

流木塊の橋脚への堆積に関する研究

A STUDY OF ACCUMULATION OF A LUMP OF FLOATING LOGS ON BRIDGE PIER

松本健作¹・小葉竹重機²・清水義彦³・石田和之⁴・近内壽光⁵・Ioakim Ioakim⁶

Kensaku MATSUMOTO, Shigeki KOBATAKE, Yoshihiko SHIMIZU, Kazuyuki ISHIDA,
Toshimitsu KONNAI, and Ioakim IOAKIM

¹正会員 工博 群馬大学工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

²正会員 工博 群馬大学工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

³正会員 工博 群馬大学工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

⁴ 佐田建設(株) (〒371-0846 群馬県前橋市元総社町 1-1-7)

⁵ 東日本測量(株) (〒974-8261 福島県いわき市植田町林内 26-5)

⁶ Lyceum Apostolon Petrou kai Pavlou, Aleksandrou Papadiamanti (3085 Limassol, Cyprus)

The characteristics of the accumulation of a lump of floating logs on bridge pier are investigated by laboratory experiment. The results show that floating logs can be very dangerous for bridge when many floating logs make a lump even if the ratio of span to log length is little. If the floating log is long and the flow rate is calm, the area of a lump of floating logs causes the area of accumulation of a lump of floating logs on bridge pier without the influence of the condition of each floating logs. But the shorter the floating logs become and the larger the flow rate becomes, the smaller the area of accumulation of a lump of floating logs on bridge pier becomes.

Key Words: Floating log, a lump of floating logs, accumulation, span of a bridge piers

1. はじめに

流木は山腹の崩壊や建材の流出、過去の放置流木の再流出等によって随所で容易に発生し、出水に伴って流下することで多種多様な流木災害を引き起し、その被害は、出水が流木を伴わないものである場合に比べ、遙かに甚大なものとなる。流木災害の形態には、①橋脚等の河川構造物に直接衝突することによる破壊、②橋脚での堆積・堰上りが引き起こす水位の急変による周囲の局所洗掘や、左右の圧力差による倒壊、③堰上げによる溢流、④溢流水に乗って流木が堤内地へ侵入することによる家屋等の破壊、⑤一度堰上げされた状態で、堆積していた流木が再流出することによる鉄砲水の誘発、⑥災害復旧工事の大きな障害等、様々なものが挙げられる。これらの各災害は近年頻発している河川災害においても随所で見られているもので、記憶に新しいところでは、平成10年の那須

地方を襲った集中豪雨の際に、⑤に示したような機構で鉄砲水の発生があったとの現地住民の目撃報告がある。また、今年平成12年8月に群馬県の谷川岳において発生した鉄砲水による災害では、人命を失う最悪の事態に至った原因の1つに、過去の出水において発生し、そのまま放置されてうず高く積み重なって堆積していた流木塊が被災者の避難の妨げとなっていた、という可能性も示唆されており、その早急な対策の必要性があらためて指摘されている。このように流木災害については、その被害の甚大さから、従来様々な研究が行われ、水原¹⁾は実験、現地調査等によって、流木の堆積・堰上げや、砂防ダムでの補足効果についてなど多方面から検討を行っている。中川らの一連の研究^{2), 3), 4)}では流木の流下中の挙動や橋脚での堰止め現象を実験及び数値解析によって検討しており、福岡⁵⁾らは現地調査、大型模型実験、流れ場の解析によって、流木類の集積に関する種々

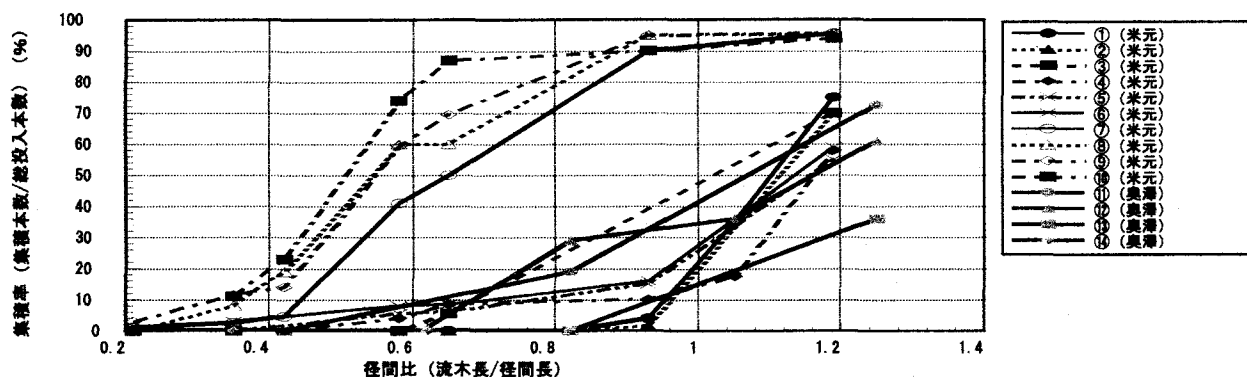


図-1 米元・奥澤による集積率と径間比に関する研究結果

実験条件 米元：流木の総投入本数 800 本、河床勾配 1/1000、桁下余裕高 3.4cm

奥澤：流木の総投入本数 200 本、河床勾配 1/300、桁下余裕高 4.0cm 以上

投入方法 ①：1 本ずつ水路全体にバラバラと、②：10 本ずつ全幅に、③：100 本揃えて左右交互に
④：200 本揃えて左右交互に、⑤：400 本揃えて左右交互に、⑥：800 本揃えて一度に
⑦：100 本乱積み左右交互に、⑧：200 本乱積み左右交互に、⑨：400 本乱積み左右交互に
⑩：800 本乱積み左右交互に、⑪：流下密度一定、桁下余裕高 4cm、流木長 40cm
⑫：流下密度一定、桁下余裕高 6cm、流木長 40cm
⑬：流下密度一定、桁下余裕高∞、流木長 40cm⑭：流下密度一定、桁下余裕高 4cm、流木長 30cm

の要因について検討を行い、堆積場所の推定を行っている。しかしこれら多くの知見を得るに至ってはいるものの、現在においても依然として、多岐にわたる流木災害に対する充分な対策は確立されているとは言いがたい。一方で平成 9 年の河川法改正によって、治水・利水とともに、環境美化や生態系保全といった要素が今後の河川整備の重要な課題として示されたのに伴い、河道内の樹林帯等の植生を有効に利用する試みが盛んに行われている。樹林帯の減勢機能や流木の補足機能を利用しようとするものや、放置流木をそのまま新たな生態系の苗床とする試み等、様々であるが、この、河川空間における植生域の増大を促す動きは、流木災害の見地から見ると、流木の供給源を増大させる可能性を孕むものであり、無軌道な植生域の増大は流木災害の危険度の増加にも直結し得るものと考えられる。よって、環境美化や生態系保全といった問題が盛んに検討されている現在、改めてそれらを、未解決のまま残されている流木災害とのバランスの上で検討してゆくことは、今後の河川域における人間活動と自然環境の長期的な安定を保つ上で必要不可欠なものとなると考えられる。そこで本研究では、種々の流木災害を引き起こす要因となる、橋脚での堆積問題に注目し、過去の研究例との比較を行いながら、室内模型実験によって、その特性の解明を試みることにした。

2. 径間比と集積率に関する研究の動向

橋脚における流木の堆積現象に関しては、現在までに多くの研究報告がなされており、流木の堆積強度の検討には、流木長の橋脚の径間長に対する比（以下、本論文の中ではこれを径間比（ r ）と呼ぶことにする）と集積本数の総投入本数に対する比によって整理されたものが多く、最適な径間比の確立に向けた種々の検討が行われている。しかし、過去の研究例を見ると、同一の径間比の流木を用いて、同本数投入したとしても、流木の投入方法次第で結果は大きく異なる、ということを示すものが少なくない。図-1 に米元⁶⁾及び奥澤⁷⁾によって別々に報告された、集積率と径間比の関係を表した研究結果を示す。図は奥澤の論文⁶⁾を元に、図より数値を読みとり作成し直したものであり、細かい数値に関しては正確ではないが全体的な傾向は再現できている。米元の実験結果が①から⑩までの 10 通り、奥澤の実験結果が⑪から⑭までの 4 通りである。図を見ると米元の①から⑥までの 6 通りの結果と奥澤の 4 通りの結果は全体的に似通った傾向が見られるのに対し、米元の⑦から⑩の 4 通りの結果だけが小さな径間比であっても高い集積率を示し、他と大きく異なる傾向を示していることが分かる。この⑦から⑩の実験は、投入時に流木を乱積み状態にして行ったものである。米元の①から⑥及び奥澤の 4 通りの条件間にも、河床勾配や投入本数等その条件に様々な相違点があるにもかかわらず同様の傾向を示すのに対し、乱積み状態で投入する、という投入条件の違いが付加されることによって集積率にこれだけ大

きな違いが現れるということは、言い換えれば、流木の橋脚への堆積現象を考える上で、最も大きな影響を及ぼし得る条件が、流木の投入状態が乱積み状態であるか否か、であるということ示唆していると考えることが出来る。従来の、橋脚への流木の堆積現象に関する研究では、個々の流木の長さを用いて、それと径間長の比である径間比をパラメーターとして検討されたものがほとんどである。しかし実災害においても随所に見られるこの乱積み状態の流木群は、個々の流木の長さによっては表現しきれない、流木群全体としての大きさを持ち、その大きさが橋脚における堆積現象を考える上での重要なパラメーターになっていることが考えられる。そこで本研究では、個々の流木の長さに加え、流木同士が絡み合っただけの乱積み状態を形成した際の、流木塊全体としての大きさをパラメーターとして、この流木塊の橋脚における堆積現象の特性について検討を行った。

3. 流木塊の橋脚への堆積頻度の検証

(1) 実験条件

まず始めに、様々な長さの流木を様々な本数で絡み合わせて流木塊を形成し、それらの流木塊が橋脚において示す堆積傾向について検討を行った。図-2に実験装置を、図-3にその際の橋脚の配置図を示す。実験に用いた水路は、幅40cm、深さ40cm、長さ10mの水路で、下流端に模型流木捕集用の網が取り付けられている。また、水路勾配は1/1000に固定した。模型橋脚は高さ40cm、長さ8cm、幅1cmの尖頭楕円形のものである。橋脚は全実験を通して4本設置して行った。尚、今回の実験では橋桁は考慮していない。模型流木は直径2mmの円柱木材を用い、長さを8種類(4.0cm、4.8cm、5.6cm、6.0cm、6.4cm、7.2cm、8.0cm、8.8cm)用意した。流木の投入は、橋脚の上流3mの所から乱積み状態で1つの塊となるようにして投入した。流量 Q は1.304、3.939、7.764l/s(それぞれ水深2.5、4.0、5.5cm)の3通りで行った。流木の橋脚での堆積現象は本来中・上流域で頻発しており、河川構造令で定められた最小基準径間長が20mであることなどを考慮すると、本実験で用いる水路床勾配や橋脚モデル等の諸条件は最適なものではない。これらの諸条件は足立ら⁸⁾の実験を参考にして、ほぼ同一の条件での実験を行い、個々の流木の堆積現象に着目した足立らの研究結果と、流木が複数で団塊化して形成した流木塊に着目した本研究の結果の比較を行いやすいように意図して設定したものである。

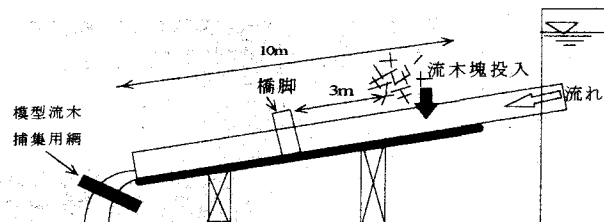


図-2 実験装置

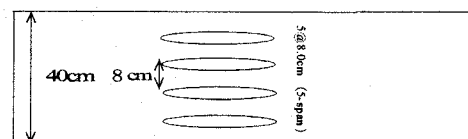


図-3 橋脚の配置

(2) 流木塊の橋脚への堆積頻度

まず始めに流木塊の堆積傾向を調べるにあたって、試行毎に、「堆積する」と「堆積しない」のどちらかとして判断し、同一条件での5回の試行中に何回堆積するか、という堆積頻度を調べた。ここで「堆積する」とは、投入された流木塊の一部が橋脚に留まった後、10秒間そこに留まり、さらに上流から模型流木を数本投入し、それらとの衝突等の影響によって流出しなかった場合を指している。堆積の判定を試行後10秒間放置した後に行ったのは、今回の実験では一時的な釣り合いで橋脚に滞留し、数秒後に流出する流木に関しては堆積とは考えなかったため、それら不安定な状態で堆積している流木が流出してしまうのを待っていたためである。また、その放置時間を10秒としたのは足立ら⁸⁾の研究をもとに一時的な滞留流木の滞留時間を参考にして設定したものである。水原¹⁾、足立ら⁸⁾の研究では、予め流木が橋脚に堆積されている状態で流木を投入した場合には、それが1~2本のごく少数であっても、初期状態で全く流木の堆積がない場合と比べて、流木が堰き止められる確率が急激に増大するという結果が報告されている。本実験においても、たとえ1本であってもそれが2橋脚間にまたがるような強固な堆積である場合には、後続の流木の堆積量が著しく増大する傾向を示した。このため今回の実験では、たとえ1本であっても後続流木の堆積量の増加を強く励起し得る強固な堆積を「堆積」と判断することとした。図-4・(a)から図-4・(c)は、3通りの流量で行った、径間比(流木長/径間長)と流木塊形成本数(投入する流木塊を形成するのに用いた流木の本数)の変化に伴う堆積頻度の分布を示したものである。尚、図-4・(b)、図-4・(c)に関しては小さな径間比での実験結果がないが3つの図間での比較を容易にするため敢えて同一の

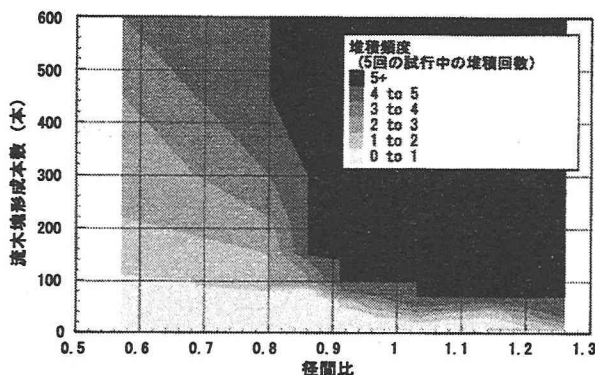


図-4-(a) 径間比と流木塊形成本数の変化に伴う堆積頻度分布 ($Q=1.304$ l/s, $Fr=0.456$)

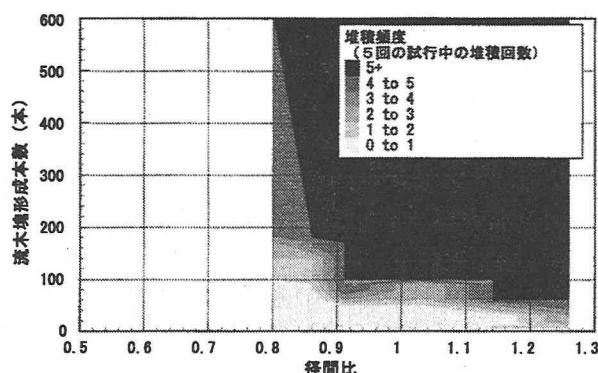


図-4-(b) 径間比と流木塊形成本数の変化に伴う堆積頻度分布 ($Q=3.939$ l/s, $Fr=0.473$)

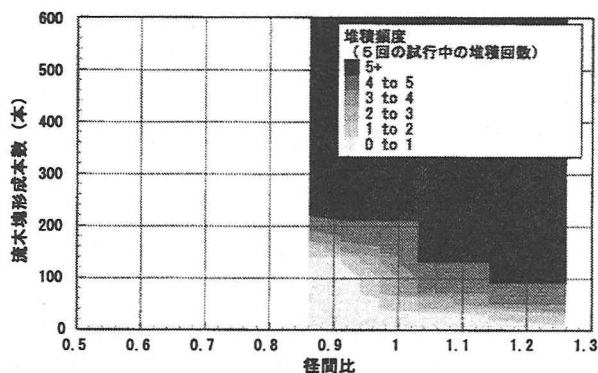


図-4-(c) 径間比と流木塊形成本数の変化に伴う堆積頻度分布 ($Q=7.764$ l/s, $Fr=0.473$)

軸を用いて表してある。図-4-(a)をみると、全体的には径間比の増大に伴って同一本数での堆積頻度は増加する傾向が見て取れる。また径間比0.8付近を境にして、それ以下では、本数の変化に伴って堆積頻度が大きな影響を受けているのに対し、径間比約0.8以上では本数の影響は少なく、少ない本数で形成された流木塊であっても高い堆積頻度を示している。この、径間比0.8付近を境にした堆積傾向の変化は奥澤⁷⁾によっても指摘されている。奥澤の研究では径間比と個々の流木の集積

率(集積本数/総投入本数)との関係において、桁下余裕高が充分確保されていれば集積率に径間比が影響を及ぼすのは0.8程度からである、という報告がなされている。個々の流木の堆積傾向がなぜ径間比約0.8付近で大きく変わるのかについては、依然としてそのメカニズムを説明するに至っておらず、これについては今後の課題である。本研究は、奥澤が行ったような個々の流木に関する検討ではなく、それらの流木によって形成される流木塊の堆積傾向について検討を行ったものであるが、同様に径間比約0.8付近で堆積傾向が大きく変化するという結果を得た。この、個々の流木の堆積傾向は径間比約0.8以上で急激に増大するという奥澤の指摘を考慮すると、流木塊の堆積傾向が、同じく径間比約0.8以上で急激に増大しているのは、流木塊の堆積傾向は、その塊を形成する個々の流木の径間比に強く依存するものである、ということが考えられる。つまり、流木塊形成本数が最小の1本であったとしても、径間比約0.8以上の流木は既に高い堆積傾向を示すものであるので、本数を増やして塊を増大させても同様に高い堆積傾向を示すことになる。径間比約0.8以下の流木によって形成された流木塊も、その形成本数の増加に伴って、流木塊全体としての長さは径間長を上回るようになり、もしこの流木塊が終始その大きさを保ち続けられるならば、径間比約0.8以上の流木同様に、高い堆積傾向を示すことになるものと思われる。しかしながら図を見ると、流木塊を形成する流木の径間比が約0.8以下になると急激に堆積頻度が低くなっている。これは多数の流木によって大きな流木塊が形成されたとしても流下中の振動や橋脚と衝突した際の衝撃などによって塊の分解が促されるため絡まり具合が弱くなり、塊が堆積に耐え得るだけの強度を失ってしまうからであると考えられる。この、流木同士の絡まり具合の強さを流木塊の剛性のようなものと捉えているが、その定義や定量的な評価は現在検討中である。ここでは単に流木塊を形成する流木同士の絡まり具合の強さという概念で流木塊の剛性という表現を用いることとする。径間比約0.8以下の流木によって形成された流木塊は、図にあるようにその堆積頻度が大きく下がることから、その規模が小さい間は流木の堆積現象にとっては比較的危険度の低い存在として見る事ができることがわかる。しかし、塊形成に用いられる本数が増加すると、それが径間比0.5~0.6程度の、橋脚での堆積に関しては一般的には危険度の非常に低いと思われる流木であったとしても、径間比0.8以上の流木によって構成される流木塊同様

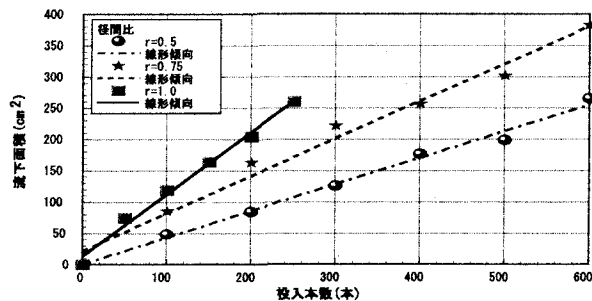


図-5 投入本数と流木塊の流下面積の関係
(流量 7.746 l/s)

の高い堆積頻度を示す非常に危険度の高い存在になり得る、ということも示している。この径間比約 0.8 以下の流木によって形成された流木塊は、本数の増加によって堆積に耐え得る剛性を有した流木塊としての規模が大きくなり、それによって堆積頻度が増大したものと考えられる。図-4 (b)、(c) は、(a) と同様の実験を、流量を変えて行った結果である。全体的には径間比の増大に伴って同一本数での堆積頻度は高くなる、という (a) と同様の傾向が見て取れる。(a) ~ (c) の 3 つの図を比較すると、流量の増加に伴う変化としては、若干、流量の増大にともなって堆積頻度が減少している。これは他の多くの研究例と同様、流速の増大によって堆積が起りにくくなっている、という傾向を示している。なお、(b) 図、(c) 図では小さな径間比における結果がないが、これは上述のように、流速の増大に伴い堆積しにくくなることによって、さらに多くの流木を用いて流木塊を形成する必要が生じたが、ある程度以上の本数では、それらを 1 つの流木塊としてまとめることができなかったためである。以下にその概略を示す。図-5 は、流量 7.746 l/s における、径間比がそれぞれ 0.50、0.75、1.0 となる流木での、流木塊形成に用いた本数と形成された流木塊の流下中の面積との関係である。流下中の面積の算出は、実験中にビデオカメラで撮影した流木塊の流下中の平面画像から行った。この際、予め 1cm 間隔の格子線を水路床にひいておき、それをもとに面積を算出した。流木は流下中に次第にバラけてしまうため、投入から堆積までの一連の挙動を観察し、堆積直前まで団塊状態の部分と絡まり合って連結している範囲を 1 つの流木塊として捉えた。なおこの際、他の流木との絡まりがなく表面張力による付着力のみで流木同士が連結している部分に関しては、流木塊が橋脚に堆積する際に分離して流下していく場合が多く、塊としての機能を有していないと考えられることから、本実験では塊とは見なさず面積の算出に用いなかった。図-5 を見る

と、各流木ともに用いられる本数に比例して形成される流木塊の面積が増大することが分かる。しかし径間比が 0.50 の流木では、600 本付近からそれ以上本数を増やしても 1 つの流木塊としてまとめることができず流下面積は 250~300cm² 以上大きくならず、余剰分の流木はバラバラな状態で流下するようになった。このことは、用いられる流木の長さ等の条件と流量等の水理条件によって、形成される流木塊の大きさに制限があるということを示唆しているが、この機構の詳細についても今後の課題としたい。ここでは流木塊の大きさを 1 つのパラメーターとして検討を進めてゆくので、以後の議論は主に図-5 で確認した範囲の本数を用いた場合の議論とする。

3. 流木塊流下面積と堆積面積の関係

図-4 では定量的なものを考慮せず、「堆積する」と「堆積しない」、という定性的な検討のみであったので、次に、流木塊の大きさと堆積量との定量的な検討を行う。図-6 は、径間比が 0.50、0.75、1.0 となる 3 種類の流木を用いたときの、流木塊の流下面積と堆積面積の関係である。ここで堆積面積とは、流下面積同様にビデオカメラの平面画像から算出した橋脚部で堆積した流木塊の面積である。尚、流量は 1.304、3.939、7.746 l/s (それぞれ水深 2.5、4.0、5.5cm) の 3 通りで行った。パラメーターとしてそれぞれ面積を用いたのは、前節で示したように、水理条件、流木条件によって、必ずしも本数がそのまま流木塊の大きさを表すものではないためである。図-6 を見ると、堆積面積が 0 になっているものがあるが、これは堆積せずに通過したことを表している。また、流木塊は 3 次元的に増大するため、水深が浅いと、形成される流木塊も水深方向の制限が加わり小さいものに制限されている。全体的には、流下面積の増大に伴い、堆積面積も増大している傾向がうかがえる。径間比 0.75 と 1.0 の流木の、水深 2.5、4.0cm の結果を見てみると、形成された流木塊の流下面積の大きさによって、ほぼ同様の規模の堆積を引き起こしていることが分かる。これは橋脚への堆積が、構成要素の流木個々の長さに依らず、流木塊としての全体的な大きさが堆積量を支配していることを示している。このことは、橋脚における流木の堆積現象を考える上で、流木個々の長さの他に流木塊全体の大きさをパラメーターとした検討が有効であるということを示している。しかし一方で径間比 0.75 と 1.0 の流木の、水深 5.5cm での結果を比較すると径間比 0.75 の流木で

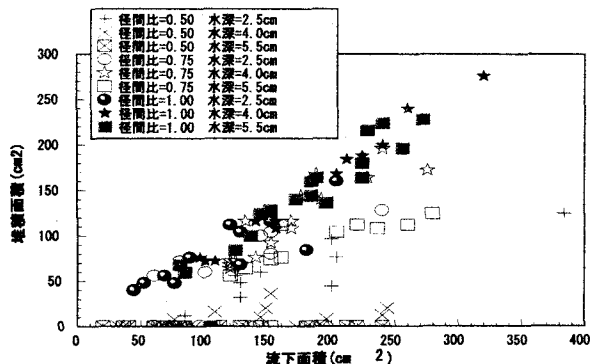


図-6 流木塊の流下面積と体積面積の関係

形成された流木塊は堆積面積が小さくなっている。これは流木長が短くなるにつれて、流木同士の絡まり具合が弱くなり流木塊全体として剛性が低下することによって、流速が比較的遅い間は顕著でなかったものが、流速の上昇に伴って顕著になり大きな塊を維持出来なくなったものと考えられる。径間比 0.5 の流木で形成された流木塊は流木塊の剛性が非常に小さくなるものと思われ、流速の上昇によって堆積面積は著しく低下している。以上のことから、ある一定以上の長さを持つ流木で形成された流木塊は、比較的穏やかな水理条件下においては、その構成要素である個々の流木の長さによらず塊全体としての大きさによって堆積量が決まるが、流木長が短くなるにつれ形成される流木塊自体の剛性が低下し、また流速の増加等により流下中の流木塊の振動や橋脚との衝突時の衝撃力が大きくなるため、橋脚に堆積するために必要な剛性の要求も大きくなり、堆積量は減少するものと考えられる。しかし現在のところ流木塊の剛性といったものの充分な定義や水理諸量との関連、及びその定量的な評価には至っておらず、今後さらに検討を進める必要があるものと思われる。

4. おわりに

本研究は、橋脚における流木の堆積現象において、最も顕著な堆積傾向を示す、乱積み状態の流木塊に注目して、その流木塊の橋脚での堆積メカニズムを解明することを目的として行われたものである。その結果以下のような結論が得られた。

- (1) 流木の橋脚への堆積は、投入方法が乱積みみであるかどうかという条件によってその結果が大きく異なり、乱積み状態で塊を形成した場合はその堆積量は大きく増加する。
- (2) 同一流木で形成された流木塊であっても、

その流木塊形成に用いられた本数によって橋脚での堆積頻度は大きく異なる傾向を示す。

- (3) 流木塊の橋脚での堆積は、その流木塊を構成する個々の流木の径間比が 0.8 付近を境として大きく異なる傾向を示し、約 0.8 以下で特に本数の変化に伴う堆積頻度の変化が大きくなる。
- (4) 流木の条件及び水理条件がある範囲内（本実験では径間比 0.75 以上、流量 3.939 l/s 以下）であれば、流木塊の橋脚での堆積面積は流木塊を構成する個々の流木の長さによらず、塊全体の大きさで決定される。しかし径間比の低下、流量の増大によって堆積量は減少する。

参考文献

- 1) 水原邦夫：流木に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1978.
- 2) 中川一・井上和也・池口正晃：流木群の流動に関する研究、京都大学防災研究所年報、第 35 号、B-2、pp.249-266、1992.
- 3) 中川一・井上和也・池口正晃・坪野孝樹：流木群の流動に関する研究(2)、京都大学防災研究所年報、第 36 号、B-2、pp.487-498、1993.
- 4) 中川一・井上和也・池口正晃：流木群の流動に関する研究(3)一流木の回転運動を考慮した解析一、京都大学防災研究所年報、第 37 号、B-2、pp.1-15、1994.
- 5) 福岡捷二・新井田浩：流木類の流下・堆積とそれらの河道設計への利用、土木学会論文集 No.479、pp.51-60、1993.11
- 6) 米元卓介：洪水時に流木が橋梁及び堤防に及ぼす影響と対策、早稲田大学理工学部研究所、17、1961.7
- 7) 奥澤豊：流木の流下と集積に関する研究：河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、第 4 回、pp.141-146、1998.6
- 8) 足立昭平・大同淳之：流木に関する実験的研究、京都大学防災研究所年報第 1 号、pp.41-48、1957.
- 9) 水山高久・石川芳治・福沢誠：流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究、土木研究所報告第 183 号、pp.71-156、1991.
- 10) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩：樹木群を有する河道の洪水位予測、土木学会論文集、447 号/II-19、pp.17-24、1992.
- 11) 望月達也・松尾和巳：橋梁の流木災害に見られる特徴、土木技術資料、第 39 巻、第 5 号、pp.6-7、1997.5

(2000. 10. 2 受付)