

# 三角波による河川管理上のリスク： ブロックの安定性を例として

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○岩崎 理樹  
井上 卓也  
矢部 浩規

高速流条件下で発生する三角波が河川管理上どのようなリスクを持っているかについては未だ明らかではない。本論文では、そのようなリスクの一例として護岸・護床ブロックの安定性に及ぼす三角波の影響を、水理実験を通じて検討する。実験結果より、三角波の発生によりブロックが動きやすくなることが明らかとなった。このため、三角波の発生を想定せずにブロック重量を設計すると、危険側の重量となることが示唆される。

キーワード：高速流、三角波、河床波、ブロック

## 1. はじめに

急流河川における洪水時の流れは容易に高流速となるため、河床変動や河岸侵食等による堤防の浸食や、河川構造物周辺の侵食、さらには流体力の著しい増大による河川構造物の被災など様々なリスクを生む。その中で高流速条件下において特徴的な現象の1つに、水面が三角波状に切り立つ三角波をあげることが出来る。急流河川における洪水時に見られるこの三角波は、急流河川の激流を表現する1つの例としてしばしば取り上げられる。三角波が発生している様は、一見して非常に危険な印象を与えるが、一方で三角波が一体どのような河川管理上のリスクを含んでいるかについては実はよくわかっていない。これは、いつどこで発生するかわからない三角波の観測を行うことが困難であることや、洪水後にはその痕跡がわからないことから、その影響を洪水後の調査から推定することが難しいためと考えられる。しかしながら、これまでに観測された三角波の中には波高が2.3mと水深スケールまで発達するものもあり、例えば構造物の被災等に対して潜在的なリスクを有している可能性は否定出来ない。すなわち、三角波が発生することによって、想定されていない河床変動、河岸侵食や、構造物の破壊といったことがこれまでも引き起こされていたかも知れない。本研究は、そのような背景を踏まえて、三角波が発生する流れ場における護岸や護床工等のブロック構造物の安定性に関する検討を行うものである。

護岸や護床工等のブロック構造物の設計は、我が国においては一般に護岸の力学設計法<sup>2)</sup>によって行われる。この設計法は、基本的には平坦な底面にブロックが設置されている状態が想定されており、その状態のブロックに作用する外力として、抗力と揚力、抵抗力として重力、

摩擦力を考え、これらの力の釣り合いから移動しない条件を導いている。この設計法の特徴は、ブロックが移動しないために必要な重量が、ブロックに作用する流速の6乗に比例するという、極めて単純で使いやすい関係式を提供していることにある。そのため、想定する外力（流量）と河道条件において、等流・不等流計算等の流れの計算を実施し、算定された流速から施工するブロックに必要な重量を簡単に求めることができる。また、上記で述べたように、この設計法では簡易なブロックの設置条件や水理条件が想定されているため、水理計算で考慮出来ない要素、例えば湾曲や砂州による流れの偏流の影響などは、別途作用流速に対して割り増し係数などをかけることで対応が可能である。このような使い勝手の良さや力学的な背景が明確であることから、護岸の力学設計法は実務現場において広く使用されている。しかしながら、この設計法において、三角波の影響は考慮されていないようである。三角波が発生すれば、水面と河床の変動によって、局所的に強い高流速が生じて、ブロック構造物に対して瞬間的に大きな流体力が作用することで、被災の要因となり得ることは容易に想像される。

本研究では、三角波が発生する流れ場において護岸等のブロックの安定性がどのような影響を受けるかを定性的に把握する水理実験を行う。三角波が発生する水理条件でも、平坦固定床では三角波が発生しない性質を利用し、三角波が発生する移動床条件においてブロックの安定性が低下しえるのか、また低下する場合、どの程度ブロックが移動しやすくなるのかに着目した検討を行った。三角波がブロック構造物に与える影響を定量的に明らかにすることは、これまで過去に護岸等が被災した事例を正しく解釈することに有用な知見を与えるとともに、より合理的な護岸の設計に役立つものと考えられる。

表-1 実験条件

	粒径 $d(\text{mm})$	勾配 $i_b$	平均流速 $U(\text{m/s})$	水深 $h(\text{m})$	フルード数 $Fr$	シーラズ数 $\theta$	三角波	三角波波長 <sup>3)</sup> (cm)	三角波波高 <sup>3)</sup> (cm)
Case 1	1.42	0.008	0.981	0.073	1.16	0.25	発生	25.8	6.9
Case 2	1.42	0.008	0.826	0.055	1.13	0.19	発生	29.5	7.5
Case 3	1.42	0.008	0.591	0.037	0.98	0.13	発生	42.5	4.3
Case 4	5	0.018	1.254	0.071	1.50	0.15	発生	49.2	7.5
Case 5	5	0.018	0.945	0.053	1.31	0.12	非発生	-	-
Case 6	5	0.018	0.85	0.045	1.28	0.10	非発生	-	-
Case 7	1.42	0.03	1.148	0.026	2.27	0.33	非発生	-	-
Case 8	1.42	0.03	1.115	0.023	2.35	0.29	非発生	-	-
Case 9	1.42	0.03	0.543	0.021	1.20	0.27	非発生	-	-

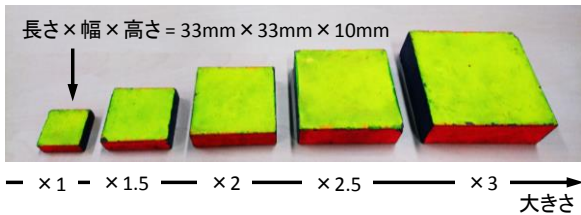


図-1 実験に用いたモルタル製平型ブロック

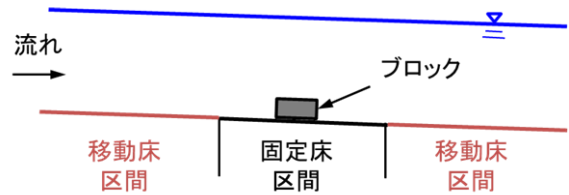


図-2 移動床条件における実験の概略図

## 2. 水理実験

水理実験は、長さ23m、幅0.5mの可傾斜水路において実施した。実験条件は、既往の研究<sup>3)</sup>を参考に、三角波が発生する場合としない場合が網羅出来るように表-1のように設定してある。この水理条件において、底面が移動床、固定床条件の2つを考え、底面に設定したブロックの移動に関する実験を行う。

ここで三角波が発生するというのは、底面が移動床であった場合であり、底面が平坦固定床であった場合、三角波は発生しない。この性質を利用して、底面に設置されたブロック構造物の安定性に対する三角波の影響を以下のように把握する。平坦固定床状態においては三角波は発生しないが、これは護岸の力学設計法と同様な状態を考えていることに相当する。一方、底面が移動床となった場合、平坦固定床と同一条件であっても、三角波が発生することで、護岸の力学設計法で想定している流れの状態からは著しく逸脱することになる。このときのブロックの移動状況を把握することで、三角波がブロックをどのように不安定化させるかが把握出来る。このような比較は、護岸の力学設計法で想定していた状況に対して、三角波という想定外の事象が起きたときに、どの程度ブロックの安定性を低下させるのかを理解することを意味している。一方で移動床条件でも三角波が発生しない条件においては、固定床と移動床の違いは理想的には単に底面の状態の違いのみとなる。

底面に設置するブロックについては、護岸や護床ブロック形状を最も単純化したものと考えられる平型ブロッ

クとし、形状が相似で寸法を変化させた5つのブロックを用いている(図-1)。ブロックはモルタル製であり、比重はおよそ2.2であった。本稿では以降、一番小さなブロックの寸法(長さ×幅×高さ=33mm×33mm×10mm)を基準として、これらのブロックをx1、x1.5、x2、x2.5、x3のように標記することとする。これらのブロックを底面に設置し、上面を棒で押さえた状態から棒を取り外した際にブロックが移動するか停止するかの判定を行った。各ブロックに対して、特に移動する条件においては、複数回の試行を行い、移動と停止の状態を判定した。また、停止の判定については、棒の取り外し後、一分間の静止状態が継続したものを停止としている。なお、移動床実験中に移動床状に直接ブロックを設置することは困難であったため、平坦固定床との違いが明確になるよう、図-2のように移動床区間の一部に平坦床の固定床区間を設け、そこにブロックを設置することとした。

すべての固定床ケースにおいてブロック高さに相当する位置における等流流速を電磁流速計により測定している。ただし、水深がブロック高さと同程度となるCase7-9については、水深方向に高さを変えた流速の測定が難しいこともあり、水深の中央位置において流速を測定し、実験値としている。

## 3. 実験結果と考察

### (1) 三角波発生の有無によるブロックの安定性

実験において観察されたブロックの移動形態を不動、ずれ、滑動、転動に分類し、各ケースごとの移動確率、また移動したブロックの内、転動形態で移動した確率をまとめたものを図-3に示す。なお、ここでずれとは底面

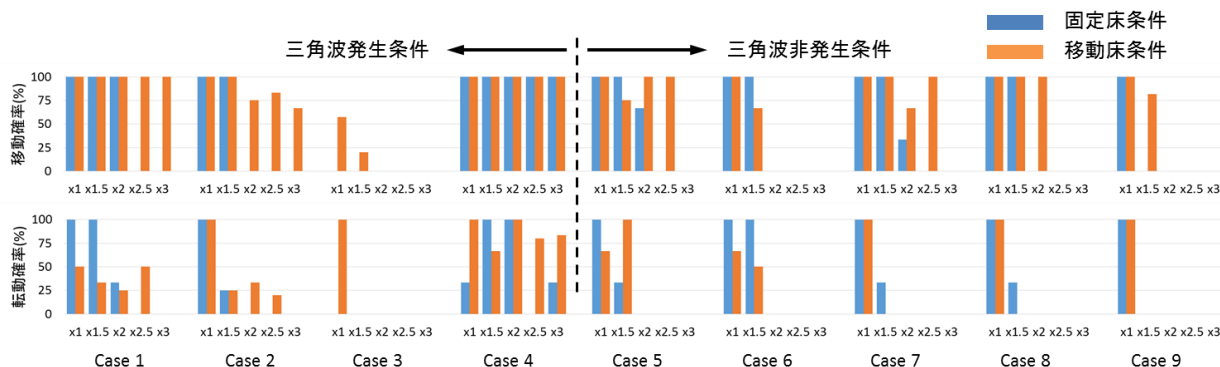


図-3 実験におけるブロックの移動確率（上）と移動したブロックの転動確率（下）

に設置したブロックが方向のみが変化するものの、下流方向には流されないものを意味しており、ここでは移動しない形態として実験結果を整理してある。各ケースでは、特にブロックが移動する場合には三回以上の試行を行っている。観測された移動回数を全試行回数で割ることで、移動確率を求めている。

実験結果について、まず固定床条件におけるブロックの移動形態についてまとめる。この条件においては、ブロックの重量が小さい場合は主に転動で移動するが、ブロックの重量が増加するとともに移動形態は滑動となる傾向にあった。Case4を除いては重量が大きいブロックは不動となっているものが多い。このように、本実験条件ではブロックの重量と水理条件を変化させることで、ブロックが移動しない条件と移動する条件を幅広く網羅している。この固定床条件におけるブロックの移動形態が、移動床条件となったときどのように変化するかを以下にまとめていく。

まず、移動床条件においても三角波が発生しないCase5-9の条件では、固定床条件で停止となっているものでも、ブロックが移動しているものが見られた（Case 5: x2.5, Case 7: x2.5, Case 8: x2, Case 9: x1.5）。このときの移動形態は主に滑動であった。当初この条件では、移動床条件でも三角波が発生しないために、移動床と固定床条件で、ブロックの移動形態はあまり変わらないことが期待されていた。しかし、実際には移動床条件では、ブロックを設置する底面とブロックの間に流砂が入り込み、ブロックを移動させやすくさせていることが見て取れた。この点については、実際に現地に施工するブロックと底面の状況では生じ得ないと考えられるため、本水理実験における一種のあやである。一方で、移動床条件において三角波が発生する場合においても、固定床条件で移動しなかったブロックが、移動しているケースが多く見られた。Case1-3では、固定床条件で不動と判定されたブロックでも、移動となっていることがわかる。移動形態は滑動が支配的であり、この点については上述のブロックと底面間への砂の入り込みが影響している可能性はあるが、転動として移動しているものも存在する。また、

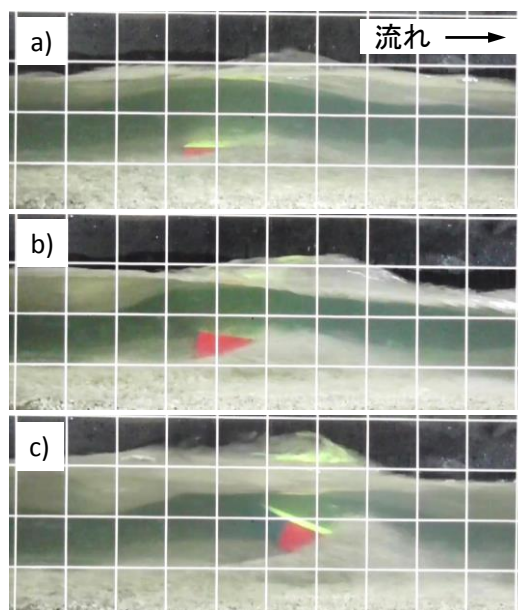


図-4 Case1: x2.5におけるブロックの移動状況と水面の様子。a) ブロック移動開始直前, b) ブロック移動開始時, c) ブロック移動後

Case 4は固定床条件で用いた全てのブロックが移動となったが、移動床条件では特に転動による移動形態が顕著となっている傾向が見て取れる。この点については、三角波発生条件において生じるブロックの不安定現象である可能性が示唆される。

本実験結果により、三角波によってブロックが移動しやすくなる傾向が明らかになってきた。三角波がブロックを移動しやすくしている原因としては、実験時の様子より以下の様なことが考えられる。図-4は、Case1 x2.5にてブロックが移動を開始する瞬間を捉えたものである。このとき、ブロックの上には三角波が発生しており、これが下流方向に流下していた。この三角波の頂部がブロックを通り過ぎたあたりでブロックが移動を開始している。また、三角波の発生とともに河床には同様の形状を持った河床波が形成されていることもわかる。これを模式的に示したものが図-5aである。一般に、河床波の谷から頂部にさしかかる部分では、上昇流が生じており、



これがブロックを巻き上げらせる要素となり、ブロックが移動した可能性がある。また、ブロックが移動を開始した顕著な例として図-5bのような状態も良く観察された。この場合では、ブロックが三角波の谷部に位置しているときに、主に活動形式として移動している。三角波の谷部においては、一般に高流速となっている場合が多く、この流速の増大によってブロックが移動を開始したものと考えられる。このような上昇流や場所的な高流速の発生は、護岸の力学設計法で想定している場では生じない要素であり、三角波発生場において考慮されるべきものであると考えられる。

## (2) ブロック安定性の定量的評価：護岸の力学設計法との対応

これまでに本実験において三角波がどのようにブロックの安定性を低下させるかについて定性的に述べてきた。以下では、三角波の影響をより定量的に評価するために、護岸の力学設計法の考え方との比較を行うこととする。護岸の力学設計法では、底面に設置したブロック構造物に対する外力として抗力と揚力、移動に対する抵抗力として摩擦力、重力を考慮した力の釣り合いを考えることにより、移動しないブロックの必要重量はブロックへ作用する流速の6乗に比例する式を導いている。ここで実施した固定床条件における実験は、この護岸の力学設計法で想定している状態と近いと見られ、まず設計法の適用範囲内の実験ケースについて比較を行う。実験では、ブロックに作用する流速と重量、並びにブロックの移動確率がわかっているため、これをまとめることで、ブロックの移動と停止を区分する関係について示すことが出来る。このように実験結果をまとめたものを図-6に示す。実験結果のブロックの移動と停止を護岸の力学設計法の考え方から区分しようとすればおおそ図中の点線のようなもの。若干のずれはあるものの、実験結果についてはおおそ区分出来ていると考えられる。次にここで示した関係が、移動床条件においてどのように変化するかを示す。移動床条件における結果をまとめる際には、あえて固定床条件の等流のような状態で測定された流速を用いている。これは、実際に三角波の発生を想定せずに、平坦固定床状態に生じる流速を用いてブロックの必要重量を算定したとき、どの程度必要ブロック重量を見誤るかを示すことに相当する。

図-7、8はそれぞれ三角波が発生しない条件と発生する条件に分けて、固定床と移動床条件で得られたブロックの移動確率と流速-ブロック重量との関係を見たものである。図中に示す点線は、図-6で求めた固定床条件におけるブロックの移動と停止を区分する線である。一方、移動床条件の実験結果にこの点線を書き加えれば、明らかに実験で観測された移動と停止を分けることが出来ない。移動床条件で得られた結果を区分しようとすれば、新たに実線の関係が得られる。実線と点線のずれが大きい

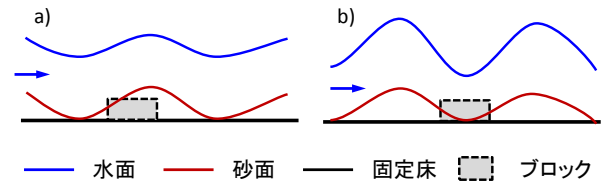


図-5 実験より推定される三角波とブロック移動開始状態の模式図。 a)三角波の頂部より若干上流で移動する場合(図-4の例)、 b)三角波の谷部で移動する場合。

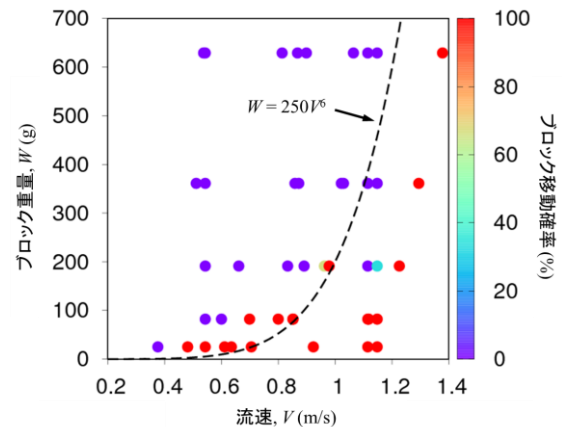


図-6 平坦固定床条件でのブロックへの作用流速-ブロック重量の関係と、ブロック移動確率の比較。

ければ大きいほど、移動床条件においてブロックが移動しやすくなっていることを示している。図-7に示すように、移動床条件においても三角波が発生しないケースにおいては、両線のずれは比較的小さいものの、三角波が発生する場合は2つの線には大ききずれがあることがわかる。このずれを数値化すれば、固定床条件で移動しないブロックよりも、さらに3.5倍のブロック重量が必要なことになる。これは、ブロック重量を設計する際に用いる流速に対する割り増し係数に直すと $3.5^{1/6} \approx 1.23$ 程度に相当する。本結果は、三角波が発生する場では、ブロックが移動しないために必要な重量は同一水理条件における固定床条件よりも顕著に増加することを示唆している。

## (3) 実問題への適用可能性：三角波が持つリスク

本実験結果は、三角波がブロックを不安定にする可能性があることを示唆している。三角波は護岸ブロックの設計や被災要因の解釈において従来考慮されていないものであり、本実験結果はより合理的な被災要因の解明やブロックの設計に新たな知見を与える可能性がある。一方、ここで示したような単純化された水理実験の結果が、実際の河川の問題に対してどのような意味を持つのか、若干の考察を以下に加えることとする。

まず、ブロックの設置については当然ながら河床面の上に置かれたものではなく、群体として河床面に埋め込まれることで河床や河岸を防御する。従って、実験で見

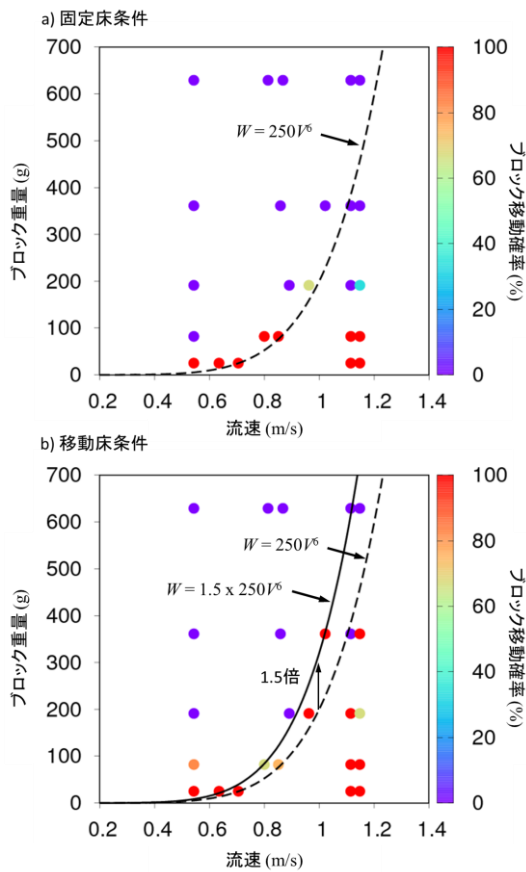


図7 三角波非発生条件におけるブロック移動確率と流速—ブロック重量の関係。 a)固定床, b)移動床。

られたようなブロック—底面間への流砂の入り込み等の影響はないと考えられる。しかし、三角波が発生することで生じる高速流や三角波谷部から頂部にかけて発生する上昇流は、実験のみならず実スケールでも発生すると考えられるため、実験と同様に実際に現地に施工される護岸や護床ブロックを不安定化させる可能性はある。また、実際の場合では、ブロック設置区間の上下流は移動床であり、侵食の影響を受ける。ブロック設置区間の上流から三角波が移動してきた場合、谷部においてブロック前面、下面の土砂が抜け出し、ブロックを下から上方へ押し上げようとする流体力も増加する。このような現象の類似例として、護床工前面の洗掘による被災があげられる。平成19年台風9号出水調査報告によれば、多摩川二々領上河原堰上流の護床工前面が出水により顕著な洗掘を受け、その洗掘域から発生する上昇流が護床工の被災要因となったことが示唆されている<sup>4)</sup>。三角波も同様な洗掘と上昇流を発生させる要因であり、このような侵食機構によって、ブロックの安定性を低下させることが懸念される。最後に本実験では、三角波が発生した場合には、現状の設計法で想定されるよりも重いブロックが必要であることを示したが、実際の施工を考えると、構造物の巨大化はコストや施工面で不利である。そのため、三角波等の発生に強いブロック形状や、逆に三角波の発

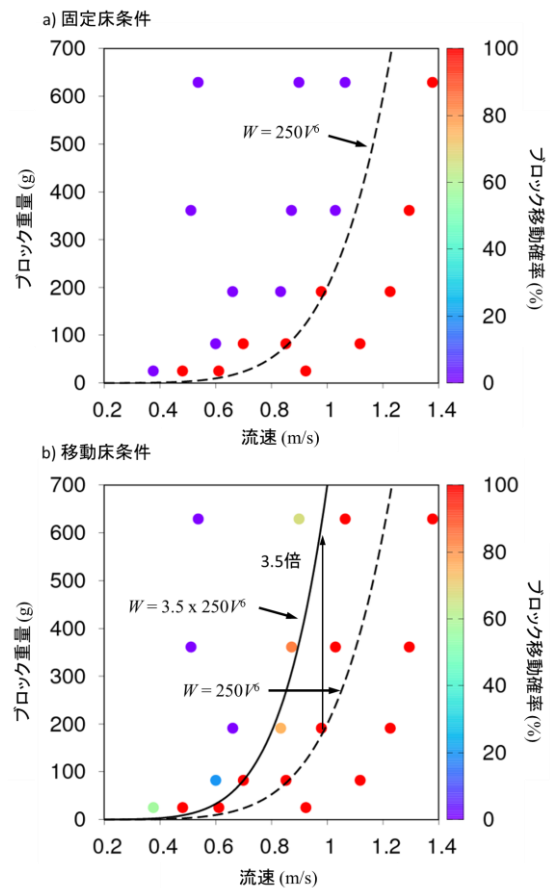


図8 三角波発生条件におけるブロック移動確率と流速—ブロック重量の関係。 a)固定床, b)移動床。

生を抑制するブロックなどを考え、重量を抑えつつ安定性を増す対策も重要であると考えられる。

#### 4. まとめ

本論文では、三角波の発生が河川管理上どのようなリスクをもたらすかについて、護岸や護床工等のブロック構造物の安定性に着目した単純な水理実験により検討した。実験結果より、三角波が発生すると、局所的な高流速や上昇流が発生し、ブロックが移動しやすくなることを示した。従来、護岸等の設計に用いられる護岸の力学設計法では、このような三角波の発生に伴う流れの変化を考慮していないため、設計ブロック重量を過小評価する可能性がある。また、三角波が発生しやすい急流河川における護岸等の構造物の被災事例の解釈に有用な知見を与える可能性がある。一方、本検討は単純な場において三角波がブロック構造物の安定性に及ぼす影響を現象論的に示したにすぎない。今後は本現象をより水理的に解釈しつつ、三角波が発生しても被災しないブロック形状等の検討につなげていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 山口甲：日本一の急流都市河川 豊平川，（財）河川環境管理財団北海道事務所，pp.126-130，2005.
- 2) 国土開発技術研究センター編：改訂護岸の力学設計法，山海堂，pp.1-153，2007.
- 3) 井上卓也・長谷川和義・渡部靖憲・船木淳悟：三次元的な反砂堆上の水面波に関する実験的研究，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.71，No.2，pp. I\_739-I\_746，2015.
- 4) 土木学会水工学委員会平成 19 年台風 9 号出水調査団：平成 19 年台風 9 号出水の調査と今後の河川維持管理のあり方に関する調査研究，河川整備基金助成事業報告書，2007.