

流木に関する実験的研究

足立 昭平・大同 淳之

EXPERIMENTAL STUDY ON WASHED TIMBERS

by Shōhei ADACHI and Atsuyuki DAIDŌ

Synopsis : A large number of growing trees, cutted trees and members of wooden structures are washed away by a flood. Some of these washed timbers are caught by the bridge piers and give rise to break the bridges and banks. In order that the basic consideration how the washed timbers are smoothly carried away through the span of the bridge piers may be had, some experiments with use of the uniform size model timbers are made. Although the experiments have not been finished yet, the authors obtained some representative expressions about the critical conditions that all of the washed timbers are entirely caught by the bridge piers, and about the dam-up water stage due to the accumulated timbers.

1. 緒 言

洪水時に流失する木材は、山地崩壊による立木、山腹に切り倒されている原木、河岸の貯木場に集積された木材のほか、山間上流部で流失した木橋、家屋などであつて、洪水ごとに失われる木材量は、地方によつて差異はあるけれども、莫大な数量にのぼる。たとえば和歌山県下における流失木材石数は、同県庁広報課の資料によれば表-1 のようであり、過去4年間に約130万石と推定されている。

Table 1 Washed timbers due to floods in Wakayama Prefecture

Name of the river	Year	1953	1954	1955	1956	Remarks
Arita river		(22 930) 258 300	(780) 10 900	(760) 5 400	(760) 5 800	Unit : Koku (): Picked up
Kino	"	15 680	200	—	—	
Koza	"	23 000	(6 750) 225 000	(38) 500	(453) 1 000	
Kumano	"	73 894	(38 081) 128 140	(10 737) 24 952	(11 556) 41 606	
Hidaka	"	484 670	(1 700) 2 000	—	—	

これらの流木は流下の途中、各種の河川構造物を破損し、災害を激化する。とくに橋梁に対しては、たんにその衝撃力によつて橋体を破損するだけでなく、橋脚に堰止められた流木がうず高く堆積して、いちじるしく流水の疎通を阻害し、橋梁上流側の水位を堰上げる。その結果、堤防の溢流破堤あるいは洗掘による橋体の破壊、流失を招来する。

昭和28年の北九州および南近畿の大水害、また昭和32年の北九州諫早地方の水害は、いずれも未曾有の豪雨によるものであるが、災害を激化した諸種の要因の一つとして、このような流木の害をあげることができ

る。

流木に対する最善の方策は、もちろん有用な材木を流失しないという点からも、まず流木の原因を除去す

ることであつて、山間上流地域における原木の集積、木橋の架設あるいは家屋の建造などは、河川管理の立場から再検討されねばならない。しかしながら不可避免的な流木に対して、それらを支障なく流下せしめ、流木による派生的災害を防止することも忘れてはならぬ問題の一つである。すなわち、流木が予想される河川においては、既設橋梁の流木疏通能力を再検討するとともに、今後の架橋計画において、この点を十分考慮しなければならない。

本研究は模型化した実験水路において、流木の流下が橋梁によつて、どのように阻害されるかを検討し、さらに若干の実例をとりあげて、従来ともすれば観念的に、洪水のもたらす必然的災害として放置されがちであつたこの問題に、一つの足掛かりを与え、流木による災害防止の基本的指針を求めることを目的としたものである。

2. 実験装置とその方法

実験に用いた水路は図-1に示すような巾50 cm、深さ20 cm、長さ15.00 mの鋼製水路であり、上流部に模型流木投下用の布ベルトコンベアを、また下流端に流木捕集用の金網の箱をとりつけてある。水路への

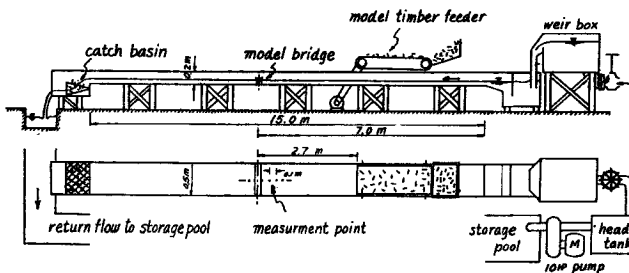


Fig. 1 Equipment for washed timber experiment

ロググラフに水位変化を自記せしめた。

模型流木としては0.2 cm×0.2 cm×5.0 cmのマッチ棒を用い、模型橋梁の橋脚は高さ8.5 cm、長さ6.5 cm、巾1.3 cmの尖頭楕円形である。実験はまず個々の流木が橋脚に堰止められる状況を仔細に観察することから始め、ついで橋脚の配列が図-2に示すような3つの支間割りについて、数種の流量および流木量を与え、流木の堆積が橋梁支間を閉塞して

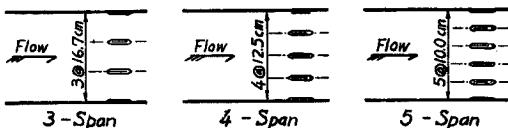


Fig. 2 Kinds of span in this experiments

3. 実験結果と考察

(1) 流木堆積の過程 流木が橋脚に堰止められる現象の第一の要素は流木の形状、寸法である。実際の橋梁に堆積した流木の一本一本を丹念に調査することは不可能でないにしても、きわめて困難な仕事であり、また現在そのような資料は全く得られていない。しかしながら数多くの災害の写真から、流木の大部分は奔流にもまれて原形を失い、個々ばらばらの素材の群と化してしまうと判定することができる。もちろん流下距離の短い橋梁流失材などには、原形を保っているものもあるが、これらは構造物自体の流失を防ぐことが先決問題であるから除外してよいであろう。写真-1は昭和28年7月18日の洪水における有田川河口付近の流木の実例を示したものである。

このような大小さまざまな流木をどのように規格づけるかは問題ではあるが、現象の基本的表示方法とは

給水は、10 HP 揚水ポンプ、8 in 空気作動弁および流量測定用の梯形堰をもつ循環系路を使用している。なお水路勾配は1/1000に固定し、水路床面の粗度にも特別の考慮ははらわれていない。

水位の測定はポイントゲージと、水路床面から引きだしたU字管を併用し、U字管内には電気抵抗式自記水位計を取り付け、インキ書きオシ

とから始め、ついで橋脚の配列が図-2に示すような3つの支間割りについて、数種の流量および流木量を与え、流木の堆積が橋梁支間を閉塞してしまうような限界条件を求め、さらに堆積した流木量と堰上げた水位との関係について若干の考察を試みた。



Photo. 1 Washed timbers in the Arita river (1953. 7. 18)

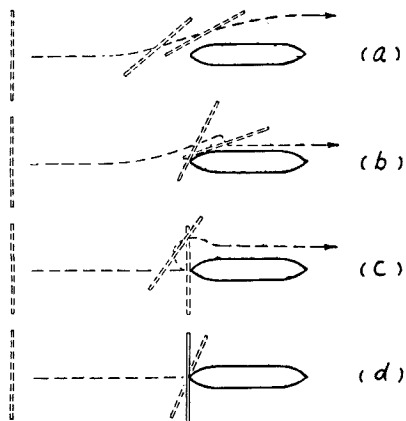


Fig. 3 Cases of state for timbers to be washed away

ちろんのこと、その考え方すらも全く不明であるから、まず流木の形状、寸法が一樣である場合をとりあげる。このことは、流砂現象の解明が均一砂粒から始められたことと全く同じ意味をもつといえよう。

流木の一本一本が橋脚に堰止められる状態を観察するために、橋脚の正面 20 cm 上流の地点に模型流木を一本ずつ投入したのであるが、その結果、流木流下状況を次の 4 つに分類することができた。

(a) 流木は橋脚に全く接触しないで流下する場合。

(b) 橋脚に接触するが、その側面を滑って流下する場合。

(c) 橋脚の先端に正面衝突してはねかえり流下する場合。

(d) 流木の中央部が橋脚の先端で支持され、その左右にかかる流水の圧力が釣り合う場合。その中には一時的な滞留であるものも少なくないが、とにかく橋梁に堰止められる。

これらのスケッチは図-3 のようである。同図は流木を流れに対して直角の向きに投入した場合を描いてあるが、流れに平行に投入した場合も全く同様である。

このような試行を 500 回繰返した結果は表-2 のようである。表には、あらかじめ 1 本あるいは 2 本の流木を (d) の状態において、同様な試行を繰返した場合も記載してある。また分類 (d) の数値は、時間を長くおくと流失してしまうものもあるから、その時間的变化を示すと図-4 のとおりである。

Table 2 Percentages of each case

No.	Hydraulic condition	Initial accumulated condition	Case			
			(a)	(b)	(c)	(d)
1	A	0 (piece)	16.2%	34.4%	36.4%	13.0%
2'	B	0	27.6	32.7	30.7	9.0
2	B	0	18.8	30.8	42.8	7.6
3	B	1	15.7	25.2	47.4	11.7
4	B	2	11.7	23.8	46.2	18.3

A: $h=4.8$ cm $v_s=20.0$ cm/sec

B: $h=7.5$ cm $v_s=33.4$ cm/sec

これらの結果から、流木が橋脚に堰止められる確率は、2 本目、3 本目とすでに何本かが堰止められると急に増大し、また数本が堆積すると、互いに組合つて流失し難くなることを認めることができる。流速および流下中の流木の向きについては資料が少ないが、流速が大きいと一本の流木が堰止められる確率は小

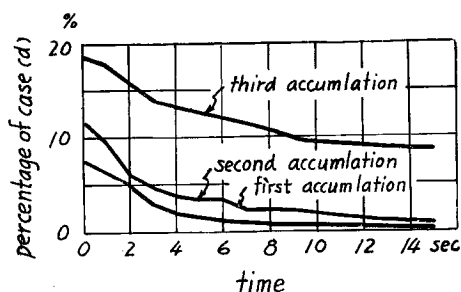


Fig. 4 Time changes of percentage of case (d)

(2) 流木による支間閉塞 橋梁支間が十分広い場合には、個々の橋脚に堰止められた流木は、それぞれ独立に堆積し、ある限度以上には堆積しない。しかし支間長が十分でない場合には、隣りの堆積流木と連結して支間を閉塞し、上流から流下してくる流木を完全に貯溜してしまう。実験で与えた流木密度に対して、このような支間閉塞状態に至るまでの時間を、各支間長別にプロットすると図-5のようである。ここに流木密度とは流下中の流木が水面で占めている面積の全水面積に対する比であらわしたものである。

図-5の点はかなり散らばっているが、流木密度が小さく、支間長が大きいほど閉塞しにくいという常識的判断と一致しており、また同一の流木密度に対して、支間長が10.0 cmと12.5 cmの場合は大差ないけれども、16.7 cmになると急に閉塞しにくくなることを示している。実験点のちらばりは、流速が異なっていることも関係があるようであるが、流木の流下が水路幅について一様でないことによるものであつて、とくに支間数の多い5 @ 10.0 cmの場合は、個々の橋脚に堆積する流木量が異なるため、その散らばりが大きいものと判断される。

実験の範囲内では、120秒以上経過してなお閉塞しないものは、一応支間閉塞の危険は少ないと考えられたので、120秒以上継続した実験について、閉塞したものとし、しないものを対比し、さらに表面流速によつて分類して、流木密度に対する支間閉塞の限界を求めると図-6のようである。この限界値は限られた小範囲の実験に基いているから、さらに実験範囲を拡げ、流木寸法を変化せしめた実験、あるいは相隣る支間長に差のある場合などの実験を加味しなければならないのであるが、一応流木による支間閉塞の限界条件を表示する一つの方式であるといつてよいであろう。

(3) 流木堆積による水位の堰上げ 橋脚に堰止められた流木は、水面を覆うだけでなく、水面下に押し込められ、支間が閉塞されたときには、流木の堆積は水路底面に達している。したがつて流木堆積の縦断面は、橋脚前面で水深と等しい一辺と、水表面に沿つて上流側に拡がった堆積長を一辺とする三角形形状を呈

さく、また流下中の流木の向きはほとんど無関係であると推察できる。

つぎに一つの橋脚正面に連続的に流木を投入すると、堰止められた流木は互いに重なり合つて、橋脚先端でその底辺の中点を支えられる三角形形状に堆積し、次第に上流および横方向に拡がる。しかし堆積量にはある限度があるようであり、それ以上堆積すると不安定となり、堆積した流木が一団となつて流失する。この限界は流速によつて異なるようであり、流速の速い場合ほど少ないが、堆積三角形の底辺は、実験範囲内ではほぼ流木長の4倍程度と判定された。

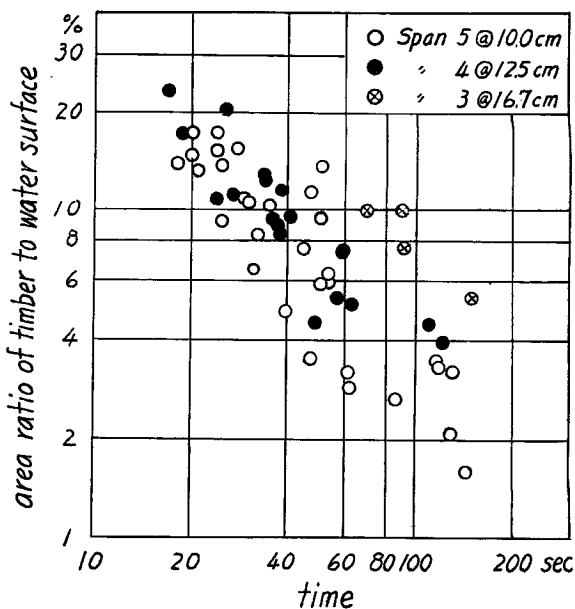


Fig. 5 Time for closing the span with washed timber

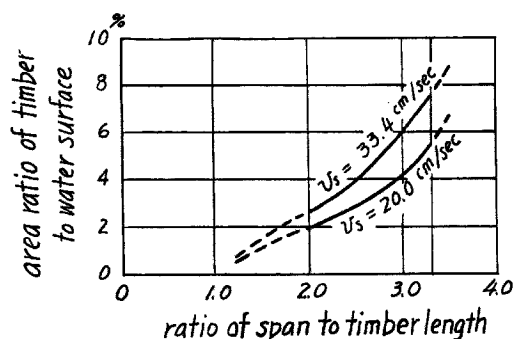


Fig. 6 Critical condition for closing the span with washed timbers

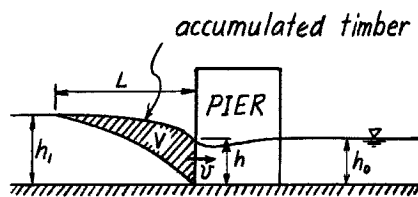


Fig. 7 Dam-up by accumulated timber

し、丁度孔だらけの樋門を閉じて流水を堰上げた恰好となる。いま 図-7 に示すように、堰上げられた上流側の水深を h_1 、平均流速を v_1 、橋脚前面すなわち流木堆積の下流面における水深を h 、流速を v 、また下流側の等流水深および平均流速を h_0 、 v_0 とおき、流木堆積の空隙率を ε であらわすと、連続の法則から

$$v_0 h_0 = v_1 h_1 = v \varepsilon h \quad \dots\dots\dots (1)$$

でなければならない。

簡単のため、水路床勾配が 0 に近く、また h_1 と h_0 の値に大差がない場合を考えるならば、跳水現象は無視できるから $h_0 \doteq h$ とおくことができ、またベルヌーイのエネルギー式から

$$v \doteq \frac{v_0}{\varepsilon} \doteq C \sqrt{2g(h_1 - h_0)}$$

すなわち

$$h_1 - h_0 \doteq \left(\frac{1}{C\varepsilon} \right)^2 \frac{v_0^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。

ここに C は一種の摩擦係数であつて、樋門の場合の流出係数に相当する。

C および ε はともに、流木堆積の詰まり方、あるいは流木の堆積量に関係する係数であると考えられるから、(2) 式の $(1/C\varepsilon)^2$ を係数 K で置きかえ、この係数に堆積流木のあらゆる性格を含めた定義を与えることにすれば、結局流木堆積による水位堰上げ高 Δh は、

$$\Delta h = K \frac{v_0^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

実験値から係数 K を求め、これを橋脚前面の流木堆積断面積 A (実験の範囲ではこの地点における跳水現象はなく、この値は等流の場合の流水断面にほぼ等しい値となつた) と堆積した流木の総体積 V との比 V/A に対してプロットすると 図-8 が得られた。実験点はごく少量の堆積から、非常に多量が堆積した場合まで含めてあり、実験条件の差異にもかかわらずかなり良い相関関係を示しており

$$K \propto \left(\frac{V}{A} \right)^m \quad \dots\dots\dots (4)$$

の形で表示でき、指数 m の値は 1 に近い。

(V/A) はたんに流木堆積の状態をあらわす量の一つとしてとりあげたにすぎないのであるが、これは長

さの元を有する量であつて、流木堆積の縦断面形が三角形である場合には、水表面に沿つて上流に向つて堆積した流木群の長さ L に等しく、一般には L の函数である。実験では残念ながら L の測定を見逃したため、係数 K と水表面での堆積長 L との相関を直接求めることはできなかったが、水位堰上げに関する表示式 K として

$$\Delta h \propto L^{m'} v_0^2 \dots\dots\dots (5)$$

が一つの手掛りを与えるであろう。

4. 流木による橋梁被害の実例と実験結果の適用

実験で得られた、流木堆積に関する諸量の性格を基本概念として、次に災害の実例を検討しよう。

昭和28年6月26日の九州地方における

水害は、その規模の大きさから、近年の代表的災害の一つに数えることができる。土木学会西部支部水害調査研究委員会の調査¹⁾によれば、橋梁の被災は九州全域で、道路橋のみについて、流失総延長28 000 m、被災件数約1 550件にのぼり、それらの大部分が多かれ少なかれ流木の被害をうけている。

被災橋梁を流木に着目して分類すると

- (a) 洪水位が計画高水位をはるかに突破し、橋体が水中に没して、流木が直接橋桁に激突したもの
- (b) 橋脚が脆弱で、流木の衝突に耐えかねたもの
- (c) 流木の堆積いちじるしく、基礎部の洗掘また堆積流木の浮力、重圧によつて破損もしくは流失したものの3つの場合がある。(a)、(b)は河川上流部の橋梁に、また(c)は中、下流部の橋梁に多く、その傾向は各水系に共通している。

(a)、(b)の場合は流木の衝撃力が表面的原因ではあるが、鉄筋コンクリート橋脚が、流木の衝撃だけで致命的損傷をうけた例はほとんど見当らず、これらの災害防止は、流木の問題よりむしろ計画高水位の正しい把握にあるといえる。山間上流部における二、三の無被害橋梁はこのことを実証している。これらの橋梁はまた支間長が10.00m以下のものも少なくないのであるが、流木が堆積して支間閉塞を生じたような形跡は全く見受けられない。その理由は流木流下の絶対量が少ないことと同時に、流速が非常に速いことによるものであろう。図-5および図-6から、その限界を指摘するには、実験範囲が十分でないが、実験結果は、この推定を指示しており、限界を見出すことの可能性を暗示しているように思われる。

一方(c)の場合には、橋梁自体は堅牢であつて、一部の破壊に止まつたが、そのため流木堆積による水位堰上げが、堤防の溢流、破堤の非常事態を惹起した例も少なくない。

被災橋梁をはさんで無被害の橋梁のあるような場合を選んで、その支間割りに注目すると、無被害橋梁のいずれもが、比較的長大な支間を有していることに気付く。もちろん長大な支間を有するものは、その構造も堅牢であるから、これからただちに流木の堆積が絶無であつたと結論づけるのは早計であるが、明らかに流木堆積のはなはだしかつた被災橋の支間長と対比すると、流下してきた流木量に対応して、ある限界の存在することを認めうる。

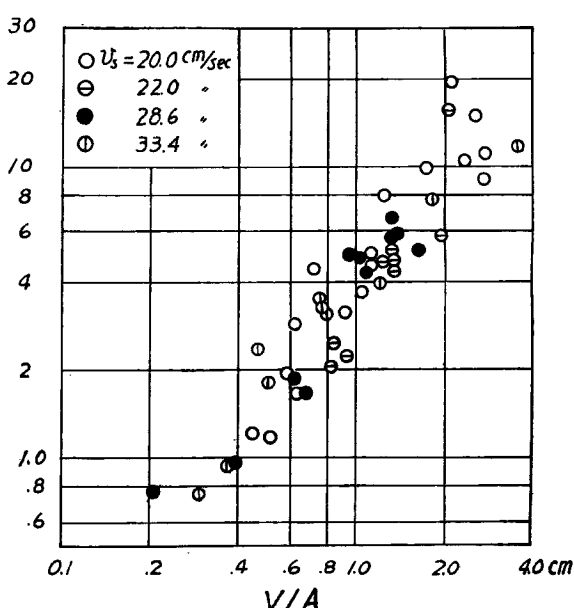


Fig. 8 Relation between K and V/A

たとえば筑後川本川久留米市において、小森野橋が流木によつて全面的に支間を閉塞され、一挙に流失しており、また西鉄筑後川橋梁は全支間の半分以上を閉塞され、その流木堆積量は、実に2万石と推定され、橋体自体の破損とともに上流左岸堤防の溢流破壊を生じた。しかし両橋の上流あるいは下流地点には全く被害をうけなかつた橋梁もあり、それらの架橋位置とそれぞれの橋梁支間割りを示すと、それぞれ図-9および表-3のようである。



Fig. 9 Sketch of the Chikugo-river near Kurume city

Table 3 The damage to bridges on the Chikugo-river, June 1953²⁾

No.	Name	Length (meter)	Span (meter)	Presence of damage
7	Mamezu-bridge	350.00	5@30.00, 2@26.20 & 2@22.00. 2@7.80	None
A	National-railway-bridge	—	—	—
8	Chitose-bridge	125.00	1@9.55, 7@9.10 & 7@7.10~7.60	None (under construction)
9	Komorino-bridge	330.00	33@10.00	Washed away entirely ; Persumptive lumber accumulation is 400 koku
10	Kurume-bridge	324.50	9@30.50 & 2@25.00	None
B	Nishi-railway-bridge	322.48	7@30.48*, 5@15.24* & 1@12.19*	Damaged partly ; Persumptive lumber accu- mulation is 20 000 koku
11	Miyanojin-bridge	309.77	6@31.15, 5@20.48 & 1@20.47	Damaged partly ; Persumptive lumber accu- mulation is 200 koku
12	Jindai-bridge	385.60	11@28.10, 2@22.95 & 2@15.30	None, Lumber accumula- tion is about 80 koku
13	Oshiro-bridge	298.80	2@22.95, 9@28.10	None
14	Chinzei-bridge	165.75	1@17.00, 4@14.00 & 8@9.10~9.50	None
15	Chikugo-bridge	426.60	4@60.40, 8@10.00 & 7@15.00	None

* clear span length

まず⑩西鉄筑後川橋梁に堆積した流木は、そのすぐ上流150mの地点にある⑪宮の陣橋を通過したものでなければならない。したがつて⑩の流木堆積は右岸の15.24m径間4連から始まり、この部分の支間閉塞によつて水位が堰上げられた結果、さらに30.48m径間3連にまで堆積が拡がり、その影響は上流の⑨にまで及んで、その20.48m支間3連の流木堆積を誘発したものと考えられる。この⑩西鉄筑後川橋梁から⑮筑後川橋までの間には、流失橋梁はなく、また二、三の小支川の合流があるけれども、いずれも流木を多量に流下するほどの規模をもっていない。さらにこの区間に発生した堤防の欠壊はかなり大規模ではある

が、破壊時間から推して、下流側の⑩に流木が堆積するまでの間は、この区間における流木流量は同程度であつたと考えてよく、少なくとも下流が上流側より流木が多いということはない。したがつてこの区間の無被害橋梁は、流木の疎通能力という点において、⑩西鉄筑後川橋梁に優つてはいるはずである。これらの橋梁の支間割りについて、まず最大支間長を比較すると、⑩がとくに短いとは認められないが、しかし各橋梁の短い方の支間を比較すると、⑩の15.24 m×5連に対して、⑪は20.48 m×6連、⑫は22.95 m×2連、15.30 m×2連、⑬は22.95 m×2連、また⑭は15.00 m×7連、10.00 m×7連であつて⑮筑後川橋を除いては、⑩西鉄筑後川橋梁が流木疎通に対して不利であると認めることができよう。⑯神代橋の流木堆積推定80石と報告されていることはまた、この区間における当時の流木量に対する限界支間長が15.00 mから20.00 mの間にあるであろうことを示唆している。⑮筑後川橋については流木堆積の記事が報告されていないのであるが、この橋梁の主要区間は60.40 m 4連であつて、他の橋梁の主要区間が高々30.00 m程度であるに比べて、いちじるしく長大であり、短支間の部分には当然若干の流木堆積があつたであろうけれども、流木の大部分が長大支間の部分を流下し、特筆されるべき流水阻害がなかつたものと推定される。なお⑭鎮西橋の支間はかなり短いのであるが、これは図-8に示すように本川に架設されたものでなく、旧河川にあるから、流木量が少なく無被害であつたと考えられる。

つぎに④小森野橋の被災状況をみると、流木が全支間を閉塞し、最高水位時より5時間も早く全流失している。この橋梁は老朽木橋でもあつたが、その支間割りは10.00 m×33連である。このすぐ上流点にある⑩久留米大橋は最小支間25.00 mで無被害となつている。また下流側については、次の④国鉄筑後川橋梁の状況が不明であり、⑨の流失材がどのような経路をたどつて流下したか判定しにくい、その下流にある⑦豆津橋は最小主要支間22.00 mで無被害である。この区間については、⑩西鉄筑後川橋梁によつて流木が貯溜されているから、前区間に比べて支間閉塞の限界はやや小さいと予想できるが、橋梁の数が少ないから、10.00 mないし20.00 mという以上に細かい数値を推定することができない。

さて以上の事例から流木の堆積に関して、流下流木量と流速に対応するある限界支間のあることを認め得たのであるが、これらの実験結果がどの程度の相似性を示すかを検討してみよう。一般に数学的表示が得られていないこの種の実験の相似律は、数多くの資料を集積して、実証的に確認する以外に手段がないから、いまの段階では、相似律の本質を論ずることよりもむしろ実験と実際との間に性格的矛盾のないことを確かめ、それらの類似性から逆に相似律を求めるという進め方にしなければならない。

試みに前節で述べた実験結果を、簡単に幾何学的縮尺が1/100であり、流速の縮尺がその平方根1/10であるとおくならば(一般の開水路水流の相似律はフルード数を合致せしめることが一つの要件であり、その場合流速縮尺は長さの縮尺の平方根となる)、図-6は長さ5.0 m、小口20 cm×20 cmの様な材木の流下に対する橋梁支間の閉塞限界をあらわすことになり、パラメーターの表面流速の値は10倍になるわけである。一方筑後川の各区間を流下した流木量の詳細は不明であり、また河幅の広い区間では、流木がかたよつて流下するから、同一橋梁についても極端な場合には支間ごとに通過流木量が異なるはずである。したがつてすこぶるあいまいではあるが、たとえば流木密度が10%であつたとすると、図-6から流速4m/sec程度に対して、限界支間長は流木の長さの約3.5倍、すなわち16.5 mという値が与えられる。この値は一応事例のそれに近い。ここに仮定した流木密度10%は現実に入りうる数値であると考えられる。もちろんこれによつて直ちに図-6の曲線が妥当であるとはいえないのであつて、実際の流木は大小様々であり、模型流木よりも堆積し易いであろうし、また本実験はごく限られた一部分の範囲についてしか行われていないから、なお多くの実験資料によつて補足されなければならないけれども、これらの実験的考察が、災害防止対策への一つの目安となりうるということではできよう。

5. 結 語

以上要するに最近の水害でとくに論議的となつた流木の問題を究明する最初の試みとして、実験的に流

木の堆積による橋梁支間の閉塞および水位の脈上げについて検討したのであるが、その現象に關与する諸要素の性格を明らかにし、その基本的概念を得ることができた。さらにこれに基づいて、この種の災害対策を確立するためには、なお流木の形状、寸法およびその混合状態、洪水時における流下量の時間的变化、河幅についての分布状態、また橋梁については、その支間割りすなわち橋脚の配置、さらに斜橋の場合などの多くの問題が残されているが、引続きこれらの条件に対する実験を準備中である。

おわりにこの研究に當つて終始御指導を賜つた矢野教授ならびに実験に協力していただいた京都府技師木下新一氏および研究所員角田吉弘氏に深甚なる謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会西部支部：昭和28年西日本水害調査報告書 昭和32年2月 p. 251.
- 2) 同 上 p. 290.