

# 消波ブロック被覆堤におけるブロックの 動揺・衝突現象の解明のための水理模型実験

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

山口貴之<sup>1</sup>・上野紗代<sup>2</sup>・林建二郎<sup>3</sup>・大野友則<sup>4</sup>

Takayuki YAMAGUCHI, Sayo UENO, Kenjiro HAYASHI and Tomonori OHNO

<sup>1</sup>学生会員 防衛大学校 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>2</sup> 防衛大学校 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D 防衛大学校助教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>4</sup>正会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

When a storm is happened, such seawall structures as the composite breakwaters with vertical wall are subjected to produce impulsive forces due to breaking waves. And, the front face of seawall structures is locally damaged by the collision of precast concrete units placed in front of the vertical wall. To reduce the local damage on the concrete face, this study examines the oscillating and colliding behaviors of precast concrete units and evaluates the impulsive force on the wall. The impulsive forces produced by the collision of precast concrete units and behaviors of precast concrete units could evaluate by the hydraulic tests of the 1/36 scaled models.

*Key Words* : seawall structure, breaking waves, precast concrete units, composite breakwater, vertical wall, impulsive force

### 1. まえがき

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(いわゆる衝撃碎波力)が作用することが知られている。

衝撃碎波力に関する研究は、合田ら<sup>1)</sup>をはじめとして高橋ら<sup>2)</sup>や服部ら<sup>3)</sup>によって数多く行われている。また、近年では高橋ら<sup>4), 5)</sup>が、ケーソン式混成堤などの衝撃碎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。ケーソン式混成堤の被災には、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て局所的な損傷や破壊に至る被害事例がある<sup>6)</sup>。消波ブロックの衝突問題に関しては、五明ら<sup>7)</sup>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碎波力の発生機構に関する研究、高橋ら<sup>8)</sup>や小林ら<sup>9)</sup>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<sup>10)</sup>は碎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。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。

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た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

#### (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。海底模型は、水平な水路床より勾配3/100の斜面を水路床上高さ30cmまで設け、その延

長に水平床を形成したものである。また、水平床上には、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) 計測項目

実験では、直立壁に作用する砕波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/cm<sup>2</sup>, 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、サンプリング時間を8~12秒で計測を行った。また、消波ブロックの動的挙動と砕波の作用状況を観察するために高速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。

## (3) 実験パラメータ

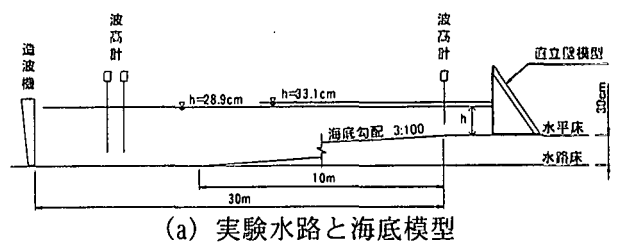
実験は、図-3に示す①消波ブロックのない直立堤断面、②消波ブロック被覆堤断面、③模型断面②の消波ブロックが静水面(水深 $h=28.9\text{cm}$ )まで沈下した場合を模擬した断面の計3種類で行った。水深 $h$ は堤体前の水深であり、潮汐差を考慮して $h=28.9\text{cm}$ (実換算10.4m)と $h=33.1\text{cm}$ (11.9m)の2種類とした。実験で使用した消波ブロックは、モルタル製の模型テトラポッド(600gf, 高さ約9cm)で実物32tf型(28.75tf, 高さ3.55m)に相当し、消波ブロックの斜面勾配が1:1.5となるように乱積形式で配置した。

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

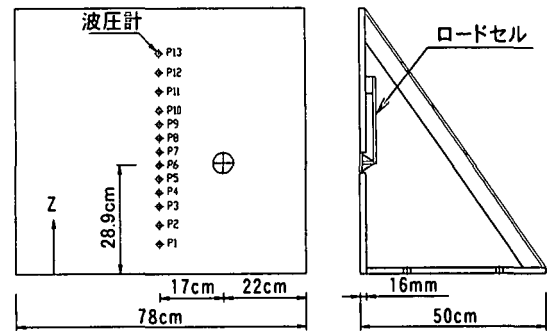
## 3. 実験結果

### (1) 波の作用状況

図-4は、波の作用状況を示すもので、デジタルビデオで撮影した画像を1/30コマづつ取り出して描



(a) 実験水路と海底模型



(b) 直立壁模型

図-1 実験装置

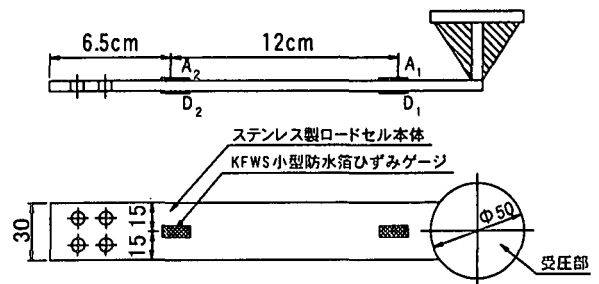
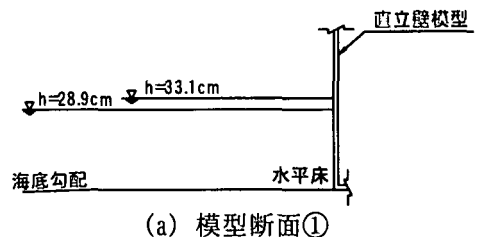
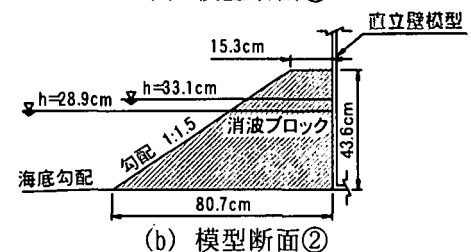


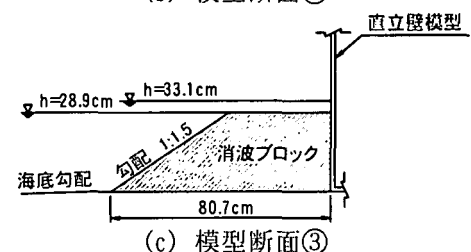
図-2 ロードセル



(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

いたものである。この波の作用状況図は、水深  $h=28.9\text{cm}$  (10.4m), 周期  $T=1.67\text{s}$  (10s), 沖波波高  $H_0=21.6\text{cm}$  (7.8m) の場合である。図-4(a)は直立堤断面の場合であり、直立壁で反射した波と入射してきた波とが海底斜面上で重複して波高が急に増大し、その直後、砕けた波が直立壁に作用して、波が大きく打ち上げられている。これに対して、図-4(b)に示す消波ブロック被覆堤断面の場合は、静水面よりやや高い位置で砕けた波がブロックの天端部分に衝突しているが、打ち上げ高さは大きくない。一方、図-4(c)の消波ブロックが静水面付近まで沈下した場合を模擬した断面では、静水面付近で砕けた波が、多くの気泡を含んだ状態で激しくブロック天端部分に衝突しているが、打ち上げ高さは模型断面②の場合とほぼ同様である。

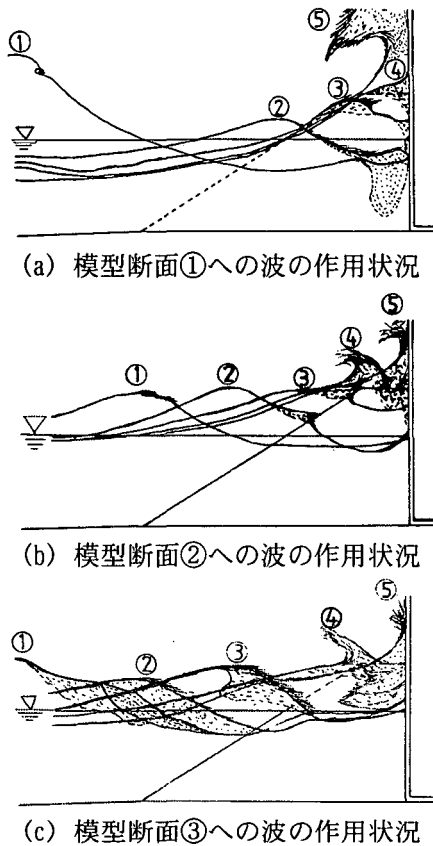


図-4 波の作用状況の一例

## (2) 直立壁に作用する波圧

### a) 波圧の計測波形

図-5は、模型断面③において水深  $h=28.9\text{cm}$  (10.4m), 周期  $T=1.67\text{s}$  (10s), 沖波波高  $H_0=21.6\text{cm}$  (7.8m) 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砕け、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〔図-4(c)参照〕。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 ( $z=21.6\text{cm}$ ) から上方に順番に作用していきP8 ( $z=36\text{cm}$ ) までの到達時間差は62msであった。また、静水面付近のP7 ( $z=32.4\text{cm}$ ) が最も波圧が大きく9.6kPa (97.7gf/cm<sup>2</sup>) 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<sup>2)</sup>。

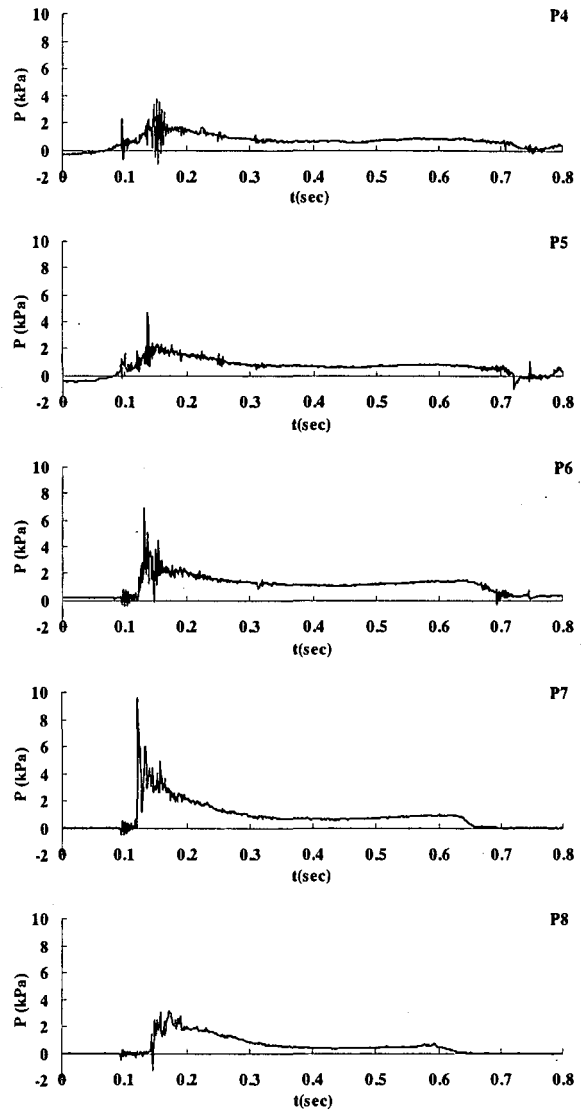
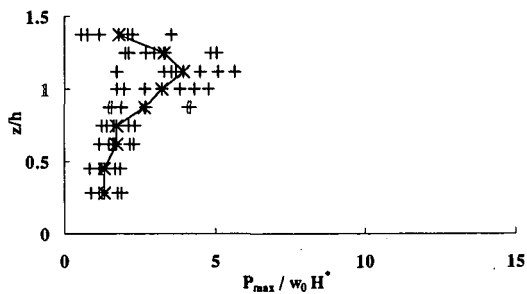


図-5 各位置における波圧の計測波形

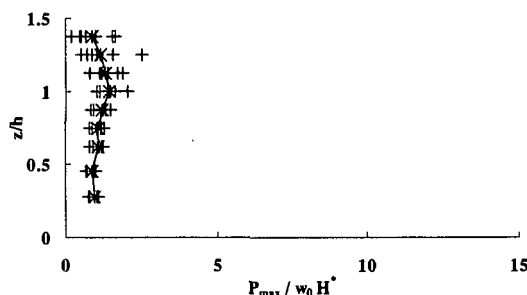
### b) 直立壁に作用する波圧強度

図-6は、模型断面①, ②, ③における水深  $h=28.9\text{cm}$  (10.4m), 周期  $T=1.67\text{s}$  (10s), 沖波波高  $H_0=21.6\text{cm}$  (7.8m) 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  $P_{\max}/(w_0 H^*)$  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場合の直立壁模型前面の位置における波高(通過波高)  $H^*=26\text{cm}$  (9.4m) である。図-6(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最大で5.6を示し、計測した7波の平均は3.9であった。

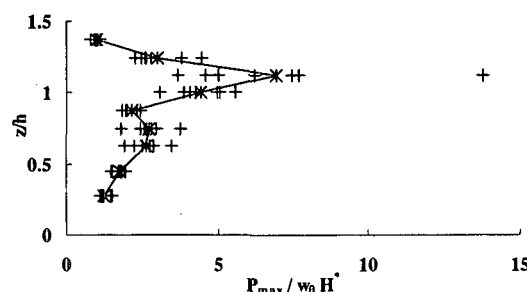
また、直立壁へ作用する平均波圧強度の水深方向分布の変化は1.3~3.9であった。図-6(b)は模型断面②での波圧強度の分布である。静水面( $z/h=1$ )において最大2.0であり、平均波圧強度の水深方向分布の変化も0.9~1.4と小さい値であった。また、図-6(c)は模型断面③の波圧強度の分布であり、 $z/h=1.1$ で波圧強度が最大で13.8を示し、平均波圧強度の水深方向分布の変化も1.0~6.9と最も大きな値であった。すなわち、模型断面②の波圧強度が最も小さく、消波ブロックによる波力の低減が効果的に得られていることがわかる。また、模型断面③の波圧強度が最も大きく、消波ブロックの沈下により高マウンドが直立壁前面に形成されたため、静水面の上近傍で衝撃的な碎波圧が作用している。



(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-6 直立壁に作用する波圧強度分布

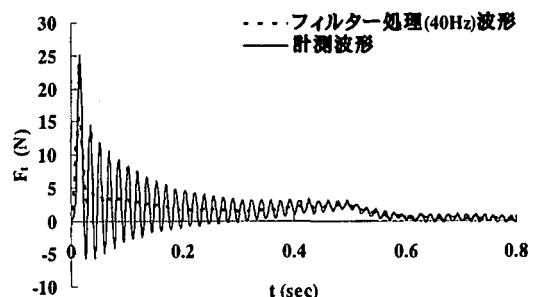
### (3) 碎波の影響を受ける消波ブロックの直立壁への衝突力 $F_1$

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、模型断面③においてa)現地に近い状態を想定した実験およびc)振り子状の実験の2つのパターンを行った。

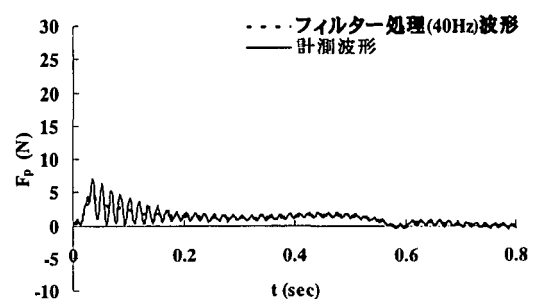
### a) 消波ブロックの沈下断面における衝突力 $F_1$ について

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 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ の和 $F_1$ 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-7(a)は、消波ブロックの衝突力 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ との和 $F_1$ の時間変化の一例を示し、図-7(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 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ の和 $F_1$ の最大値は $F_{1\text{max}}=15.8\text{N}$ (1612gf)、波圧だけによる力 $F_p$ の最大値は $F_{p\text{max}}=5.0\text{N}$ (505.3gf)であった。消波ブロックの衝突力 $F_1$ は $F_1 = F_{1\text{max}} - F_{p\text{max}}$ 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 $F_1=10.8\text{N}$ (1106.8gf)となる。また、消波ブロックの衝突力 $F_1$ の作用時間 $\Delta t$ は、約32msである。このとき、消波ブロックの衝突力 $F_1$ を現地に換算すると503.9kN(51.6tf)の衝突力 $F_1$ 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 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ の和 $F_1$ の時間変化



(b) 波圧だけによる力 $F_p$ の時間変化

図-7 衝突力 $F_{1\text{max}}$ と波圧による力 $F_{p\text{max}}$

### b) 碎波による消波ブロックの衝突力 $F_1$

模型断面③の水深 $h=28.9\text{cm}$ において $F_{1\text{max}}$ と $F_{p\text{max}}$ の沖波波高 $H_0$ に対する変化を図-8、図-9に示す。図-8は $T=1.67\text{s}$ 、図-9は $T=2.53\text{s}$ の場合である。これらの図の黒丸が $F_{1\text{max}}$ であり、白丸が $F_{p\text{max}}$ を表す。また、黒丸と白丸の差が消波ブロックの衝突力 $F_1$ であ

る。図から、最大の衝突力 $F_1$ は、周期 $T=1.67s$ 、入射波高 $H_0=21.6cm$ の場合で $13N(1326.5gf)$ である。これを現地換算すると $606.5kN(61.9tf)$ 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 $F_1$ が増加する傾向にある。また、周期の差異による衝突力 $F_1$ には沖波波高 $H_0$ が小さい場合を除けば、大差がないことがわかる。

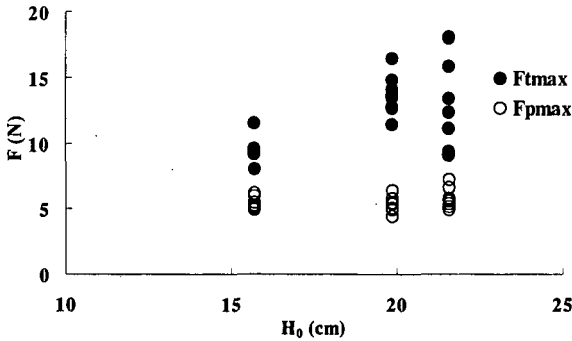


図-8 周期 $T=1.67s$ における衝突力 $F$ と $H_0$ の関係

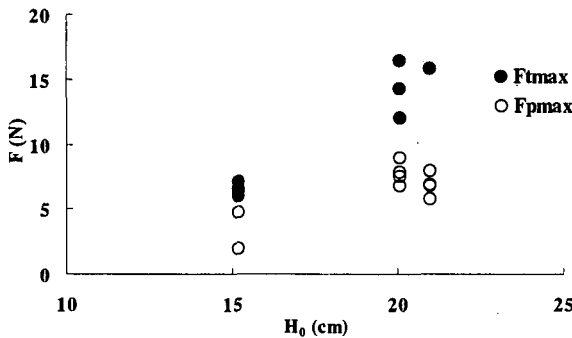


図-9 周期 $T=2.53s$ における衝突力 $F$ と $H_0$ の関係

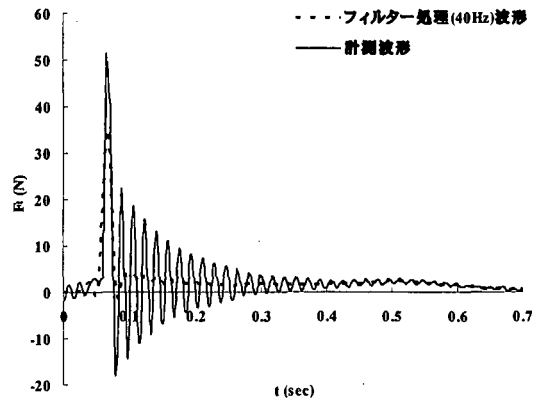
### c) 振り子状の消波ブロックの衝突力 $F_1$ について

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 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ の和 $F_1$ 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、消波ブロックとロードセル受圧面および金網面との間隙は、それぞれ約 $1cm$ とした。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用ブロックを設置することで防止している。

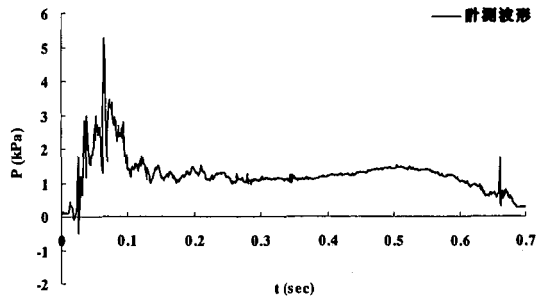
図-10(a)は、模型断面③で水深 $h=28.9cm$ 、周期 $T=1.67s$ 、沖波波高 $H_0=15.7cm$ における直立壁への衝突力 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ の和 $F_1$ をロードセルで計測した波形の一例である。図中の破線は、実験データを周波数 $40Hz$ でローパスフィルターをかけて処理したものである。図-10(b)は、消波ブロックの衝突力と同時に計測した波圧計( $P_6$ ,  $z=28.9cm$ )の波形である。図-10(a)と(b)の波形を比較すると、波圧の

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確認されている。また、このときの衝突力 $F_1$ と波圧の力 $F_p$ の和 $F_1$ は $35.1N(3582.6gf)$ であり、 $F_1$ の作用時間 $\Delta t$ は $30ms$ である。一方、図-8から考慮すると衝突力 $F_1$ は $29.7N(3032.7gf)$ である。この衝突力 $F_1$ を現地に換算すると $1.4MN(141.5tf)$ の衝突力 $F_1$ が直立壁面に瞬時(作用時間 $\Delta t=180ms$ )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、 $F_1=1.9N\sim 29.7N$ (実換算 $0.09MN\sim 1.4MN$ )、作用時間 $\Delta t=30ms\sim 32ms$ ( $180ms\sim 192ms$ )の範囲にあると考えられる。



(a) 衝突力 $F_1$ と波圧による力 $F_p$ の和 $F_1$ の時間変化



(b) 波圧計による時間変化

図-10 直立壁への衝突力波形

### (4) 消波ブロックの動的挙動と移動速度

#### a) 消波ブロックの動的挙動

1個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、砕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、飛び跳ねるように直立壁に衝突する場合もあった。

## b) 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、画面上の中央に表示された時刻である。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-11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 $0.064\text{m/s}$ 、衝突後の移動速度は $0.039\text{m/s}$ であった。また、消波ブロックに作用する砕波流速は、 $1.68\text{m/s}$ 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 $0.38\text{m/s}$ であり、衝突後は $0.23\text{m/s}$ 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。

なお、今回の実験で撮影した画像解析によって得られた消波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 $10\text{m/s}$ 前後であった。



(a) 砕波の消波ブロックへの衝突



(b) 消波ブロックの直立壁面への衝突

図-11 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、限られた条件ではあるが以下のとおりである。

- ① 本実験手法を用いることにより、砕波の作用を受けた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る。しかし、衝突現象は衝突体と非衝突体の弾性等によっても大きく変化するため、今後の検討が必要である。
- 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る。
- ③ 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 $10\text{m/s}$ 前後であることがわかった。

謝辞：本研究を行うにあたり（独）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・原中祐人：衝撃砕波圧に関する一実験，港湾技研資料，No32，pp.1-18，1967。
- 2) 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司：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，第4号，pp.3-31，1983。
- 3) 服部昌太郎・由井孝昌：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。
- 4) 高橋重雄・津田宗男・下迫健一郎・横田 弘・清宮理：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。
- 5) 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二朗・五明美智男：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。
- 6) 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一：被災防波堤集覧（その3），港湾技研資料，No.485。
- 7) 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄：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・谷本勝利・下迫健一郎：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，pp.53-75，1990。
- 9) 小林智尚・三浦健吾：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・森 信人・田中寛好：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。