

流木を伴う碎波段波衝突による波力について

——段波波高と流木径が同程度の場合——

松 富 英 夫*

1. ま え が き

松富(1989b)は碎波段波遭遇時の流木の挙動、流木を伴った碎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。しかし、後者二つについては、段波波高に比べ流木径が相当小さく、受圧部が連続壁の場合に限られていた。そのため、碎波段波そのものによる波力が支配的で、流木を伴わせた意義があまりなかった。

そこで、本研究は、より实际的で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、縦スリット壁、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、全波力のみ測定可能な自作の波力計で行う(松富, 1988)。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、その測定精度を検討する。合わせて、波圧分布等の諸特性についても考察を行う。碎波段波衝突時の波圧分布に関する研究例は非常に少なく、大体の分布形と最大衝撃波圧の発生位置が議論されている程度である(福井ら, 1962)。

2. 実 験

段波はゲート急開により発生させた。使用した水路は高さ 0.5 m、幅 0.3 m、長さ 11.0 m の水平に設置された鋼製矩形水路で、下流側の 10 m 部分が両面ガラス張りのものである。ゲート(塩化ビニール樹脂製で、厚さ 12 mm)は手動の引き揚げ式で、水路下流端から 6 m のところに位置している。図-1 に実験装置の概要を示す。

全実験を通し、初期ゲート下流側の流速と水深 h_0 は各々零と 0.02 m に固定した。また、発生段波は全て移動跳水発生条件(松富, 1989a)を満足するものとした。

(1) 波力計の測定精度と波圧分布の検討実験

波圧分布の測定は、2 cm 間隔で 3 台の波圧計(ST 研究所製で、内径 8 mm、定格容量は 0.2 kg/cm^2)を埋め

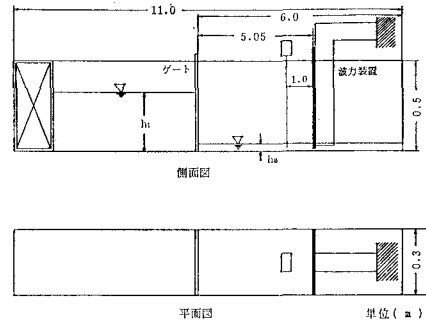


図-1 実験装置

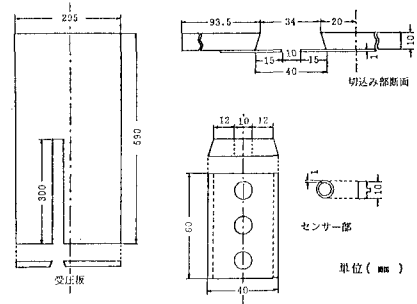


図-2 波圧計の設置方法

込んだ小板を、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 1 mm 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 1 cm で、その範囲は底面上 $z=1.2 \text{ cm}$ 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、初期ゲート上流側水深 h_1 を 0.35, 0.40, 0.45 m とした、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、 $11 \times$ 波圧計を埋め込んだ小板の移動回数で、約 165 回以上である。

波圧測定は、既報(松富, 1989b)と同じく、ゲートからの距離 $x=5.05 \text{ m}$ で行った。波圧の他に、容量式波高計により、 $x=4.05 \text{ m}$ での段波波形の測定も行った。

反射段波に関する Stoker 理論 (1957) の妥当性の再確認 (松富, 1988) 等のためである。これ等の経時変化の記録には、ペン・レコーダーを用いた。

(2) 波力実験

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、その径 D として、4.8 と 5.8 cm, 細長比 (L/D) として、6 と 8 の4種類を採用した。これ等流木の湿潤時重量は約 350 ~ 770 g である。初期、流木の中心軸は流れ方向に向け (縦置きと呼び (松富, 1989b), この状態での衝突を縦衝突と呼ぶことにする), $x=2.55$ 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。

段波発生条件は、 h_1 を 0.40, 0.45 m とした、2種類である (発生段波波高 ΔH は約 10~11 cm. ΔH の定義は文献 (松富, 1989b) を参照)。連続壁の場合、上記の流木を衝突させるには、この程度の h_1 を必要とした。

波力測定は、前節と同じく、 $x=5.05$ m で行った。受圧壁として、連続壁 (受圧幅 $B=29.5$ cm), 縦スリット壁 (図-3 参照。下端は厚さ 2 mm のアルミ板で剛結)、角柱 ($B=4.0$ cm で、前二者の受圧壁を固定する鋼棒と水路底面との間に 8 mm の隙間がある) の3種類を考えた。縦スリット壁の場合、段波衝突後の水面がスリット部上端を上回らなかったことを断っておく。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 (後出の表-1 参照)。ただし、ほぼ縦衝突の場合のみを有効な実験とした。

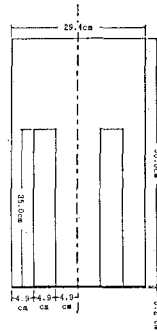


図-3 縦スリット壁

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、壁設置位置直前での流木の移動速度である。これ等の測定には、自作の波力計 (松富, 1988) 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

(1) 波力計の測定精度と波圧分布特性

図-4 に代表的な実験波圧 p 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 p_m の生起位置、静水面位置 (正確にはそれより 2 mm 上部) でのものである。静水面位置での波圧の立ち上りを $t=0$ と同期している。図より、最大衝撃波圧は後の持続波圧 (福井他, 1962) より少し大きいことが判断

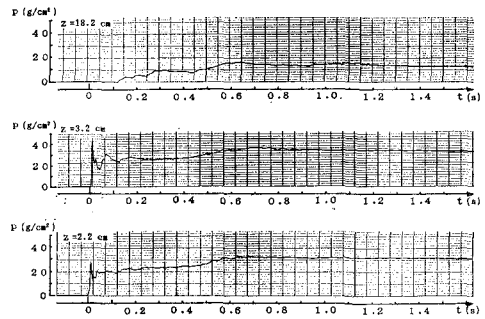


図-4 波圧の経時変化例 ($h_1=0.40$ m)

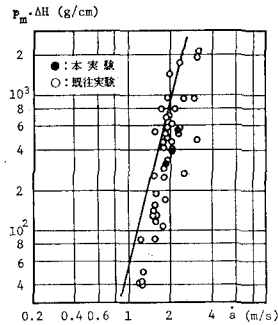
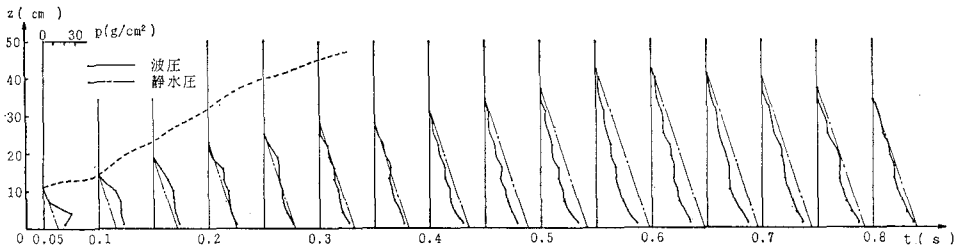


図-5 最大衝撃波圧の既往結果との比較

される。 $t \approx 0.6$ s 付近で緩やかな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 (松富, 1988)。

図-5 に本実験での最大衝撃波圧 p_m (黒丸、11回の平均) と福井等のもの (白丸) との比較例を示す。図中の実線は彼等の実験曲線で、横軸 a は段波の移動速度である。ただし、本実験での ΔH と a は Stoker 理論 (1957) によっている。松富の理論 (1986) だと、もう少し左上に位置する。本実験値の妥当性が判断されよう。

図-6 に波圧分布の経時変化例 (実線) を示す。ただし、最初の負圧の働き出す高さまでで、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。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。図中の破線は少しでも波圧を感じた領域の上限を示す ($t > 0.325$ s で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での圧力が小さいことが判る (Cumberbatch, 1960)。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い。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 (松富, 1986)。 $t > 0.4$ s では、放物分布でないことも判る (Cross (1967) は放物分布としている)。文献 (松富, 1988) で、 $t \approx 0.6$ s 付近

図-6 波圧分布の経時変化例 ($h_1=0.40$ m)

の全波力でも, Stoker 理論 (1957) 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 (上向き) の加速度効果によることが推察される. 参考までに, この時の波圧の働く最高位は $z \approx 0.42$ m で, Stoker 理論による入射段波波高, 反射段波波高と反射段波の全水深は各々約 0.10, 0.38, 0.40 m である. $t \approx 0.8$ 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 (松富, 1988).

図-7 に本実験での全波力の経時変化例 (実線) を示す. 各時刻での全波力は, 図-6 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 ($t=0$) と対象外となる $t \approx 0.5$ 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松富の理論 (1988) とより良く一致している. 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 6 cm の点に対してのみキャリブレーションを行っている. しかし, $t \approx 0.6$ 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 (図-6 参照). 以上より, 波力計の測定精度が比較的良好ことが判断される. ただし, 本波力計での流木の質量係数の算定は (松富, 1989b), その衝撃力が小さい時は, 少し問題かもしれない.

図-8 は各高さでの最大衝撃波圧 (顕著な立上り部を有するもののみ) を示したものである. 従来の理論 (松富, 1988) や実験 (福井ら, 1962) 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ようだが (例えば服部, 1987), 強い段波の場合は異なるようである. また, 顕著な衝撃波圧の作用範囲は底面から入射段波波高の 2 倍程度の高さまでで (厳密には, $\Delta H/h_0$ 等に関係しよう), その大きさは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性を有することも判断される.

(2) 波 力

既報結果 (松富, 1989b) から推して, 流木の移動形

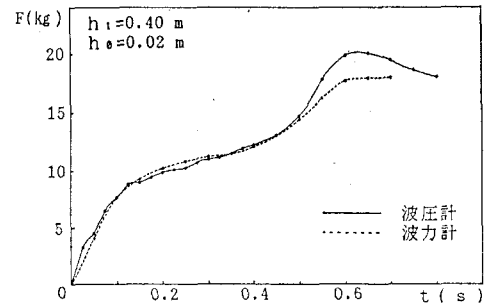
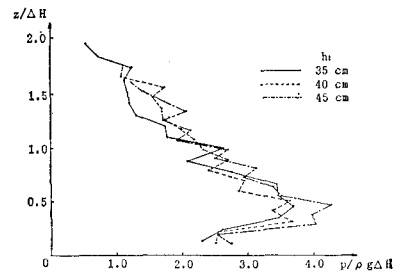
図-7 全波力の比較例 ($h_1=0.40$ m)

図-8 各高さでの最大衝撃波圧

態は Type 1-1 (流木は横向きになり, 段波の不連続波面部から次第に離れていく) 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 ($t=0$) 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-9 (a), (b), (c) に各々連続壁, 縦スリット壁, 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い. 各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, 流木衝突は殆ど生じなかった. 今少し, この時の流木の挙動を述べる. 流木後端は連続壁がない場合とほぼ同じ高さで速度で移動する. しかし, 流木先端は, 上方に投げ出された流体のため上向き, その水平移動速度は

表—1 流木衝突の生起確率
($h_1=0.40$ m, $D=5.8$ cm, $L/D=8$)

	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

小さくなり、衝突が弱くなる。(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)。これは流木滞留とそれによる流れの堰上げのためである。衝突後、流木先端が角柱で留められると、流木後端は流れにより底面に押し付けられる傾向にあり、流木後端が水路側壁に接するか流木中心軸と流れの方向がほぼ平行等の時、流木は滞留し易いようである。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、縦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、縦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) 流木の質量係数

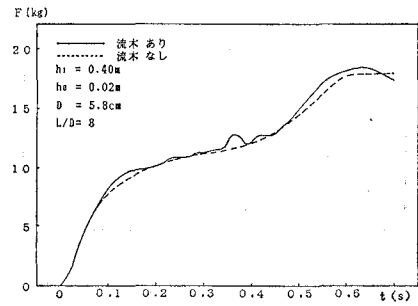
前節でも述べたように、流木衝突の時間位置が大きく変動するため、流木を伴った時の全波力の平均波形は求めていない。そこで、本研究では、個々波形において、一番顕著なピークを示す部分の、立上り始めと下がり終りを結ぶ直線で囲まれた部分を流木による衝撃力 F_d 部と考え、次式より流木の質量係数 C_M の算定を試みた。

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

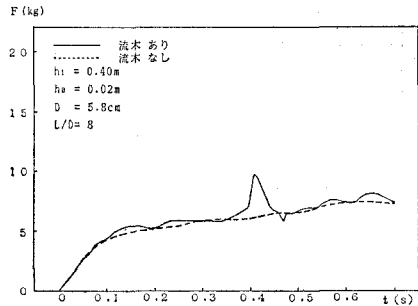
ここで、 t : 時間、 M : 流木湿潤時の質量、 u_w : 衝突直前での流木後端部の水平移動速度。縦スリット壁の場合の算定結果例を表—2に示す。連続壁、縦スリット壁、角柱の順に、 $C_M=0.3, 0.7, 1.5$ であった。連続壁と縦スリット壁の場合、付加質量係数は負となる。付加質量係数が実際に負となる現象が否かは別として(波動場の直立円柱等では負となり得る)、多くの場合平均的な流れ場の水理量のみが与えられることを考えると、流木による衝撃力を評価し易い本算定法(定義)によるものが有用と思われる。長期間水に浸かった流木は、重心が下方へ移動するため、移動時でも中心軸回りに回転しにくいことも断っておく。連続壁の場合、段波波高が流木径より相当大きい時(約 1.4)に比べて(松富, 1989b)、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の差等によると思われる。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。

(4) 波 圧

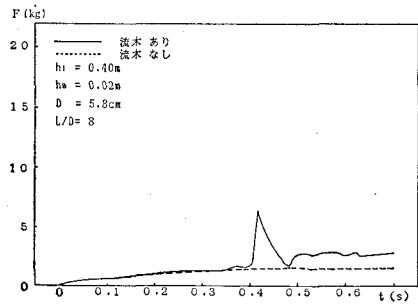
流木を伴った時の断面平均的な波圧の経時変化に関する実験値例(実線)を図—10 (a), (b), (c) に示す。



(a) 連続壁



(b) 縦スリット壁

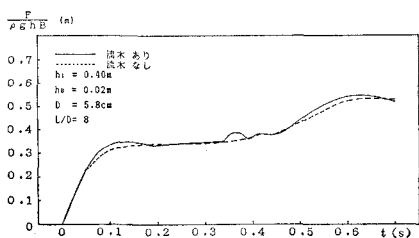


(c) 角 柱

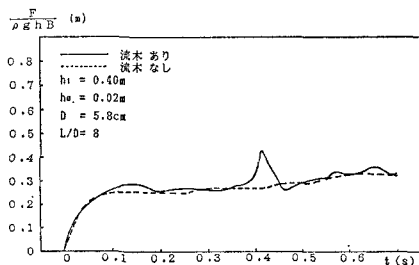
図—9 全波力の経時変化例 ($h_1=0.40$ m)

表—2 縦スリット壁での質量係数
($h_1=0.40$ m, $D=5.8$ cm, $L/D=8$)

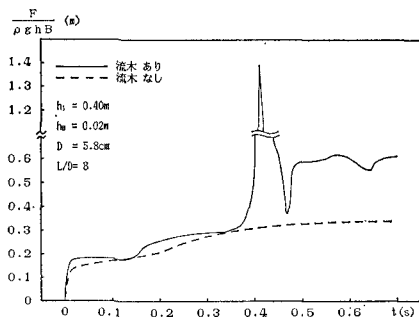
RUN NO.	$\int F_d dt$ (kgs)	u_w (m/s)	C_M
482	0.098	1.53	0.8
484	0.080	1.50	0.7
485	0.103	1.50	0.9
486	0.075	1.44	0.7
487	0.092	1.47	0.8
488	0.086	1.50	0.7
489	0.080	1.54	0.7
490	0.080	1.44	0.7
491	0.080	1.52	0.7
492	0.109	1.57	0.9
平均	0.088	1.50	0.7



(a) 連続壁



(b) 縦スリット壁



(c) 角柱

図-10 波圧の経時変化例 ($h_1=0.40$ m)

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 (松富, 1988) 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、縦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経時変化は、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碎波段

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) 波力計の測定精度が良好であることを確かめた。
- 2) 衝突後、上方に投げ出された流体部分での圧力が小さいことを確かめた。
- 3) 顕著な衝撃波圧の作用範囲は底面から入射段波波高の2倍程度の高さまでで、その大きさは入射段波波高相当の静水圧の4倍程度までに達する。
- 4) 最大衝撃波圧は静水面位置で生じず、各高さでの最大衝撃波圧の分布形は相似性を有する。
- 5) 対象段波では、角柱の場合は勿論、縦スリット壁の場合も、流木による衝撃力は無視できず、流木衝突時に最大波力 (圧) が生じる。
- 6) 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、本算定法 (定義) での流木の質量係数は (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 (松富, 1989b) で指摘した。

謝 辞：本研究を遂行するに当たり、東北大学工学部 首藤伸夫教授より有益なる御意見を賜った。ここに記して先生に深甚なる感謝の意を表する。また、実験等に助力頂いた本学卒業研究生 中村憲市、石井俊彦、町本康之の各君にも感謝の意を表する。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励金により行われたこと、本論文の公表に当り小川記念基金の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄 (1962): 津波の研究 (Ⅱ), 第9回海岸工学講演会論文集, pp. 50~54.
- 服部昌太郎 (1987): 海岸工学, コロナ社, 230 p.
- 松富英夫 (1986): 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.
- 松富英夫 (1988): 碎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.
- 松富英夫 (1989a): 移動跳水 (波状段波非) 発生条件の検討, 第33回水理講演会論文集, pp. 271~276.
- 松富英夫 (1989b): 流木を伴う碎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, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 574~578.
- Cross, R. H. (1967): Tsunami surge forces, Proc. ASCE, Vol. 93, WW4, pp. 201~231.
- Cumberbatch, E. (1960): The impact of a water wedge on a wall, Jour. Fluid Mech., Vol. 7, pp. 353~374.
- Stoker, J.J. (1957): Water Waves, Interscience Publishers, Inc., 560 p.