

流木を伴う砕波段波衝突による波力に関する実験

一段波波高と流木径が同程度の場合一

松 富 英 夫*

1. まえがき

著者は砕波段波遭遇時の流木の挙動、流木を伴った砕波段波衝突時の波力、その時の流木の質量係数等について論じた¹⁾。しかし、後者二つについては、段波波高に比べ流木径が小さく、受圧部が連続壁の場合に限られていた。そのため、砕波段波そのものによる波力が支配的で（この理由は大きくは二つ。一つは流木そのものが小さいこと。もう一つは上方に投げ出された流体による流木衝突の緩衝効果）、流木を伴わせた意味があまりなかった。

そこで、本研究は、より実際の工学的に興味深いと思われる、段波波高と流木径が同程度で、連続壁、スリット壁、角柱（橋脚等を想定）の三つの場合について検討を行うものである。

対象波力の測定は自作の波力計（全波力のみ測定可能）²⁾で行う。波力計の測定精度が問題となろう。そこで、波圧計による全波力の測定（波圧分布の積分）を別個に行い、その測定精度も検討する。ついでに、波圧分布等の諸特性についても、若干考察を行う。

2. 実 験

2.1 波力計の測定精度検討実験

段波はゲート急開により発生させた。用いた水路は高さ0.5m、幅0.3m、長さ11.0mの

水平に設置された鋼製矩形水路で、水路下流側の10m部分が両面ガラス張りのものである。ゲートは手動の引き揚げ式（塩化ビニール樹脂製で、厚さ12mm）で、水路下流端から6mのところろに位置している。図-1に実験装置の概要を示す。

波圧分布の測定は、2cm間隔で3台の波圧計（ST研究所製）の固定された小板を、切込みの入った受圧板（連続壁を想定）内で上下に移動させることにより行った。受圧板の下端部は厚さ1mmのアルミ板で剛結し、勿論、切込み部の残りの空隙部分は他の小板で塞いだ。測定間隔は1cmで、その範囲は底面 $Z=1.2\text{cm}$ から波圧の感じる高さまでであり、高所は受圧板を逆さにして測定した。図-2に波圧計の設置方法を示す。

実験ケースは、初期ゲート下流側の流速と水深（ h_0 ）を各々零と0.02mに固定し、ゲート上流側水深（ h_1 ）を0.35、0.40、0.45mと変化させた、3ケースである。ただし、各ケース11回ずつ実験を行った。よって、各ケースでの段波発生回数は、11×波圧計を固定した小板の移動回数、である。

波圧測定はゲートからの距離 $x=5.05\text{m}$ で行った。その経時変化の記録には、ペン・レコーダーを用いた。

2.2 流木を伴った場合の波力実験

用いた水路、段波の発生方法は前節と同じである。波力測定方法は文献2)を参照されたい。

段波発生条件は、初期ゲート下流側の流速

*秋田大学助手・鉱山学部土木工学科

と水深を各々零と0.02mに固定し、ゲート上流側水深を0.40, 0.45mと変化させた、2種類である。連続壁の場合、下記の流木を衝突させるには、この程度の上流側水深を採用せねばならなかった。用いた流木は、直径(D)4.8と5.8cm, 細長比(L/D)各々6と8の4種類である。流木湿潤時の重量範囲は350~765gである。

波力実験は流木を伴う場合と伴わない場合の両方を行った。前者の場合、流木は1本のみとし、その中心軸を流れ方向に向け(縦置きと呼び¹⁾、この状態での衝突を縦衝突と呼ぶことにする)、 $x=2.55\text{m}$ のところに静置した。この時、流木は水路底面に接している。

波力測定は $x=5.05\text{m}$ で行った。受圧壁として、連続壁(受圧幅 $B=29.5\text{cm}$)、スリット壁(図-3参照。3下端は厚さ2mmのアルミ板で剛結)、角柱($B=4.0\text{cm}$ で、前二者の受圧壁を固定する鋼棒。水路底面との間に0.8cmの隙間がある)の3種類を考えた。各ケース、有効な実験が10回以上となるまで実験を繰り返した。流木が衝突しない場合があるからである(表-1参照)。

測定項目は全波力(F)の他に、段波衝突前後の壁近傍での流木の挙動、壁設置位置での流木と段波の移動速度である。これ等の測定には、自作の波力計²⁾とビデオ・システムを用いた。全波力の経時変化の記録には、ペン・レコーダーを用いた。

3. 実験結果とその考察

3.1 波力計の測定精度

図-4に代表的な実験波圧の経時変化例を示す。上から順に、顕著な衝撃波圧の見られない位置、最大衝撃波圧の生起位置、静水面位置(正確にはそれより0.2cm上部)でのものである。静水面位置での波圧の立上りを $t=0$ と同期している。図より、最大衝撃波圧は後の持続波圧³⁾より少し大きいことが判断される。本実験での最大衝撃波圧が従来の実

験値³⁾と整合的であることは確認している。 $t=0.6\text{s}$ 付近でピークが見られるが、これは波力計の場合と整合的である²⁾。

図-5に波圧分布の経時変化例(実線)を示す。ただし、最初の負圧の働きの高さまでで、11回の平均である。それより上部での波圧は小さく、正や負の値を交互に取ったりする。図中の破線は少しでも波圧を感じた領域の上限を示す($t=0.325\text{s}$ 以後は上限まで波圧を測定していない)。衝突後、上方に投げ出された流体部分の圧力が小さいことが判る¹⁾。時間を固定してデータを整理しているので、各高さでの最大衝撃波圧が読み取られていない場合もあることを断っておく。図中の一点鎖線は、波圧が働いているとした最上部まで水が存在する時の静水圧分布を示す。初期の頃は、運動量がそのまま圧力に変換されるためか、静水圧よりもずっと大きくなっている。しかも、その分布は段波内の流速分布を反映した形となっている⁵⁾。文献2)で、 $t=0.6\text{s}$ 付近の全波力でも、Stoker理論⁶⁾で予測される全静水圧よりも小さめであることを指摘したが、その理由は負の加速度効果によることが判る。この時の波圧の働く最高位は約0.42mである。参考までに、Stoker理論による入射段波波高(ΔH)と反射段波波高は各々0.10, 0.38mである。ほぼ $t=0.8\text{s}$ 以降で、Stoker理論の適用できる、静水圧分布となることも判る。ただし、その値はStoker理論で予測されるものより小さめである。

図-6に本実験での全波力の経時変化例(実線)を示す。各時刻の全波力は、図-5に示したような波圧分布を積分して求めた。破線は波力計により求めたものである(次節参照)。両者の差は、立上り部と対象外となる $t=0.5\text{s}$ 以降を除いて、小さい。前者での差は波力計の感度の問題と思われる。本実験での立上り部の傾向は著者の理論²⁾と良く一致している。後者は波力計のキャリブレーションの問題と思われる。本実験では、底面

から6cmの点に対してのみキャリブレーションを行っている。 $t \approx 0.6$ s付近では、全波力の合力位置が想定位置より大きく上方へ移動している。以上より、波力計による測定が比較的精度良いことが判断される。ただし、本波力計での流木の質量係数の算定は¹⁾、その衝撃力が小さい時は、少し問題かもしれない。

図-7は各高さでの最大衝撃波圧(顕著な立上り部の存在するもの)を示したものである。従来の理論²⁾や実験³⁾では静水面位置で最大衝撃波圧が生じるとしているが、本実験では異なり、ややその上部となっている。碎波後の波による最大波圧は静水面位置で生じるとして計算されることが多いのだが¹⁾、強い段波の場合は異なるようである。また、顕著な衝撃波圧は入射段波波高の2倍程度までで($\Delta H/h_0$ によろう)、入射段波波高相当の静水圧の4倍程度になることが判る。対象の波圧分布が相似となることも判断される。

3.2 波力

既報結果から推して¹⁾、流木の移動形態はType 1-1(流木は次第に横向きになり、段波の不連続波面部から離れていく)と思われるが、ほぼ縦衝突となった場合のみを有効な実験とした。この流木の移動形態では、段波先端の衝突時から見て、流木の衝突時間位置が大きく変動する。そのため、既報のように実験値の平均を求めることは、無意味と思われる。

図-8(a),(b),(c)に各々連続壁、スリット壁、角柱の場合で、流木を伴った時の全波力の経時変化例(実線)を示す。これ等は、上述したように、平均値でないことに注意された。図中の破線は流木を伴わない時で、各々10回の平均である。(a)の場合、他に比べて、流木による衝撃力が小さい。上方に投げ出された流体の緩衝効果によるものである(事実、 $h_1=0.35$ mの時、流木衝突は生じなかった)。(c)では、流木衝突後の

波力も大きい(10例中、この1例のみ。特殊であったが、問題提起のため掲載した)。これは、流木滞留による堰上げ効果のためと思われる。図より、段波波高と流木径が同程度の時、角柱の場合は勿論、スリット壁の場合も、流木による衝撃力は無視できないことが判る。流木衝突時に対象段波の最大波力が生じることも判る。参考までに、連続壁、スリット壁の場合の流木衝突の生起確率例を表-1に示す。

3.3 流木の質量係数

前節でも述べたように、流木衝突の時間位置が大きく変動するため、流木を伴った時の全波力の平均波形は求めていない。そこで、本研究では、個々の波形において、一番顕著なピークを示す部分の立上り始めと下がり終りを結ぶ直線で囲まれた部分を流木による衝撃力(F_d)と考え、次式より流木の質量係数 C_M の算定を試みた。

$$\int F_d dt = C_M M u_w \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 t :時間、 M :流木湿润時の質量、 u_w :流木の移動速度。算定結果例を表-2, 3, 4に示す。連続壁、スリット壁、角柱の順に、 $C_M \approx 0.3, 0.7, 1.5$ であった。連続壁の場合、段波波高が流木径よりずっと大きい時(約1.4)に比べて¹⁾、その値はかなり小さい。これは、前節で述べたことの他に、段波遭遇時の流木の移動形態によると思われる。壁面のタイプ、流木の移動形態等(換言すれば、流況)により、質量係数は大きく変化するようである。

3.4 波圧

波圧の経時変化に関する実験値例(実線)を図-9(a),(b),(c)に示す。実験値は、全波力と衝突壁がない時の入射段波水位の平均的な時間波形²⁾から評価されている。図中には、流木を伴わない時のもの(破線で、平均値)も示されている。図より、角柱の場合は勿論、スリット壁の場合も、流木衝

突時には両者間に顕著な差が生じることが判る。連続壁の場合、流木を伴わない時の波圧の大体の大きさとその傾向は、波圧計によるもの（図-4参照。最大波圧生起位置でのもの。衝突直後の鋭い立上り部は除く）とほぼ同じであることも判る。本定義での波圧の位置が推測されよう。

4. むすび

段波波高と流木径が同程度の場合の流木を伴う砕波段波衝突による波力について実験的検討を行った。合わせて、波力計の測定精度や波圧分布等の検討も行った。本研究で得られた主要な結論は次の通りである。

1) 自作の波力計による波力測定が、ほぼ妥当であることを確かめた。

2) 顕著な衝撃波圧は入射段波波高の2倍程度までで、入射段波波高相当の静水圧の4倍程度までに達する。また、衝突後、上方に投げ出された流体部分の圧力は小さい。

3) 最大衝撃波圧は静水面位置で生じないこと、各高さでの最大衝撃波圧の分布は相似性を有することを確かめた。

4) 対象段波では、角柱の場合は勿論、スリット壁の場合も、流木による衝撃力は無視できない。また、これ等の場合、流木衝突時に最大波力(圧)が生じる。

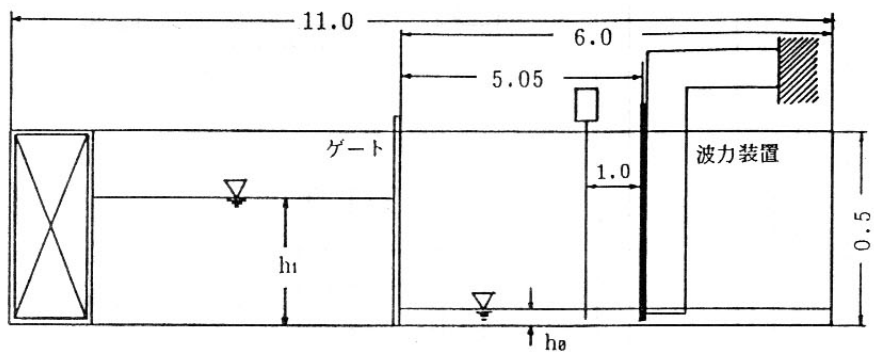
5) 上方に投げ出された流体による緩衝効果、段波遭遇時の流木の移動形態等(換言すれば、流況)により、流木の質量係数は大き

く(0.3~1.5程度に)変化する。流木の細長比にもよることは文献1)で指摘した。

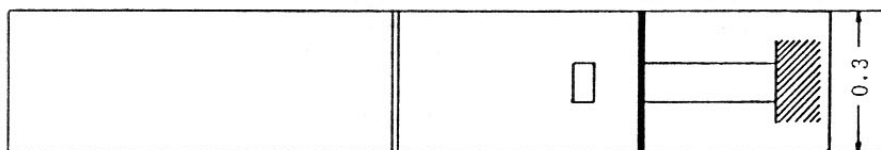
謝辞：実験を行うに当たり、本学卒業研究生中村憲市、石井俊彦、町本康之の各君の助力を得た。記して謝意を表する。なお、本研究の一部は昭和63年度(財)建設工学研究振興会の奨学金により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 松富英夫：流木を伴う砕波段波衝突による波力について一段波波高に比べ流木径が小さい場合一、海岸工学論文集、第36巻、pp. 574-578, 1989.
- 2) 松富英夫：砕波段波衝突による衝撃波力について、土木学会論文集、No. 399, pp. 147-155, 1988.
- 3) 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄：津波の研究(Ⅱ)、第9回海講論文集、pp. 50-54, 1962.
- 4) Cumberbatch, E.: The impact of a water wedge on a wall, J. F. M., Vol. 7, pp. 353-374, 1960.
- 5) 松富英夫：下流側水深を有するダム破壊流れ先端部の水面形、土木学会論文集、No. 375, pp. 161-170, 1986.
- 6) Stoker, J. J.: Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, 1957.
- 7) 服部昌太郎：海岸工学、コロナ社、1987.



側面図



平面図

単位 (m)

図-1 実験装置

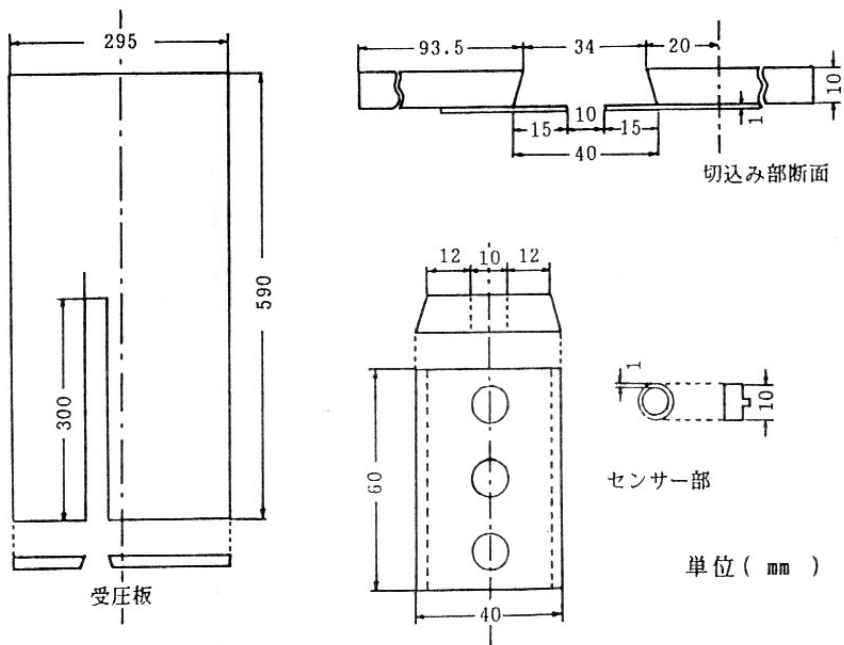


図-2 波圧計の設置方法

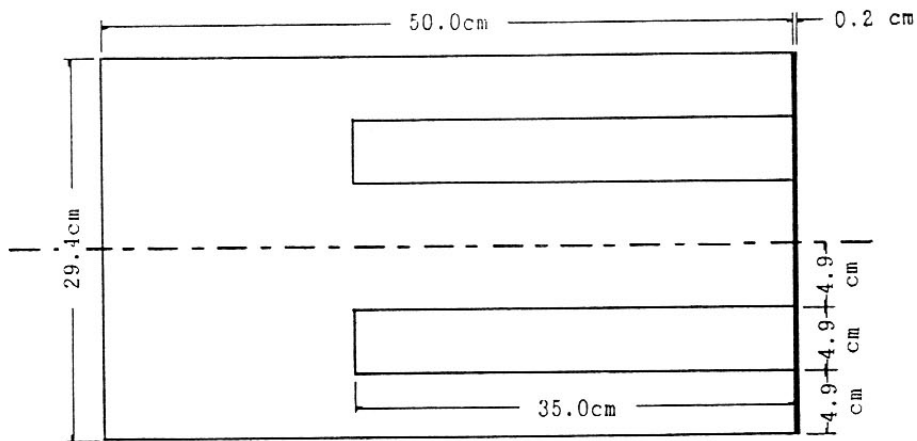


図-3 スリット壁

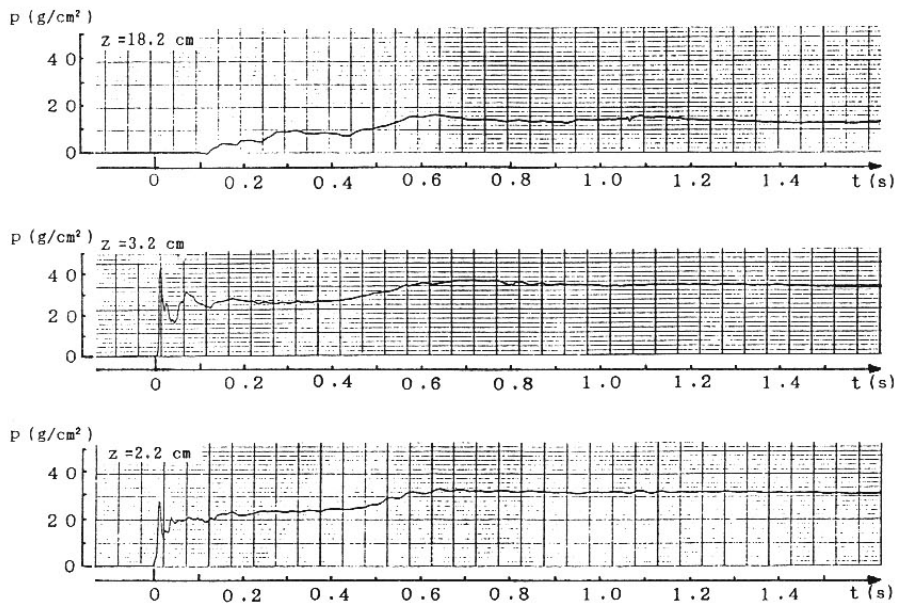
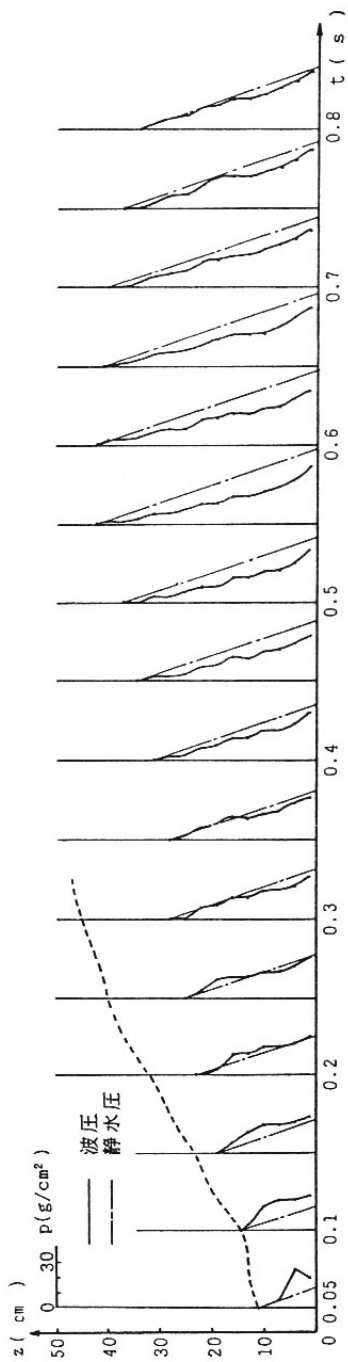


図-4 波圧の経時変化例 ($h_1 = 0.40\text{m}$)



図—5 波圧分布の経時変化例 ($h_1=0.40\text{m}$)

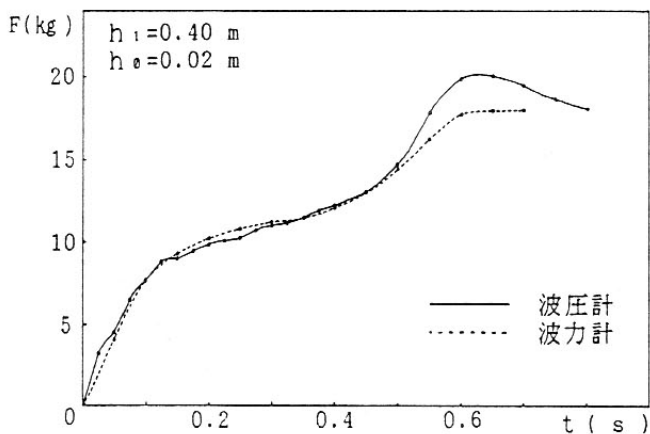


図-6 全波力の比較例 ($h_1 = 0.40 \text{ m}$)

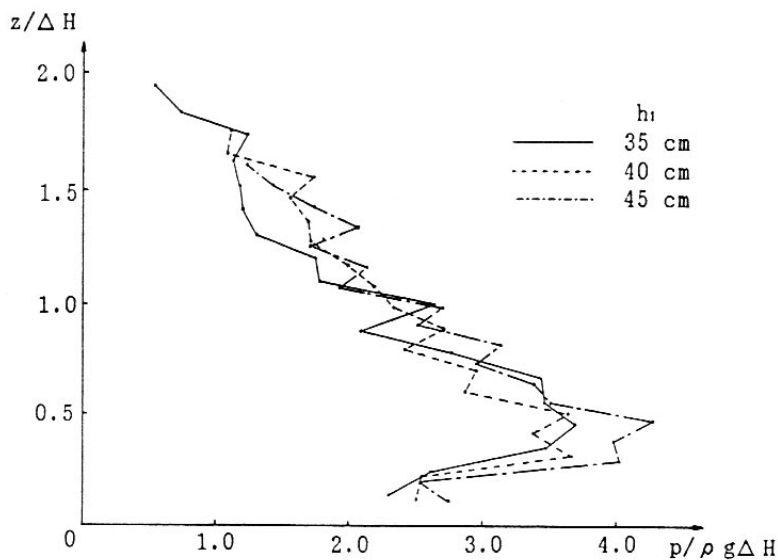
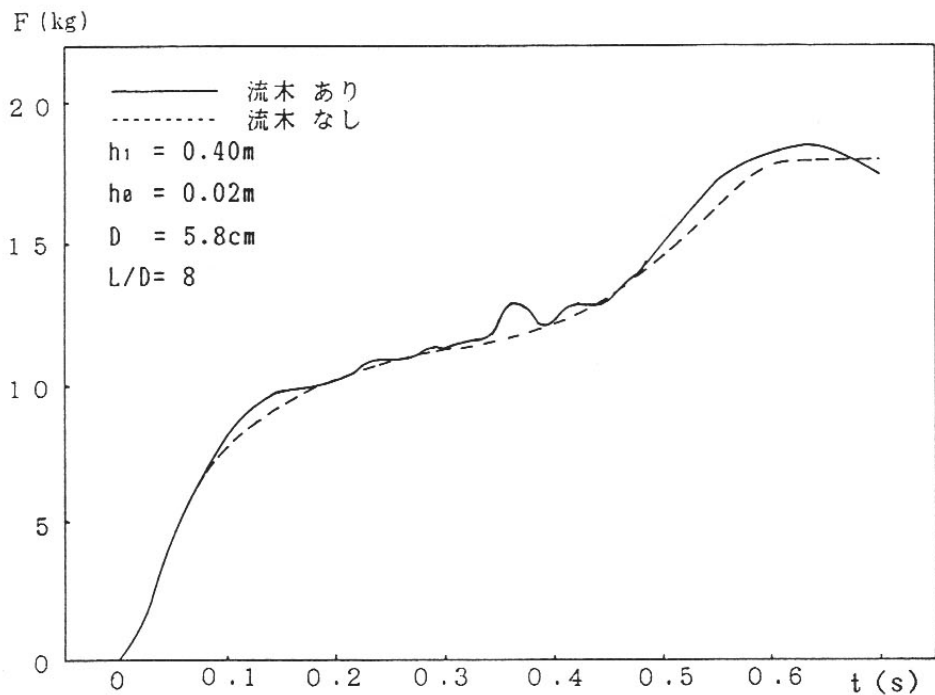


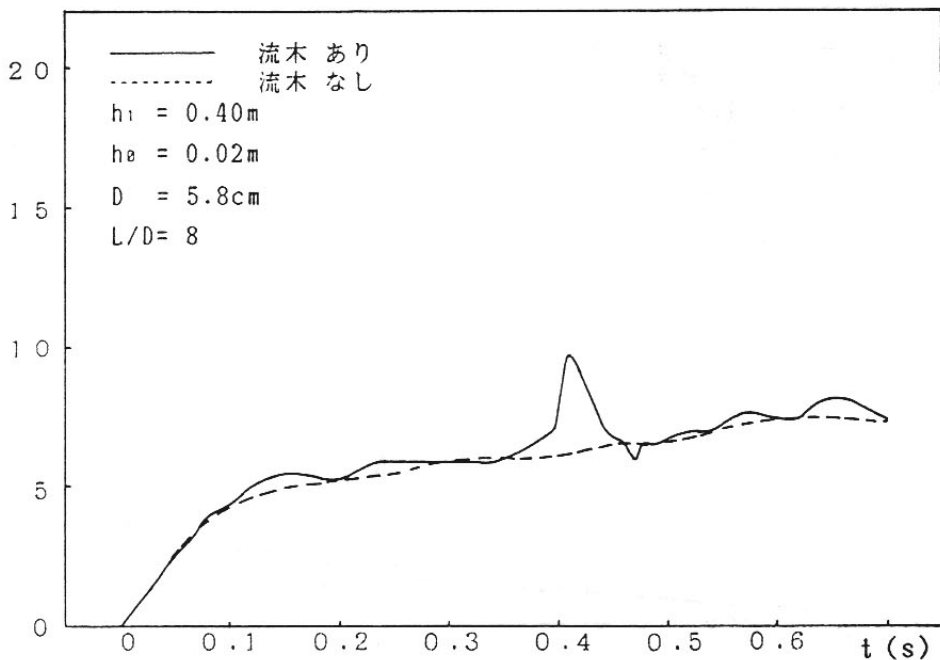
図-7 各高さでの最大衝撃波圧



(a) 連続壁

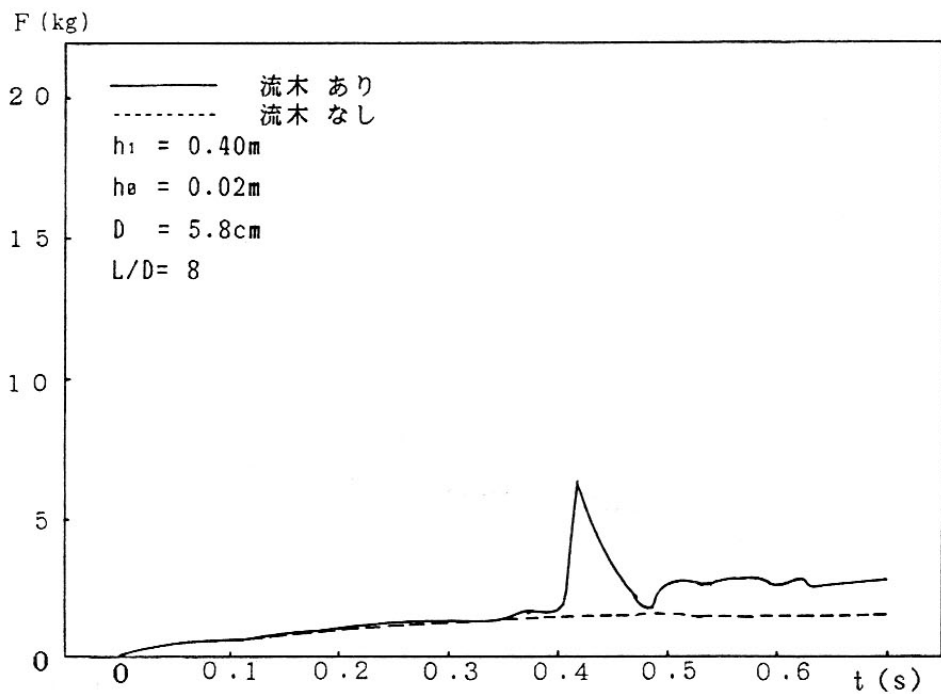
図-8 全波力の経時変化例 ($h_1=0.4\text{m}$)

F (kg)



(b) スリット壁

図-8 全波力の経時変化例 ($h_1=0.4\text{m}$)



(c) 角柱

図-8 全波力の経時変化例 ($h_1=0.4\text{m}$)

表-1 流木衝突の生起確率 ($h_1=0.4m$, $D=5.8cm$, $L/D=8$)

	強く衝突	衝突	非衝突
連続壁	0.42	0.21	0.37
スリット壁	0.77	0.23	0

表-2 質量係数 C_M (連続壁, $h_1=0.40m$, $D=5.8cm$, $L/D=8$)

RUN NO	$F \Delta T$ (kgs)	U_w (m/s)	C_M
24	0.029	1.56	0.3
29	0.034	1.50	0.3
30	0.034	1.56	0.3
31	0.011	1.44	0.1
36	0.017	1.56	0.2
38	0.029	1.50	0.3
39	0.034	1.63	0.3
41	0.023	1.50	0.2
43	0.080	1.70	0.7
46	0.034	1.56	0.3
平均			0.3

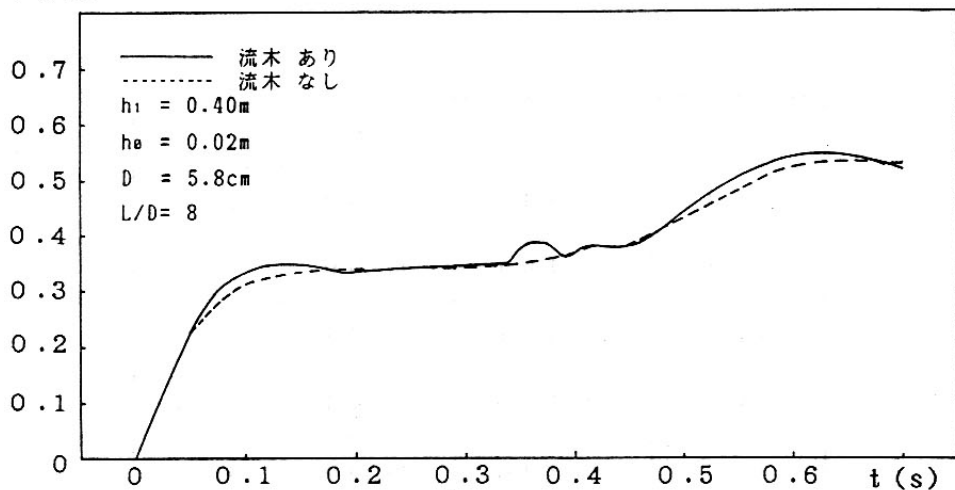
表-3 質量係数 C_M (スリット壁, $h_1=0.40\text{m}$, $D=5.8\text{cm}$, $L/D=8$)

RUN NO	$F_d \Delta T$ (kgs)	U_w (m/s)	C_M
482	0.098	1.53	0.8
484	0.080	1.50	0.7
485	0.103	1.50	0.9
486	0.075	1.44	0.7
487	0.092	1.47	0.8
488	0.086	1.50	0.7
489	0.080	1.54	0.7
490	0.080	1.44	0.7
491	0.080	1.52	0.7
492	0.109	1.57	0.9
平均			0.7

表-4 質量係数 C_M (角柱, $h_1=0.40\text{m}$, $D=5.8\text{cm}$, $L/D=8$)

R U N N O	$F_d \Delta T$ (kgs)	U_w (m/s)	C_M
163	0.144	1.50	1.3
164	0.184	1.50	1.7
165	0.201	1.44	1.9
167	0.155	1.44	1.5
170	0.144	1.38	1.4
171	0.172	1.50	1.6
175	0.155	1.44	1.5
177	0.149	1.38	1.5
179	0.149	1.33	1.5
181	0.155	1.57	1.3
平均			1.5

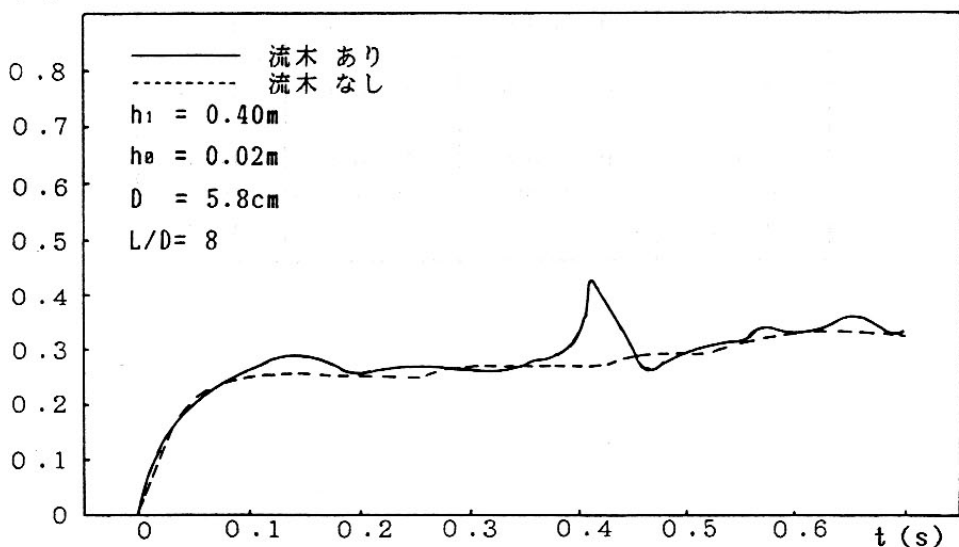
$$\frac{F}{\rho g h B} \quad (\text{m})$$



(a) 連続壁

図-9 波圧の経時変化例 ($h_1=0.4\text{m}$)

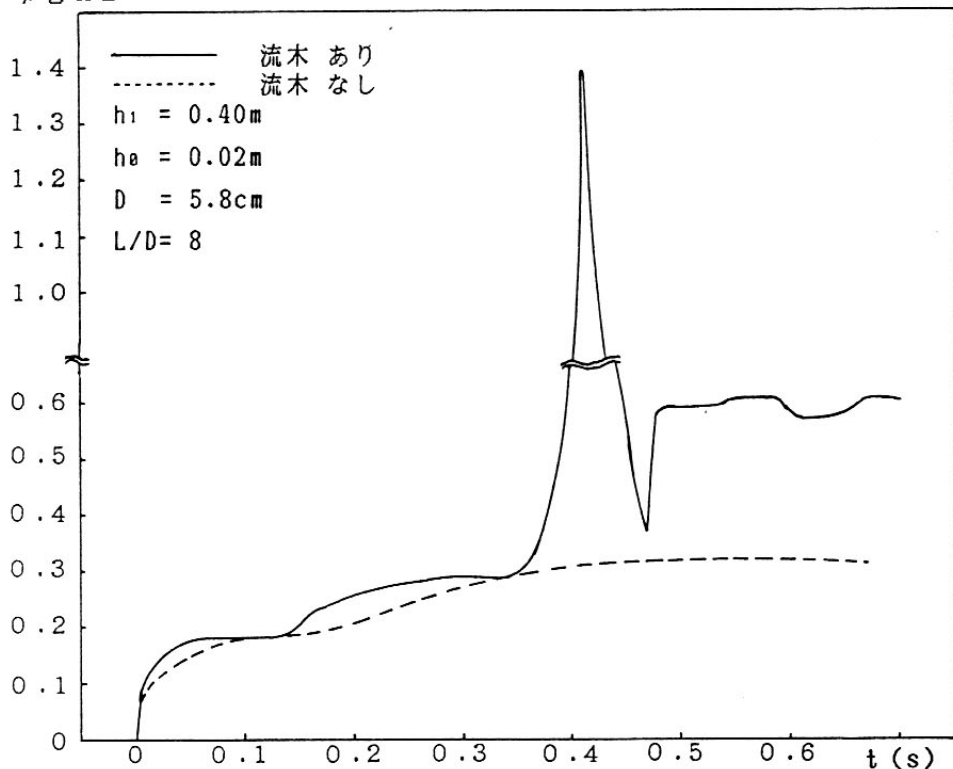
$$\frac{F}{\rho g h B} \quad (\text{m})$$



(b) スリット壁

図-9 波圧の経時変化例 ($h_1=0.4\text{m}$)

$\frac{F}{\rho g h B}$ (m)



(c) 角柱

図-9 波圧の経時変化例 ($h_1=0.4\text{m}$)