

砕波による衝撃波の作用を受ける消波ブロックの 挙動に関する基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON OSCILLATING AND COLLIDING BEHAVIORS OF PRECAST CONCRETE ARMOR UNITS DUE TO BREAKING WAVES

山口貴之*, 上野紗代**, 林建二郎***, 大野友則****

Takayuki YAMAGUCHI, Sayo UENO, Kenjiro HAYASHI and Tomonori OHNO

- * 防衛大学校理工学研究科 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
** 防衛大学校学生 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
*** Ph.D 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
**** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：護岸構造物，砕波，消波ブロック，混成堤，直立壁，衝撃力

(seawall structure, breaking waves, precast concrete units, composite breakwater, vertical wall, impulsive force)

1. はじめに

四面を海に囲まれた我が国では，台風による波浪や地震による津波など自然災害の発生に直面している地域が多い．なかでも，海象条件が厳しい高波浪海域や外海に面した地域には，生活を保全するための防波堤や護岸構造物が建設されている．これまで，港湾や海岸構造物における高マウンドや急勾配斜面上の鉛直壁には，条件によっては衝撃的な力（いわゆる衝撃砕波力）が作用することが知られている．

衝撃砕波力に関する研究は，合田ら¹⁾をはじめとして古くから行われており，谷本ら²⁾や高橋ら³⁾，服部ら⁴⁾によっても数多くの研究が行われている．近年では，高橋ら⁵⁾，⁶⁾がケーソン式混成堤などの衝撃砕波力による被災パターンなどについての調査報告を行っている．写真-1は，ケーソン式護岸構造物の前面に配置された消波ブロックがケーソン壁面に衝突し，局所的な損傷や破壊に至った事例である．これまで，このような被災は少なくはないようである．消波ブロックによる被災に関しては，五明ら⁷⁾による消波ブロックの散乱や不完全消波工に作用する衝撃砕波力の発生機構に関する研究，高橋ら⁸⁾や小林ら⁹⁾による波の作用による直立壁へのブロック荷重に関する研究などがある．また，池野ら¹⁰⁾は砕波段波津波による漂流物の挙動と衝突力に関する研究などを行っている．しかし，消波ブロックの衝突による損傷・破壊を防護するためのケーソン壁面の設計には，消波ブロックの衝突力の評価が必要であると考えられるが，これまで衝突力に関する研究は十分に行われていないのが現状である．

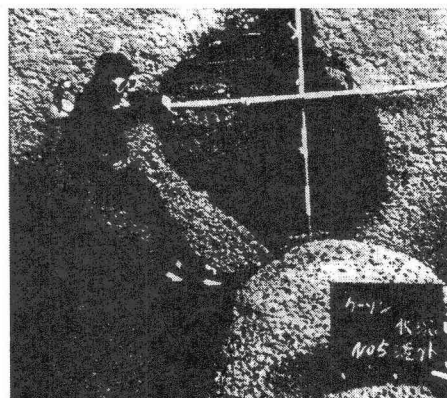


写真-1 ケーソン壁の局部破壊

本研究は，消波ブロックの衝突によるケーソン壁の損傷や破壊を防止することに着目し，直立壁を有する防波堤や護岸構造物の耐波・耐衝撃設計の確立という観点から，衝撃的な波力を受ける消波ブロックの動的挙動とその防波堤や護岸直立壁への衝突力について水理模型実験により基礎的な検討を行うことを目的としている．

2. 実験の概要

2.1 実験装置

実験は長さ 40m，幅 0.8m，深さ 1m の吸収式 2 次元造波水路を用いて，フルード則の適用による縮尺 1/36 の水理模型実験として行った．水路には，図-1(a)に示すように海底模型をステンレス鋼材を用いて形成した．海底

勾配3/100に続けて水路床上高さ30cmの水平床を形成し、図-1(b)に示すL型鋼製の直立壁模型(高さ70cm, 幅78cm, 水路長手方向50cm, 直立壁の鋼板厚み16mm)を設置しボルトで固定した。

2.2 計測項目

実験では、直立壁に作用する波圧および消波ブロックの壁面衝突時の衝突力の計測を行った。波圧計13個(定格容量200gf/cm², 固有振動数2kHz)を直立壁中央部(図-1(b), P1からP13)に取り付けた。また、既往の研究では消波ブロック1個の衝突力について検討した事例がなく、消波ブロックが直立壁に衝突した場合にどの程度の力が作用するのか不明な点が多いため、衝突力計測用のロードセルを製作した。衝突力の計測には、高い固有振動数を有するロードセルが望ましいが、本ロードセルは固有振動数が58Hzである。ロードセルは、図-2に示すステンレス製の本体に防水用ひずみゲージを片面2枚ずつ(貼付間隔12cm)の計4枚を貼付したものである。荷重への変換は、4アクティブゲージ法を用いてひずみゲージの2点間の曲げモーメントの差から荷重を計測する仕組みとなっている。このロードセルを図-1(b)に示すように、直立壁背面から固定し受圧面と直立壁前面が同一平面となるように設置した。本実験での波圧および衝突力は、サンプリングタイム1msで計測を行った。また、消波ブロックの動的挙動と碎波の作用状況を観察するために高速度ビデオカメラを用いて、1秒間に4500コマの記録スピードで約6秒間の撮影を行っている。同時に、デジタルビデオカメラでも撮影を行った。

2.3 実験パラメータ

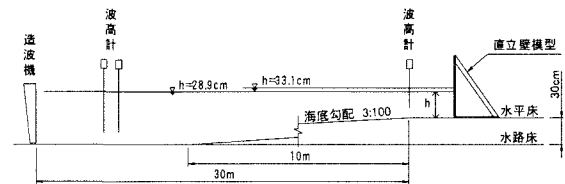
実験は、図-3に示す①消波ブロックのない直立堤断面、②消波ブロック被覆堤断面、③模型断面②の消波ブロックを、天端から静水面(水深 $h=28.9$ cm)まで取り除いて、消波ブロックが沈下した場合を模擬した断面の計3種類で行った。水深 h は堤体前の水深であり、潮汐差を考慮して $h=28.9$ cm(実換算10.4m)と $h=33.1$ cm(11.9m)の2種類とした。実験で使用した消波ブロックは、モルタル製の模型テトラポッド(600gf, 高さ約9cm)で実物32tf型(28.75tf)に相当し、消波ブロックの斜面勾配が1:1.5となるように乱積形式で配置した。

実験で用いた波はすべて規則波であり、周期 $T=1.67$ s(実換算10s)と $T=2.53$ s(15.2s), 沖波の入射波高で $H_0=15.2$ cm(実換算5.5m)から $H_0=24.2$ cm(8.7m)までを作用させて行った。

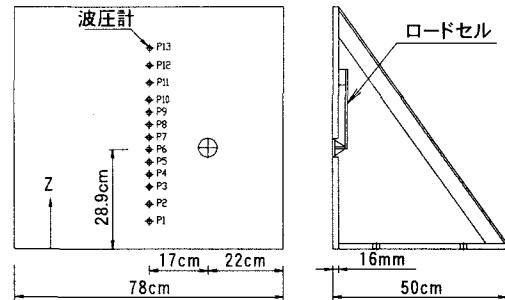
3 実験結果

3.1 直立壁に作用する衝撃碎波力の検証

直立壁に作用する衝撃碎波力の発生機構は、波の条件や海底条件およびマウンドの条件などによって複雑に発



(a) 実験水路と海底模型



(b) 直立壁模型

図-1 実験装置

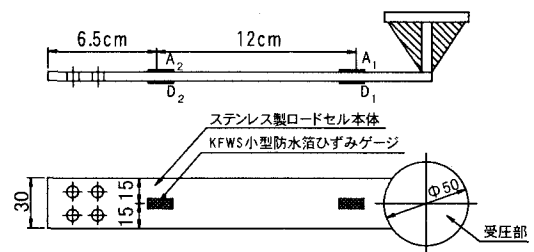
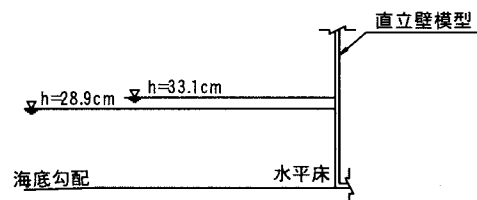
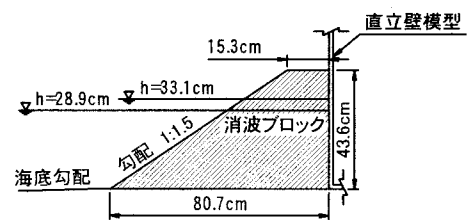


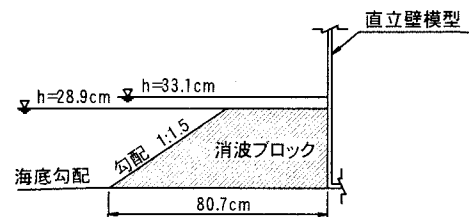
図-2 ロードセル



(a) 模型断面①



(b) 模型断面②



(c) 模型断面③

図-3 実験の模型断面

生し、値の大きさにもバラツキが多い。この衝撃碎波力の発生モデルには、波面と壁面の衝突時の状態によって大きく分けて 2 種類あり、①空気を巻き込む場合を Bagnold 型、②空気を巻き込まない場合を Wagner 型と呼んでいる¹¹⁾。以下に、今回の実験で得られた波圧について検討する。

図-4 は、模型断面③において水深 $h=28.9\text{cm}(10.4\text{m})$ 、周期 $T=1.67\text{s}(10\text{s})$ 、沖波波高 $H_0=21.6\text{cm}(7.8\text{m})$ の場合の波圧計による計測結果の一例である。このときの波の作用状況は、堤体から手前約 5m の位置で巻き波状に波が碎け、空気を多く巻き込んだ波が海底斜面を遡上して消波ブロックに衝突した後、直立壁へ作用したときの波圧の波形である。各計測チャンネルの波圧の最初の作用時間をみると、静水面位置よりやや低い位置にある P4 から上方に順番に作用していき P8 までの到達時間差は 62ms であった。また、静水面付近の P7 が最も波圧が大きく $9.6\text{kPa}(97.7\text{gf}/\text{cm}^2)$ で、波が作用してピークに達するまでの時間は約 2ms であった。したがって、今回の直立壁に作用する波圧は、Bagnold 型の衝撃波圧が作用しているものとみなせる。

本実験における衝撃碎波圧の発生は、すべての波において堤体の手前 $1\text{m}\sim 5\text{m}$ の位置で巻き波状に波が碎け、空気を多く巻き込んだ波が直立壁へ作用していることが確認できた。また、衝撃碎波圧の発生は水深 h 、周期 T 、沖波の波高 H_0 が同じであっても値に大きなバラツキがあり、瞬時に直立壁に作用していることが検証された。

3.2 直立壁に作用する波圧分布

図-5 は、模型断面①、②、③における水深 $h=28.9\text{cm}(10.4\text{m})$ 、周期 $T=1.67\text{s}(10\text{s})$ 、沖波波高 $H_0=21.6\text{cm}(7.8\text{m})$ のときの直立壁面に作用する波圧分布を示している。縦軸は水平床上の波圧計の設置高さ z を水深 h で割った水深比 z/h 、横軸は無次元波圧強度 $P_{\text{max}}/(w_0 H^*)$ で、図中の実線は波圧強度の平均値を示している。ここでの波高 H^* は、水平床上に直立壁模型を設置していない直立壁前面における通過波高 $H^*=26\text{cm}(9.4\text{m})$ である。図-5(a) は模型断面①における無次元波圧強度を示したもので、 $z/h=1.1$ で波圧強度が最も大きく 5.6 で、計測した 7 波の平均は 3.9 であった。また、直立壁へ作用した平均波圧強度は $1.3\sim 3.9$ であった。図-5(b)、は模型断面②での波圧強度の分布である。静水面 ($z/h=1$) において最大 2.0 であり、平均波圧強度の分布も $0.9\sim 1.4$ と小さい値であった。また、図-5(c) は模型断面③の波圧強度の分布であり、 $z/h=1.1$ で波圧強度が最大値で 13.8 を示し、計測した 7 波の平均波圧強度も $1.0\sim 6.9$ と最も大きな値であった。すなわち、模型断面②の波圧強度が最も小さく、消波ブロックによる波力の低減が効果的に得られていることがわかる。また、模型断面③の波圧強度が最も大きく、消波ブロックの沈下により高マウンドが形成されたため、静水面の上近傍で衝撃的な碎

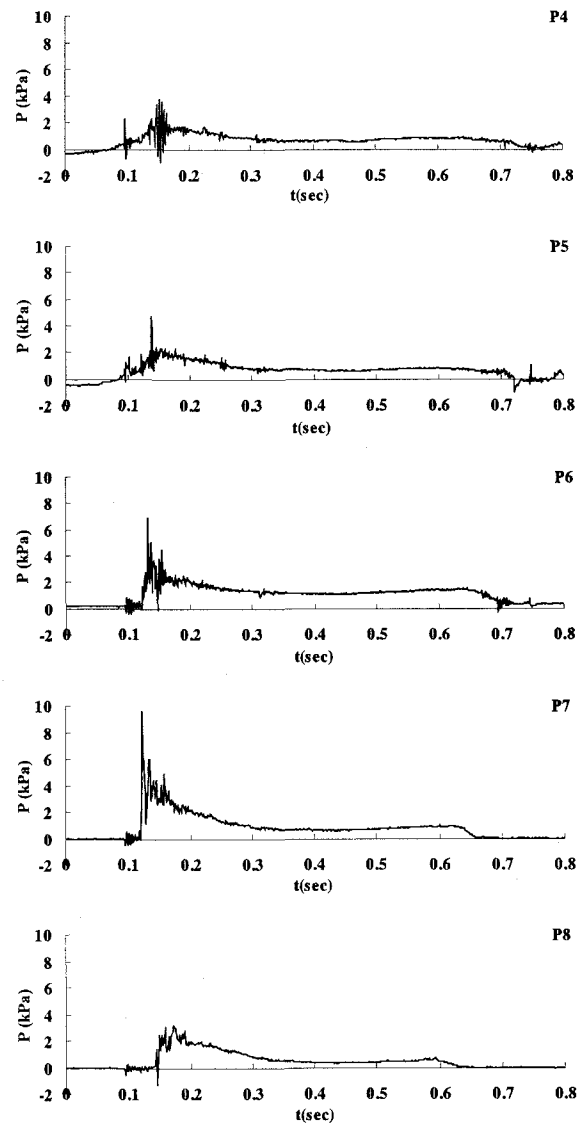


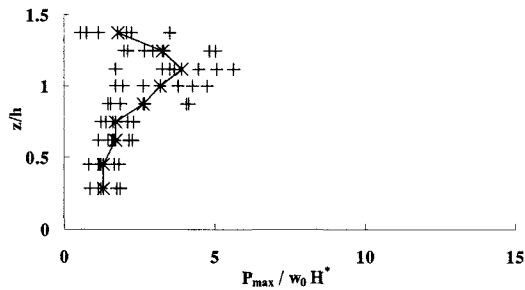
図-4 各位置における波圧の計測波形

波圧が作用している。

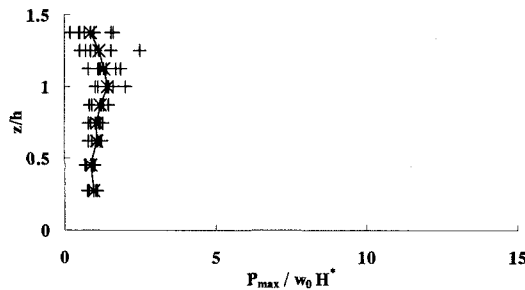
3.3 衝撃碎波力の影響を受ける消波ブロックの直立壁への衝突力 F_1

消波ブロックの動揺や衝突によって、直立壁が局部的な損傷や破壊に至る主たる原因には、消波工下部における砂の吸い出し（洗堀）があり、その結果、消波ブロックが沈下および散乱の発生が考えられている。つまり、消波ブロックが沈下することによって直立壁前面の水深が大きくなり、高マウンドおよび不完全消波部が形成され衝撃碎波力の発生を促していると考えられる。したがって、消波ブロックの沈下・散乱によって不安定となった消波ブロックに衝撃碎波力が作用し、消波ブロックの動揺による繰り返し衝突が発生し、局部的な損傷や破壊が発生しているものと考えられる^{5), 6)}。

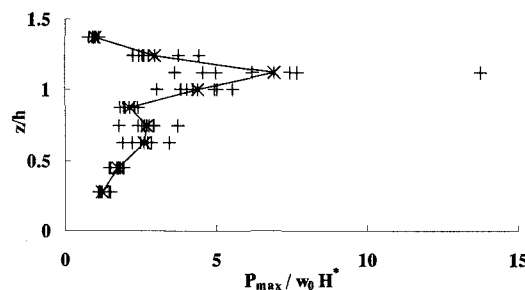
そこで、消波ブロックが直立壁へ衝突する際の衝突力 F_1 を計測するための基礎的検討として、消波ブロックの



(a) 模型断面①における波圧分布



(b) 模型断面②における波圧分布



(c) 模型断面③における波圧分布

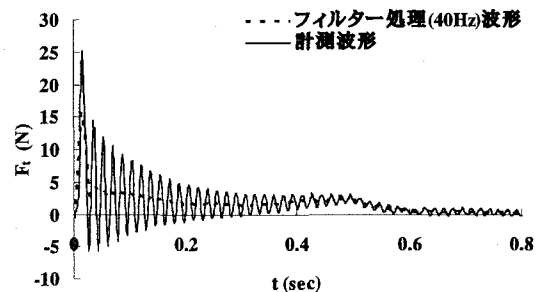
図-5 直立壁に作用する波圧強度分布

沈下を模擬した模型断面③において(1)現地に近い状態を想定した実験および(2)振り子状の実験の2つのパターンについて実験を行った。

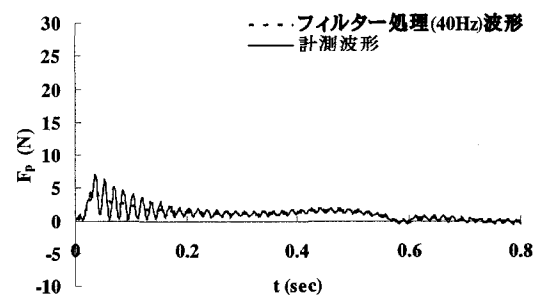
(1) 消波ブロックの沈下断面における衝突力 F_i について

模型断面③で水深 $h=28.9\text{cm}$ 、周期 $T=2.53\text{s}$ 、沖波波高 $H_0=21.3\text{cm}$ において、ロードセルの受圧面に1個の消波ブロックの1脚が接触するように乱積で配置し、受圧面に作用する消波ブロックの衝突力 F_i と波圧による力 F_p の和 F_t を計測した。また、比較のためにロードセル受圧面の前面に金網付きの型枠で隙間をあけ、波圧のみによる力 F_p の計測も行った。図-6(a)は、消波ブロックの衝突力 F_i と波圧による力 F_p との和 F_t の時間変化の一例を示し、図-6(b)は波圧だけによる力 F_p の時間変化を示している。

これらの波形を周波数 40Hz のローパスフィルターで処理した場合、衝突力 F_i と波圧による力 F_p の和 F_t の最大値は $F_{t\max}=15.8\text{N}(1612\text{gf})$ 、波圧だけによる力 F_p の最大値は $F_{p\max}=5.0\text{N}(505.3\text{gf})$ であった。消波ブロックの衝突力 F_i は $F_i = F_{t\max} - F_{p\max}$ の関係で求めることができるとすると、1個の消波ブロックの直立壁面への衝突力は $F_i=10.8\text{N}(1106.8\text{gf})$ となる。また、消波ブロックの衝突力の作用時間 Δt は、約 32ms である。このとき、消波ブロックの衝突力 F_i を現地に換算すると $503.9\text{kN}(51.6\text{tf})$ の衝突力が直立壁面に作用することになる。その作用時間は $\Delta t=192\text{ms}$ である。



(a) 衝突力 F_i と波圧による力 F_p の和 F_t の時間変化



(b) 波圧だけによる力 F_p の時間変化

図-6 衝突力 $F_{i\max}$ と波圧による力 $F_{p\max}$

つぎに、模型断面③の水深 $h=28.9\text{cm}$ において $F_{i\max}$ と $F_{p\max}$ の沖波波高 H_0 に対する変化を図-7、図-8に示す。図-7は $T=1.67\text{s}$ 、図-8は $T=2.53\text{s}$ の場合である。これらの図中の黒丸が $F_{i\max}$ であり、白丸が $F_{p\max}$ を表す。また、黒丸と白丸の差が消波ブロックの衝突力 F_i である。図から、最大の衝突力 F_i は、周期 $T=1.67\text{s}$ 、入射波高 $H_0=21.6\text{cm}$ の場合で $13\text{N}(1326.5\text{gf})$ である。これを現地換算すると $606.5\text{kN}(61.9\text{tf})$ となる。また、沖波の入射波高 H_0 が増加すると消波ブロックの衝突力 F_i が増加する傾向にある。また、周期の差異による衝突力 F_i には H_0 が小さい場合を除けば、大差がないことがわかる。

(2) 振り子状のブロックの衝突力について

消波ブロックを糸で吊した状態で、波を作用させ消波

ブロックが直立壁に衝突するときの衝突力 F_i と波圧による力 F_p の和 F_t を計測した。計測にあたっては、消波ブロックが波の作用によって大きく動揺することを抑制するために直立壁前面から手前 12cm の位置に直立壁面に平行して金網を設置し、直立壁面と金網面との間に直立壁上端部から長さ 40cm の糸で吊した消波ブロックに波を作用させている。ただし、ロードセル受圧面と消波ブロック 1 脚の間隔および金網面との間には約 1cm の間隔で吊り下げた。また、水路に直交した方向への消波ブロックの横揺れは、吊り下げた消波ブロックの両サイドにガイドを設置することで防止している。

図-9(a)は、模型断面③で水深 $h=28.9\text{cm}$ 、周期 $T=1.67\text{s}$ 、沖波波高 $H_0=15.7\text{cm}$ における直立壁への衝突力 F_i と波圧による力 F_p の和 F_t をロードセルで計測した波形の一例である。図中の破線は、実験データを周波数 40Hz でローパスフィルターをかけて処理したものである。図-9(b)は、消波ブロックの衝突力と同時に計測した波圧計(P6)の波形である。図-9(a)と(b)の波形を比較すると、波圧の作用から約 10ms 遅れて、消波ブロックが直立壁に衝突していることがわかる。この衝突現象は、後述する高速ビデオ撮影によっても直立壁に波が作用した後に消波ブロックの衝突が確認されている。また、消波ブロックの衝突力の作用時間 Δt は約 30ms である。このときの衝突力と波圧の力の和 F_t は 35.1N(3582.6gf)を示しており、図-7から考慮すると衝突力 F_i は 29.7N(3032.7gf)である。この衝突力 F_i を現地に換算すると 1.4MN(141.5tf)の力が直立壁面に瞬時(作用時間 $\Delta t=180\text{ms}$)に作用していることになる。

先の現地を想定した断面の実験結果をあわせて考えると、実際の消波ブロックの衝突現象は、 $F_t=1.9\text{N}\sim 29.7\text{N}$ (実換算 0.09MN $\sim 1.4\text{MN}$)、作用時間 $\Delta t=30\text{ms}\sim 32\text{ms}$ (180ms $\sim 192\text{ms}$)の範囲にあると考えられる。

3.4 消波ブロックの動的挙動と移動速度

(1) 消波ブロックの動的挙動

実験では、1 個の 600gf の消波ブロックを模型断面③の消波ブロック天端に設置して高速度ビデオカメラで撮影したところ、碎波の作用によって消波ブロックが直立壁へ衝突している状況が観測できた。その挙動は、消波ブロックの重心が低いために消波ブロックの一脚だけが少し浮いたような状態で滑るように衝突している場合がほとんどであった。一方、波圧によって転倒した後に衝突する場合もあった。また、波高が大きな波を作用させた場合、飛来するように直立壁に衝突する場合もあった。

今回の実験で使用した消波ブロックは、消波ブロックの所要重量を算定するハドソン式を用いて重量から逆算された限界の波高が 19.3cm(実換算 6.9m)であり、限界波高を越えた波高が作用したために動揺したと考えられる。

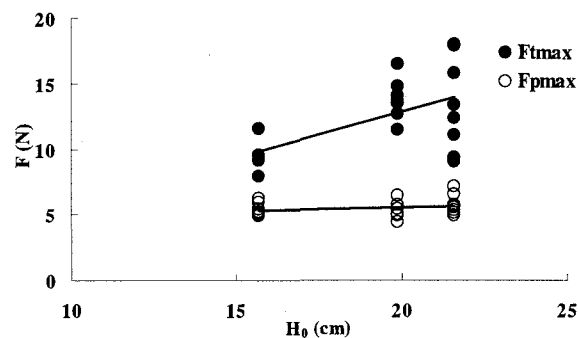


図-7 周期 $T=1.67\text{s}$ における衝突力 F と H_0 の関係

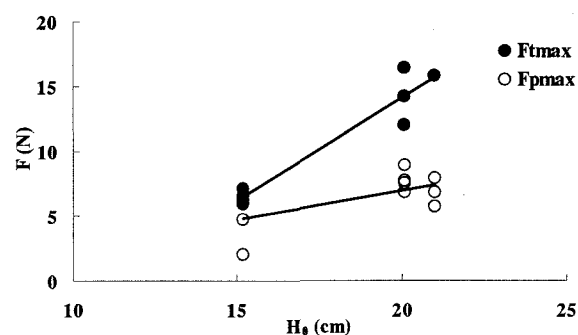
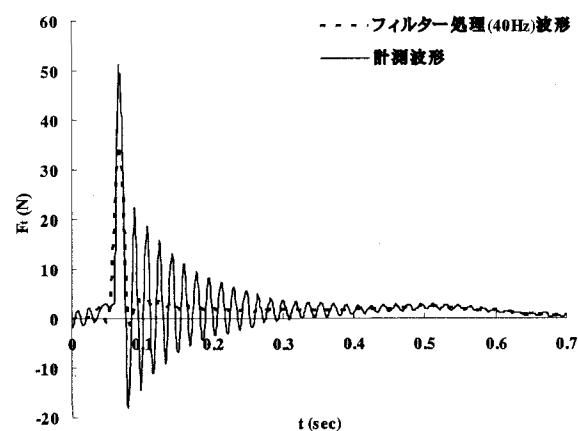
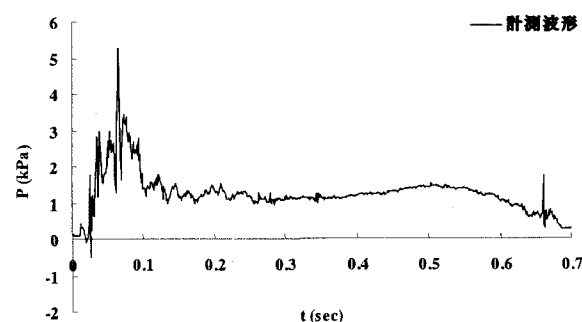


図-8 周期 $T=2.53\text{s}$ における衝突力 F と H_0 の関係



(a) 衝突力 F_i と波圧による力 F_p の和 F_t の時間変化



(b) 波圧計による時間変化

図-9 直立壁への衝突力波形

(2) ブロックの移動速度

1秒間に4500コマで撮影を行った高速度ビデオカメラの映像から、消波ブロックに衝突する水塊の移動経路および砕波による消波ブロックの移動経路について調べた。移動経路の計測はモニター画面に透明のOHPシートを貼付して、ターゲットの時間変化をプロットした。ターゲットは砕波した水塊に含まれる気泡と消波ブロック一脚の点とした。なお、画面上の寸法は実寸法と異なるため、画像上の消波ブロック一脚の端部寸法と使用した消波ブロックの寸法の比率によってスケールの調整を行った。移動経路の時間は、画面右上に表示されるコマ数から換算した。画像解析により得られた移動経路点の移動距離と時間を用いて、水塊の流速と消波ブロックの移動速度の算出を行った。

図-10は、今回の実験で撮影を行った模型断面③における水深 $h=28.9\text{cm}$ 、周期 $T=1.67\text{s}$ 、沖波波高 $H_0=21.6\text{cm}$ の一例である。この場合、消波ブロックの衝突前の移動速度は 0.064m/s 、衝突後の移動速度は 0.039m/s であった。また、消波ブロックに作用する砕波流速は、 1.68m/s であった。これらを現地の縮尺に換算すると、消波ブロックの衝突前の移動速度は 0.38m/s であり、衝突後は 0.23m/s となる。また、消波ブロックの衝突前の移動速度は、砕波流速の $1/26.6$ である。



(a) 砕波の衝突



(b) 消波ブロックの衝突

図-10 高速度ビデオカメラによる画像

4. まとめ

- 本研究で得られた主要な結論は、以下のとおりである。
- ①本実験手法を用いることにより、消波ブロックが直立壁へ衝突する際の衝突力を計測することが可能であり、衝突力の大きさは、 $1.9\text{N}\sim 29.7\text{N}$ (実換算 $0.09\text{MN}\sim 1.4\text{MN}$)、作用時間 $\Delta t=30\text{ms}\sim 32\text{ms}$ ($180\text{ms}\sim 192\text{ms}$) の範囲であることがわかった。
 - ②砕波の作用によって消波ブロックが直立壁へ衝突する際の挙動がわかった。また、波の作用状況に依存し、直立壁前の水深 h 、周期 T および沖波波高 H_0 によって挙動は異なり、衝突の挙動は複雑である。
 - ④高速度ビデオカメラを用いることによって、消波ブロックの衝突速度と砕波流速が算定できた。すなわち、ブロックの移動速度は現地において $0.2\text{m/s}\sim 1.2\text{m/s}$ で、砕波流速が約 10m/s 前後であることがわかった。

謝辞：本研究を行うにあたり港湾空港技術研究所 海洋・水工部 耐波研究室の下迫健一郎室長に貴重な御助言を頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 合田良実ほか：衝撃砕波圧に関する一実験，港湾技研資料，No32，pp.1-18，1967.
- 2) 谷本勝利ほか：混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について，港湾技術研究所報告，第20巻2号，pp.3-39，1981.
- 3) 高橋重雄ほか：直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察，港湾技術研究所報告，第22巻3号，pp.3-31，1983.
- 4) 服部昌太郎ほか：衝撃性砕波圧の発生・伝搬機構に関する実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp.751-755，1993.
- 5) 高橋重雄ほか：防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃砕波力について，海岸工学論文集，第45巻，pp.751-755，1998.
- 6) 高橋重雄ほか：ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて，海岸工学論文集，第46巻，pp.816-820，1999.
- 7) 五明美智男ほか：消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査，海岸工学論文集，第42巻，pp.886-890，1995.
- 8) 高橋重雄ほか：消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重，港湾技術研究所報告，第29巻，第1号，1990.
- 9) 小林智尚ほか：消波ブロック被覆堤における直立壁への荷重について，海岸工学論文集，第45巻，pp.771-775，1998.
- 10) 池野正明ほか：砕波段波による波力と漂流物の挙動と衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.846-850，2001.
- 11) 高橋重雄ほか：混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案，海岸工学論文集，第39巻，pp.676-680，1992.