

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—

松 富 英 夫*

1. ま え が き

津波は、緩斜面の海岸や河川等を遡上する時、たびたび碎波段波を形成する。その上、段波先端部に木材や船舶等の浮遊物を伴う場合もある。浮遊物を伴う場合の碎波段波衝突による衝撃波力(圧)は、そうでない場合のそれに比べて、激甚と思われる。その評価は防災・減災工学上重要であろう。

浮遊物を伴った場合の波力の研究例は非常に少ない。碎波時のものは特に少なく、孤立波の碎波による碎波段波に、流木を伴った場合として、堀川(1983)のものがあ程度である。しかし、それも流木のみの衝撃力を議論したもので、その時の碎波段波のみの衝撃波力やそれ等両者の大きさの関係等は一切論じていない。

流木の衝突形態は衝撃力(圧)の大小に関係し、その挙動(特に、移動形態)を知ることは重要である。碎波段波時の流木の挙動に関する検討は、今まで行われたことがないように思われる。

著者(1988)はゲート急開による碎波段波衝突時の衝撃波力の一評価方法を示している。同段波の移動の速度や加速度等も予測できる段階に達している(松富, 1986)。よって、慣性力項を考慮することで、浮遊物を伴う碎波段波の場合の衝撃波力を推定できる段階にある。

そこで、本研究は、浮遊物として円柱の流木を考え、ゲート急開による碎波段波時の流木の挙動と質量係数、それ等衝突時の全衝撃波力等について検討を行うものである。ただし、流木径として、底面の影響をほとんど受けない、段波波高に比べて十分に小さなものを対象とすることにする。

2. 実 験

実験に使用した水路、段波の発生方法や波力の測定方法等については、文献(松富, 1988)を参照されたい。

全実験を通して、段波は、初期ゲート下流側の流速 u_0 と水深 h_0 を各々0と0.02mに固定し、初期ゲート上流側水深 h_1 を0.20~0.45mまで5cmずつ変化さ

せて、計6種類発生させた。発生段波は全て移動跳水発生条件を満足するものである(松富, 1989)。

流木の挙動実験は大別して二種類行った。一つは初期に流木の中心軸を流れ方向に(以下、縦置きと呼ぶ)、一つは水路横断方向に(以下、横置きと呼ぶ)置いた場合である。ただし、今回は共に流木1本のみとし、ゲートからの距離 $X=2.5\text{m}$ のところに静置して行った。 $X=2.5\text{m}$ という比較的ゲート下流に静置した理由は、段波の発生させ方に起因する固有の水理現象をできるだけ除去するためである(松富, 1989)。流木の直径 D として、1.0, 1.5, 1.8, 2.4cm, 細長比(L/D)として、4, 6, 8, 10, 12, 15を採用した。挙動の判定には、目測、ビデオ・システムとモーター・ドライブ・カメラ(約5コマ/秒)による方法の三つを併用した。

波力実験は流木を伴う場合と伴わない場合の2種類行った。使用した流木は $D=2.4\text{cm}$, $L/D=6$ と8, 湿潤時重量48と64gの2種類で、初期静置位置は $X=2.55\text{m}$ である。この実験での段波発生条件は、流木の最も危険な衝突形態を考慮し(次章1節参照), $h_1=0.40$ と0.45mの2種類である。波力測定は、堀川(1983)の橋脚を模擬した円柱と異なり、鉛直壁に対して行った。そのため、本波力は段波を完全に遮る場合のもので、堀川の進行波でのものと異なる。また、文献(松富, 1988)の実験結果との比較・検討(再現性の確認)のため、 $X=5.05\text{m}$ で行った。測定項目は全波力と段波衝突前後の壁面近傍での流木の挙動である。この等の測定には、各々波力測定装置(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、ビデオの解析には、1/60秒まで読み取り可能なビデオ・モーション・アナライザーを用いた。

3. 実験結果とその考察

(1) 流木の挙動

縦置きの場合、大きく四つに分類された。それ等の特徴を、模式的に、図-1に示す。図中、段波は右から左へ伝播している(図-2も同じ)。上から順に、無次元段波波高($\Delta H/h_0$)は大きくなっている。ここで、 ΔH は

* 正会員 工博 秋田大学助手 鉱山学部土木工学科

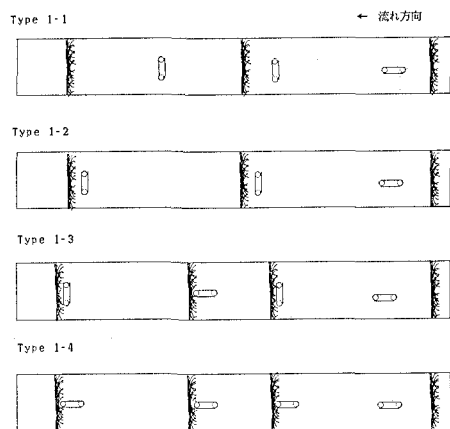


図-1 流木の挙動分類 (縦置き)

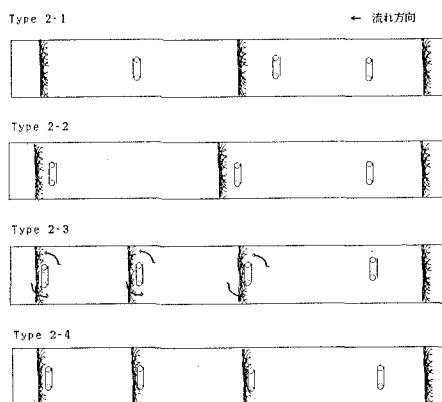


図-2 流木の挙動分類 (横置き)

段波下流の静水面から上流のほぼ様な水深部の水面までの高さである。順に、各挙動を Type 1-1~1-4と呼ぶことにする。以下、段波遭遇後の各挙動の特徴を簡単に説明する。

Type 1-1: 横向きになり、不連続波面部から次第に離れる。

Type 1-2: 横向きになり、不連続波面上部にはほぼその位置を保つ。

Type 1-3: 不連続波面部にその位置を保ち、横向きになったり、縦向きになったりする。

Type 1-4: 縦向きのまま、不連続波面部にその位置を保つ。

Type 1-1 と 1-2 は、もっと流下距離が長くなれば、同じ挙動と判定されるかもしれない。ちなみに、本実験での流下距離は約 3.5m である。Type 1-4 では、流木中心軸と水平面との間に角度が存在する。

横置きの場合も四つに分類された。それ等の特徴を、模式的に、図-2 に示す。縦置きの場合と同様、上から

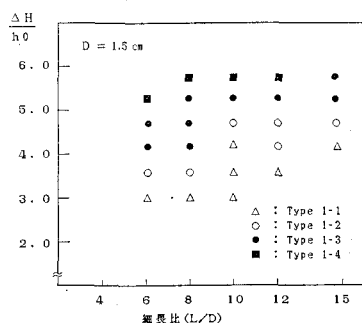


図-3 無次元段波波高と細長比による分類 (縦置き)

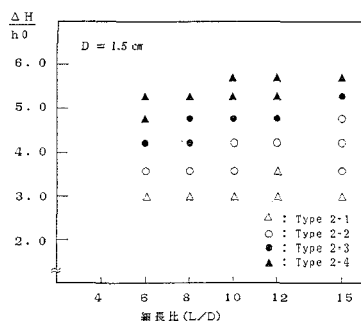


図-4 無次元段波波高と細長比による分類 (横置き)

順に、無次元段波波高は大きくなっている。順に、各挙動を Type 2-1~2-4と呼ぶことにする。以下、段波遭遇後の各挙動の特徴を簡単に説明する。

Type 2-1: 横向きのまま、不連続波面部から次第に離れる。

Type 2-2: 横向きのまま、不連続波面上部にはほぼその位置を保つ。

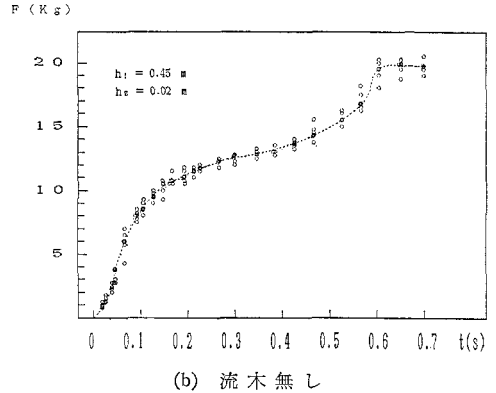
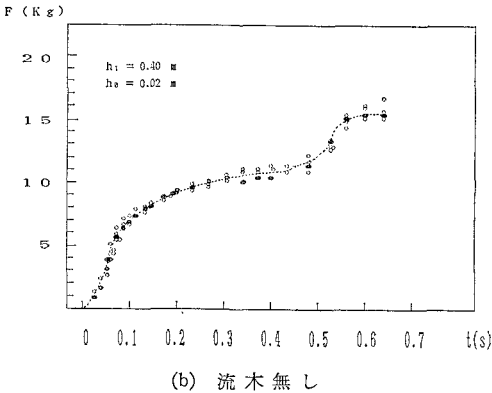
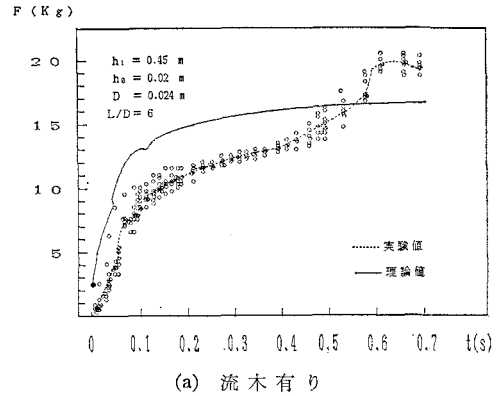
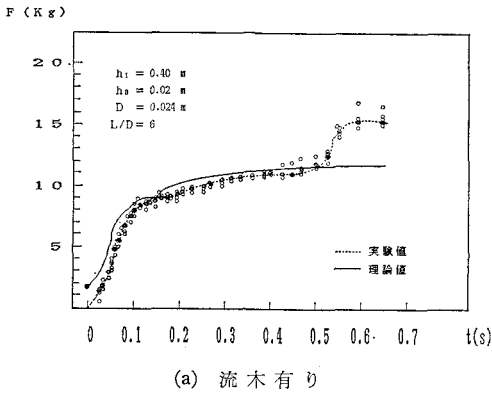
Type 2-3: 不連続波面部にその位置を保ち、縦向きになったり、横向きになったりする。

Type 2-4: 横向きのまま、不連続波面部にその位置を保ち、激しくピッチングする。

Type 2-1 と 2-2 は、縦置きの場合と同様、もっと流下距離が長くなれば、同じ挙動と判定されるかもしれない。

縦置きと横置きでの流木の挙動の顕著な差は、各々で Type 1-4 と 2-4 が存在することである。ただし、不連続波面部は不安定なので、もっと流下距離が長くなれば、Type 1-4 は 2-4 と判定されるかもしれない。その逆が起こるとすれば、Type 1-3 または 2-3 であり、この流れ段階 (無次元段波波高のこと) ではそれは考えられない。

以上を総合すると、砕波段波時の流木の挙動は (Type 1-1, 2-1), (Type 1-2, 2-2), (Type 1-3, 2-3), (Type 1-4) と (Type 2-4) の 5 組に大別されよう。

図-5 全衝撃波力の経時変化 ($h_1=0.40$ m)図-6 全衝撃波力の経時変化 ($h_1=0.45$ m)

縦軸に無次元段波波高，横軸に細長比を取り，流木軸の初期静置方向，流木の直径毎に，挙動結果をまとめて示した例が図-3 と 4 の(a)，(b)である。ここで，段波波高 ΔH は Stoker 理論 (1957) から算定されている。図より，これ等の無次元量で，各挙動は比較的良く分類されることが判断される。ただし，まだ実験値の数が少ない，流下距離が短い，底面や側壁等の影響が皆無とは言えない等という，欠点があることに注意を要しよう。今後，より良い無次元量を探す等，一層の検討が必要である。

橋脚等と異なり (堀川, 1983)，幅広い壁面の場合，波力 (圧) という点で最も危険な衝突形態は，流木が段波不連続部に存在し，その中心軸を流れ方向に向けている，Type 1-4 の場合であろう。この理由については次節で少し触れるが，単位幅当りの波力ということを考えれば，当然の帰結と思われる。そのため，次節の波力実験では，この衝突形態のものを対象とする。

(2) 波 力

Type 1-4 で，顕著に流木 ($D=2.4$ cm, $L/D=6$) が衝突したと判定された場合と流木を伴わない場合の全衝撃波力 F の経時変化に関する実験値例 (白丸) を， h_1

($=0.40, 0.45$ m) 毎に，図-5 と 6 の (a)，(b) に示す。各図の実験値は，図-6 (a) が 9 回，他が各 10 回の実験分である。勿論，各図での段波の発生条件は全て同じである。ちなみに，顕著に流木が衝突した確率は，上記の h_1 の順に， $0.40(24/60)$ ， $0.47(38/80)$ ，衝突しなかった確率は， $0.25(15/60)$ ， $0.29(23/80)$ であった。ここで，() 内の数値は各々生起回数と全実験回数を示す。これ等をまとめて表-1 に示す。衝突しない場合が存在するのは，段波先端部が流木よりかなり先 (約 0.07 s より大) に壁面に衝突し，激しい鉛直上向きの流れ (松富, 1988) による遮り効果が働いたためである。流木が横向きの場合，これはより顕著となる。顕著に衝突した時，流木はその後，壁面近傍に留まる傾向にあったことを付記しておく。

各図中の破線は本研究で採用した全衝撃波力の平均的な時間波形を示す。 $t \approx 0.5$ s 付近からの立上りは，段波衝突後，鉛直方向に投げ出された流体塊が落下してきた時に生じるものである。これは，次項で示される理論 (図中の実線) では表現しえない部分で，今後の検討が必要な部分である。文献 (松富, 1988) の実験結果と比べてみると，その波形や絶対値はほぼ同じである。文献

表-1 流木衝突の生起確率 ($D=2.4\text{ cm}$, $L/D=6$)

$h_1(\text{m})$	強く衝突	衝突	非衝突
0.40	0.40	0.35	0.25
0.45	0.47	0.24	0.29

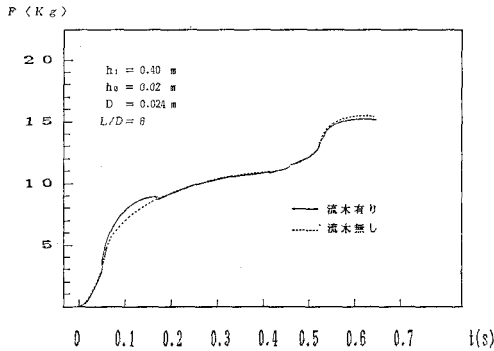


図-7 全衝撃波力の差 ($h_1=0.40\text{ m}$)

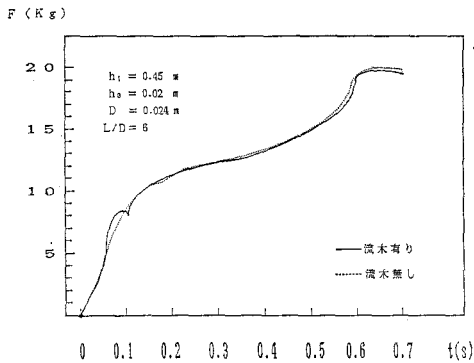


図-8 全衝撃波力の差 ($h_1=0.45\text{ m}$)

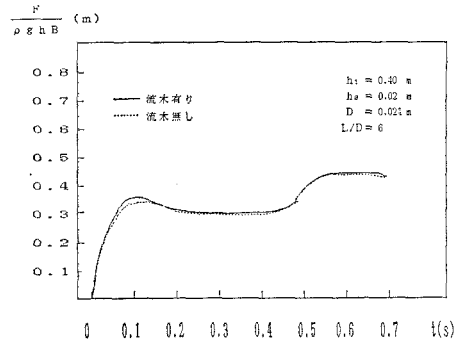


図-9 衝撃波圧の差 ($h_1=0.40\text{ m}$)

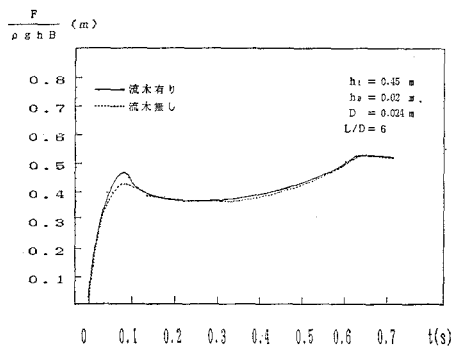


図-10 衝撃波圧の差 ($h_1=0.45\text{ m}$)

べてみると、その波形や絶対値はほぼ同じである。

(3) 流木の質量係数

図-7 と 8 の流木を伴った場合と伴わない場合の全衝撃波力に関する平均的な時間波形の差から、流木の質量係数の算出を試みた。算出式は次式である(堀川, 1983)。

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

ここで、 F_d : 全衝撃波力の差、 t : 時間、 C_M : 質量係数、 M : 流木湿润時の質量 ($48/980\text{ グラム cm}^{-3}\text{s}^2$)、 u_w : 流木の移動速度。流木衝突後、その水平移動速度がほぼ零であることは、ビデオ解析を通して確認している。

算出結果は、図-7, 8 の順に、 $C_M \approx 1.3, 1.4$ であった。ただし、流木の移動速度として実験値、順に $1.76, 1.96\text{ m/s}$ を採用した。参考のため、個々波形(流木を伴った場合の個々の時間波形と流木を伴わない場合の平均的な時間波形との差)についても検討を行ってみた。その結果例を表-2 に示す。結果は大きく変動しているが、平均的には $C_M \approx 1.8$ である。不安定な流れでのものなので、大きな変動は仕方なかろう。平均波形と個々の波形(平均値)から算出したものとの間に、かなり大きな差がある。これは平均波形の決め方、すなわち、各

(松富, 1988) での実験が再現されていると言えよう。

図-7 と 8 に、流木を伴った場合(実線)と伴わない場合(破線)の全衝撃波力に関する平均的な時間波形の比較例を示す。流木 1 本であるが、両者の波形間に差のあることが認められる。また、本実験条件のような場合では、砕波段波そのものによる衝撃波力が支配的であることも判断される。

流木を伴った場合の衝撃波圧の経時変化に関する実験値例(実線)を図-9 と 10 に示す。実験値は、全衝撃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から評価されている。この理由等については、文献(松富, 1988)を参照されたい。各図中には、流木を伴わない場合のもの(破線)も示されている。ピーク付近で両者間に顕著な差のあることが認められる。参考までに、衝撃波圧についても、文献(松富, 1988)の実験結果と比

表-2 質量係数 C_M ($h_1=0.40$ m, $D=2.4$ cm, $L/D=6$)

RUN No.	$F_0 \Delta T$ (Kgs)	U_w (m/s)	C_M
4	0.011	1.71	1.4
5	0.015	1.75	1.8
9	0.010	1.84	1.2
11	0.026	1.79	3.1
31	0.010	1.76	1.3
45	0.011	1.67	1.5
49	0.020	1.90	2.2
58	0.011	1.71	1.4
61	0.009	1.72	1.1
72	0.026	1.71	3.1
平均			1.8

時間毎に平均した点を連ねた波形は、小さく不規則に振動しているため、さらに均して単調的な波形にしていることに、原因があるのかもしれない。

以上より、碎波段波で、対象移動形態の流木の質量係数 C_M は1.4程度と推定される（実際は細長比（後藤・佐々木・首藤, 1982）、流木長と段波の表面渦領域の長さとの比等に関係しよう）。これは、堀川(1983)の実験結果(1.5~1.6)より、小さめである。本実験での発生段波が堀川のものより強い（段波内の気泡密度がより高いと思われる）ことや波力の測定精度、質量係数の算出方法等に原因があるのかもしれない。

図-5(a)と6(a)に、実線で、次式で評価される全衝撃波力 F を示す。

$$F = \rho g h^2 B / 2 + C_F \rho u^2 h B + C_M M u_w |dt| \dots \dots (2)$$

$$C_F = 1 + (\tan \theta)^{1.2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 h : 局所水深、 B : 壁面幅、 u : 断面平均水粒子速度、 Δt : 流木の衝突作用時間、 u , u_w , $\tan \theta$, 式中に陽に現れていない抵抗係数(約0.002)等の評価方法については、文献(松富, 1986, 1988)を参照されたい。ただし、 u_w として、段波の移動速度(= $\dot{a}$ (松富, 1986))、慣性力項の作用開始時刻と作用時間として、各々式(1)左辺の積分開始時刻と積分幅を採用している。前者は、対象流木の挙動を考えると、妥当と思われる。後者の定式化等は今後の課題である。本計算例では、図-5(a), 6(a)の順に、(0.07s, 0.06s), (0.05s, 0.05s)の組合せであった。これ等の図によると、 h_1 が大きくなるにつれて、理論値と実験値の差が大きくなっている。これは主に、本理論が準定常解析に基づいているためと思われる(松富, 1986)。流下距離が同一の場合、 h_1 が大きくなるにつれて、非定常性が

増し、適用性が悪くなるからである。とは言え、全般的には、上述の質量係数($C_M=1.4$)を用いた慣性力項を、著者の碎波段波衝突による全衝撃波力の評価理論に付加することで、対象段波衝突による全衝撃波力の推定が比較的精度良くできると判断される。

4. む す び

碎波段波時の流木の挙動と質量係数、それ等衝突時の全衝撃波力等について実験的検討を行った。本研究で得られた主要な結論は次の通りである。

1) 碎波段波時の対象流木の挙動は大きく五つに分類される。その概略的分類図を図-1と2に示す。

2) 本対象段波のような場合、碎波段波そのものによる衝撃波力が支配的である。

3) 幅広い壁面への波力(圧)という点で、最も危険と思われる衝突形態(Type 1-4)時の流木の質量係数 C_M は約1.4である。これは、堀川の算出値(1.5~1.6)より、小さめである。

4) 3)の質量係数を用いた慣性力項を、著者の碎波段波衝突による全衝撃波力の評価理論に付加することで、対象段波衝突による全衝撃波力の推定が比較的精度良くできることを確認した。

今後、流木の挙動(複数本も含め)に関するデータの蓄積、その整理方法やその他残された課題等の検討と共に、段波波高に比べ相対的に流木径が大きい場合について、検討を行ってきたい。

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 堺谷常広、阿部 融、大口寿文、大橋伸之の各君にも感謝の意を表する。なお、本研究の一部は(財)建設工学研究振興会の奨励金と昭和63年度文部省科学研究費奨励研究(A)により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫(1982): 津波による木材の流動, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 491~495.
堀川清司(1983): 浮遊物の衝突による破壊力, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, No. A-58-2, pp. 85~92.
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(1989): 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.
Stoker, J. J. (1957): Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, p. 560.