

第3章 実験による検討

本目的の遂行のためには、前章の現地被災事例からも判断されるように、流木の諸元や橋梁の諸元（径間長や桁下余裕高）や水理量等、多くの要素を取り込みそれらの条件を組み合わせる実験を行う必要があるため、検討の目的別に効率的な模型水路や実験方法を選定することが重要である。次に各ケースの実験施設や実験方法及び実験結果を示す。

3.1 流木集積の実験（実験Ⅰ）

3.1.1 実験方法

[水路]

模型実験を行う際に、模型縮尺が小さすぎると橋梁での流木集積やその近傍の流れに対して水の粘性による影響が過大となるため、ある程度以上に縮尺を大きくする必要がある（1/50程度以上）。また、側壁の影響が小さく且つ数種類の径間を有する橋梁の模型が設置できるように幅広の水路が良い（水路幅に比例して水路長も有る程度の長さが必要）。さらに、水理量の条件設定の容易性を考慮した水路を用いる。例えば、一定水深で流速を変化させる条件を設定するためには、水路の縦断勾配を容易に変えることのできる水路が有利である。

以上の条件に適切な水路は、図3.1に示すように、水路長50m、水路幅2m（全幅3mを2mに仕切る）、水路縦断勾配0/0～1/100、最大通水流量 $0.4\text{m}^3/\text{s}$ の諸元を有する屋内水路である（拡散実験水路）。この水路内に縮尺1/50の橋梁模型を設置し、上流から流木を投入しその集積と水位せきあげの関係を、種々の項目と条件の下に把握検討した。なお水路床には模型粗度係数 $n_m=0.021$ （現地粗度係数 $n_p=0.035$ ）となるように人工芝を敷き詰めた。この水路を用いて表3.1に示すケースを実験した。

[流木模型の諸元]

流木諸元については、狩野川の調査事例¹⁰⁾から、流木長は10～20m程度のもが多く、最大長は20m程度、流木径は40～60cm程度のもが多く、最大径は約1.2m、平均径は約0.5mとの結果が得られている。これらの値を参考に、流木模型の長さは40cmと20cm、径は1cmと0.5cmとした。流木の比重は、桁下余裕高が小さい時には、比重の小さい方が流木集積は顕著であり、また過去の研究者^{1, 2)}も比重が1より小さな材料を流木模型としたことから、主として比重0.7の流木模型（タイプ1）を用いた。また、関川の現地調査¹¹⁾において0.91～1.1で、実際の流木は根茎を付けた状態のものもあることから、模型上では、比重1.0とし、かつ重心に偏りの有り無しのタイプとした（タイプ2：比重1.0で偏り無し、タイプ3：比重1.0で偏り有り）。さらに流木の形状については、大量の流木模型を使うことから、容易に入手可能な材料として丸棒状のものを用いた。以上の流木模型の諸元をまとめると次の表のようになり、流木形状（流木長、流木径）別の3タイプ計12種類の流木模型を用いた。

形状番号	流木長L (cm)	流木径D (cm)	タイプ(比重と重心偏)	形状
1	40	1	タイプ1～3*)	丸棒
2	40	0.5		
3	20	1		
4	20	0.5		

*) タイプ1：比重0.7で、重心位置が流木長の中央

タイプ2：比重1.0で、重心位置が流木長の中央

タイプ3：比重1.0で、重心位置が偏り（流木長の約1/3の部分に重心）

また、実際の流木は枝葉が付きヨシ等の草本類も多く見られることから、可撓性を有する流木模型も用いて実験した。この流木模型は、長さ40cm、太さ1.2cmと0.5cm、比重約0.8のビニールチューブ製である。

橋梁模型は、橋脚形状としては円形、小判、張出の三種類とし、橋脚の長さ（流下方向長）33cmとし、これを幅2mの水路内で河積阻害率が5%になるように（ケース1-10とケース1-17を除く）、橋脚の幅と設置本数を組み合わせた次の条件で図3.2に示すように設置した。なお上部工を設置したケースでは、橋桁と欄干（両者合わせた高さは5cm）を取り付けた。

		2 径間 (橋脚 1 本)	3 径間 (橋脚 2 本)	4 径間 (橋脚 3 本)	5 径間 (橋脚 4 本)	6 径間 (橋脚 5 本)	
橋脚幅		10.0cm	5.0cm	3.3cm	2.5cm	2.0cm	
径間長		95.0cm	64.2cm	48.3cm	38.8cm	32.3cm	
流木長／ 径間長	流木 長	40cm	0.42	0.62	0.83	1.03	1.24
	20cm	0.21	0.31	0.41	0.52	0.62	

[流木模型の投入方法と集積率]

前述の流木模型の投入方法と流木集積率の整理方法は、次に示す「単独投入」と「集団投入」の2通りとした。

○単独投入（実験1-1～1-17）

流木集積には多くの要素が関与していると考えられるため、“支配的な条件の当たりをつける”意味で、まず実験1-1～1-17において以下に示すような投入方法で流木集積を求めた。

橋梁模型の2m上流地点から、水路幅中央の位置に設置した1本の橋脚に衝突するように200本の流木を1本ずつ約2秒間隔で投入し、橋脚に接触した流木の流下形態（以下の①～③）から判断して、一時集積しかけたものを含めて「集積した」と見なして流木の集積率を求めた。このような整理方法とした理由は、実際における流木集積のメカニズムは、「流木が橋脚または径間に引っかかるのは偶発的であり、初期に一部集積しかけたことが契機となって流木集積が急激に進行する」と考えられ、安全側の結果が得られる。

①集積しない……橋脚に接触はしたが橋脚の側壁沿いをすり抜け流下する形態。

②集積しかけた…橋脚に衝突し一時集積する。その後すぐに流況の変動等により流下する形態。

③集積した……橋脚に5秒間以上集積する形態

したがって、集積率 = (集積した本数 + 集積しかけた本数) / 橋脚に接触した本数

また、橋梁模型の2 m上流地点における流木投入の方向は、流れに平行（縦）と直角（横）の2種類とした。

○集団投入（実験1-18～1-36、実験2-1～2-7、実験3-1～3-4）

集団投入の方法が実験シリーズによって若干異なるため、シリーズの異なるケースの比較において厳密な定量的判断ができないが、定性的判断は十分できると考えられる。以下に実験シリーズ別の集団投入方法を示す。

・実験1-18～1-36

図3.3及び写真3.1に示すように、橋梁模型の6 m上流地点において底面が40cm×200cmの金網を有する流木投入装置を作製し、その金網上に流木を一定数敷き並べ（流れに直角方向）投入装置を水没させて流木模型を一気に流下させる方法とした。集積の有無は次のような状態で判断した。

①集積した……流木が橋梁に衝突後、約20秒間以上集積した。

②集積しない……流木が橋梁に衝突後、約20秒間以内で流下した。

したがって、集積率 = 集積した流木本数 / 投入した流木本数

1 ケース当たり同一条件で10通水行い、各通水別に集積率を求め、その最大値や平均値等を整理した。

・実験2-1～2-2

ケース2-1～2-2における流木投入方法で前述の実験1との相違点は、図3.4及び写真3.2に示すように、投入装置の大きさ（底版の面積：160cm×200cm）と流木投入位置（橋梁模型の12m上流地点）及び流木800本を一気に投入した点である。なお1 ケース当たりの繰り返し通水は実験1と同様の10通水とし、集積の判断は橋梁に衝突後約30秒経過した時点で集積している流木本数をカウントした。

・実験2-3～2-7と実験3-2～3-4

流木をさらに大量に投入する本ケースでは、ケース2-1～2-2の実験と同様の投入方法では、橋梁上流側で水面の乱れが大きくなり集積率に影響を与えられたと考えられた。これより、図3.5及び写真3.3に示すように、橋梁模型の12m上流地点から流木100本づつを30秒間隔で16回に分けて投入し（投入装置の底版面積は約1㎡、水面上約30cmの高さから投入）、これを1通水とし1 ケース当たり10通水行った。集積の判断は橋梁に衝突後約30秒経過した時点で集積している流木本数をカウントした（投入本数400本、800本、1200本、1600本の各段階において、橋梁をすり抜けてきた流木本数を水路下流端で捕捉し、これを投入本数から差し引いた）。

・実験3-1

ケース3-1では、流木投入の密度による集積の影響を把握するために、流木の投入密度を3通りとして（20本ずつ20回に分けたものと50本ずつ8回に分けたものをそれぞれ30秒間隔で橋梁の12m上流から水路全幅に投入、さらに1本ずつ1秒間隔で50本を橋梁に衝突するように連続的に水路中央の橋梁から12m上流地点から投入）実施した。集積の判断は実験2と同様である。

3.1.2 実験結果

○単独流下実験（橋桁無）

流木模型200本を1本ずつ流下させた条件を「単独流木流下実験」として、橋桁無しの場合におけ

る実験結果を次に示す。

図 3.6 は、流木の流下方向と集積率の関係について、長さ $L=40\text{cm}$ 、径 $D=1\text{cm}$ の流木模型のタイプ別（比重及び重心が異なる）をパラメータとして示したものである（実験 1-1～1-2）。この場合の橋は、水路中央に小判型、張出型、円柱型の各橋脚 1 本を設置し橋桁の無い条件として、流木模型が橋脚に一時的に留まりかけたものも含めて「集積」と定義し、橋脚 3 種類での集積率を平均したものである。この図より集積しやすい傾向は、比重が 1.0 で重心が偏らない流木の場合であり、この流木の流下方向が縦断方向よりも横断方向の場合（橋脚の長手方向に対し直角）に卓越することがわかる。

図 3.7 は、図 3.6 と同一のデータを用い橋脚形状をパラメータにして、流木の流下方向と集積率の関係について示したものである。集積率の値は流木タイプ 3 種類での平均値である。これより流木の集積は、橋脚形状にあまり係わず、流木を横断方向に流下した場合に卓越することがわかる。

図 3.8 は、橋の条件は小判型の橋脚を水路内に 1 本～4 本設置し（河積阻害率を一定の 5% とし）、長さ $L=40\text{cm}$ 、径 $D=1\text{cm}$ の流木模型を用い、流木長径間長比と集積率の関係について流木タイプ別をパラメータに示したものである（実験 1-1～1-4 の小判型のケース）。なお、どれか一本の橋脚を狙って流木を縦断方向と横断方向に流下したデータを対象とした。同図より、比重が 1 で重心が偏らない流木が集積しやすいことがわかる。また流木長径間長比が大きくなると（径間長に対して相対的に流木長が長い）集積しやすい傾向にあるものの両者あまり明確な関係は見られない。

図 3.9 は、流木諸元と集積率の関係について、橋脚本数（径間長）をパラメータに示したものである。なお、流木のタイプ、流下方向、橋脚形状は一定条件とし（比重 1.0 で重心が偏っていない流木を横断方向に流下、小判型橋脚）、橋脚本数（径間長）は橋脚の河積阻害率を 5% の一定条件として 1 本～4 本設置した。これより、長さ $L=40\text{cm}$ では長さ $L=20\text{cm}$ に比べて、細い流木の場合に（径 $D=0.5\text{cm}$ ）集積率が高くなっている。これは、流木の長さがある程度以上長ければ細い方が集積しやすいことを意味しており、橋脚形状や水深及び河床勾配が異なってもこれは同様であることから（図 3.10～図 3.12 参照）、流木の弾性も集積の一要因であると考えられる。

以上の実験によって、「それほど水位が高くなく橋桁の影響がない場合に流木が 1 本ずつ流下してくる時には、流木の比重（比重 1.0 で重心が偏っていない場合に卓越）と流木の流下方向（横断方向の場合に卓越）及び流木の長さや径が支配的な要因となる」ことがわかった。一方、流木長径間長比についてはあまり明確な傾向が得られなかったが、実河川では径間が狭く橋桁までの桁下余裕高が小さい橋梁において流木集積が顕著であることから、次の段階では、橋桁の有無等の条件に注目して実験する必要があると考えられた。

○単独流下実験（橋桁有）

「単独流木流下実験」で橋桁が有る場合の実験結果について次に示す。なお本実験では、水面に浮くような比重の小さな流木を用いた方がより流木が集積しやすく、安全側の結果を得ることができるとの考えより、流木タイプは比重 0.7（重心偏り無し）のみ用いた。

図 3.13 は、桁下余裕高（橋桁から水面までの距離）と集積率の関係を流木諸元（長さや径）をパラメータに示したものである。なお、小判型の橋脚を水路中央に 1 本設置した条件である。これより、桁下余裕高が支配的であり、桁下余裕高が大きく流木長が短い場合に（太さにはあまり係わず）集積率が小さくなる傾向にあることがわかる（このような状況は橋脚形状に係らず一定の傾向であ

る)。以上のように桁下余裕高が小さくなると、橋脚部分だけでなく橋桁にも流木が接触し引っ掛かり易くなる。一度流木が引っ掛かると桁下余裕高がさらに小さくなるため、流木が連続して流下してくると流木集積がさらに進行すると推測されることから、連続して流木投入の条件で実験する必要性が高いと考えられる。

○集団流下実験

前述の単独流下実験（橋桁有）から、水面から橋桁までの桁下余裕高が小さい場合に流木が連続流下する条件で検討する必要性が高いことがわかり、この条件を「集団流下実験」と称して検討した。次にその結果を示す。

流木の集積にとって流木長径間長比 γ が主要な要素であることから²⁾、集積率と γ の関係を整理した（流木長は一定で、径間を変えることによって γ の値を変えた）。図3.14はその結果の一例であり（実験1-18～1-22）、水深22cm、桁下余裕高0cmの橋梁に、比重0.7、長さ40cmは一定で、径が2種類（0.5cm及び1.0cm）の流木を同数そろえて（総数50本～300本）一気に投入した実験のデータを整理したものである。なお同図に同一条件10回通水分のデータから求めた平均値、最大値、最小値を示した。同図より次のことが確認される。

- ・ 図3.14の各図は、流木本数（径が0.5cmと1.0cmの流木の合計）50本、100本、150本、200本、300本にそれぞれ対応したものである。これより流木集積率は、流木の径にはあまり関わらず、流木本数が多く流木長径間長比 γ が大きいほど高い傾向を示す（流木集積率のデータにバラツキはあるが、流木の径よりも流木本数との関わりの方が強く、流木本数が多いほどそのバラツキは小さい）。
- ・ 流木長径間長比 γ が約0.5より大きくなると流木の集積率が急増し、この状況は流木本数に係わらず、米元論文での γ 値（桁下余裕高が無い時）とほぼ同程度である。このことは換言すれば、径間の約5割以上の長さを有する流木が流下してきた場合には集積が顕著になることを示す。

以上のように、 γ がある一定値以上になり流下してくる流木本数が多くなると、流木の集積率は確実に急増する傾向があることがわかった。この流木本数の影響についてさらに整理した一例を図3.15に示す。同図は、図3.14と同一実験の平均値データを用いて流木本数別の「 γ ～集積率」の関係を示したものである。同図における凡例の数値は、0.4m×2mの面積における流木本数を示し、「300本」の時がほぼ流木が隙間無く水面を覆っている状態に相当する。また図3.15のデータを用いて、 γ をパラメータとして集積率と流木本数の関係を示したものが図3.16である。これより、流木本数と集積率にはほぼ正の相関があり、 γ が大きいほど集積率の変化が大きいことがわかる。このことは γ が大きい場合ほど、流出する流木量を精度よく見積もることが重要であることを意味する。

図3.14～図3.16は、桁下余裕高ゼロで、流木比重0.7、流木長40cm、流木径1.0cmと0.5cmの条件下での実験結果であり、概略の特性を把握するという観点から危険側の条件での検討結果である。さらに検討の精度を上げるためにこれらの条件を変えた実験を行った。図3.17は、流木投入本数200本、桁下余裕高ゼロ、流木長40cm、流木径1.0cmと0.5cmの条件で、流木比重の異なる2種類の流木（比重1.0と0.7）を用いた実験データ（1ケースで10回通水から得られたデータの最大値、平均値、最小値）から集積率～ γ の関係を整理したものである。これより、比重の小さい方が集積率は高くなっている。写真3.4に示すように、 γ が小さい内は橋脚周辺に、 γ が大きくなると橋桁も含めて、それぞれ流木集積が生じ、比重の小さい方が当然、橋桁に集積しやすくなるため、このような結果と

なったものと考えられる。実河道において比重の小さい流木が卓越する場合には、集積率が上昇する傾向があることに留意する必要がある。

桁下余裕高の影響について整理したものが図 3. 18 である。同図は桁下余裕高以外は図 3. 17 と同一条件の実験について集積率 $\sim\gamma$ の関係について桁下余裕高をパラメータに整理したものであり、通水10回中の平均値（図 3. 18(1)）、最小値（図 3. 18(2)）、最大値（図 3. 18(3)）をそれぞれ示す。これより桁下余裕高の大きい方が流木集積率が低くなる傾向にあるが、桁下余裕高 2 cm（流木径の約 2～4 倍程度）程度では桁下余裕高ゼロとほぼ同様であり、それ以上の桁下余裕高にしなければ集積率を低下させる効果が得られないと言える。また、平均値と最大値の結果からは、流木長径間長比 γ が約 0.5 を超えると桁下余裕高に係わらず流木集積率は急増するが、最小値の結果では、桁下余裕高がある程度大きいと流木長径間長比 γ が約 0.5 を超えても流木集積率は急増しないことがわかる。これは、桁下余裕高及び流木長径間長比 γ が一定値以上に大きくなると、流木集積の不確実性は高く（バラツキが大きく）、集積率の最小値が極端に小さくなる傾向があることを意味する。実際には、桁下余裕高の大きい橋梁において一度の出水で流木集積が少なく安全度が高いことが実証されても、同様の出水が再来した場合には、かなりの集積が起り得る可能性があることを示している。つまり、流木長径間長比 γ を小さくする（径間長を流木長に対して相対的に長くする）ことが効率的であることを示唆するものである。

図 3. 18 は、桁下余裕高による集積率の違いを流木長 40 cm の場合について示したものであるが、流木長を変えた場合の状況について図 3. 19 に示す。同図は流木長 30 cm とした場合の通水 10 回の平均データから $\gamma\sim$ 集積率の関係を桁下余裕高別（0, 2, 4 cm）に示したものである。これより、図 3. 18(1)の流木長 40 cm の場合と比較して極端に集積率が小さいことがわかる。これを詳しく調べるために、流木長 20 cm のケースを追加して同一の水理条件と流木投入条件下で実験した。図 3. 20 は、流木長別に γ と集積率の関係を示したもので、通水 10 回の平均値、最小値、最大値について、それぞれ整理したものである。同図より、流木長が長いほど集積率が高くその差が著しいことがわかる。この実験で投入した流木本数はいずれの流木長においても 200 本と同一であるが、流木量（流木の体積）については各ケースで異なり流木長に比例することになる。流木量の影響について前述の図 3. 15 の結果を参考にすると、集積率とほぼ比例関係にあるが（図 3. 16 は流木長 40 cm のみではあるが、流木長が異なっても同様であると考えられる・・・）、図 3. 20 では集積率にそれ以上の差が生じており、流木量の差だけでは説明できない。そこで橋脚部に集積した流木の状況を見ると、流木長が長い場合に橋脚を支点としたシーソーのような動きが卓越しており、「橋脚周辺の流れと流木の動きの関係」が流木長によって異なることが集積率の相違につながったものと考えられる。つまり、流木中央部が橋脚に衝突し橋脚が支点になったシーソーの状態のようになると、橋脚周辺の流れの乱れに起因して流木が橋脚を支点に前後上下に動き、一部は橋桁に接触することになる。その後、流木が次々に流下してくると下流に抜け出にくくなって流木集積が助長される。このことでさらに橋梁上流での水位せきあげが大きくなって流速が小さくなるため、流木集積がさらに加速される。この状況は流木長が長いほど顕著であると考えられることから、同一の流木長径間長比でも流木長の長い方が集積しやすいことになり、現地河川において流下してくる流木の長さを把握することの重要性を示唆するものである。

これまでの実験では 800 本の流木を一気に投入した場合が流木量の最大条件であり、図 3. 16 から「 γ と集積率には正の相関があり、 γ が大きいほど流出する流木量を精度よく見積もることが重要で

ある」ことが明らかとなった。この流木量800本の総投影面積は橋梁部通水面積の約6倍 ($0.4\text{m} \times 0.0075\text{m} \times 800\text{本} \div 0.4\text{m}^2 = 6$) となる。この量が模型で約2秒間で流下するとして現地換算すると、「通水面積の約6倍の投影面積を有する流木量が、約15秒間で一気に流下してくる」ことに相当する。余笹川等の流木被災¹²⁾ 実態においては一洪水で集積した流木の総量（投影面積）は通水面積の約3倍であったことから、その約2倍の量の流木がわずか15秒間で一気に流下してくるとは考えにくい。つまり図3.16の流木本数が多い（密度の高い）ケースは、対象橋梁の直上流で河岸浸食に伴う河畔林の流出など特別な条件下での結果と言える。そこで現実的な現象を考慮して、妥当な一定密度で流木が次々と長時間流下してくる条件で（橋梁模型の12m上流地点から、1回当たり流木100本を一気に、30秒間隔で4回～16回連続投入し、流木100本及び400本毎の集積率を計測）、桁下余裕高、可撓性の各要素が集積率に与える影響について実験した。次にその結果を記述する。

〔桁下余裕高〕

図3.21(1)は、桁下余裕高がゼロの場合における流木本数と集積率（流木400本毎の集積率データ）の関係を流木長径間長比別に示したものである。いずれの γ においても流木本数と集積率には正の相関があり、 γ が大きいほど高い集積率を示すことがわかる。集積率を図3.16と比較すると、 γ の大きな場合は流木密度にあまり係わらず集積率が高いが、 γ が小さな場合は密度の影響を受けやすい。つまり、 γ が小さい場合は大量の流木が一気に流下してくるかまたは徐々に流下するかによって集積率に差が生じ、一気に流下する場合の方が集積率は高い。一方図3.21(2)は、桁下余裕高が無限大の場合（＝橋桁が無い場合）における流木本数と集積率の関係を図3.21(1)と同様に流木長径間長比別に示したものである。 γ が0.83以下では流木本数が多くなっても流木集積は生じない。実際に橋脚だけの橋梁はあり得ないが、桁下余裕高が大きい場合には、流木量がいくら多くても径間長がある程度以上あれば流木集積は生じないことを意味し、その値は、流木長径間長比 γ は0.8程度以下で（流木長を20mとすれば径間長は25m以上）、桁下余裕高は水深相当以上と考えられる。

図3.22は、流木長径間長比 $\gamma = 0.83$ の場合における流木本数と集積率の関係を桁下余裕高別に示したものである。流木本数が少ない場合は桁下余裕高による集積率に差はあまりないが、流木本数が多くなると桁下余裕高が小さいほど集積率が高くなる傾向が見られる。このことは、桁下余裕高が小さい橋梁を有する河川ほど流木がどの程度の量が流出してくるかを見積もることが重要であることを示唆するものである。

〔可撓性〕

実験では主に円柱状の棒（棒状流木）を流木模型として用いており、これは殆ど流れによって撓まない素材である。実際の流木は、枝葉が付いておりまたヨシ等の草本類も多く見られることから、可撓性を有する場合の流木集積について検討した。図3.23は、可撓性のある流木（可撓性流木）と可撓性の無い流木（棒状流木）の結果（桁下余裕高ゼロ、 $\gamma = 0.42$ ）を図3.21と同様に整理し比較したものである。これより、棒状流木は流木量と集積率には正の相関があるが、可撓性流木の場合には流木量にかかわらず集積率はほぼ一定値を示す。このように可撓性流木の場合に流木量が増加しても集積率があまり増加しない理由は、流木集積量が増加しても流水の抵抗を少なくするように流速の増大に対応して可撓性流木が撓み、橋梁上流の流況（水位せきあげ、流速）が大きく変化しないことが考えられる。実現象としてはこの棒状流木と可撓性流木の間にあると考えられるが、可撓性流木が卓越するほど集積率の増加が小さい傾向にあると言える。

可撓性流木の γ による集積率の相違について、橋桁無の条件で比較したものが図3.24である。これより、流木量にかかわらず集積率がほぼ一定の傾向（図3.23、桁下余裕高ゼロの可撓性流木のデータと同様）は棒状流木と異なるが、 γ が小さい場合に集積率が小さいことは棒状流木と同様である。これは、 γ が小さいほど同一の太さの可撓性流木であれば撓みにくく、棒状流木に近い状態になるためと考えられる。

〔河床勾配〕

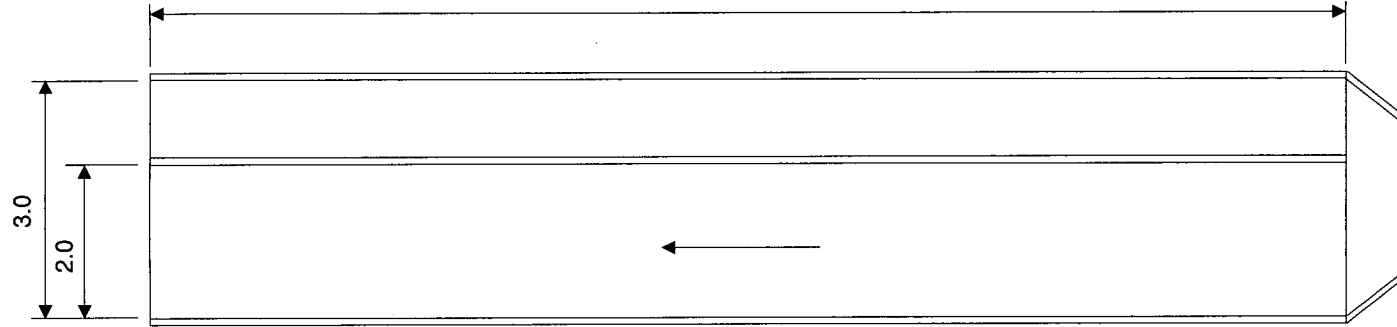
図3.25は、橋桁有り（桁下余裕高ゼロ）で棒状流木を用いた条件での流木集積率を水路勾配別に示したものである。これより、いずれの水路勾配においても流木投入本数と集積率に正の相関が見られるが、水路勾配が小さい（河道下流部）ほど集積しやすい傾向がある。またいずれの水路勾配でも流木長径間長比 γ が大きいほど集積しやすい傾向にあるが、水路勾配が大きいほど流木長径間長比 γ が集積率に支配的に働く。つまり、河道下流部よりもセグメント1の河道上流部のほうが、径間を少し広げることによって流木の集積率を効率的に低下させることが可能であると言える。

〔水深〕

図3.26は、流木長径間長比 γ 毎に集積率と流木量の関係を示したものである。水深の異なる2ケースの比較にあたっては、橋梁及び流木の条件（流木長40cm、比重0.7、桁下余裕高ゼロ）及びフルード数 Fr の各条件を同一とした（水深 h 、フルード数 Fr 、流速 v は独立変数ではないので、 Fr と v の両者を一定として h だけを変化させることはできない。そこで、 Fr のみをほぼ同一条件として水深による集積率の違いを検討した）。同図より、流木長径間長比 γ が大きく水路勾配が小さいと集積率が高い傾向にあり流木量と集積率はほぼ比例関係にあることは水深に係わらない。しかし、水深10cm（流木長水深比 $L/h=4$ ）の方が水深22cm（ $L/h=1.8$ ）よりも集積率が高い。一定水路幅での水深と河積は比例関係にあることから、流木量は同一でも河積に占める流木量は水深によって異なることになるため、この集積率の相違は単純に水深だけの影響ではないことになる。実河道の上流部では、下流部に比較して一般に河床勾配が急で水深が小さい。河床勾配については大きいほど集積率は低く、水深については小さいほど集積が高い傾向にあることを実河道に応用すると次のようになる。河道上流部では下流部に比較して、河床勾配の影響で集積率は低く、水深の影響で集積率は高くなる傾向を有する。したがって、上流部下流部どちらで集積率が高くなるかは河床勾配と水深のどちらが支配的であるかによって決まる。一般に上下流の違いは水深より河床勾配の方が支配的とすると、 γ や流木量の条件が同一の場合上流部の狭窄部等を除き河床勾配の緩い河道下流部の方が集積率は高くなると考えられる。

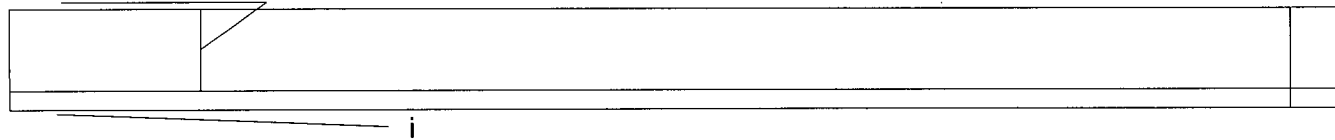
平面図

水路延長 50m



側面図

最大水深 70cm



断面図

実験水路幅 2.0m

対象橋脚

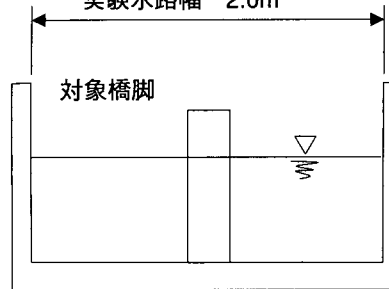
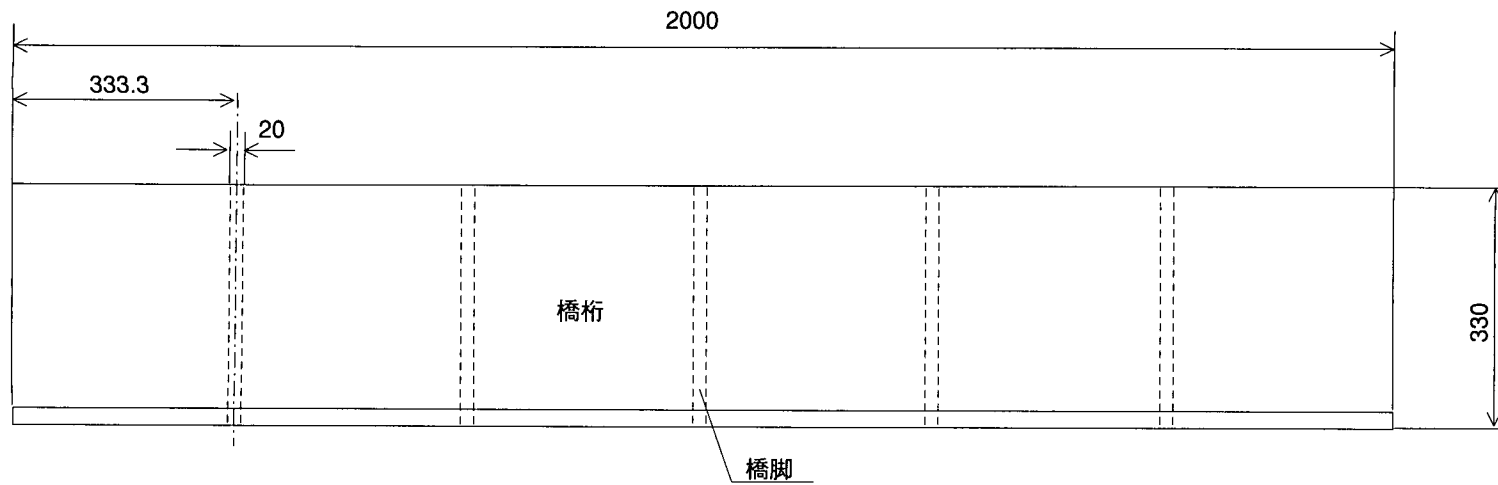
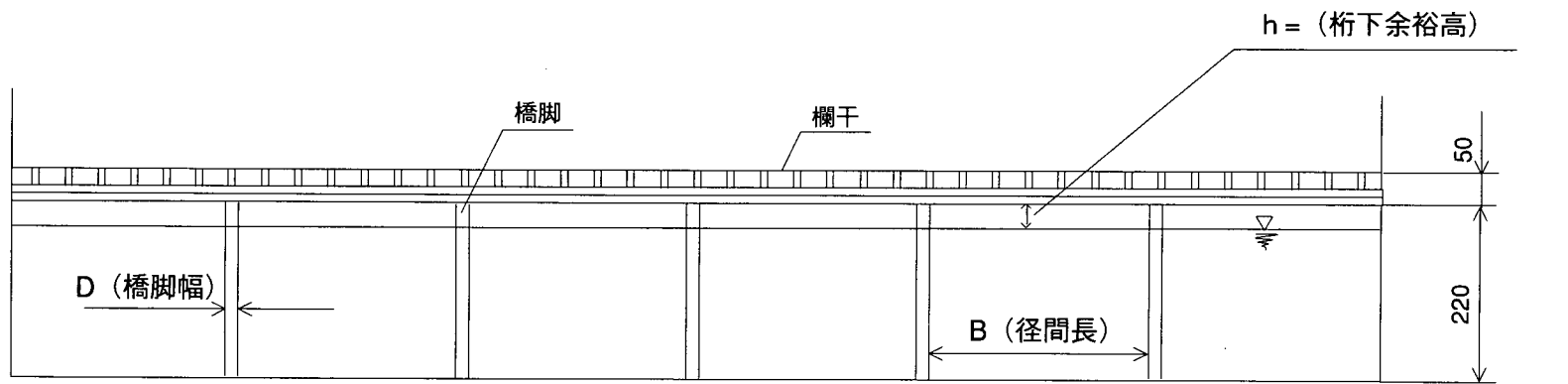


図 3.1 実験水路 (実験 I、実験 II)



平面図



正面図

[単位：mm]

図 3.2 橋梁模型詳細図 (橋脚 5 本、小判型橋脚の例)

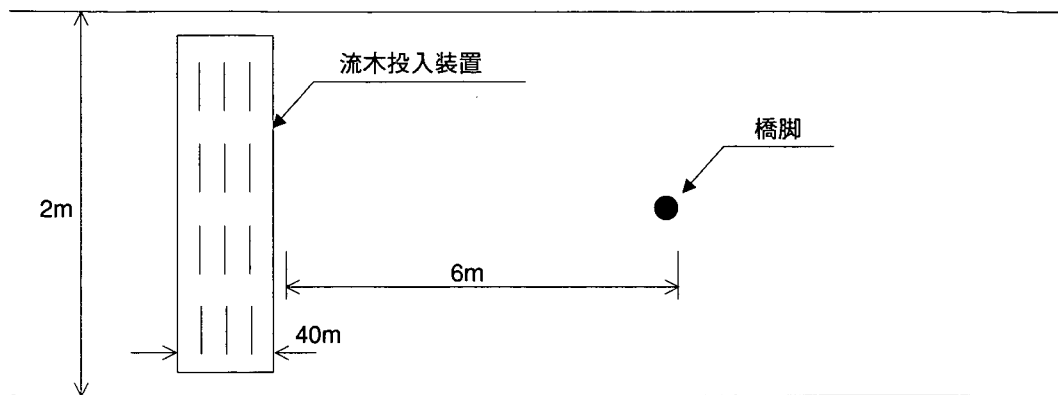
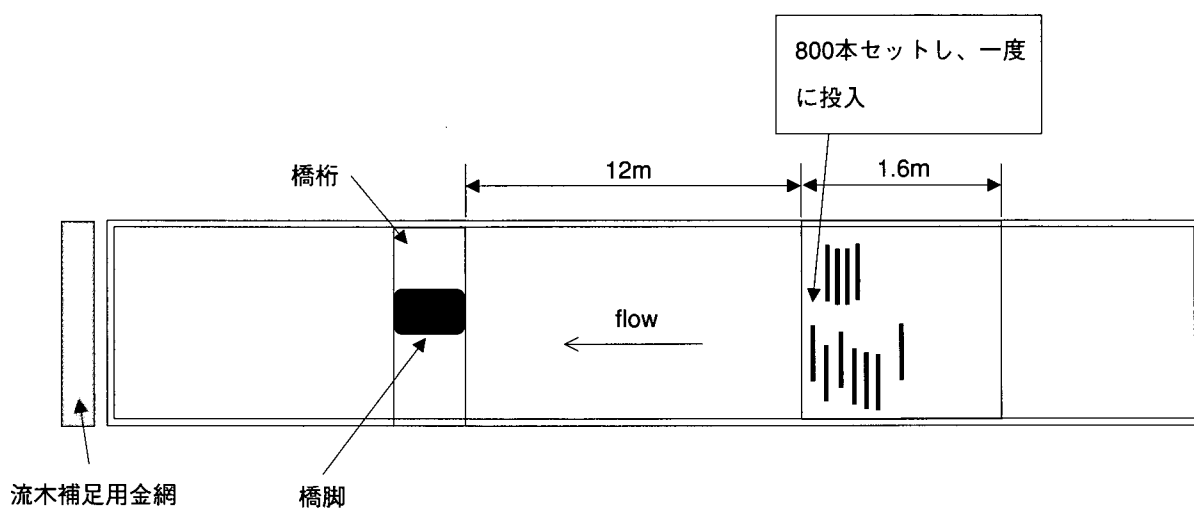
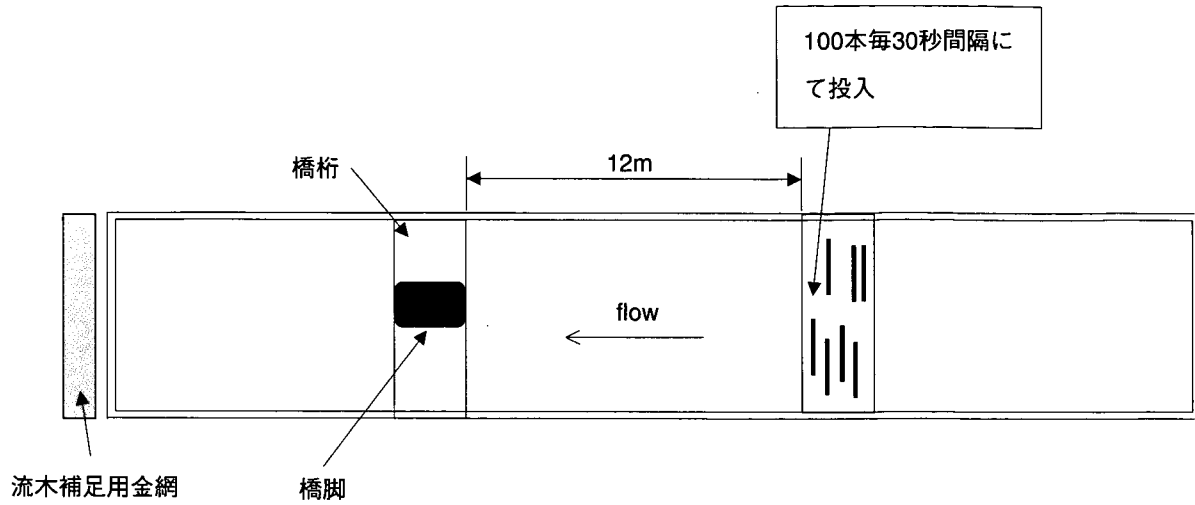


図 3.3 流木投入方法 (実験 1-18~1-36)



平面図

図 3.4 流木投入方法 (実験2-1、2-2)



平面図

図 3.5 流木投入方法 (実験2-3~2-7、実験3-2~3-4)

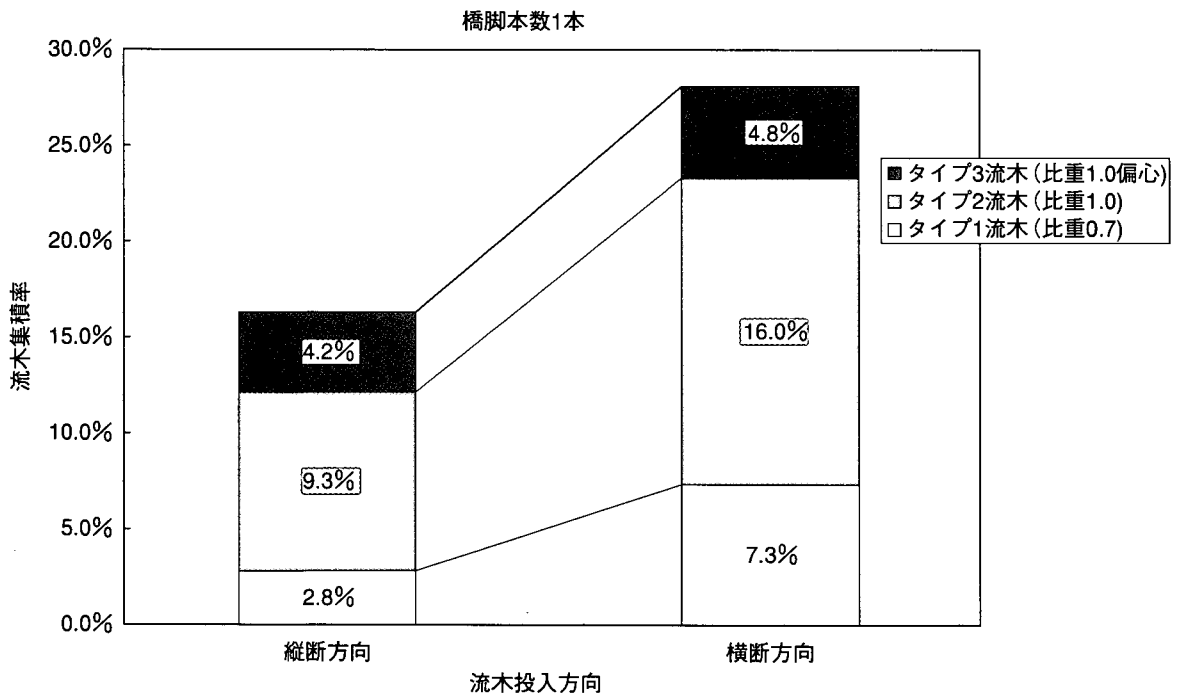


図 3.6 流木タイプ別の流木投入方向と集積率の関係 (実験 I の単独流下のケース)

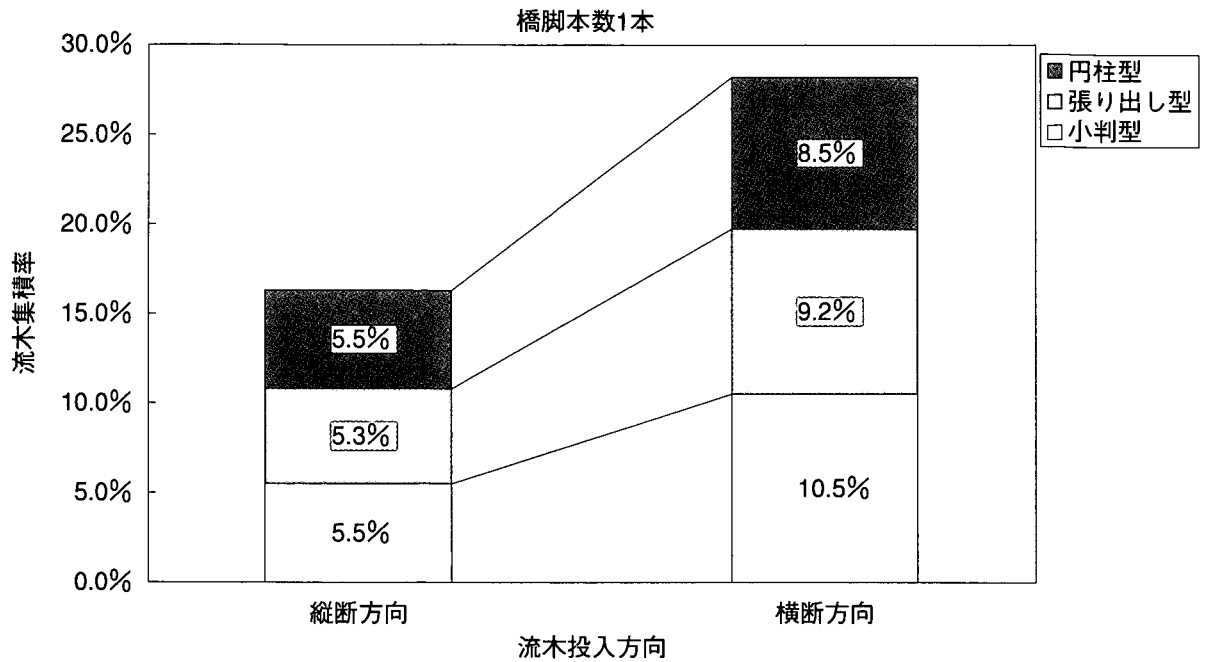


図 3.7 橋脚形状別の流木投入方向と集積率の関係 (実験 I の単独流下のケース)

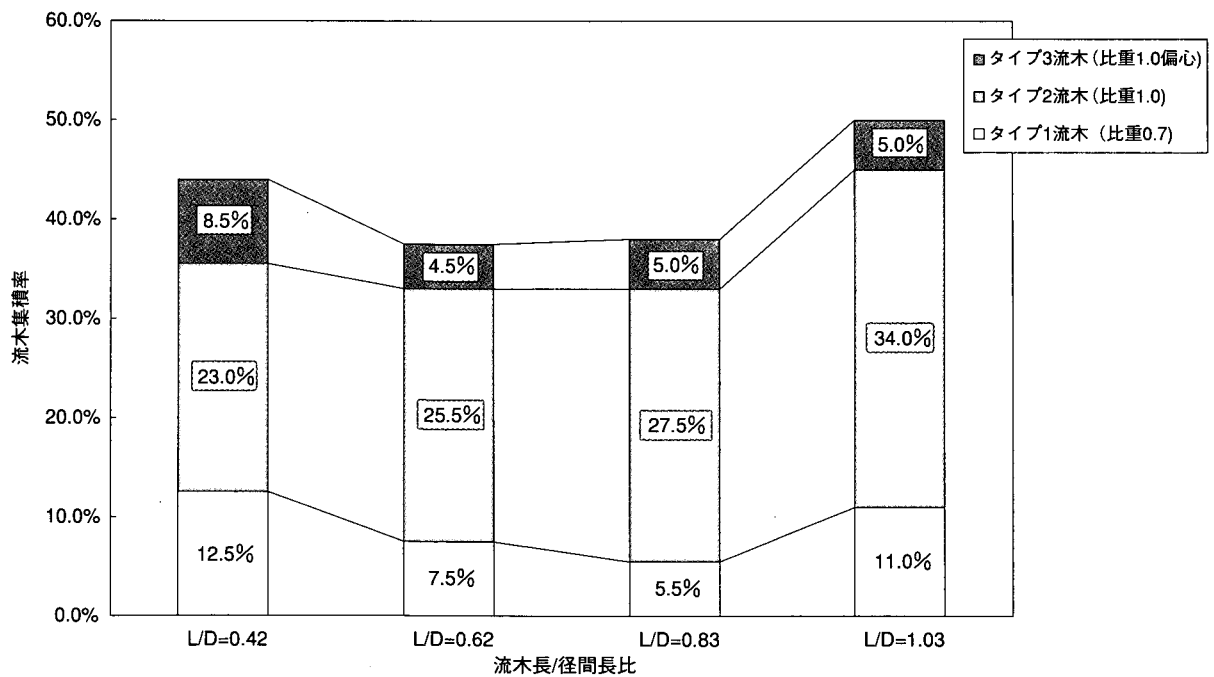


図 3.8 流木タイプ別の流木長径間長比と集積率の関係 (実験 I の単独流下のケース、小判型橋脚)

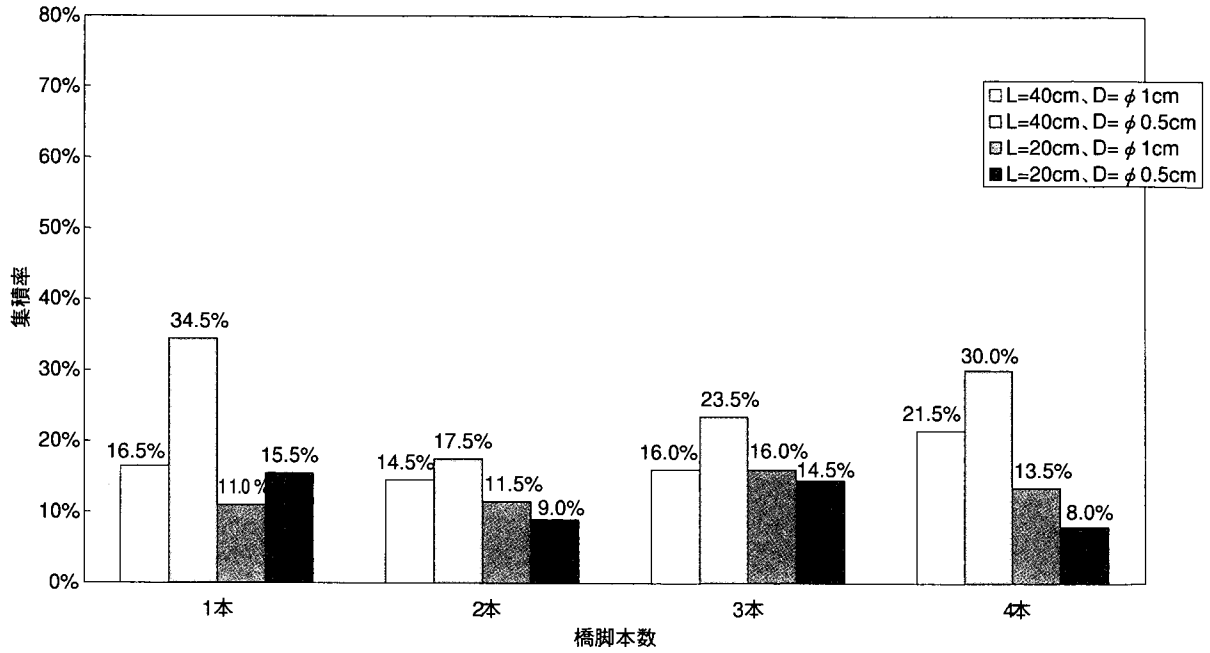


図 3.9 流木諸元別の橋脚本数と集積率の関係（実験 I の単独流下、タイプ 1 流木、小判型橋脚）

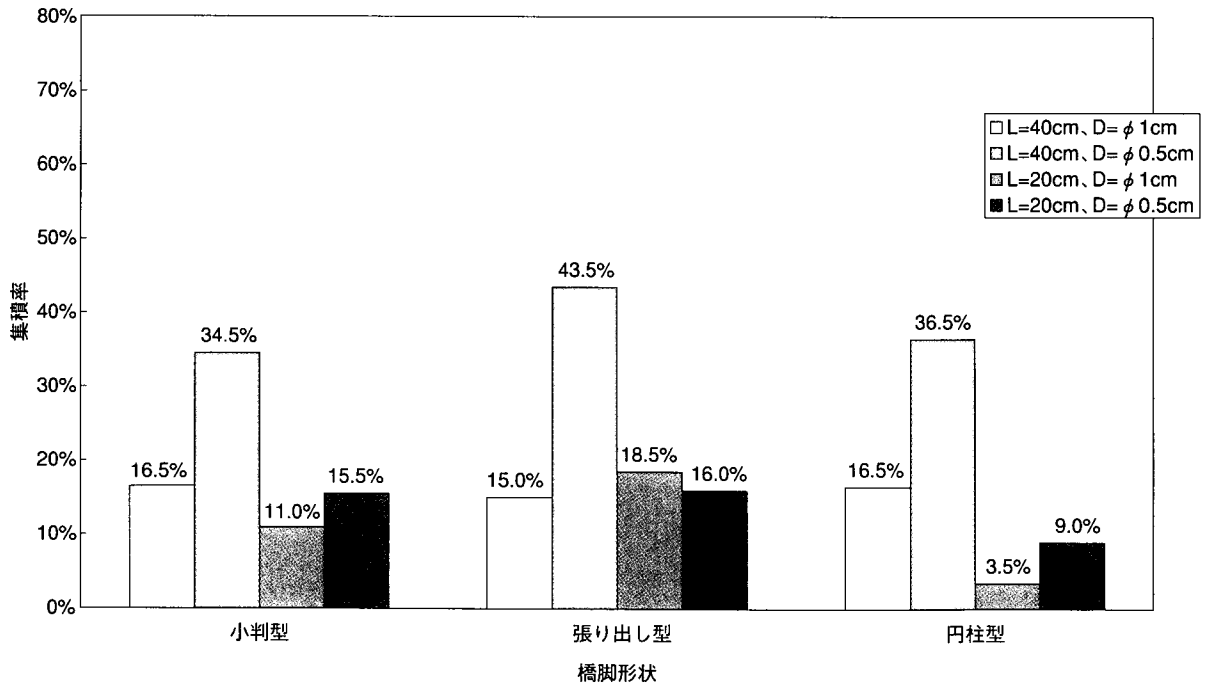


図 3.10 橋脚形状と集積率の関係（水深22cm、実験1-5）

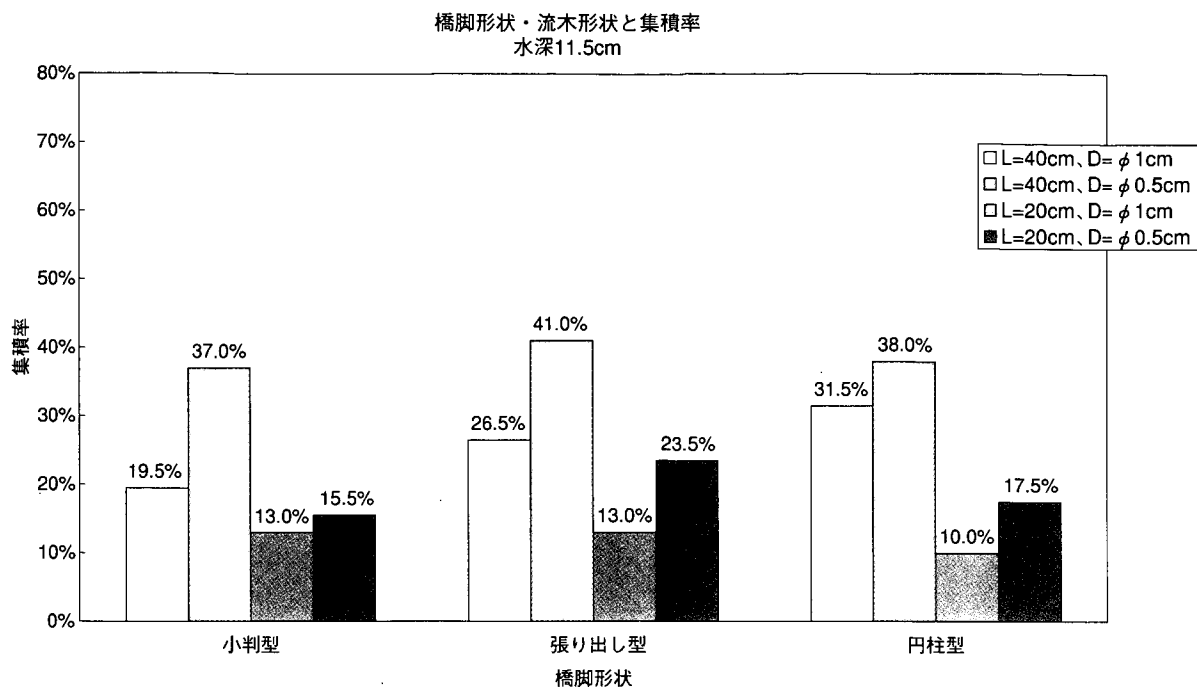


図 3.11 橋脚形状と集積率の関係（水深11.5cm、実験1-7）

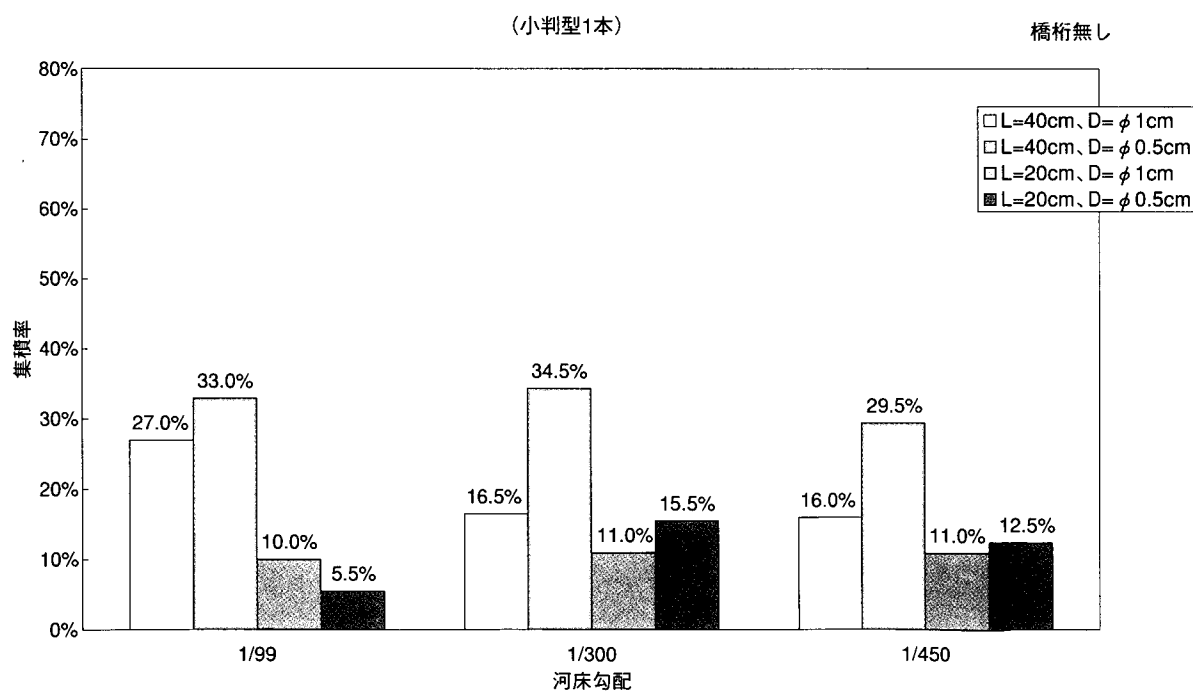


図 3.12 河床勾配と集積率の関係（実験1-8、1-5、1-15、小判型橋脚）

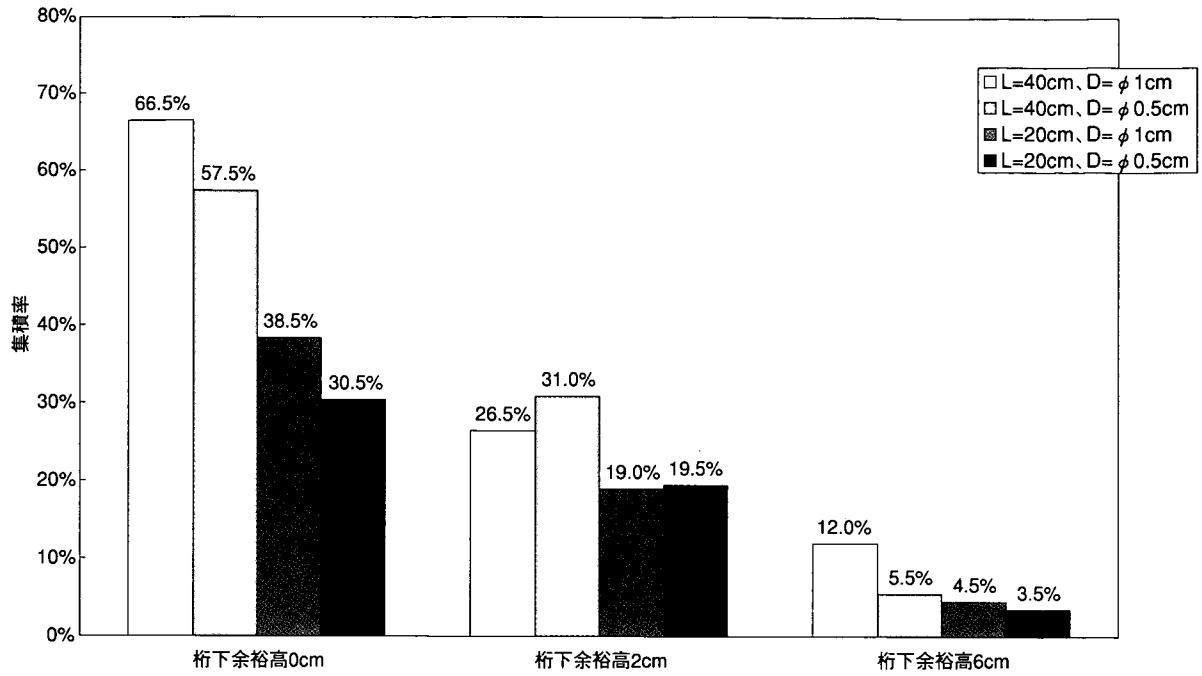


図 3.13 桁下余裕高と集積率の関係（実験1-11、1-13、1-14、小判型橋脚）

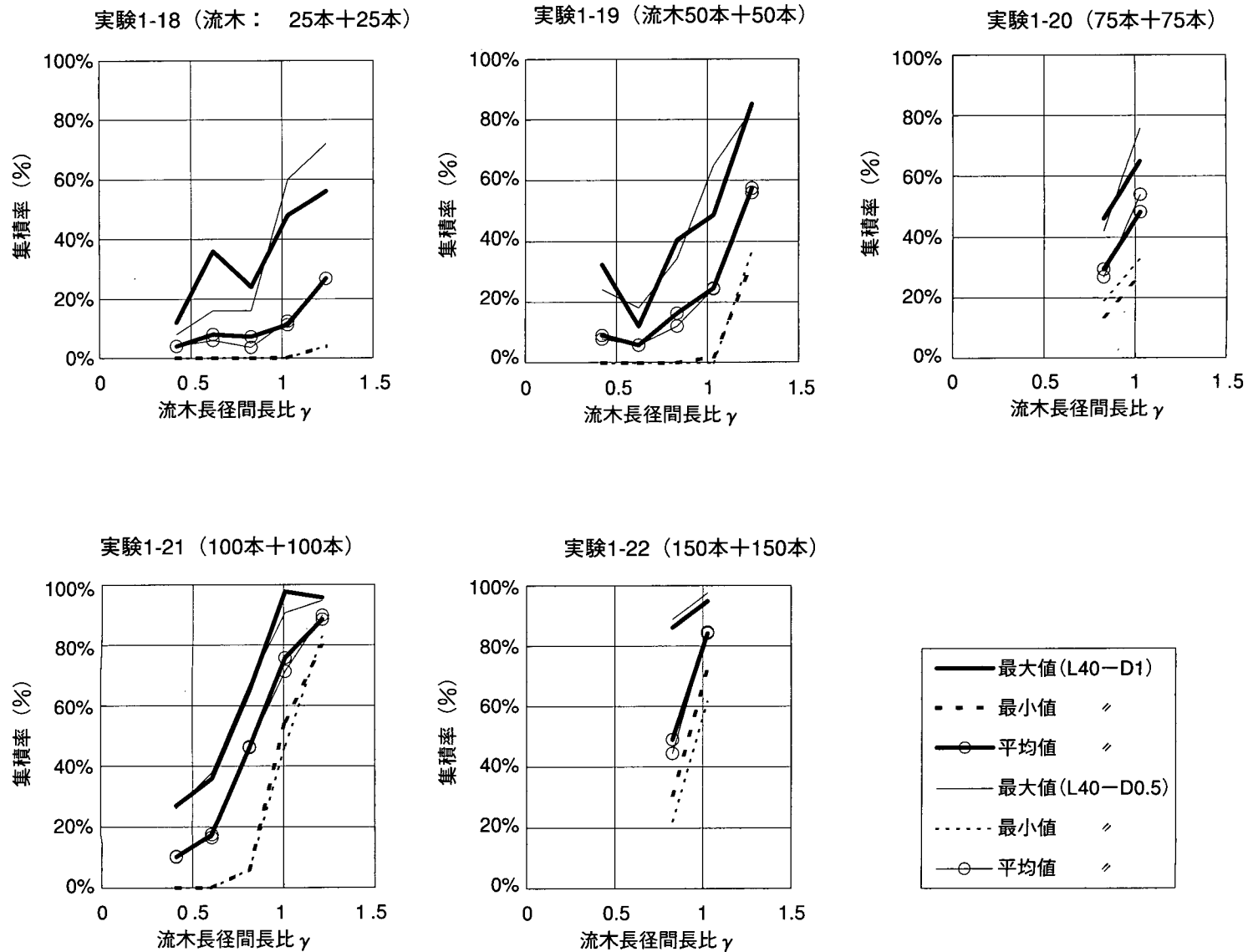


図 3.14 流木諸元 (長さL、太さD) 別の流木長と集積率の関係 (水深22cm、桁下余裕高0cm、実験1-18~1-22)

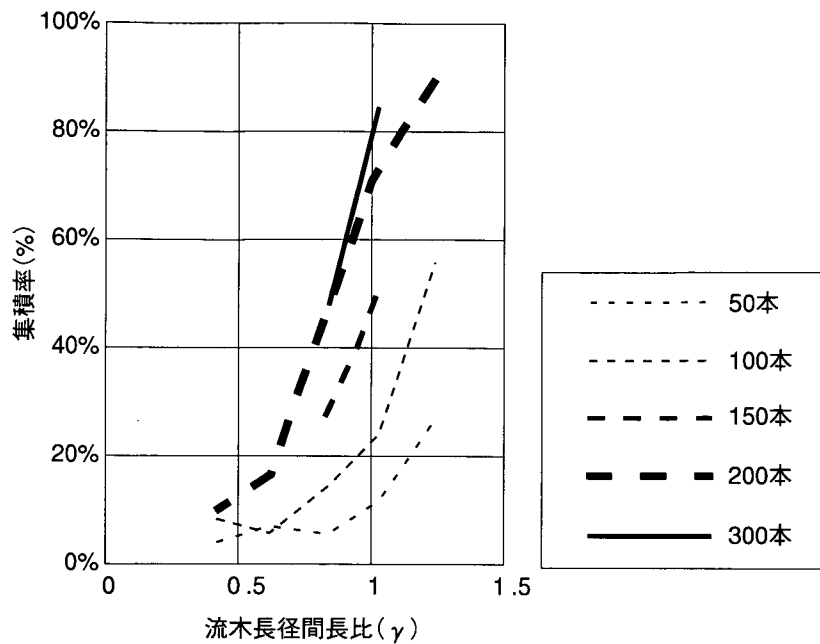


図 3.15 流木本数別の γ と集積率の関係

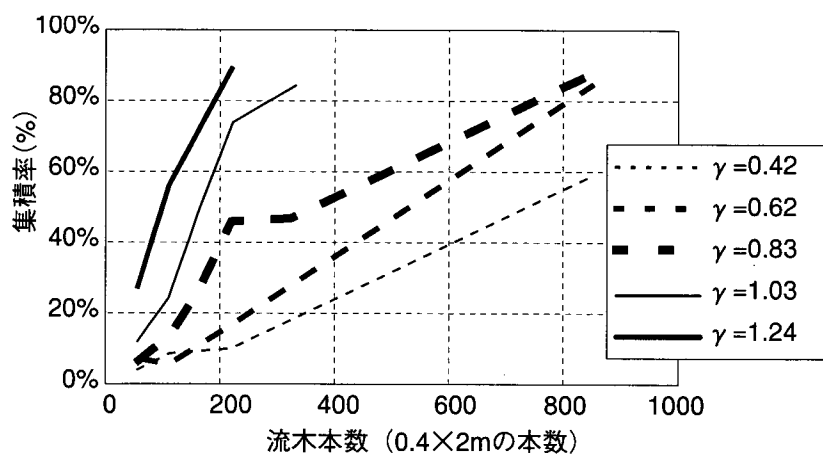


図 3.16 γ 別の流木本数と集積率の関係

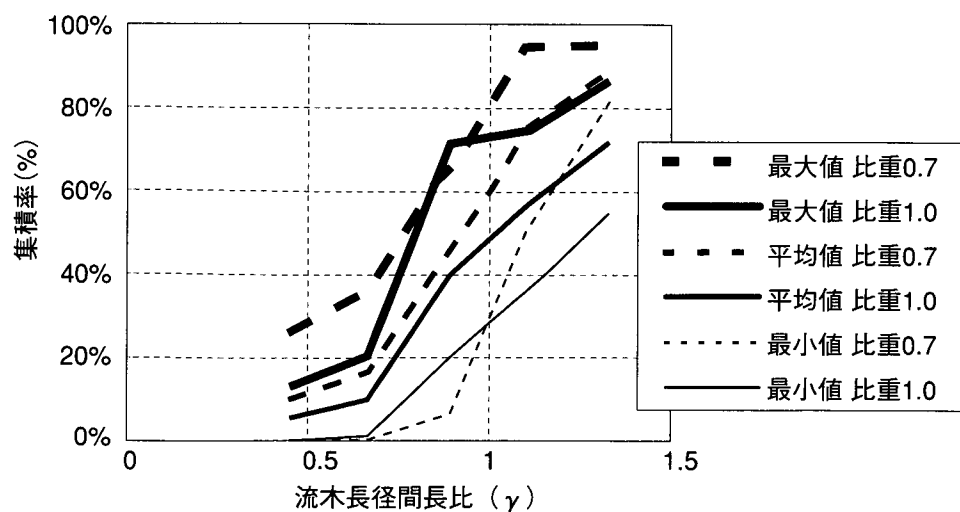


図 3.17 流木比重別の γ と集積率の関係 (実験1-21、1-23)

図3.18 (1) 平均値

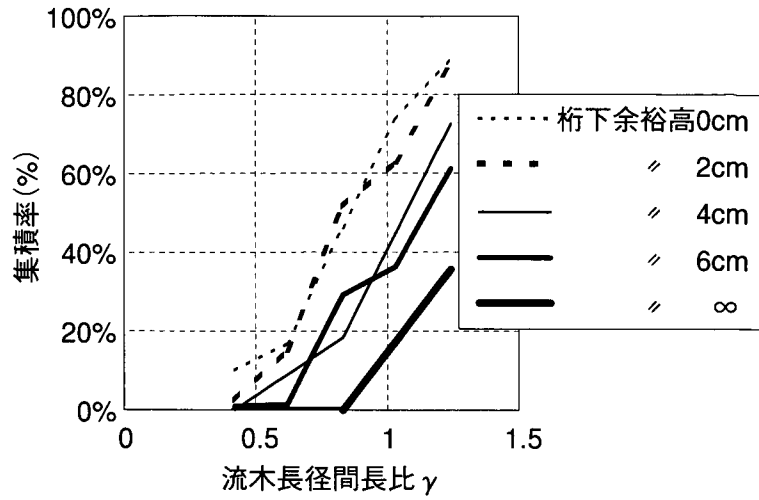


図3.18 (2) 最小値

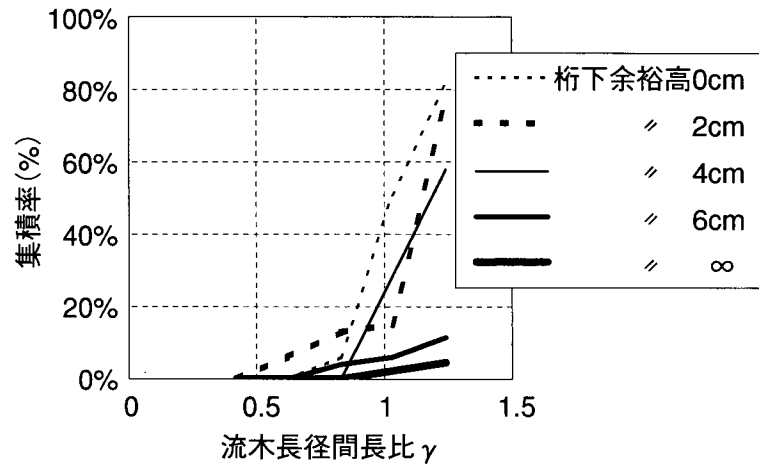


図3.18 (3) 最大値

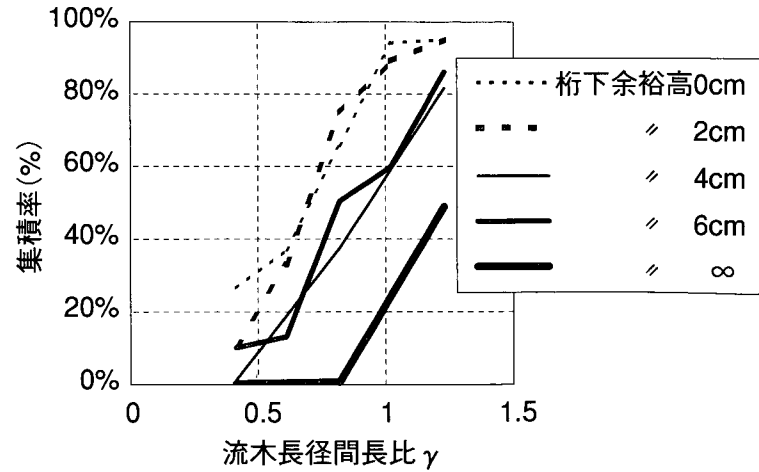


図 3.18 桁下余裕高別の γ と集積率の関係 (水深22cm、L:40、D:0.5,1.0、実験1-21、1-24、1-25、1-33、1-34)

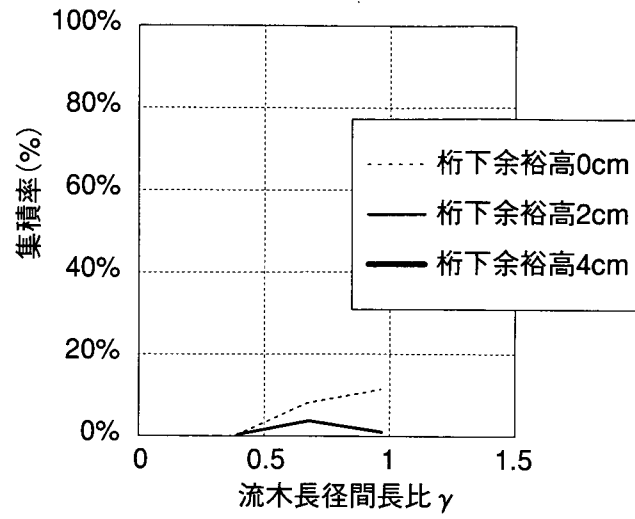


図 3.19 桁下余裕高別の γ と集積率の関係 (L:30cm、D:0.5,1.0、水深22cm、実験1-30~32)

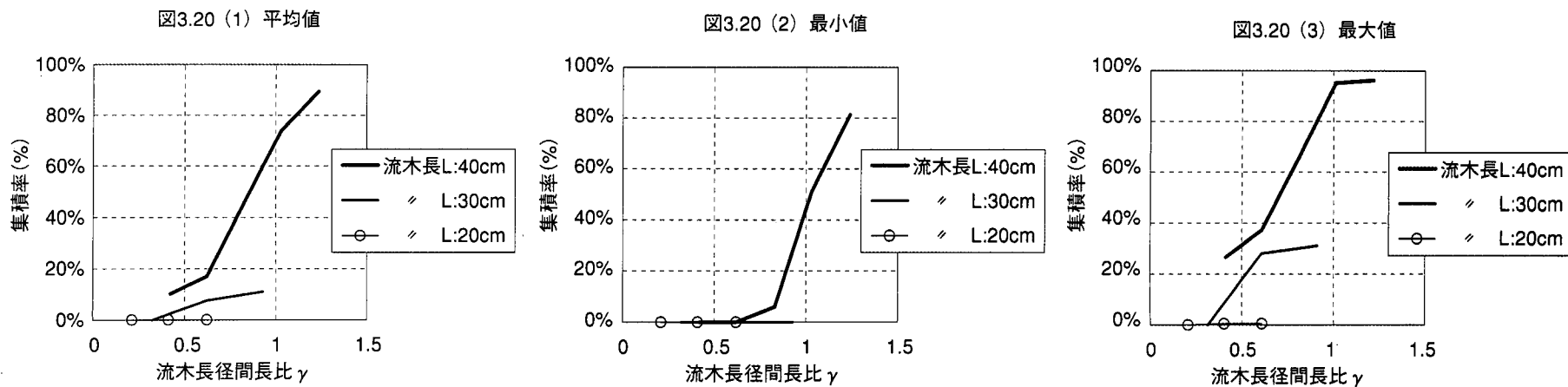


図 3.20 流木長別の γ と集積率の関係 (水深22cm、勾配1/300、実験1-21、1-28、1-30)

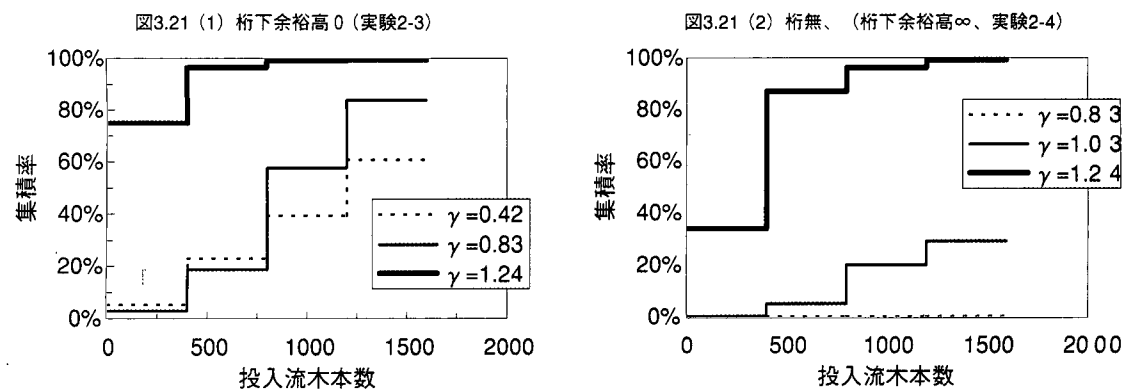


図 3.21 γ 別の投入流木本数と集積率の関係 (水深22cm、L:40、D:0.5,1.0、100本ずつ連続投入、実験2-3、2-4)

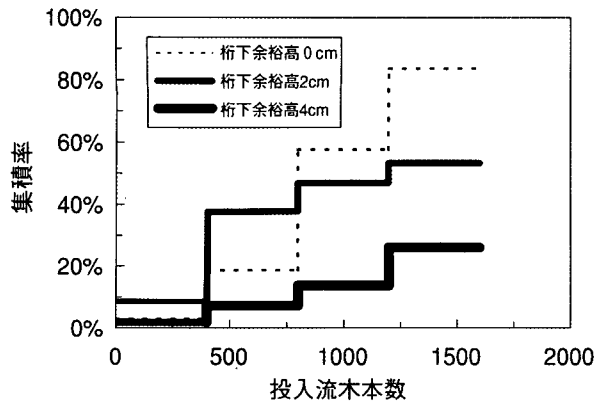


図 3.22 桁下余裕高別の投入流木本数と集積率の関係 (γ : 0.83、実験2-3、2-5)

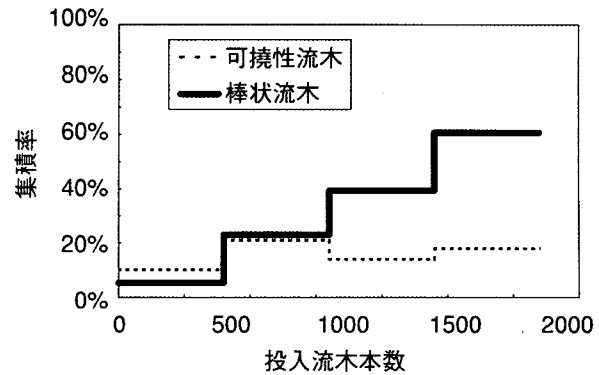


図 3.23 可撓性流木の投入流木本数と集積率の関係 (桁下余裕高 0、実験2-6、2-3)

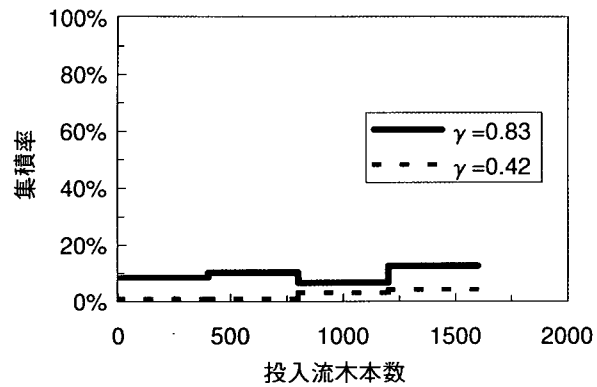


図 3.24 可撓性流木の γ 別の投入流木本数と集積率の関係 (桁下余裕高 ∞ 、実験2-6)

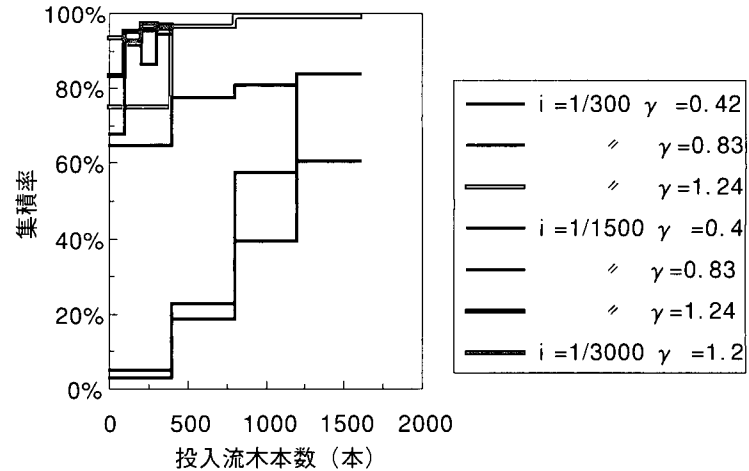


図 3.25 水路勾配及び γ 別の投入流木本数と集積率の関係 (水深22cm、桁下余裕高 0、実験2-3、3-2)

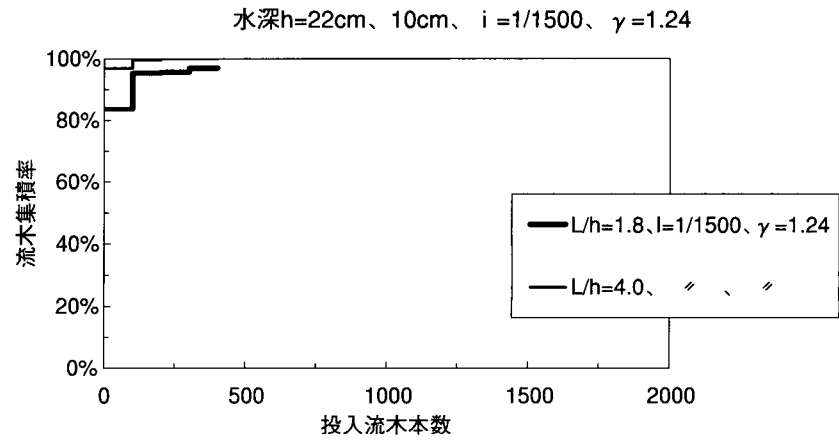
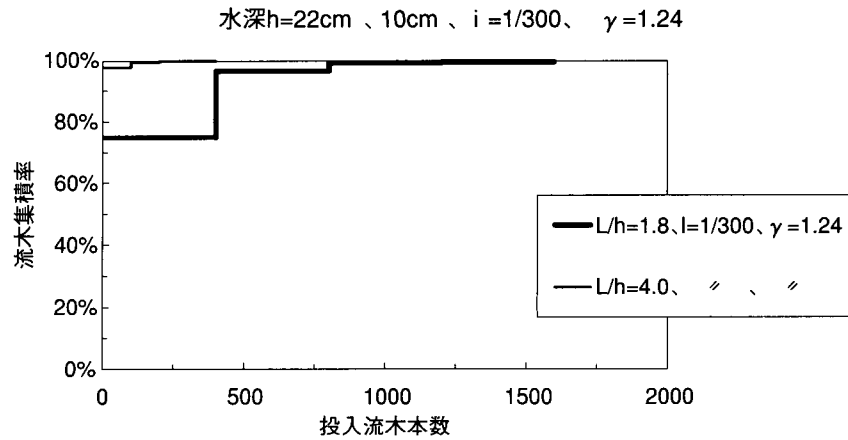
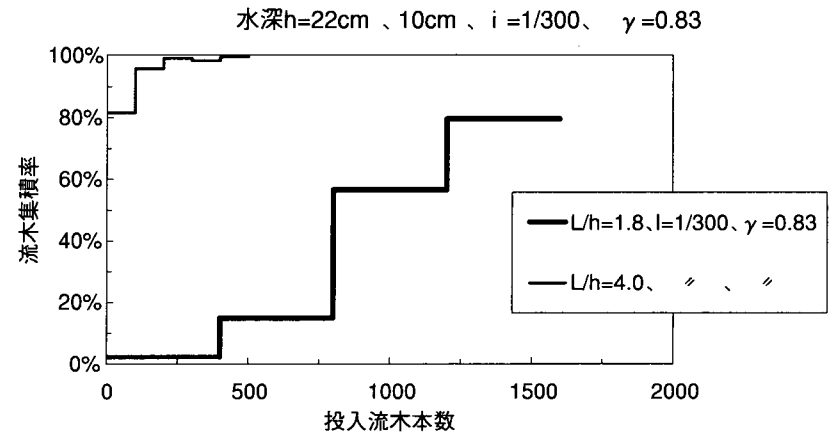
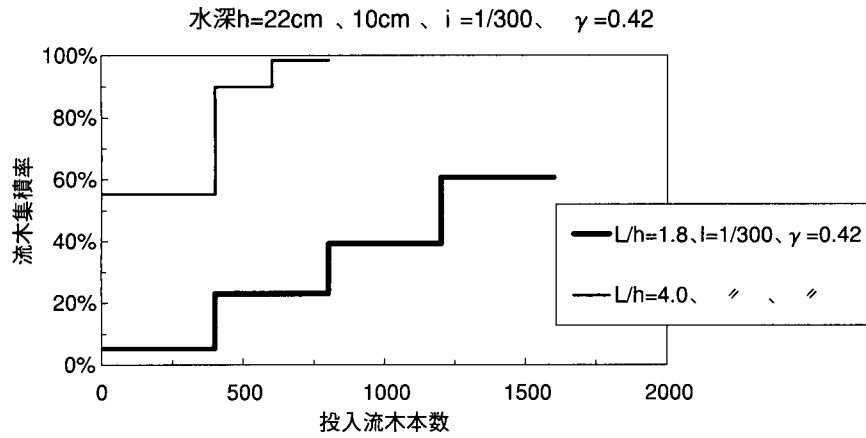


図 3.26 水深別の投入流木本数と集積率の関係 (桁下余裕高 0、水深：22cmと10cm、実験2-3、3-4、棒状流木L:40、D:0.5,1.0)

表 3.1 実験 I ケース一覧

実験ケース	検討項目	橋脚形状	橋脚本数	余裕高 (cm)	水深 (cm)	河床 (水路) 勾配	流木諸元	流木投入条件	備考								
1	・流木集積の支配要因の概略検討 (橋脚形状、径間、余裕高、流木諸元、流木投入方法等) ・水位せきあげ検討 (ケース21、24、25、27、30、31、33、34、35、36)	小判、張出、円	1	桁無	22	1/300	L:40でD:1	単独、縦	流木タイプ:1,2,3								
			2,3,4					単独、横									
			1					単独、縦									
			2,3,4					単独、横									
		小判、張出、円	1	桁無	11.5	22	1/300	L:40でD:0.5、L:20でD:1と0.5の混合	単独、横	流木タイプ:2							
			2,3,4		15												
		小判 (D:5.3、2.5)	1	桁無	0	22	1/300	L:40でD:1とL:20でD:1の混合	集団 (100本×1回)、横	流木タイプ:1							
		小判、張出、円	2,3,4						2								
		小判	1	桁無	2	24	1/300	L:40でD:1と0.5の混合、L:20でD:1と0.5の混合	単独、横	流木タイプ:2							
		小判、張出、円	6														
		小判、円	1	桁無	2	24	1/300	L:40でD:1と0.5の混合	枝付	枝付							
		小判、張出、円	桁無														
		小判、円	1	桁無	2	24	1/300	L:40でD:1と0.5の混合	枝付	枝付							
		小判、張出、円	2														
		小判 (D:2.5、5、10)	1	桁無	2	24	1/300	L:40でD:1と0.5の混合	ビニールシート&スキの穂	-							
		小判、張出、円	桁無														
		・流木集積の支配要因の概略検討 (橋脚形状、径間、余裕高、流木諸元、流木投入方法等) ・水位せきあげ検討 (ケース21、24、25、27、30、31、33、34、35、36)	・流木集積の支配要因の概略検討 (橋脚形状、径間、余裕高、流木諸元、流木投入方法等) ・水位せきあげ検討 (ケース21、24、25、27、30、31、33、34、35、36)	小判	1,2,3,4,5	0	22	1/300	L:40でD:1と0.5の混合	集団 (50本×1回)、横	流木タイプ:1						
					3,4					集団 (100本×1回)、横							
					1,2,3,4,5					集団 (150本×1回)、横							
					3,4					集団 (200本×1回)、横							
					1,2,3,4,5					集団 (300本×1回)、横							
					3,4					流木タイプ:2							
					2					22		1/300	L:20でD:1	200本×1回、横	流木タイプ:1		
					1,2,3,4,5											6	
					0											16	1/100
					0											24	1/450
					2					22		1/300	L:30でD:1と0.5の混合	200本×1回、横	流木タイプ:1		
					1,3,5											2	
					0											2	
					2											2	
					4					22		1/300	L:40でD:1と0.5の混合	200本×1回、横	流木タイプ:1		
					桁無											11	
		0	16														
		0	16														
		2	流木の供給量と集積率の関係 (橋梁諸元別) 及び水位せきあげ (ケース2-3~2-7)	小判	1,2,3	22	1/300	1/300	棒状流木 (L:40でD:1と0.5)	集団 (800本×1回)、横、タイプ1	橋脚周辺洗掘無						
					桁無												
1,3,5	0																
3,4,5	桁無																
3	2,4																
1,3,1	0,桁無																
1	0																
可撓性流木 (L:40でD:1と0.5の混合)	集団 (100本×16回)、横、タイプ1																
棒状流木 (L:40でD:1と0.5の混合)	洗掘有																
3	集積率と各要因の関係 (流木密度、径間、勾配、余裕高、水深)	小判	3,5	22	10	1/300	棒状流木 (L:40でD:1と0.5の混合)	集団 (20本×20回、50本×8回、混練)、横	流木タイプ:1								
			1,3,5			0	1/1500、1/3000	棒状流木と可撓性流木 (L:40でD:1と0.5の混合)		集団 (100本×12回&4回)、横							
			1,3			2,4	1/3000	棒状流木と可撓性流木 (L:40でD:1と0.5の混合)		集団 (100本×8回&12回)、横							
			1,3,5			0	1/300、1/1500	棒状流木 (L:40でD:1と0.5の混合)		集団 (100本×12回と5回と4回)、横							

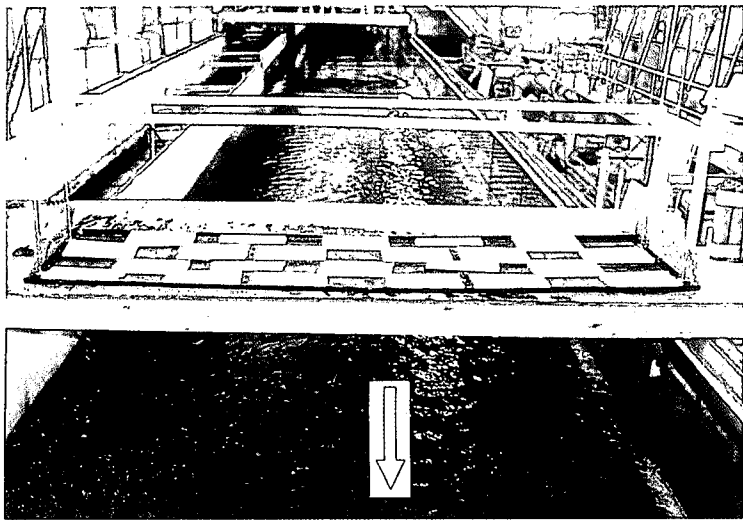
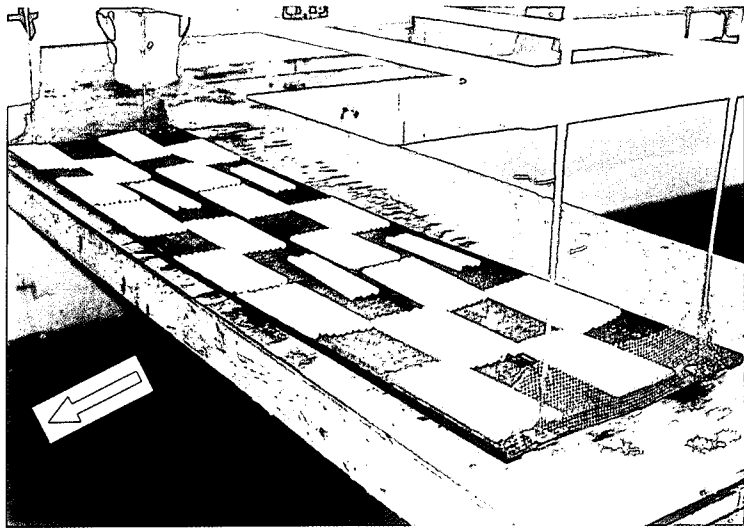


写真 3.1 流木投入方法 (実験 1-18~1-36)

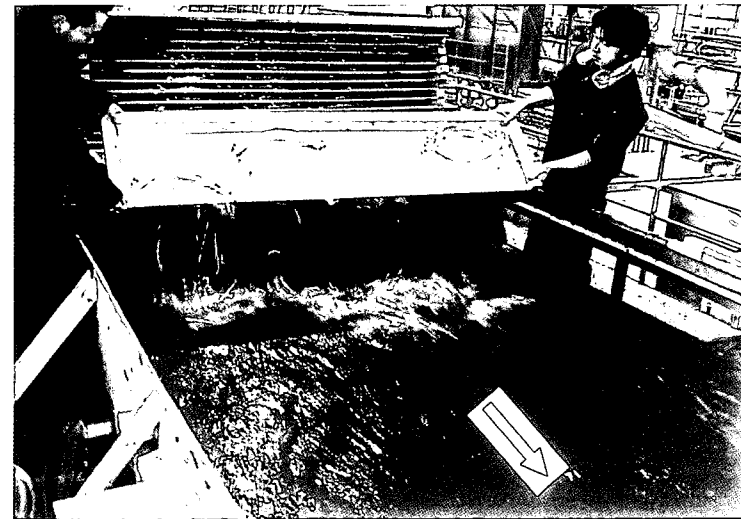
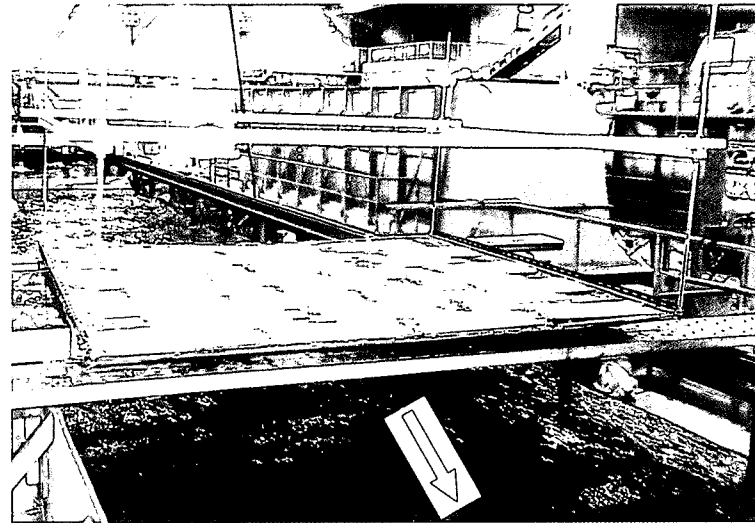
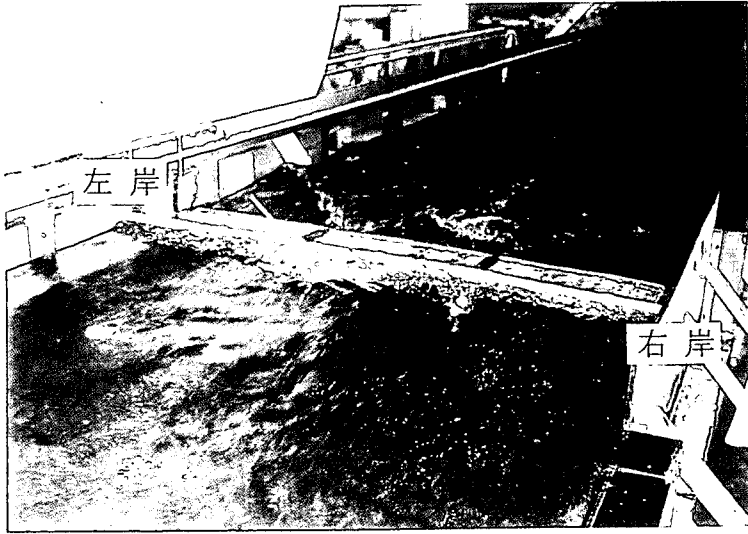
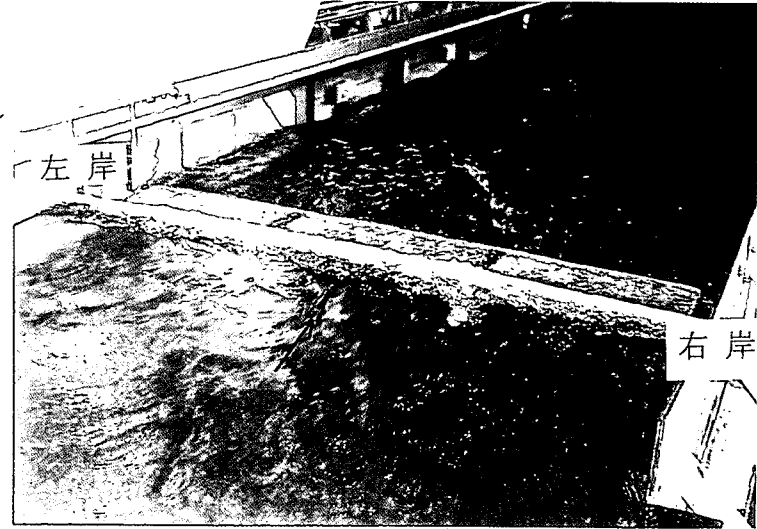


写真 3.2 流木投入方法 (実験2-1、2-2)

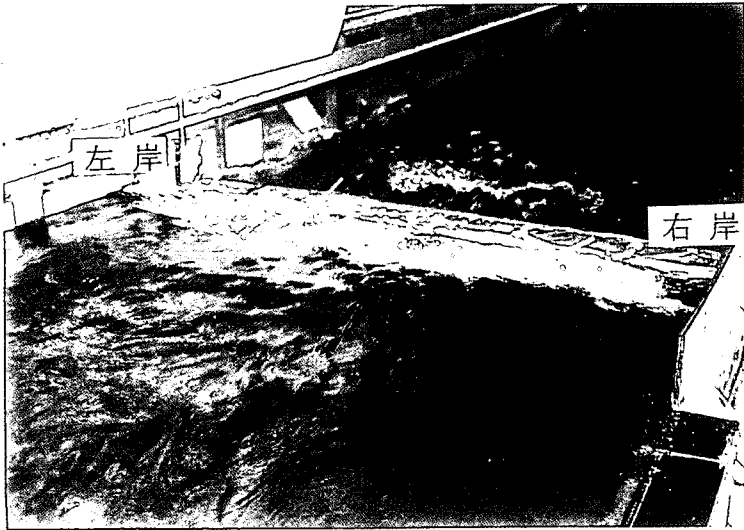
写真 3.3 流木投入方法 (実験2-3~2-7、実験3-2~3-4)



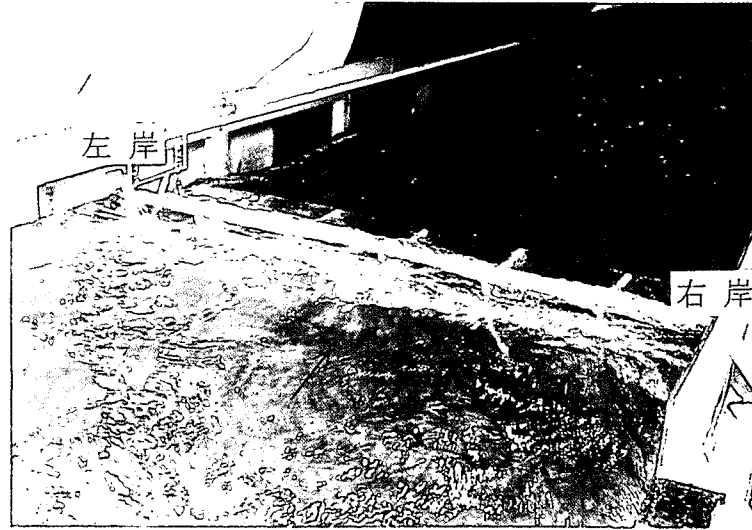
比重=0.7 $\gamma=0.62$



比重=1.0 $\gamma=0.62$



比重=0.7 $\gamma=1.24$



比重=1.0 $\gamma=1.24$

写真 3.4 流木比重による集積状況の相違

3.2 流木集積による水位せきあげの検討実験(実験Ⅰ-1及びⅠ-2の一部、実験Ⅱ)

3.2.1 実験方法

河道内においては、河道内構造物による直接の影響によって水位せきあげが生じる。特に橋梁(橋脚部分)は流水を阻害するため、その上流では常時水位せきあげが生じる。流木が橋梁に集積した場合にはその水位せきあげは急増し、橋梁上流の堤防では溢水する可能性が高くなるとともに、橋脚周辺では局所洗掘等の著しい河床変動の発生が推定される。これらの状況を種々の水理条件下で定量的に把握するために、大縮尺で水理条件の設定が容易で河床変動を再現できる実験水路として、実験Ⅰと同一の拡散実験水路(実験Ⅰ-1及びⅠ-2の一部、実験Ⅱ-1、固定床実験用)と屋外幅広水路(実験Ⅱ-2、3、移動床実験用)を用い、表3.2に示すケースを実験した。

実河道におけるせきあげ水位は、橋梁の条件(橋脚の阻害率、橋脚形状等)や橋脚周辺の局所洗掘の状態や流木集積率等によって左右されることから、これらの項目を分離して以下のように実験した。

- ・平坦河床に橋脚のみの設置(円、小判、張出)で流木集積の無い場合に、橋脚の阻害率とフルード数を変えて水位せきあげを把握し(実験Ⅱ-1-1、-2、-4、-5、-6)、ドビソン等の水位せきあげ算定式との整合性を検討した。また橋脚周辺の局所洗掘を想定した固定床実験も行った(実験Ⅱ-1-3)。
- ・流木集積した場合の水位せきあげについて検討した(実験Ⅰ-1-21、24~27、30~36、実験Ⅰ-2-3~5)。また橋脚周辺の局所洗掘を想定し流木集積した場合の固定床実験(実験Ⅰ-2-7)によって水位せきあげに及ぼす影響を検討した。
- ・移動床実験によって、橋脚周辺の河床変動~流木集積量~水位せきあげについて把握した(実験Ⅱ-2及び実験Ⅱ-3)。

これらのうち、固定床実験(実験Ⅱ-1)においては、橋梁の上流区間では水位変動が大きくまた流木が流下するためポイントゲージ等の接触式水位計では正確な測定が困難であること等から、水路床版を底上げしてピエゾ管を図3.27に示す水路床の位置に設置し、そこからビニール管でマンメータに連結し間接的に水位を計測する方法とした。具体的には、マンメータ部分をビデオで30秒間撮影し、その映像から最大値及び最小値を読み取り、その中央値と橋脚無しの場合との水位差を水位せきあげとした。一方、移動床実験(実験Ⅱ-2及びⅡ-3)においては、水位は河床形態の影響を受け時間的に変動することを考慮して、水位の経時時間を把握できるように水面追従型の触針型水位計により計測した。

拡散実験水路を用いた固定床実験(実験Ⅰ)における流木の投入方法や集積の判断については前述の通りであるが、流木集積率と同じタイミングで水位せきあげを測定した。

一方、屋外幅広水路(2m)を用いた移動床実験(実験Ⅱ-2及びⅡ-3)では、河床形状と流木集積は相互作用により状況が時間的に変動し状況を正確に把握することが困難である。このため、本実験ではこれまでの固定床実験から得られた流木集積状況(本数と形状)が流れによって変化しないように橋梁に流木を固定させて、水位せきあげと河床変動を測定した。河床材料は平均粒径 $d_m \doteq 0.9\text{mm}$ の混合砂($\sqrt{d_{84}/d_{16}} \doteq 3$)を敷き詰めて通水した(写真3.5参照)。水位せきあげは、橋脚より上流85cmの横断面における河床安定後の時間平均の値と流木取付前(≒橋脚設置前)水位との差とした。

実験Ⅰ-2-7、Ⅱ-1-3の固定床実験では（局所洗掘の影響実験）、予め橋脚周辺のみに限界掃流力近傍となる移動床材料（ $\phi = 8 \text{ mm}$ の均一粒径の玉砂利）を敷き詰め、通水して局所洗掘形状を再現し、その形状をニスで固めて固定床模型とした（写真3.6参照）。

3.2.2 実験結果

○橋脚のみによる水位せきあげ（実験Ⅱ-1-1～-6）

図3.28は、円柱橋脚を水路内に1本設置した場合の橋脚の阻害率（橋脚の太さ）による水位せきあげについて、実験と計算（係数 $C=1.0$ と 0.92 としたドビソン式による算定値）を比較したものである。水理条件は、水路床勾配 $I=1/1000$ 、水深 $h=0.33\text{m}$ 、フルード数 $Fr=0.33$ である。水位せきあげの実験値は、橋脚模型上流部における横断の水面形がほぼ平坦となる断面として、橋脚上流85cm（水路幅 B の約 $0.4B$ 上流地点）の断面における水位上昇量とした。これより、阻害率と水位せきあげの関係は実験値と計算値でほぼ同様であり、実験値は係数 $C=1.0$ としたドビソンの計算値とほぼ同一であることがわかる。また、フルード数 Fr との関係を図3.29に示す。この実験では、直径10cmの円柱橋脚模型1本を水路中央に設置し（阻害率5%の一定）、流量一定（ $0.4\text{m}^3/\text{s}$ ）で水路床勾配を $1/250\sim 1/2500$ にすることによって、フルード数 $Fr=0.21\sim 0.65$ の条件を設定した。同図より、実験値はいずれのフルード数 Fr においても係数 $C=1.0$ としたドビソンの計算値とほぼ同一であることがわかる。

護床工の設置されていない橋脚周辺では水流によって局所洗掘が生じる。局所洗掘の水位せきあげに及ぼす影響を把握することは、護床工設置の是非を論じる上でも重要である。図3.30は、橋脚の阻害率及びフルード数 Fr の条件別の水位せきあげについて洗掘の有無で比較したものである。これより、阻害率15%の場合の水位せきあげは洗掘の有無にかかわらず同様であるが、阻害率5%の場合には洗掘有の水位せきあげは洗掘無の約半分になることがわかる。このような阻害率によって状況の異なる理由として次のようなことが考えられる。一般に、橋の上下流での流速変化が大きく水位差が生じるが、橋脚周辺の洗掘を許すと流速変化が小さくなり水位差を小さくする方向に働く。しかし阻害率がある程度以上に大きくなると、橋脚周辺の河床変動よりも橋脚の阻害による縮流の影響が水位差にとって支配的となるものと考えられる。一般的に橋梁の河積阻害率は5～8%が基準¹³⁾となっており、本実験のような高い阻害率は現実にはあり得ない。また検討ケースが少ないことから、阻害率の高い場合の結果は参考としてとらえるべきであると考えられる。

以上のように、橋脚のみによる水位せきあげは、係数 C を 1.0 とすればドビソン式で表現してあまり問題がなく、橋脚周辺の局所洗掘を許せば水位せきあげを半分程度に低下させることが可能であることがわかった。

○流木集積による水位せきあげ（実験Ⅰ-1-21、24～27、30～31、33～36、実験Ⅰ-2-3～-5、実験Ⅰ-2-7、実験Ⅱ-2～-3、）

図3.31は、水位せきあげと集積率の関係を桁下余裕高 F_h 別に示したもので、水路床勾配 $I=1/300$ でフルード数 $Fr=0.62$ の水量下で小判型の橋脚を有する橋梁模型の上流で長さ $L=40\text{cm}$ 、径 $D=1.0$ と 0.5cm の流木模型200本を一気に投入した実験（実験Ⅰの1-21、24、25、33、34のケース、）の様々な流木長径間長比 γ におけるデータを一括して整理したものである。これより、水位せきあげ Δh と集積率の間には桁下余裕高 F_h にあまり係わらず正の相関（ $R^2=0.9$ 、図3.32参照）が高いことが分かる。

さらに水深、フルード数、流木諸元の異なる実験データ（実験Ⅰの1-30、31、26、27、35、36のケース）を加えて整理したものが図3.33である。同図では、実河川への適用も考慮して縦横軸を無次元表示した。縦軸については水位せきあげを水深で除した $\Delta h/h$ で示し、横軸については、集積率は無次元であるものの流木総量が異なる場合には応用できないため、橋梁部の河積に対する集積流木の総投影面積（流れ方向）の比を集積流木障害率 r_0 として整理した。これより、 $\Delta h/h$ と r_0 には正の相関はあるもののそれほど高い相関ではなく、フルード数 Fr によってデータが偏っていることがわかる。これは、流木集積による水位せきあげにとって「橋梁付近の流況」が重要な要素であることを意味している。

実験における橋梁模型付近の流況に注目すると、流木集積した橋梁での水位せきあげは急縮部上流の水位せきあげと同様であることから、流速の変化に基づいて提案された橋脚のみによる水位せきあげを推定するドビソン公式の適用が妥当と考えられ以下のように検討した。

水位せきあげ Δh はドビソン公式では

$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}$$

$$= \frac{Q^2}{2g \cdot C^2 \cdot b^2 \cdot h_2^2} - \frac{Q^2}{2g \cdot B^2 \cdot h_1^2} = \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{C^2 \cdot b^2 \cdot (h_1 - \Delta h)^2} - \frac{1}{B^2 \cdot h_1^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 h_1 =上流断面水深、 h_2 =下流断面水深、 A_1 =上流断面積、
 A_2 =下流断面積、 B =下流川幅、 b =縮小部の有効幅、 C =補正（抗力）係数

$C \cdot b$ を未知数とすると

$$\frac{1}{C^2 \cdot b^2 \cdot (h_1 - \Delta h)^2} = \frac{\Delta h \cdot 2g}{Q^2} + \frac{1}{B^2 \cdot h_1^2}$$

$$C \cdot b = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\Delta h \cdot 2g}{Q^2} + \frac{1}{B^2 \cdot h_1^2} \right) \cdot (h_1 - \Delta h)^2}} \dots \dots \dots (2)$$

水位せきあげ Δh 、流量 Q 、下流断面水深 h_2 を(2)式に代入して $C \cdot b/B$ と r_0 の関係を図3.33のデータを用い計算すると図3.34のように両者に高い相関（ $R^2 \approx 0.8$ ）が見られる。これによって集積流木障害率 r_0 を与えれば $C \cdot b/B$ が求まり、さらに水理量を(1)式に代入することによって水位せきあげ Δh がトライアルで算出される。

図3.34は、主に集積流木障害率 $r_0 \leq 2$ のデータを取り扱っているが、流木集積によって被災した実例を考慮すると r_0 のさらに大きな領域について検討する必要がある。 r_0 の大きい条件を含む実験ケース（実験Ⅰ-2-3～2-5）のデータを追加して再整理すると図3.35のようになる。 $r_0 \geq 2$ の場合に $C \cdot b/B$ の変化率が小さくなり、一つの関係式（一次式）で近似させることは適切ではないため、以下の二つの近似式（一次式）で表すこととした。

$$r_0 < 2 \text{ の場合} \rightarrow C \cdot b/B = -0.1704 r_0 + 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$r_0 \geq 2 \text{ の場合} \rightarrow C \cdot b/B = -0.0269 r_0 + 0.7343 \quad \dots\dots\dots (4)$$

本節で提案した計算式は限られた水理量下で固定床模型実験に基づくものである。さらに水位せきあげの計算式の適合度を高めるために、移動床模型の実験値（実験Ⅱ-3-3、3-4）と比較したものが図 3.36 である。この実験では、小判型の橋脚模型（幅3.3cm）を3本設置し（阻害率5%）、流量 $Q \approx 250\text{l/s}$ 通水450秒後（河床安定後）に流木模型を取り付け（実験Ⅱ-3-3では200本、実験Ⅱ-3-4では400本）、その後1,000秒～1,200秒間の橋脚模型より上流85cm断面の水位を測定した。この水位と同断面の流木取付前の水位との差を水位せきあげ Δh とした（橋脚設置前と流木取付前の水位はほぼ同一）。この図より、計算値と実験値はほぼ同一であることから、移動床実験時においても推定式の妥当性が確認される。また、図 3.37 は同一実験の水位縦断（水路中央1点）を集積流木の本数別に示したものである。河床条件が両ケースで全く同一ではないため（移動床模型の通水中の河床条件である）厳密に比較できないが、本実験の範囲内において、流木集積量と水位せきあげには正の相関のあることがわかる。

図 3.38 及び図 3.39 は、前述の移動床実験時の橋脚周辺河床高の時間変動を示したもので、図 3.38 は集積流木200本（実験Ⅱ-3-3）、図 3.39 は集積流木400本（実験Ⅱ-3-4）の結果である。これより、集積本数に係わらず橋脚上流部周辺で（測点1）最大洗掘が生じ、流木集積によって急激に洗掘が増大する傾向がある。ただし、集積流木200本の場合にはいずれの箇所も最大洗掘深が約10cmでほぼ平衡状態になるが、集積流木400本の場合には測点1の箇所のみ最大洗掘が約20cmと顕著である。このように橋脚の上流側周辺では、流木集積の増大と最大洗掘深は正の相関があるが、橋脚下流側周辺ではある一定値以上に洗掘されない傾向がある。これは橋脚の根入れ深さや橋脚周辺の護床工範囲等を考えるに当たって、これらの諸元を部分毎に変えることが合理的であることを示唆している。

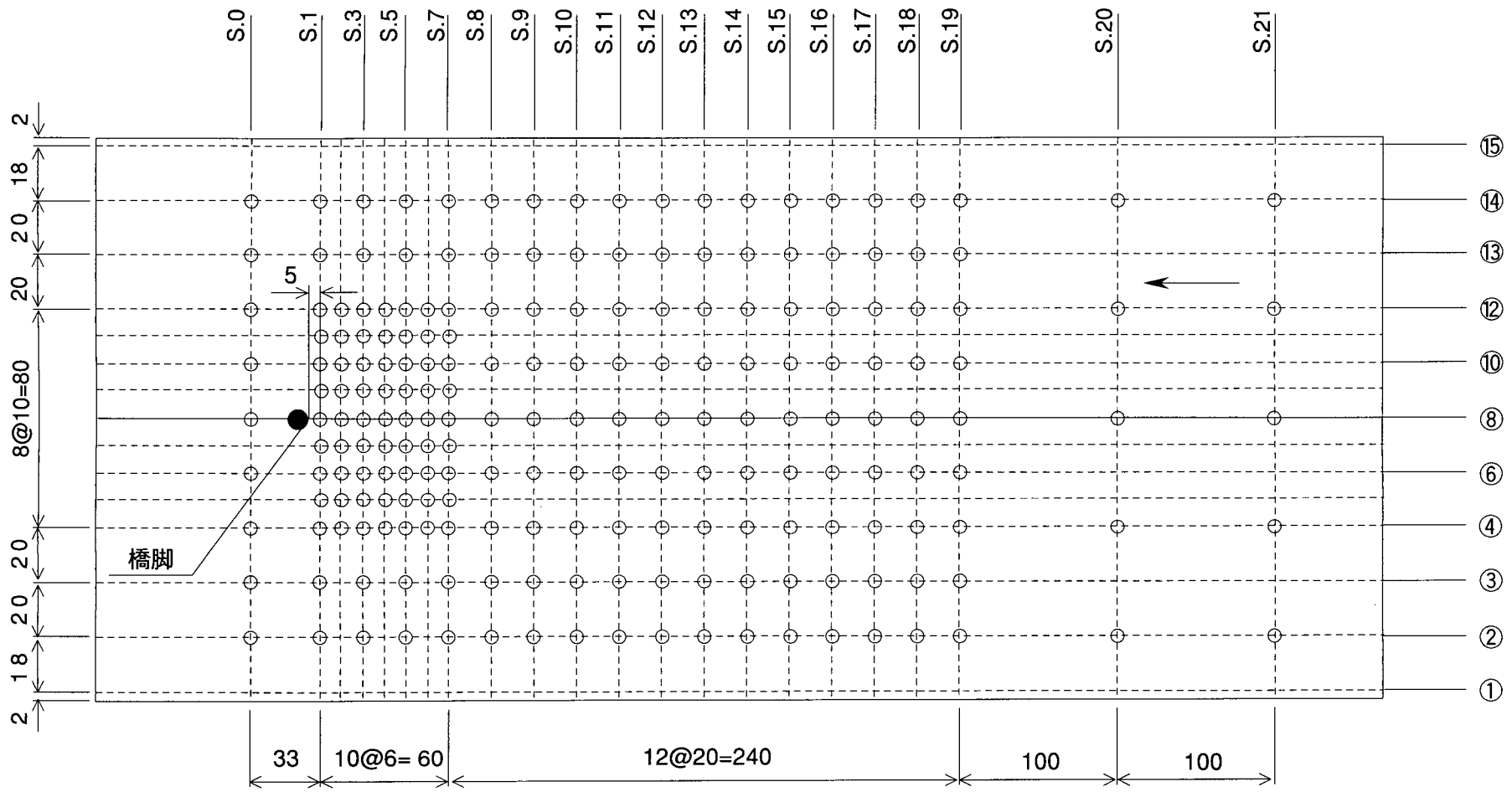
次に水位せきあげの推定式と現地事例と比較する。対象とする現地事例は、直轄河川的那珂川水系余笹川の余笹川橋（平成10年8月）と岩手県の新井田川水系雪田川の昭和橋（平成11年10月）の被災である。このうち余笹川橋のデータは、被災後に橋付近の痕跡水位を測量し、橋上下流の水位差を水位せきあげ Δh とすると、 $\Delta h \approx 2.5\text{m}$ であった。一方昭和橋については、痕跡水位の測量データがないため、洪水ピーク時の空中写真から橋上下流の水位差を求めると、 $\Delta h \approx 2\text{m}$ であった。また集積流木阻害率 r_0 については調査が困難なため正確ではないが、洪水後の写真やスケッチ等から推定した。その結果、余笹川では $r_0 = 2 \sim 4$ 、昭和橋では $r_0 = 5 \sim 7$ と推定した^{*}。この両橋の近傍の河道特性として、流量 Q 及び川幅 B 、さらに(3)式、(4)式から求まる $C \cdot b/B$ の各値を(1)式に代入してトライアル計算によって集積流木阻害率 r_0 別に Δh を求める。その結果、図 3.40 の r_0 と Δh の関係に示すように、推定式の実河川との適合性が高いことが確認できる。

上記の水位せきあげが現地水理量によってどの程度の差異があるかについて試算した結果が図 3.41 である。ここで用いた現地水理量は、表 3.3 に示すセグメント別の代表値とした。これより下流ほど（セグメント番号が大きいほど）、集積流木阻害率 r_0 が同一でも水位せきあげは小さいことがわかる。

以上のように、水位せきあげの推定式は、種々の模型及び水理量の条件下における実験だけでなく現地事例（急流部の2事例）との比較においても適合性の高いことを確認した。今後さらに高い適合

性を得るには、特に現地の緩流部における事例を収集することが必要である。

*¹) 長さ $L = 10\text{m}$ 、太さ $D = 0.2\text{m}$ の円柱状丸太を流木と仮定すると、流木 1 本の投影面積は 2 m^2 ($10\text{m} \times 0.2\text{m}$) である。余笹橋地点の河積を 200m^2 (幅 $50\text{m} \times$ 深さ 4 m) として、余笹橋に流木が 1 本ずつぎっしり集積したとすると流木 100 本となり、この状態が $r_0 = 1$ である。例えば $r_0 = 3$ は流木が 300 本集積したことになる。この $r_0 = 3$ の状態は、集積流木の高さが水深の約 2 倍、厚さが流木径の 3 本分、空隙が 0.5 に相当する ($r_0 = 2 \times 3 \times 0.5 = 3$)。この状態は洪水時の状況写真等から判断してほぼ妥当な値と考えられる。



単位:cm

図 3.27 ピエゾ管設置位置 (実験Ⅱ-1)

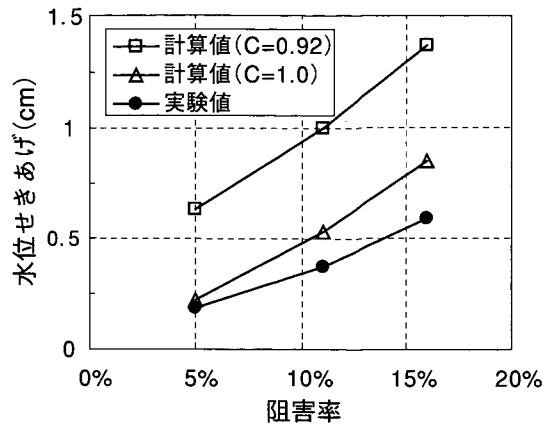


図 3.28 阻害率と水位せきあげの関係 (実験値と計算値の比較、実験1-1、1-4、円柱橋脚、Fr:0.33、 $l: 1/1000$ 、 $h:33\text{cm}$)

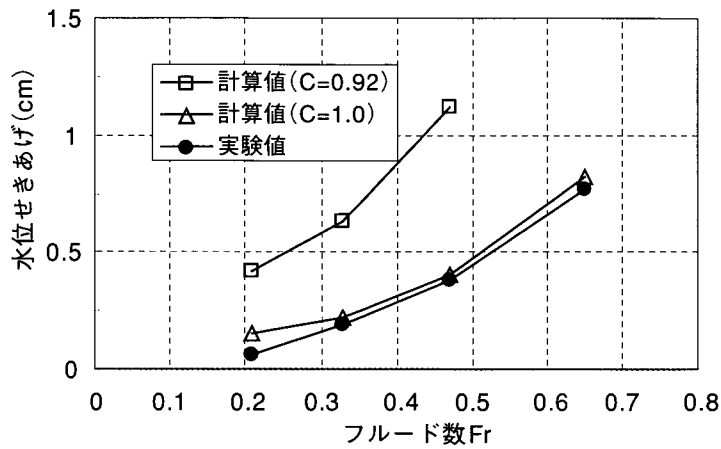


図 3.29 フルード数Frと水位せきあげの関係 (実験値と計算値の比較、実験1-1、1-2、円柱橋脚、阻害率5%)

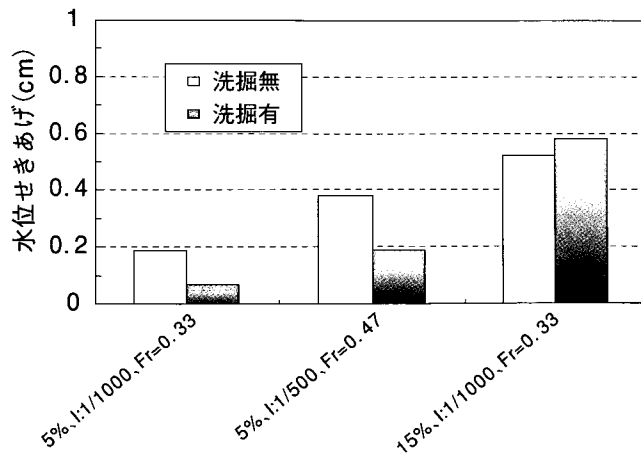


図 3.30 橋脚周辺洗掘有無と水位せきあげの関係 (実験1-1、1-2、1-3、1-5、円柱橋脚)

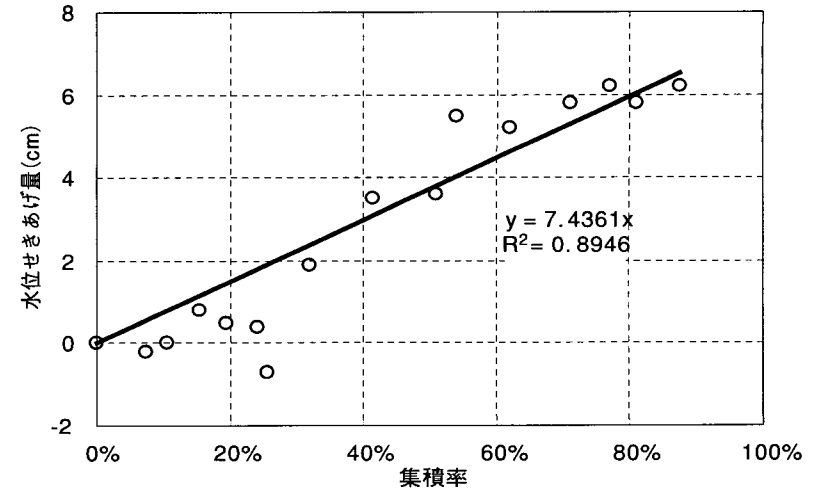
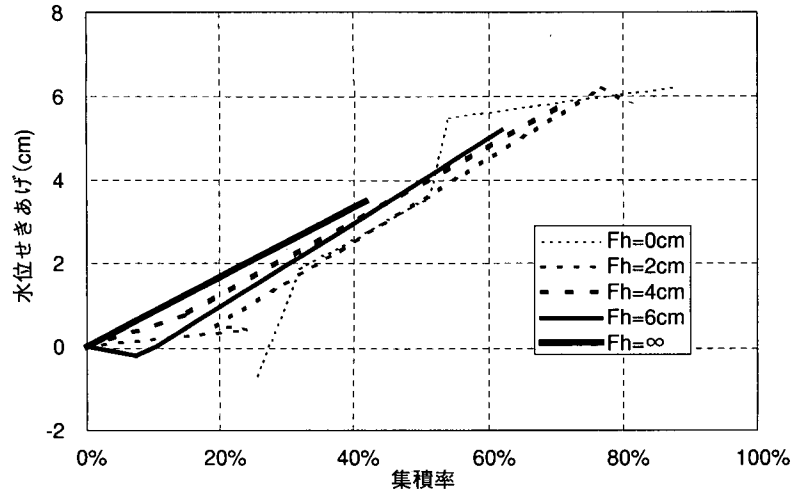


図 3.31 桁下余裕高別の集積率と水位せきあげの関係 (水深22cm、L:40、D:0.5、

図 3.32 集積率と水位せきあげの関係 (水深22cm、L:40、D:0.5、1.0、200本投入、小判型橋脚、実験1-21、-24、-25、-33、-34)

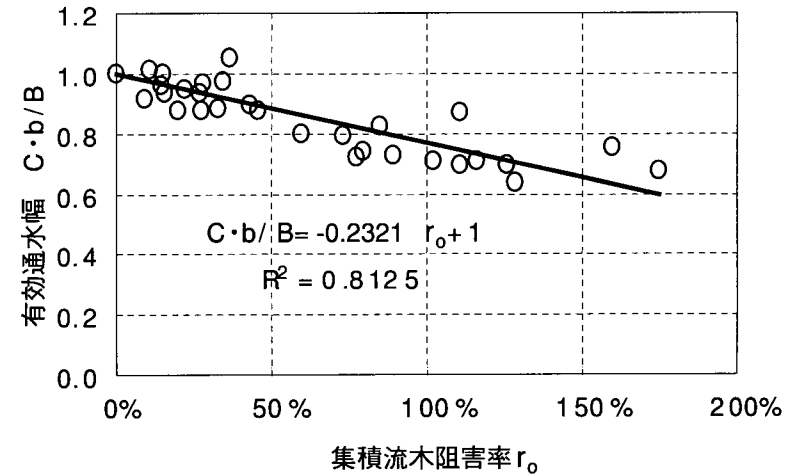
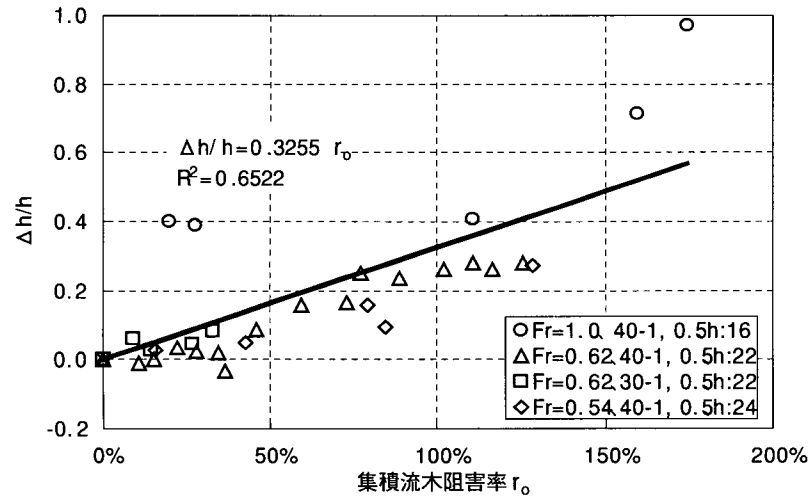


図 3.33 流木及び水理条件別の集積流木阻害率 (r_0) と水位せきあげ ($\Delta h/h$) の関係 (実験1-21、-24、-25、-26、-27、-30、-31、-33、-34、-35、-36)

図 3.34 集積流木阻害率 (r_0) と川幅縮小率 ($C \cdot b/B$) の関係

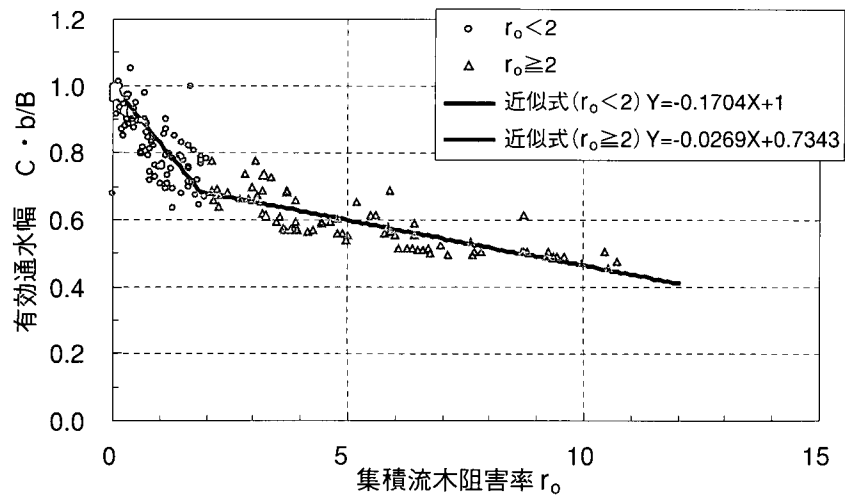


図 3.35 集積流木阻害率 (r_0) と川幅縮小率 ($C \cdot b/B$) の関係 (r_0 大データ追加)

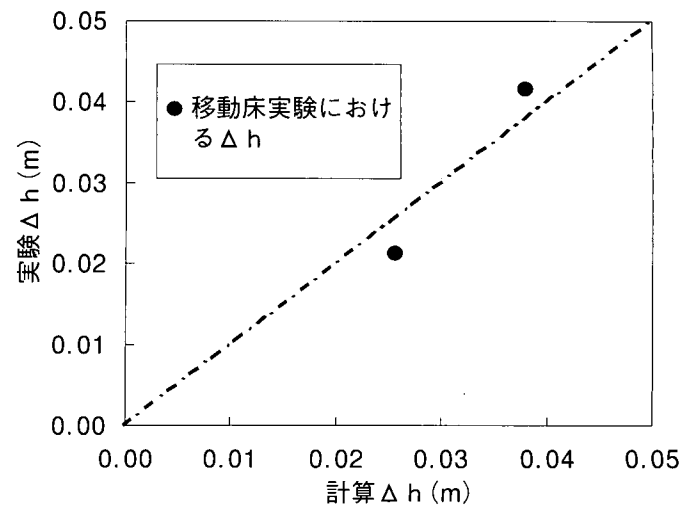


図 3.36 計算値と移動床実験値の水位せきあげの比較 (水深16cm、1:1/300、材料粒径:0.09cm、実験Ⅱ-3-3、-4)

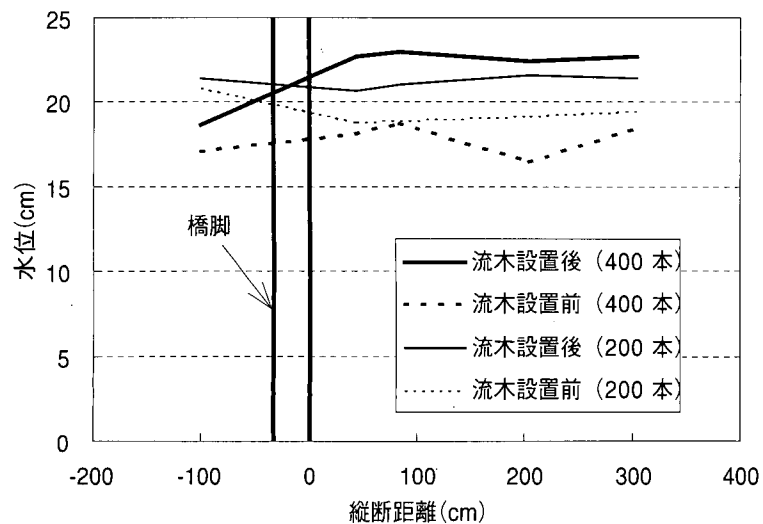


図 3.37 河床変動を伴った場合の流木集積による水位縦断形 (実験Ⅱ-3-3、-4)

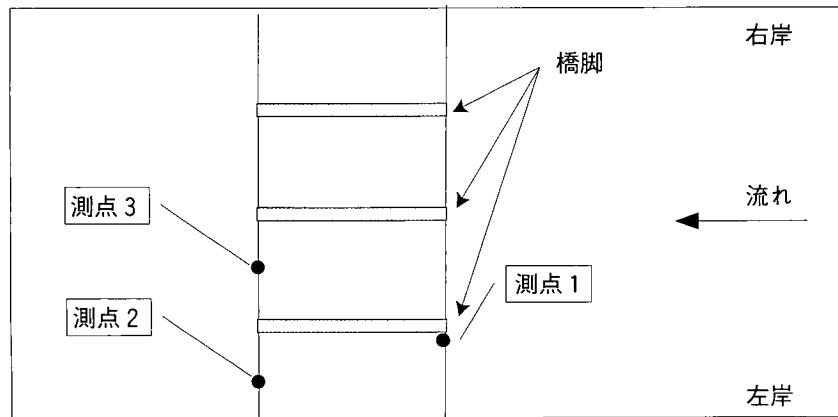
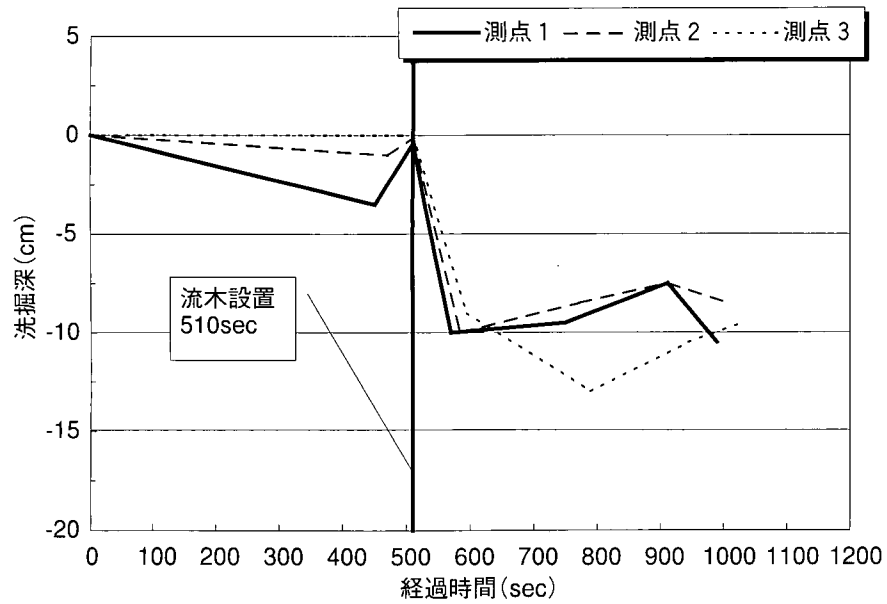


図 3.38 流木集積に伴う河床高の経時変化 (集積流木200本、桁下余裕高0、水深16cm、棒状流木、L:40、D:1.0、0.5、実験Ⅱ-3-3)

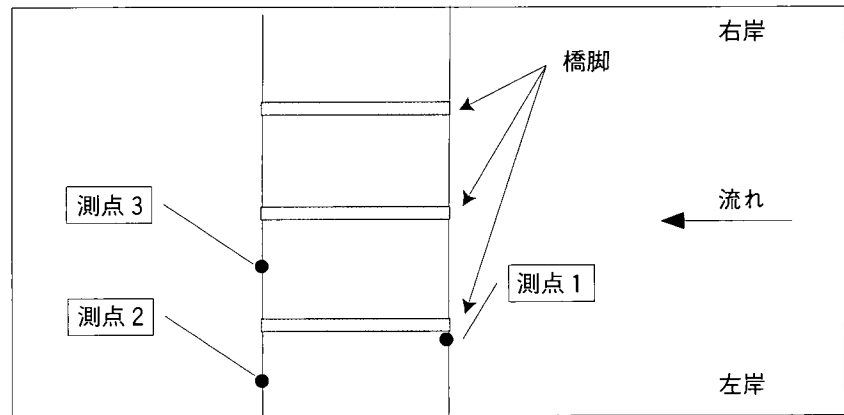
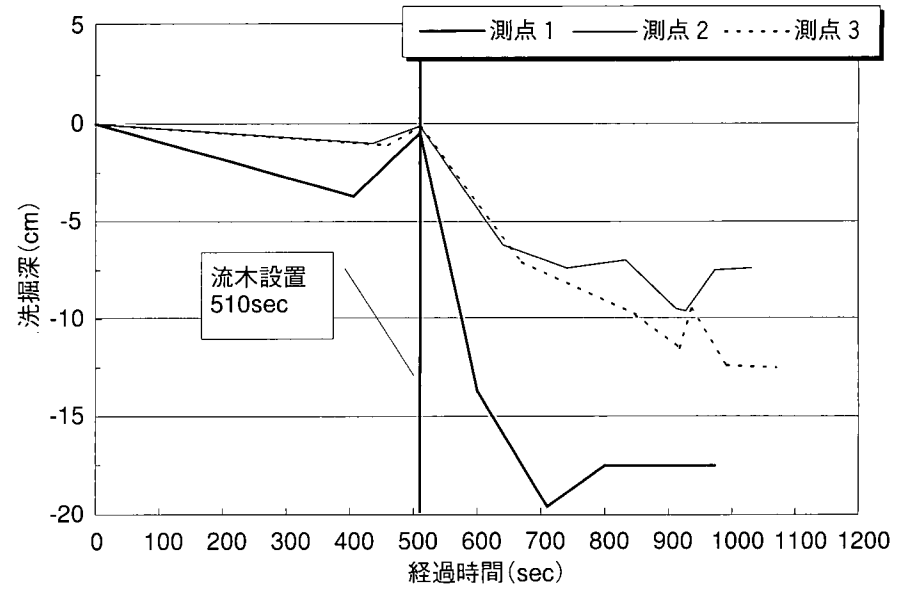


図 3.39 流木集積に伴う河床高の経時変化 (集積流木400本、桁下余裕高0、水深16cm、棒状流木、L:40、0.5、1.0、実験Ⅱ-3-4)

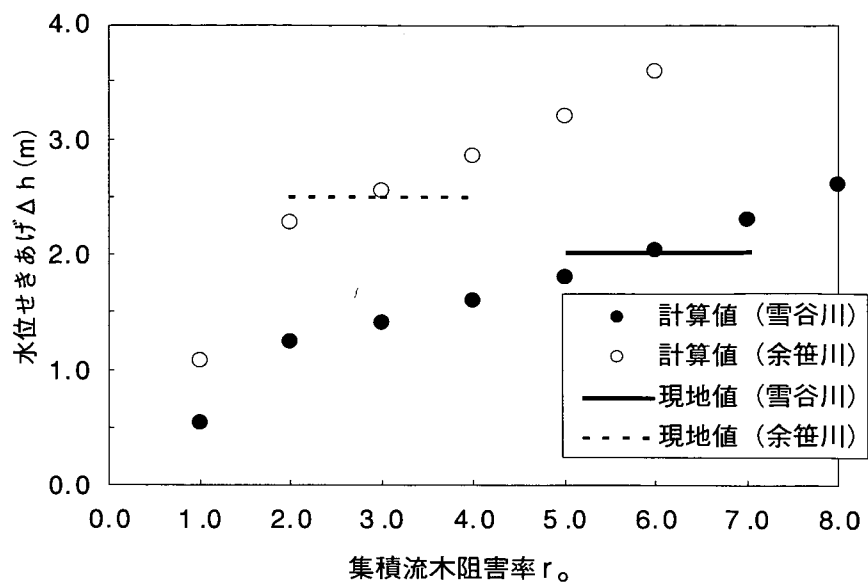


図 3.40 推定式の適合性

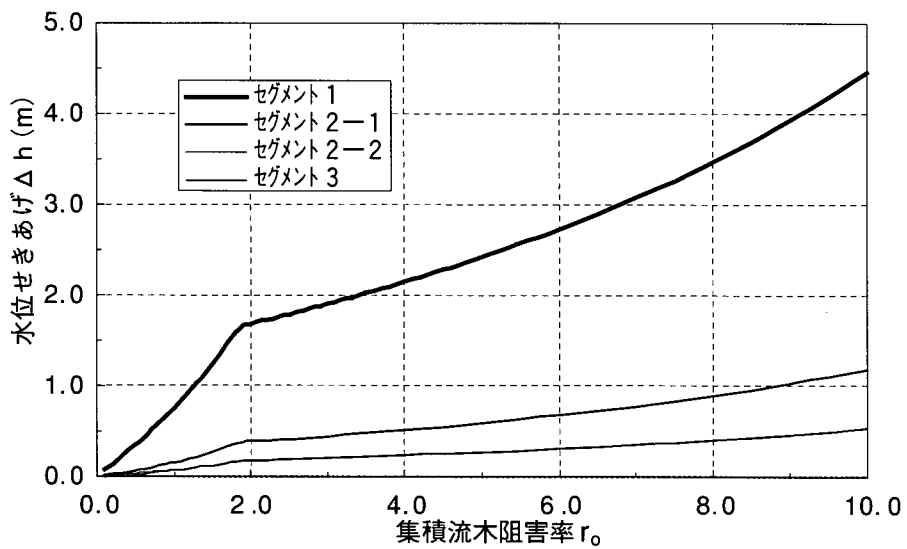


図 3.41 セグメント別の集積流木阻害率 (r_0) と水位せきあげ (Δh) の関係

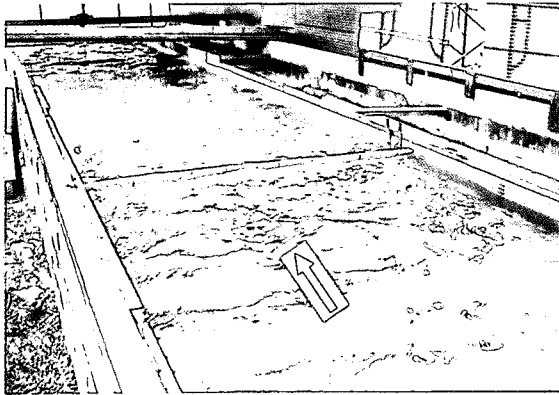
表 3.2 実験Ⅱケース一覧

実験ケース	検討項目	橋脚形状	橋脚本数	余裕高	流木諸元	流木投入条件	水深(cm)	河床勾配	使用水路	備考		
1	橋脚の阻害率による水位堰上げ量(流木集積無)	円、小判、張出	1	桁無	流木無	-	33	1/1000	拡散実験水路	阻害率5%		
		円	1,3				27,40	1/500, 1/2500		5%、15%、洗掘有		
			1				27,33	1/500, 1/1000		11%、16%		
			3				33	1/1000		5%、15%		
			円、小判				1	22		1/250	5%	
		2	河床変動を伴った場合の水位堰上げ量(流木集積無)				円	1		桁無	-	-
小判	3			0								
	小判			3	桁無	L:40cm、D:0.5、1cm、可撓性、タイプ1	768本					
0					L:40cm、D:0.5、1cm、棒状、タイプ1	384本						
3	河床変動を伴った場合の水位堰上げ量(流木集積有)	小判	3	桁無	L:40cm、D:0.5、1cm、可撓性、タイプ1	400本						
				0	L:40cm、D:0.5、1cm、棒状、タイプ1	200本						
		円	1	桁無	L:40cm、D:0.5、1cm、可撓性、タイプ1	128本						
						128本						

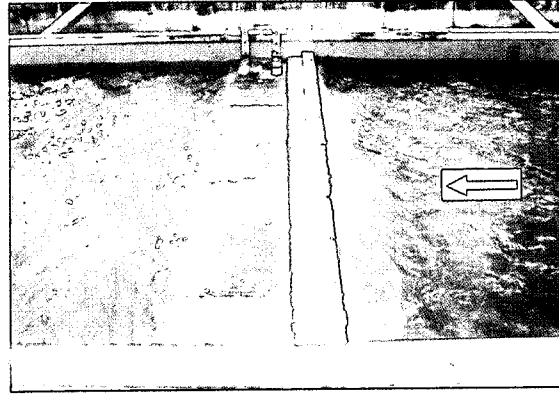
表 3.3 セグメント別水理量

	河床縦断勾配 I	川幅 B (m)	水深 h (m)	粗度係数 n	流量 Q (m ³ /s)	流速 V (m/s)	フルード数 Fr
セグメント 1	1/200	50	4	0.04	891	4.45	0.71
セグメント 2-1	1/1500	200	6	0.035	2923	2.44	0.32
セグメント 2-2	1/3000	400	6	0.035	4134	1.72	0.22
セグメント 3	1/6000	800	8	0.03	11016	1.72	0.19

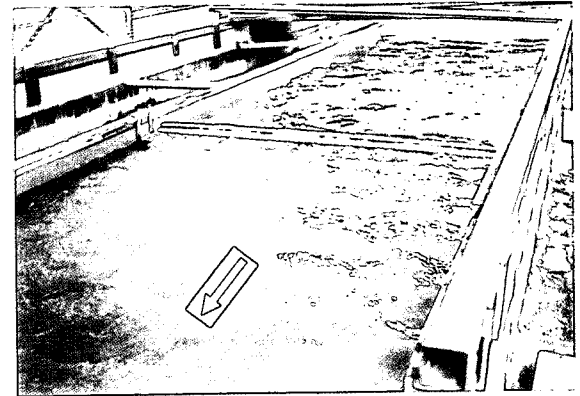
通水中（上流斜めから）



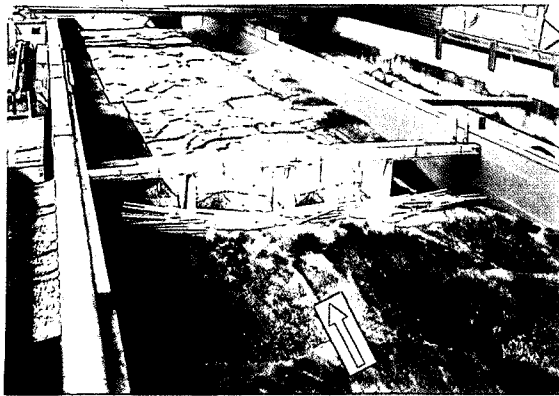
通水中（側面から）



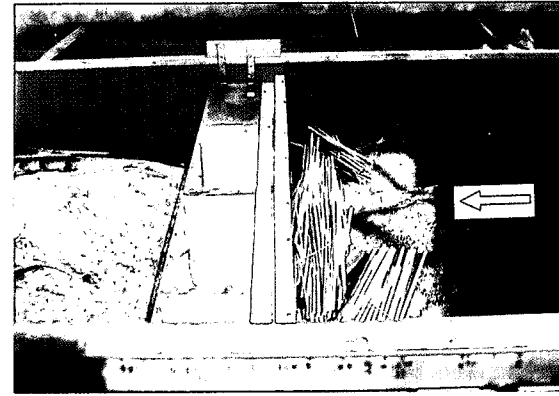
通水中（下流斜めから）



通水後（上流斜めから）



通水後（側面から）



通水後（下流斜めから）

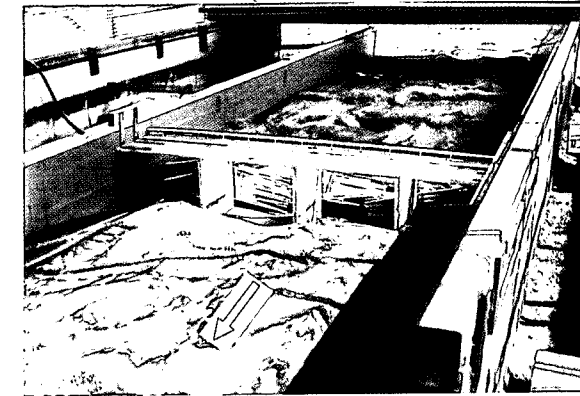


写真 3.5 河床変動を伴った場合の水位せきあげ実験状況（実験Ⅱ-3-3）

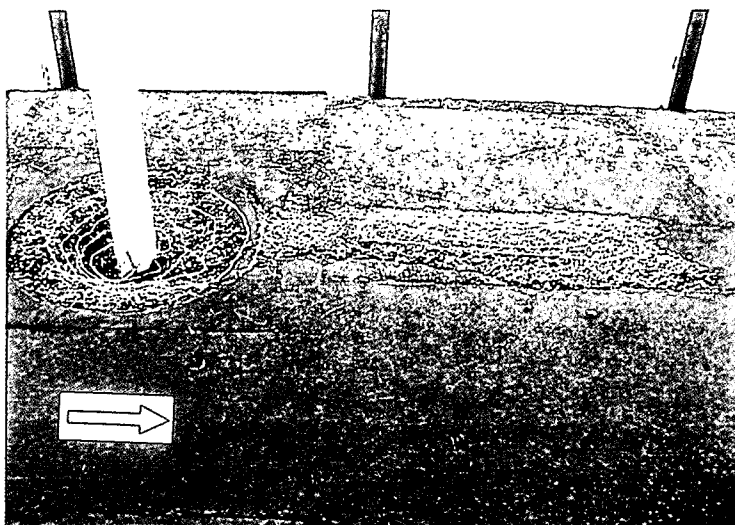
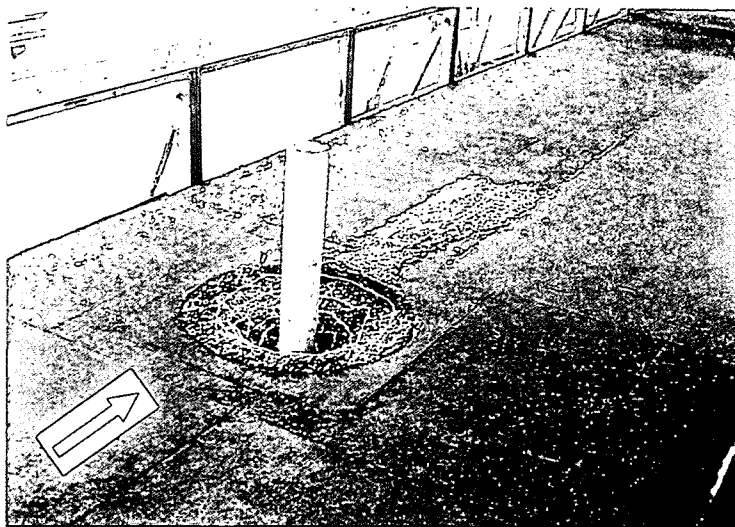
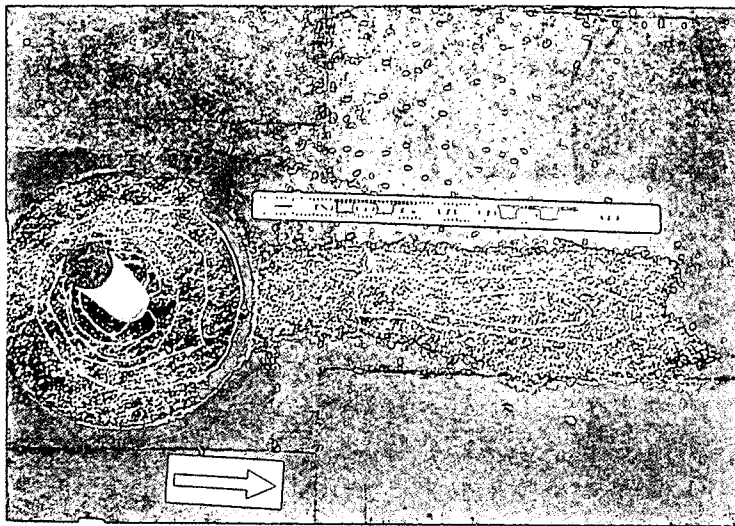


写真 3.6 橋脚周辺の洗掘形状 (実験 I-2-7、II-1-3)

3.3 流木流下特性の実験（実験Ⅲ）

実験Ⅰ及び実験Ⅱにおける流木集積と水位せきあげの結果は、流木が橋梁上流から川幅一杯に一様流下する実験条件下におけるものである。実河道では、河道の平面形状や縦横断形状等に影響されるため実験Ⅰ、Ⅱのような条件で流木が流下することは少ないと考えられる。そこで、流木の流下特性として流木の横断方向の偏り等について、河道模型を用いた水理実験により検討した。流木の流下に偏りがあって流木が通過しにくい径間部分においては、他の径間部分よりも流木を考慮して径間長を設定する必要があまりないと考えられる。つまり、流木が通過しやすい径間部分においてのみ、径間長や桁下余裕高を大きくする等の設定が可能となり、コスト低下に役立つことも考えられる。

3.3.1 実験方法

本検討のために図 3.42 及び次表に示す「最上川河道模型」を用い、表 3.4 に示すケースについて実験した。この模型は最上川の大淀地区（93.9km～105.7km）の平成元年測量形状を 1/60 で縮小したもので、イボ型の突起物（モルタル製のものを低水路に）と植生模型（植生の繁茂状況に応じて密度の違う多孔質体のものを高水敷に）の設置により現地の粗度係数に合わせてある。この対象区間では、大きな迂曲部を有する等縦横断形状の変化が顕著で、橋脚を有する橋梁が 4 基設置されている。

模型縮尺	1/60	河道延長	190m
河道幅	1.2～2.5m	河床勾配	1/700～1/2,000
水深（Q=5,400m ³ /s）	15～25cm	流速	35～80cm/s
フルード数（Q=5,400m ³ /s）	0.4～0.7		

河道模型に流した流量は当該地点の計画高水流量 $Q=5,400\text{m}^3/\text{s}$ （現地値、模型値 $Q=0.19\text{m}^3/\text{s}$ ）で、これを定流で流した。通水中に上流端付近から流木模型を投入し流下し、代表断面（11断面）で目視及びビデオ撮影にて流木の通過位置と時刻を把握した。

流木条件は、長さ・比重・密度（投入時）等の影響を把握するために、ケース別に次表に示す内容とし、各ケースにおいて総投入本数を模型上流端で一気に投入した。

実験ケース		長 (cm)	比重	投入密度 (本/m ²)	総投入本数 (本)	
Ⅲ-1	-1	10	0.7	50	50	
	-2	20				
	-3	10				5
	-4					10
	-5			50		
	-6	100		100		
	-7	1.0	50	50		
Ⅲ-2	-1	10	0.7	800	800	
	-2	10		1600	1600	
	-3	10cm と 20cm の混合		800	800	
	-4			1600	1600	

流木の通過状況の把握にあたっては、各チェック断面を5分割し（左岸から①、②、③、④、⑤）、この分割区間別の流木通過本数をカウントした。

3.3.2 実験結果

結果の一例を図3.43に示す。同図は、流木の通過割合を断面別及び投入密度別（ケース別）に比較として、流木長 $L=10\text{cm}$ 、比重0.7の円柱状流木模型の流木投入密度別に、各チェック断面の流木通過位置に関する結果である。これより流木流下特性は、流木投入密度にあまり係わず、各チェック断面で次のような状況を示す。

測線No.37は、流木投入地点より約13m（現地値800m）下流に位置する断面で、その間はほぼ直線河道である。このため、流木は若干左岸に偏る傾向があるものの横断方向に一様な通過状況である。

測線No.37より約42m（現地で2,500m）下流の測線No.30+300は、急わん曲の出口付近に位置する。このため流木は、わん曲外岸（右岸側）に偏る傾向にある。

その約18m（現地で1,100m）下流の測線No.28までは直線部となるため、流木は右岸側に偏って流下する。

その約30m（現地で1,800m）下流の測線No.23+200では、上流とは反対方向の急わん曲部の出口付近に位置するため、流木は左岸側に偏って流下する傾向にある。

さらにその約67m（現地で4,000m）下流の測線No.13+200では、中央よりやや右岸寄りが卓越するようになる。

また、流木長が異なった場合の結果を図3.44に示す。同図は、流木長20cmのみのケース、流木長10cmと20cmの混合のケースについて示したもので、同図の実験Ⅲ-1-2と図3.43の実験Ⅲ-1-1の結果を比較することで流木長の影響を把握できる。また、同図の実験Ⅲ-2-3と実験Ⅲ-2-4を比較することで長さの異なる流木が混合した場合の流木密度の影響を把握できる。これらより、流木長や混合（長さの異なる流木）が異なっても、流木の流下特性はほぼ同様であることがわかる。

前述の流木の流下特性が、流速分布と河道平面形状とどのような関係にあるかについて整理したものが図3.45～3.48である。これより、流木の流下位置はほぼ主流部に対応することがわかる。

以上より、流木の流下位置は、流木の長さや流木密度にあまり係わず一定の傾向を示し、その卓越位置は主流部と深い対応関係にあることがわかった。このことは、流木集積を考慮した橋梁の径間設計において、必ずしも全径間を同一にする必要性のないことを示唆している。例えば、出水規模によって主流位置が大きく変化しない状況であれば、この部分のみの径間を広くすれば、他の径間はそれより狭くできることになり、合理的な設計に結びつくと考えられる。しかし、流木集積後は流木通過位置が変わることも考えられることから、大量に流木が集積するような条件（例えば流木長径間長比 γ が大きく、桁下余裕高が小さい場合）では、径間長を一様とする必要性が高くなる。

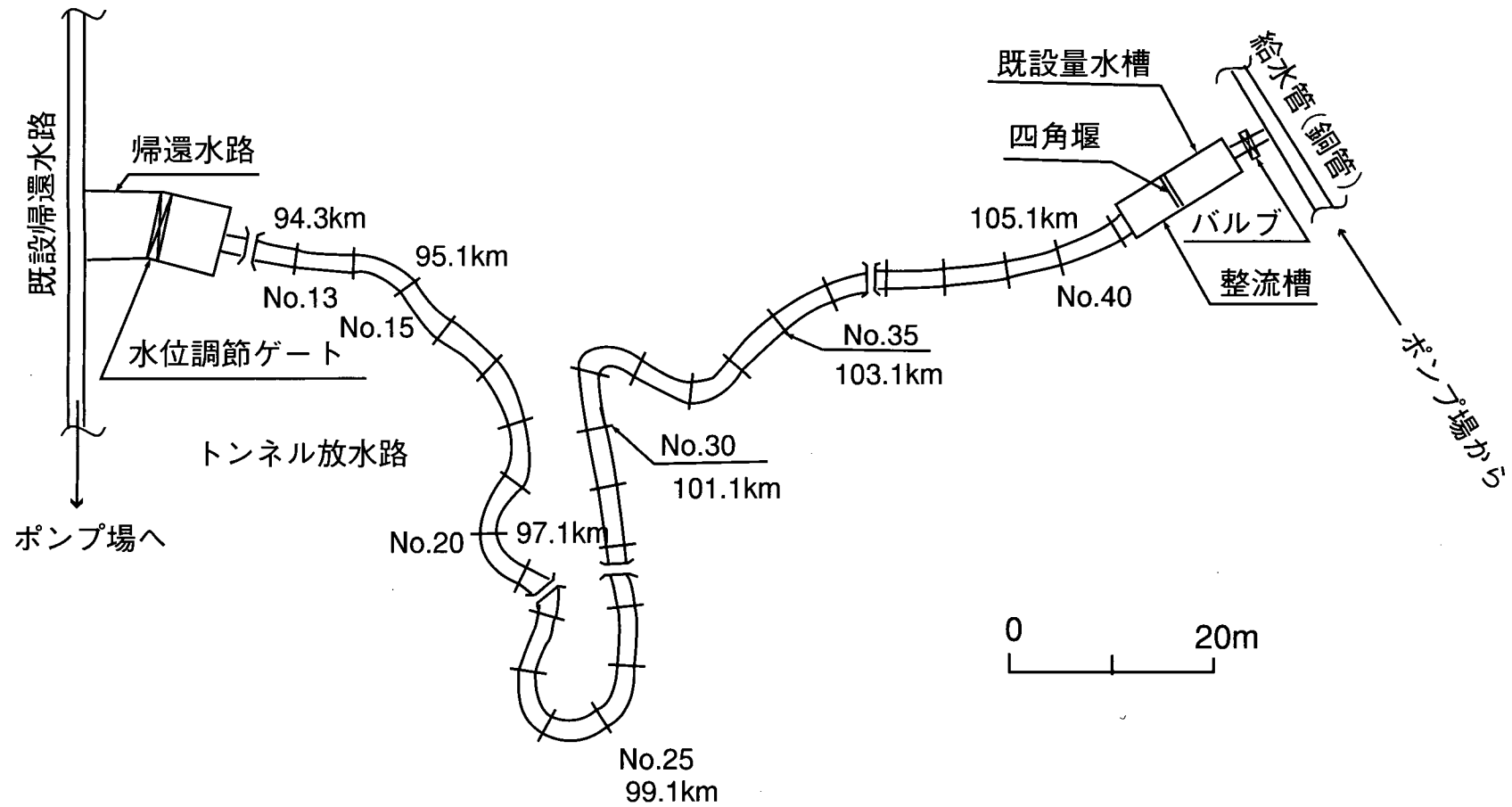


図 3. 42 最上川河道模型実験施設平面図

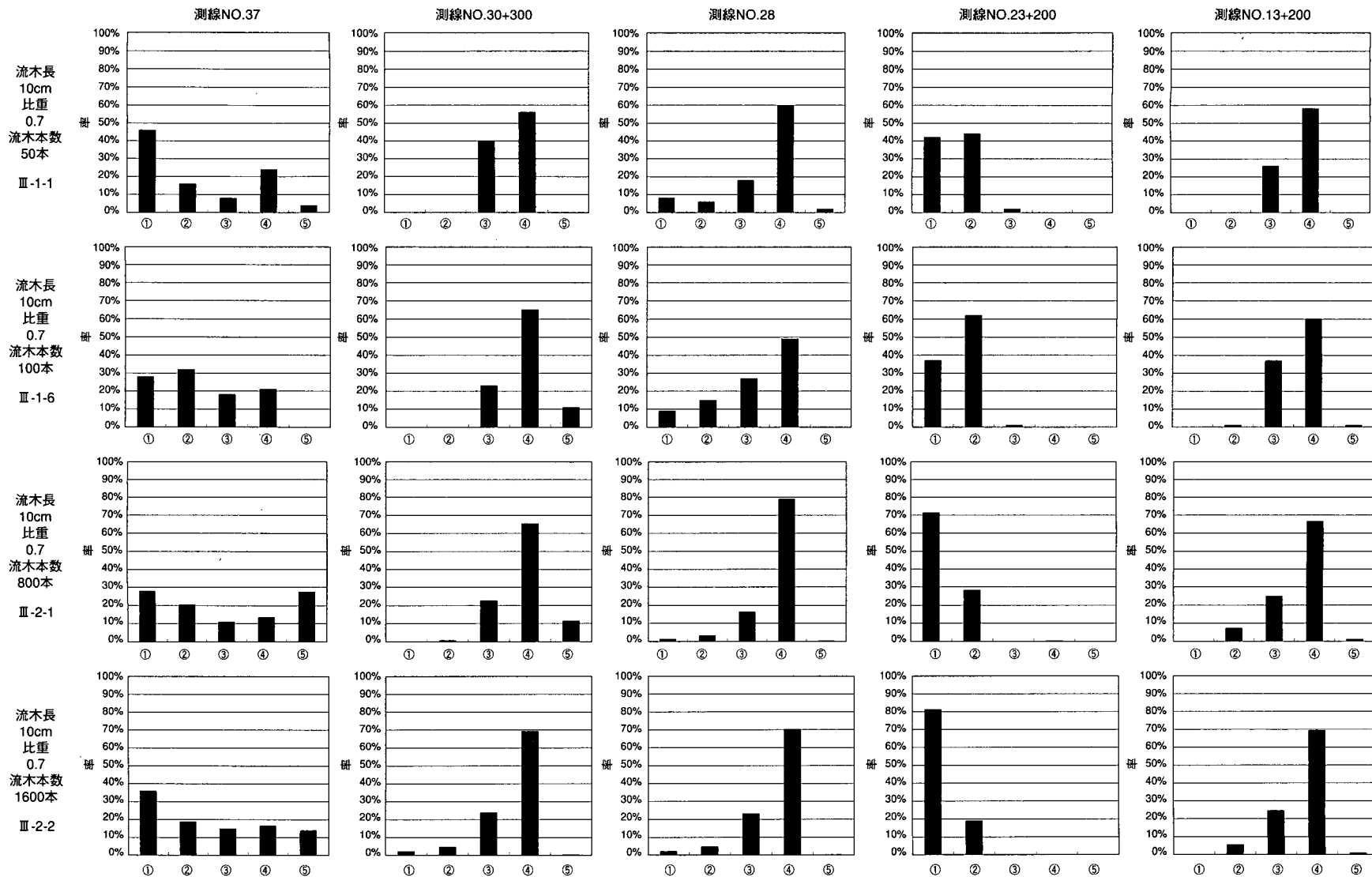


図 3.43 流木密度による流下特性比較

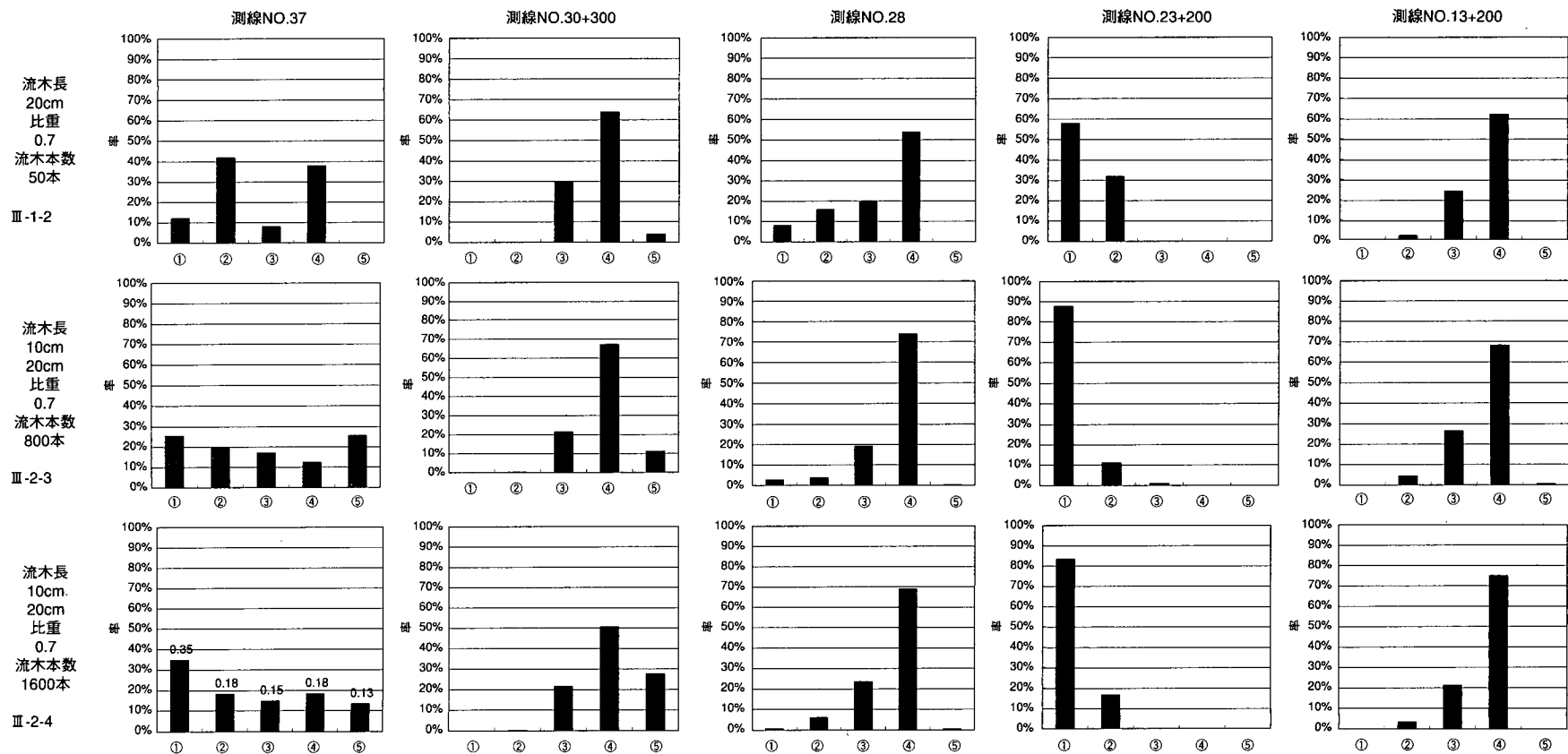


図 3.44 流木長、流木密度による流下特性比較

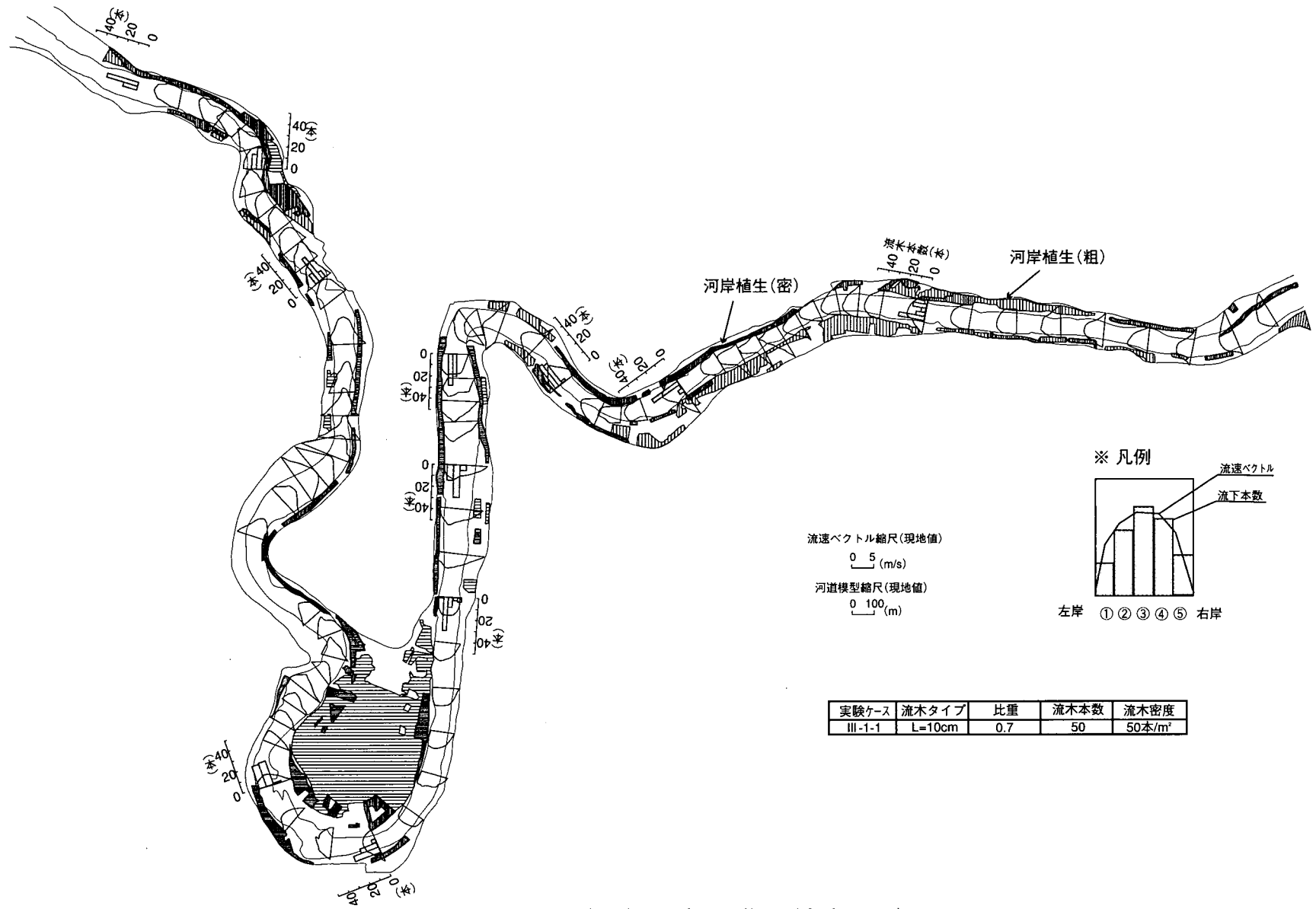


図 3.45 表面流速分布と流木流下位置 (実験Ⅲ-1-1)
流量 $Q=5400\text{m}^3/\text{s}$ (現地値)

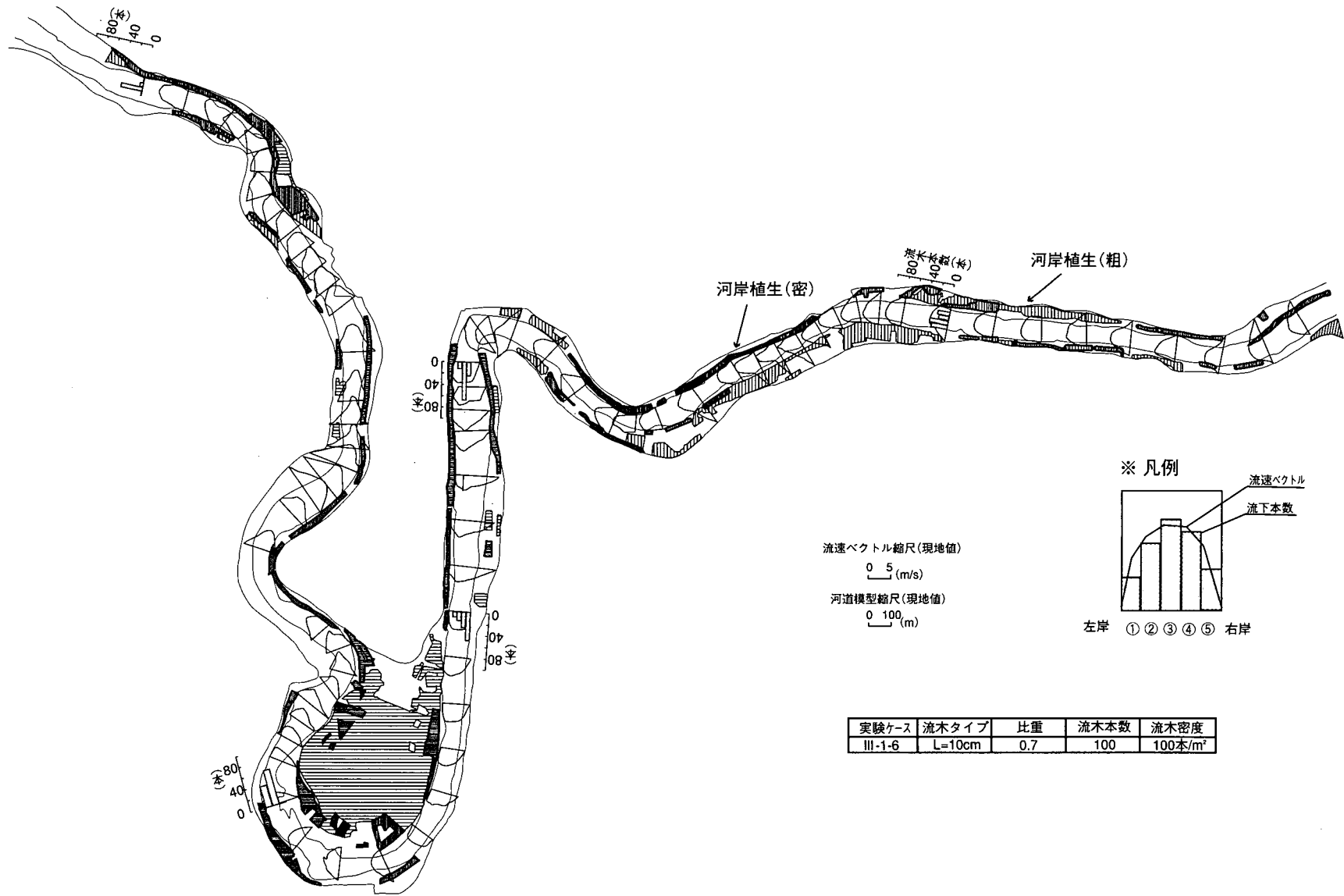


図 3. 46 表面流速分布と流木流下位置 (実験Ⅲ-1-6)
流量 $Q=5400\text{m}^3/\text{s}$ (現地値)

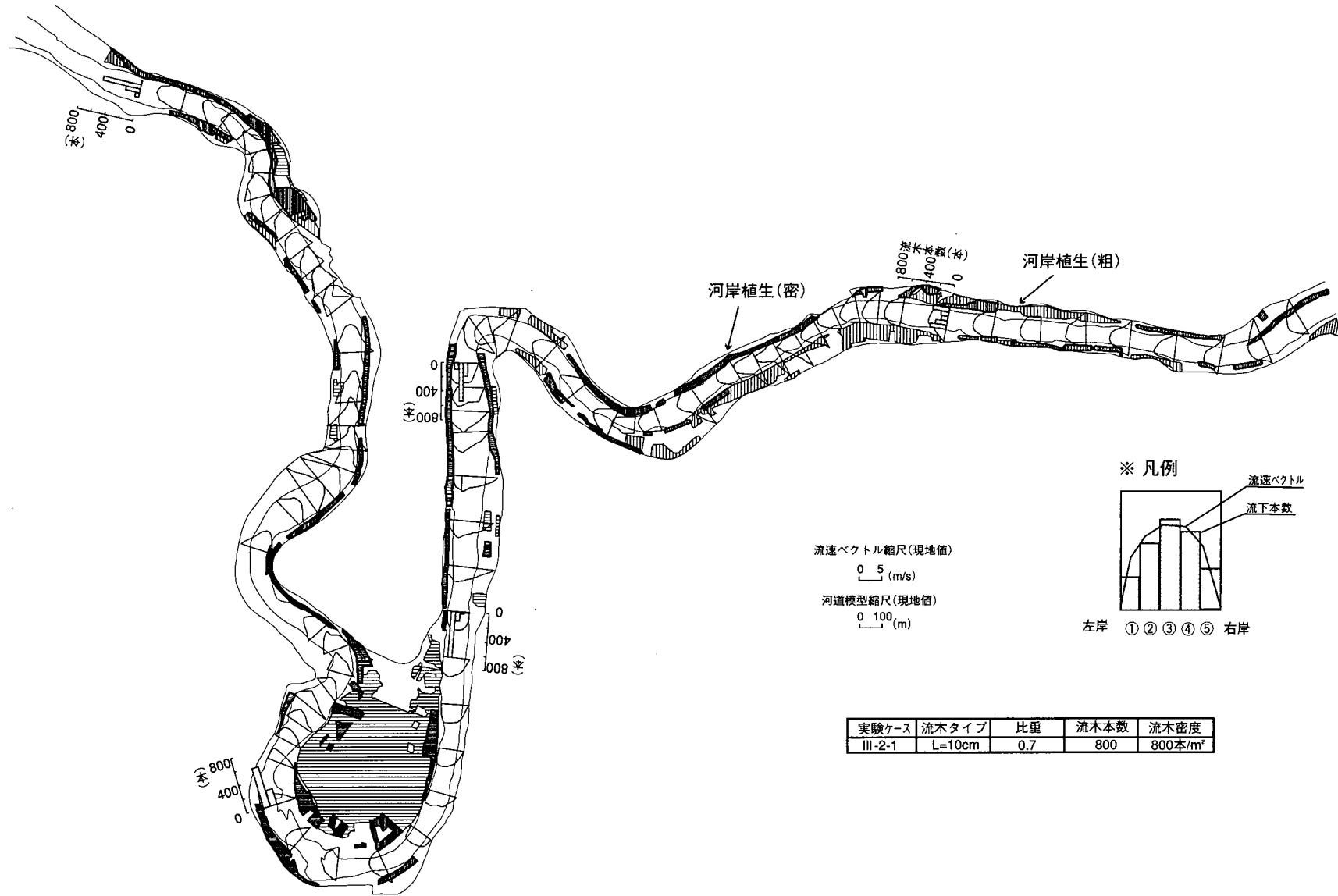


図 3.47 表面流速分布と流木流下位置 (実験Ⅲ-2-1)
流量 $Q=5400\text{m}^3/\text{s}$ (現地値)

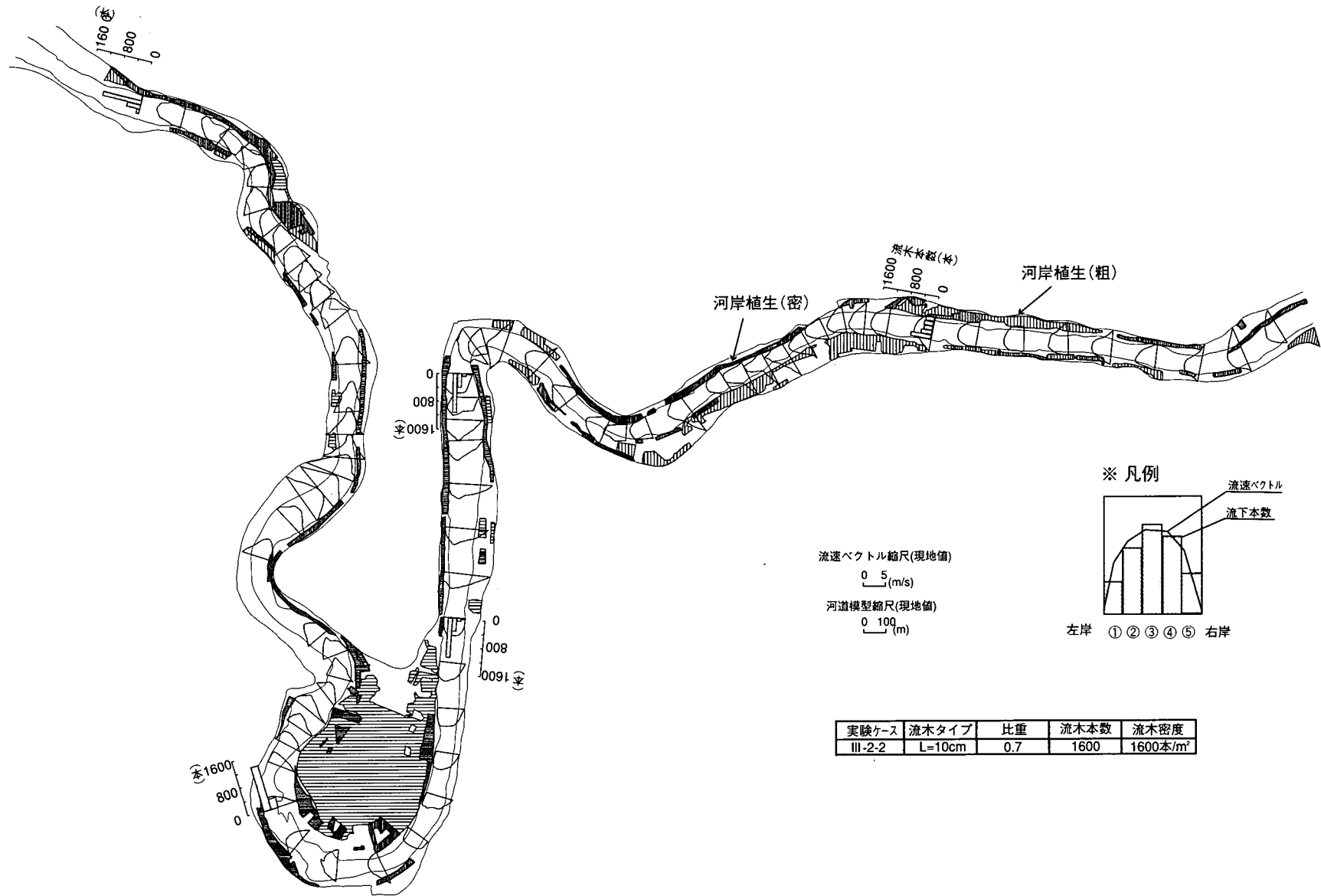


図 3.48 表面流速分布と流木流下位置 (実験Ⅲ-2-2)

流量 $Q=5400\text{m}^3/\text{s}$ (現地値)

表 3.4 実験Ⅲケース一覧

実験ケース	検討項目	流量	流木諸元	流木投入条件	水深	河床勾配	備考
1	流木の流下特性 (流木の分散・集中状況等)	5,400m ³ /s (現地計画 流量)	L:10c m D:1cm タイプ1	50本/m ² ×1回	約15～ 25cm	約1/700 ～1/2000	1/60縮尺模型、河 道幅:約1.2～2.5m 主流部流速:約35 ～80cm/s
			L:20c m D:1cm タイプ1				
			L:10c m D:1cm タイプ1	5本/m ² ×10回			
				10本/m ² ×5回			
			50本/m ² ×1回				
			100本/m ² ×1回				
			L:10c m D:1cm タイプ2	50本/m ² ×1回			
2	流木の流下特性(投入密度 大)		L:10c m D:1cm タイプ1	800本/m ² ×1回			
			L:10c m D:1cm タイプ1	1600本/m ² ×1回			
			L:10と20cm (D:1cm) の混合、タイプ1	800本/m ² ×1回			
			L:10と20cm (D:1cm) の混合、タイプ1	1600本/m ² ×1回			