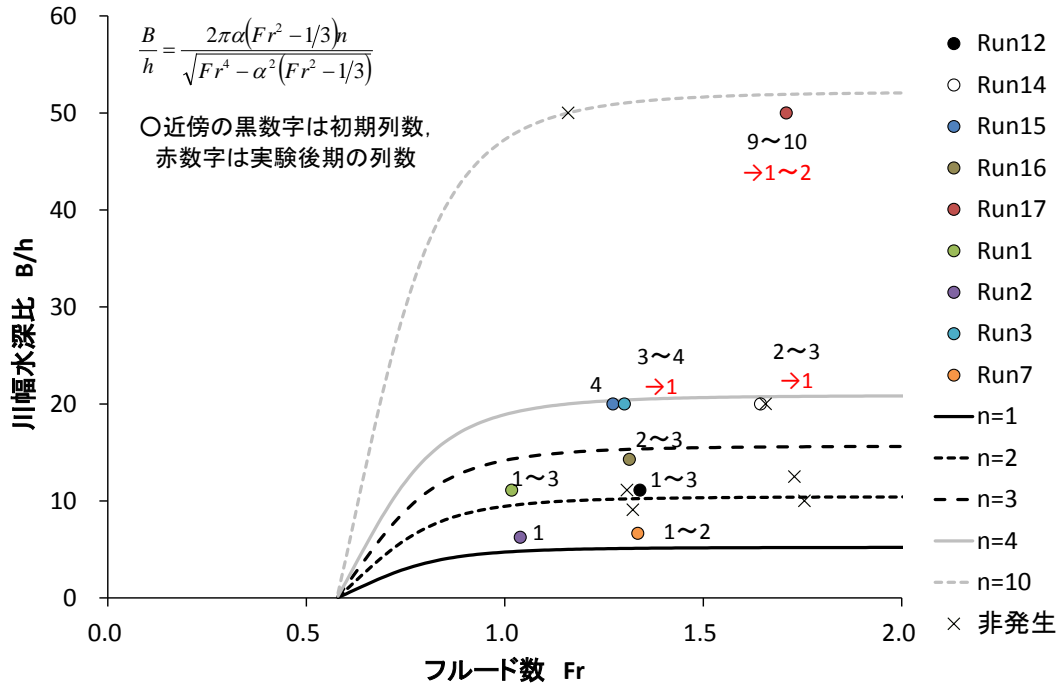


図-10 三角状水面波列の横断方向列数と長谷川らの理論の比較

反砂堆の波長に関しては、Hayashi⁷⁾の発生領域区分線のうち $C=0$ の領域に既往実験データがよく載ることを利用して、(2)に示した近似式を用いて表す。今回我々が実施した実験データも(2)式を波長水深比に置き換えた(1)式によく載っている。

$$Fr^2 = \frac{\cosh(kh)}{kh} \approx \frac{1}{(kh)^2} + \frac{1}{3} \quad (2)$$

一般に射流では、平均流速が波の進行速度より大きいために表面の波を流下させてしまうが、水路に対して斜め方向に進行する波は水路方向の進行速度を大きくすることができ、平均流速と釣り合ってその場に留まることができる。長谷川らはこのような水面波を斜め交錯波と呼び、その波数とフルード数の関係を微小振幅を仮定した定常 3 次元 Airy 波の分散関係によって表している。

$$Fr^2 = \frac{\beta h \tanh(\beta h)}{(k_w h)^2}, \quad \beta = \sqrt{k_w^2 + l_w^2} \quad (3)$$

ただし、 k_w は斜め交錯波の流下方向波数 ($=2\pi/\lambda_w$)、 l_w は斜め交錯波の横断方向波数 ($=2n\pi/B$)、 B は水路幅、 n は斜め交錯波の横断方向波数モード (横断方向波長が水路幅に一致する場合に 1) で整数をとる。三角状水面波のような振幅の大きな波は、微小振幅波理論よりも有限振幅波理論を用いて解く方が厳密である。しかし、有限振幅波理論を用いると式が複雑なことから、実験によればかなり大きな振幅の水面波に対しても(3)

式が成り立つことを理由に、微小振幅波理論である Airy 波を用いている。さらに、扱いをより簡単にするために、(3)式の近似表現をおこなうと次式になる。

$$Fr^2 \approx \frac{\alpha \beta h}{(k_w h)^2}, \quad \alpha = 0.83 \quad (4)$$

水面における斜め交錯波が河床における反砂堆起伏に対して共振状態に至った結果、三角状波列が発生すると考えた場合、この条件は、(2)式の波数 k と(4)式の波数 k_w が一致するという事と同じである。(2)式を(4)式に代入して整理すると、以下の式となる。

$$\frac{B}{h} = \frac{2\pi\alpha(Fr^2 - 1/3)n}{\sqrt{Fr^4 - \alpha^2(Fr^2 - 1/3)}} \quad (5)$$

したがって三角状水面波列発生条件は、流れが射流であることと(5)式を満たすことである。

図-10 は、(5)式の三角状水面波列の発生条件と、実験で観測された水面波列の横断方向列数の比較である。図中の線は、モード数ごとの三角状水面波の発生条件を示している。水理条件がこの線の近くであれば、そのモード数の水面波列が発生するはずである。図中のシンボル近傍に書かれた黒数字が、実験で観測された列数である。なお、モード減少が発生した Run3、Run14、Run17 については、黒数字で実験初期の列数を赤数字で実験後期の列数を示している。

これによると、(5)式は砂州が発生する前の水面波の横断方向列数をよく再現している。ただし、砂州発生

後のモード数の減少については、線形の範囲を外れているため、この理論の適用外である。また、図中の×印で表した三角状水面波が非発生の場合も、(5)式で表される線の近くにあり、十分に三角状水面波が発生する範囲である。この理論が用いているHayashiの式は、フルード数に対する反砂堆の波長を求める式のため、フルード数以外の要因（図-5に示したような無次元せん断力の影響）によって反砂堆が非発生になる場合に適用できない。上記2つの課題については、今後の研究テーマとしたい。

6. まとめ

本研究では、三角状水面波列の基本特性について、水路実験を通じて調査した。以下に本研究で得られた知見を列記する。

- 1) 三角状水面波列は、フルード数が1以上、無次元せん断力が0.15以上の範囲で発生しやすい。ただし、河床せん断力が1.5以上でも、フルード数が高くなりすぎると発生しない。
- 2) 三角状水面波列のモード数は、川幅水深比の増加に伴い増加する。ただし、砂州が発生すると、流れが変化するため、モード数は減少し、最終的には砂州の背に1列だけ残る。
- 3) 豊平川のように川幅が広いにも関わらず、1列しか三角状水面波列が発生しなかった理由は、上述した砂州の形成によるものと考えられる。
- 4) 長谷川らが提案した三角状水面波の発生条件と、実験結果を比較した結果、この理論によって水面波発生時のモード数を精度よく評価できることを確認した。
- 5) ただし、砂州発生後のモード減少やフルード数以外の要因による反砂堆の非発生には、この理論は適用できないことを確認した。

これまで、反砂堆に関する研究は、無次元せん断力や水深粒径比が大きく、川幅水深比が小さい領域を対象として進められてきた。今回、粒径が大きく、交互砂州が発生するような急流河川を対象に、既往実験例が無い領域で反砂堆の実験を行った。この結果、既往研究で語られることの無かった、反砂堆の興味深い特徴を示すことができた。

おそらく三角状水面波列のモード減少は、木下らの線状跳水、村本・藤田らの短対角州などとして、砂州の実験の中でこれまでも発生することがあったと思わ

れる。ただ、中規模河床波と小規模河床波の中間的な存在であるこの現象を予測できるモデルもまだない。今後は、数値解析的な手法を用いて、この現象を再現するとともに、三角状水面波が河岸や構造物安定性に与える影響について実験を行う予定である。

謝辞：本研究の実験を行うにあたって、北開水工コンサルタントの長谷川和義元教授、北海道大学の渡部靖憲准教授には多大なご指導を頂きました、ここに記して謝意を表したいと思います。

参考文献

- 1)木下良作：石狩川河道変遷調査・本文・付図，科学技術庁資源局資料，第36号，1960.
- 2)山本晃一：河道計画の技術史，1994.
- 3)田中祐一郎：Antidune に関する実験的研究，京大防災研年報第13号B，1970..
- 4)福岡捷二・奥津一夫・山坂昌成：急勾配移動床流れにおける河床波の形状，伝播特性，土木学会論文報告集，第323号，1982.
- 5)Kennedy, J. F. : The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 16, 1963.
- 6) Reynolds, A. J. : Waves on the erodible bed of an open channel, *J Fluid Mech*, Vol. 22, 1965.
- 7) Hayashi, T. : Formation of dunes and antidunes in open channels, *Journal of Hydraulic Division, Proc. of ASCE*, Vol. 96, No. HY2, 1970.
- 8) Coleman, S. E. and Fenton, J. D. : Potential-flow instability theory and alluvial stream bed forms. *J. Fluid Mech.* Vol. 418, 2010.
- 9) Engelund, F.: Instability of erodible beds, *J. Fluid Mech.*, Vol. 42, 1970.
- 10)Fredsoe, J.: On the development of dunes in erodible channel, *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, 1974.
- 11) Colombini, M.: Revisiting the linear theory of sand dunes formation, *J. Fluid Mech.*, Vol. 502, 2004.
- 12)泉典洋, Gary PARKER: 平坦床-反砂堆遷移過程の分岐特性, 水工学論文集, Vol. 53, 2009.
- 13)音田慎一郎, 細田 尚: 水深積分モデルによる小規模河床波の発生・発達過程と流れの抵抗則の数値解析, 水工学論文集, Vol. 48, 2004.
- 14) Boussinesq, J. : Th'éorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant an liquide contenu dans ce canal de vitesses

- sensiblement pareilles de la surface anfond, Liouvilles J. Math., Vol.17, 1872.
- 15)細田 尚, 村本嘉雄, 宮本雅章: 水深積分モデルによる波状路床上流れの底面せん断応力解析, 土木学会論文集, No.558/II-38, 1997.
- 16)Nakagawa, H. and Tsujimoto, T. : Sand bed instability due to bed load motion, Proc. ASCE, Vol.106, HY 12, pp.2029-2051, 1980.
- 17)井上卓也, 清水康行, 木村一郎, 川村里実: 1次元ブシネスク方程式モデルを用いた豊平川における三角状水面波列の数値計算, 土木学会水工学論文集, Vol.55, 2011.
- 18)Giri S. and Shimizu Y.: Numerical computation of sand dune migration with free surface flow, Water Resour. Res.,Vol.42, w10422, 2006.
- 19)山口里実, Sanjay Giri, Jonathan M. Nelson, 清水康行, 船木淳吾: 流量変化に対するデューン形状の応答に関する数値計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, 2015
- 20)Su, M. Y. : Three-dimensional deep-water waves. Part 1. Experimental measurement of skew and symmetric wave patterns, J. Fluid Mech., Vol. 124, 1982
- 21)長谷川和義, 山口甲, 伊賀久晃, 辻珠希: 急流河川における三角状水面波列の発生条件について, 土木学会北海道支部論文報告集第66号, 2009.
- 22)Yokokawa, M., Hasegawa, K., Kanbayashi, S. and Endo, N. : Formative conditions and sedimentary structures of sandy 3D antidunes: an application of the gravel step-pool model to fine-grained sand in an experimental flume, Earth Surf. Process. Landforms, Vol. 35, 2010.
- 23)芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol. 195, 1971.
- 24)村本嘉雄, 藤田祐一郎: 中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, 1978.
- 25)長谷川和義, 上林悟: 溪流における瀬・淵 (ステップ・プール) の形成機構とその設計指針, 水工学論文集, Vol.40, 1996.

A STUDY ON THE STABILITY OF REVETMENT BLOCKS UNDER HIGH FLOW VELOCITY CONDITIONS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : River Engineering Research Team

Author : FUNAKI Jungo

INOUE Takuya

ABE Takaaki

Abstract: During the flood, high-velocity flow sometimes generates large surface waves called "triangular wave train", which look like the jagged plates on the back of a dinosaur. These waves cause local erosion of riverbed and may have great destructive effects on revetment blocks. Although the wave train is thought as one of the surface waves on antidunes, study on their occurrence condition have not been sufficiently conducted. In this paper, we made the flume experiment to understand the occurrence condition of triangular wave. The experimental results showed that the triangular waves were generated when the ratio of water depth and grain size is larger than 12 and the number of waves train increased with the increase in the ratio of width and depth.

Keywords: surface waves, antidune, flume experiment