

衝撃砕波を受ける消波ブロックの直立壁への衝突現象 に関する実験的研究

山口 貴之*・別府万寿博**・大野 友則***

消波ブロック被覆堤など直立壁を持つ防波堤や護岸構造物では、壁面に局所的な損傷や破壊を生じた事例が報告されている。これは、衝撃的な砕波の作用を受けた消波ブロックが動揺あるいは移動してケーソン壁に衝突したことが原因と考えられる。そこで本研究は、ケーソン壁の損傷や破壊の要因となる消波ブロックの動的挙動に着目し、異なる 2 種類の断面に対して水理模型実験を行い、まず衝撃砕波の特徴について調べた。次に、衝撃砕波を受ける消波ブロックの動的挙動と衝撃力について検討を行った。その結果、衝撃砕波の作用を受ける消波ブロックの移動速度や直立壁に対する衝突現象・衝撃力などを定量的に評価することができた。

1. はじめに

台風による波浪や地震による津波など自然災害の発生から生活を保全するために、港湾では防波堤や防波護岸が建設される。これらの構造物には、波浪条件や海底地形の条件によっては衝撃的な砕波力が作用することが知られている(合田・原中, 1967; 高橋ら, 1983)。高橋ら(1998, 1999)は、衝撃砕波による被災事例を分析し、破壊形態と原因の整理を行っている。その中には、ケーソン式防波堤の前面に配置された異形ブロックの 1 つである 4 脚形消波ブロック(以下、4 脚ブロックと称する)がケーソン壁面に衝突し、写真-1 に示すような局所的な損傷や破壊を与えた事例がある。このような 4 脚ブロックの衝突による局部破壊は、マウンドの法尻、下部およびブロック先端における洗掘(鈴木・高橋, 1998)が初期要因であると考えられている。すなわち、まず洗掘により 4 脚ブロックが沈下・散乱し、4 脚ブロック同士の噛み合わせが緩くなる。その後、高マウンド・急勾配海底など海底勾配の急激な変化によって衝撃砕波が発生することにより、4 脚ブロックが動揺・移動してケーソン壁に衝突するというものである。

本研究は、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、まず水理模型実験を行って 4 脚ブロックへ作用する衝撃的な砕波圧の特性、4 脚ブロックの動的挙動について調べたものである。次に、実験結果に基づいて、4 脚ブロックが壁面に衝突する際の衝撃力について定量的評価の検討を行っている。

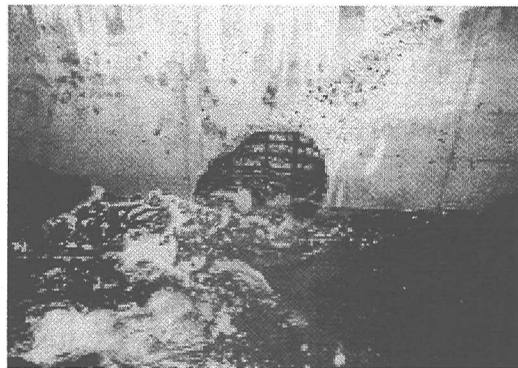


写真-1 ケーソン壁に生じた局所的破壊

た。水路には、図-1(a)に示すように勾配 3/100 で長さ 10 m の海底模型をステンレス鋼材で製作し、この海底勾配に続けて水路床から高さ 30 cm の位置に水平床を設置した。さらに、斜面から水平床に変わる位置(水平床前端)から水平部 80.7 cm のところに、図-1(b)に示す L 型鋼製の直立壁模型を設置して鋼製基礎床にボルトで固定した。

(2) 実験パラメータ

32 t 型の 4 脚ブロックの衝突によってケーソン壁に直径 1 m の穴があいた釧路港(壁厚 0.4 cm)の事例(服部ら, 1984)を参考として、①直立壁前面における水深 h 、②波の周期 T 、③入射波高 H (造波水槽内の一様水深部における波高)、を決定した。水深 h は、潮汐差を考慮して干潮時の水深 $h=28.9$ cm(実換算; 10.4 m)と満潮時の水深 $h=33.1$ cm(11.9 m)の 2 種類とした。波の周期 T は、釧路港の防波堤の設計に用いられた周期 $T=2.53$ s(15.2 s)と被災発生時の周期 $T=1.67$ s(10.0 s)の 2 種類である。入射波高 H は、高波浪の状態を想定し $H=15.5$ cm(5.58 m)、 $H=20.0$ cm(7.20 m)および $H=22.5$ cm(8.10 m)の 3 種類とした。

上記のパラメータに対して、検討した模型断面は図-2 に示す 2 種類である。すなわち、模型断面 A は釧路港の断面を模擬した消波ブロック被覆堤断面、模型断面 B は

2. 実験の概要

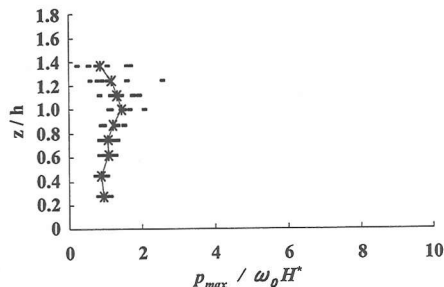
(1) 実験装置

実験は、長さ 40 m、幅 0.8 m、深さ 1 m の吸収式 2 次元造波水路を用いて、縮尺 1/36 の水理模型実験を行っ

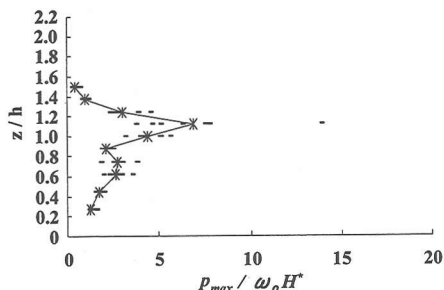
* 正会員 防衛大学校 理工学研究科

** 正会員 工(博) 防衛大学校助手 建設環境工学科

*** 正会員 工 博 防衛大学校教授 建設環境工学科



(a) 模型断面 A における波圧分布



(b) 模型断面 B における波圧分布

図一4 直立壁に作用する波圧分布

強度 $p_{\max}/(\omega_0 H^2)$ が約 14 という大きな値を示す場合もあった。これらの傾向は、高橋ら (1990) や大久保ら (2001) の実験結果と同様である。すなわち、消波工による波圧の低減効果が十分でなく、4 脚ブロックの天端で砕波した衝撃砕波圧が直接直立壁に作用した結果、極めて強大な波力が静水面に集中して作用したためと考えられる。

(2) 4 脚ブロックの動的挙動

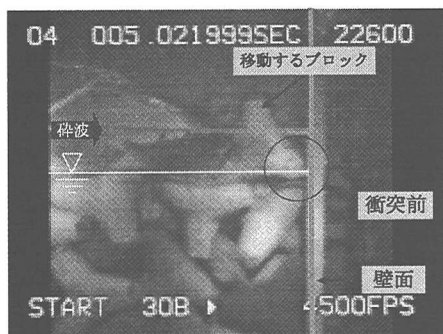
4 脚ブロックの動揺や移動が励起されるのは、① 4 脚ブロック下部および法尻等において砂地盤の洗堀が発生する、② 4 脚ブロックが沈下・散乱しながらしだいに噛み合わせが緩む、ことが必要条件である。しかし、このようなプロセスを室内実験によって再現することや、4 脚ブロックの衝突位置を特定するのは極めて困難である。一方、前節の検討の結果、模型断面 B は静水面付近に大きな衝撃砕波圧が発生することがわかった。そこで、4 脚ブロックの天端付近に位置するブロックに注目して、その挙動を高速ビデオカメラ (4500 コマ/秒) で撮影した。写真-2 に、水深 $h=28.9$ cm、周期 $T=2.53$ s、入射波高 $H=15.2$ cm の場合における 4 脚ブロックの衝突前および衝突時の画像を示す。各ケースにおける画像から、4 脚ブロックの重心は低い位置にあるため、波の流体力によって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、ブロックが波圧の作用を受けて転倒した後に衝突する場合もあった。また、波高の大きな波を作用させた場合、跳ね上がって直立壁に衝突する場合もあった。

(3) 4 脚ブロック周辺の流速と衝突速度

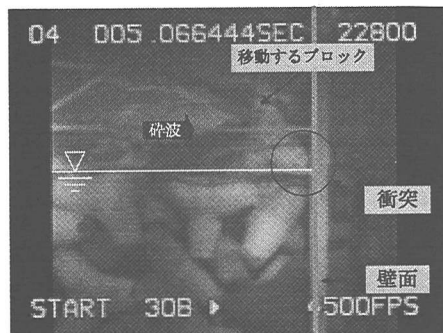
高速ビデオカメラの映像に基づいて、4 脚ブロック周辺の流速と砕波による 4 脚ブロックの衝突速度について調べた。速度は、移動距離と移動時間から以下の手順で求めた。移動の経路は、モニター画面に透明のシートを貼付して、4 脚ブロックに作用する水塊の波頭部に含まれる気泡と直立壁へ衝突する 4 脚ブロック 1 脚の先端をターゲットとしてプロットすることで求めた。なお、画面上の寸法は実寸法と異なるため、画面上の 4 脚ブロック 1 脚の寸法と使用した 4 脚ブロックの寸法の比率によってスケールの調整を行った。移動の時間は、高速ビデオカメラのコマ数から換算して求めた。なお、波の挙動と特性は、相対波高 H/h や相対水深 h/L によって変化する。とくに波速 c は、波の分類によって水深 h と周期 T および波長 L に影響を受けることがわかっており、相対水深 h/L が波速 c の指標として使用されている。したがって、ここでも 4 脚ブロック周辺の流速 V_0 および直立壁へのブロックの衝突速度 V_0 について相対水深 h/L との関係を調べた。

a) 4 脚ブロック周辺の流速

4 脚ブロック周辺の流速と沖側の相対水深 $h_{\text{off}}/L_{\text{off}}$ (添



(a) 衝突前



(b) 衝突瞬間

写真-2 直立壁へ衝突する 4 脚ブロックの挙動

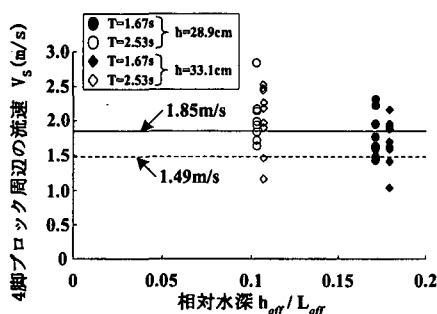


図-5 4脚ブロック周辺の流速と相対水深の関係

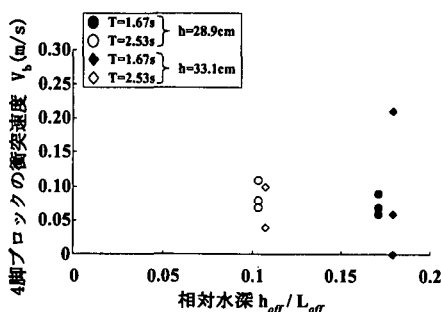


図-6 4脚ブロックの衝突速度と相対水深の関係

字 off は、本実験における造波水槽内の一様水深部における水深と波長を表す)の関係を、図-5に示す。図中の●と○は水深 $h=28.9$ cm ($h_{\text{off}}=58.9$ cm)、◆と◇は水深 $h=33.1$ cm ($h_{\text{off}}=63.1$ cm) の場合をプロットしたものである。また、各水深における黒と白の記号は、それぞれ周期 $T=1.67$ s, $T=2.53$ s に対する結果である。図から、4脚ブロック周辺の流速 V_s は相対水深 $h_{\text{off}}/L_{\text{off}}$ に対して、 $1.04 \sim 2.84$ m/s の範囲に分布していることがわかる。なお、実験での4脚ブロック周辺の流速を実現象に換算すると $6.24 \sim 17.04$ m/s に相当する。ちなみに、砕波時の波速 c は、砕波時の水平水粒子速度 u_c (波の進行方向の水粒子の移動する速さ) に等しく $c=u_c=\sqrt{gh_b}$ で表される。ここで、合田 (1979) が提案した砕波指標を用いて砕波水深を算定すると $h_b=22.8 \sim 34.8$ cm となる。よって $u_c=\sqrt{gh_b}$ より、水平水粒子速度は $u_c=1.49 \sim 1.85$ m/s となる。その値を図-5中に、実線および点線で示している。図から、今回の実験で得られた4脚ブロック周辺の流速 V_s は、 u_c の上下限値の範囲および周辺にあることがわかる。つまり、4脚ブロック周辺の流速は $V_s=\sqrt{gh_b}$ の関係式を用いて大略推定することができる。

b) 4脚ブロックの衝突速度

図-6は、沖側の相対水深 $h_{\text{off}}/L_{\text{off}}$ に対する4脚ブロック (重量: 5.9 N) の衝突速度 V_b の関係を示したもので

ある。図中の●と○は水深 $h=28.9$ cm ($h_{\text{off}}=58.9$ cm)、◆と◇は水深 $h=33.1$ cm ($h_{\text{off}}=63.1$ cm) の場合をプロットしたものである。それぞれの水深における黒と白の記号は周期 $T=1.67$ s, $T=2.53$ s に対応する。図から、4脚ブロックの衝突速度 V_b は、概ね $0.05 \sim 0.1$ m/s の範囲に分布していることがわかる。なお、衝突速度 V_b を実現象に換算すると $0.3 \sim 0.6$ m/s となる。また、衝突速度 V_b の最大値は相対水深 $h_{\text{off}}/L_{\text{off}}=0.179$ の場合であり、その値は 0.21 m/s (実現象: 1.26 m/s) であった。4脚ブロック周辺の流速 V_s と4脚ブロックの衝突速度 V_b とを比較すると、4脚ブロックの衝突速度 V_b は4脚ブロック周辺の流速 V_s の $1/20 \sim 1/13$ であることがわかる。すなわち本実験の結果から、4脚ブロックの移動速度 V_b は、概ね $V_b=(1/20 \sim 1/13) \times \sqrt{gh_b}$ として評価することができると考える。

(4) 直立壁への衝突力

図-7に、4脚ブロックの衝突力 F_t と波圧による力 F_p の合力 F_t の最大値 $F_{t\text{max}}$ および波力 F_p の最大値 $F_{p\text{max}}$ と入射波高 H の関係を示す。図-7(a), (b) は、それぞれ周期 $T=1.67$ s, $T=2.53$ s の場合であり、周期 T が4脚ブロックの衝突力に与える影響を検討するために示している。図中の黒丸は $F_{t\text{max}}$ であり、白丸が $F_{p\text{max}}$ を表す。また、黒丸と白丸の差が4脚ブロックの衝突力 F_t を示すことになる。図中の実線と点線は、それぞれ $F_{t\text{max}}$

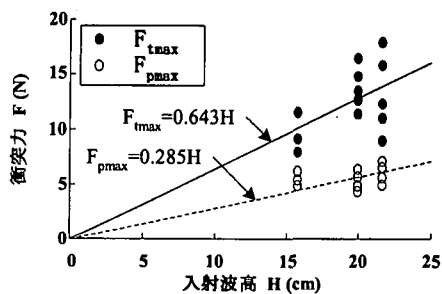
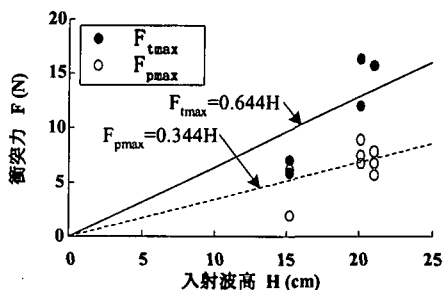
(a) 周期 $T=1.67$ s(b) 周期 $T=2.53$ s

図-7 周期の違いにおける衝突力と入射波高の関係

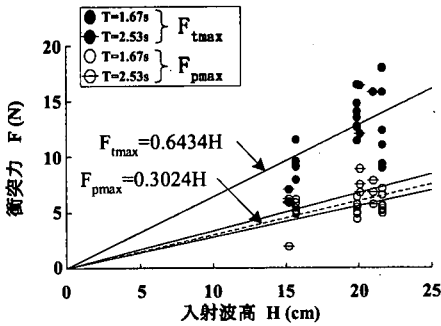


図-8 衝突力と沖側の入射波高の関係

と F_{pmax} について最小 2 乗法を用いて求めた回帰直線であり、次式で表される。

周期 $T=1.67$ s ;

$$F_{tmax}=0.643H \quad \dots\dots\dots (1a)$$

$$F_{pmax}=0.285H \quad \dots\dots\dots (1b)$$

周期 $T=2.53$ s ;

$$F_{tmax}=0.644H \quad \dots\dots\dots (2a)$$

$$F_{pmax}=0.344H \quad \dots\dots\dots (2b)$$

ここに、

F_{tmax} : 衝突力 F_t と波圧による力 F_p の合力の最大値 (N)

F_{pmax} : 波圧による力 F_p の最大値 (N)

H : 入射波高 (cm)

式 (1) と (2) を比較すると、 F_{tmax} (衝突力 F_t と波圧による力 F_p の合力の最大値) は、周期の違いによらずほぼ等しい値となる。一方、波圧による力の最大値 F_{pmax} は両者の間に約 20% の差があり、周期の影響が現れていると考えられる。そこで、周期の影響を調べるために、図-7(a) と (b) を重ねたものを図-8 に示す。また、 F_{tmax} と F_{pmax} のすべてのデータに対して最小 2 乗法を用いて求めた回帰直線を次式に示す。

$$F_{tmax}=0.6434H \quad \dots\dots\dots (3b)$$

$$F_{pmax}=0.3024H \quad \dots\dots\dots (3b)$$

図-8 には、式 (1b) および式 (2b) による結果も示している。図から、式 (3b) による結果は両者の中間値を示すことがわかる。しかし、実験におけるデータのばらつきを考慮すると、本実験で対象とした周期の範囲では式 (3b) を用いて波圧による力の最大値を評価してもさしつかえないと考える。しかしながら、今後は周期を考慮した検討を行う必要がある。

4. ま と め

本研究において得られた結果を、以下に示す。

(1) 消波ブロック被覆堤断面において、ブロックの沈

下や散乱を模擬した断面では、衝撃的な砕波力が直接直立壁へ作用するため極めて強大な波力が生じることがわかった。

(2) 高速度ビデオカメラの映像から、4 脚ブロックは、その重心位置が低いために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ことがわかった。また、波圧の大きさによっては、転倒した後に衝突したり跳ね上がって衝突する場合もあった。

(3) 高速度ビデオカメラの映像から、4 脚ブロック周辺の流速 V_b は、1.04~2.84 m/s の範囲に分布しており、砕波水深 h_b との関係式 $V_b=\sqrt{gh_b}$ によって概ね推定することができることがわかった。なお、4 脚ブロックの衝突速度 V_b は 0.05~0.21 m/s であり、 $V_b=(1/20\sim 1/13)\times\sqrt{gh_b}$ の式を用いて概ね評価できる。

(4) 衝突力と波圧による力の合力と沖側の入射波高の関係は、波の周期の違いによらず $F_{tmax}=0.6423H$ で与えられる。一方、波圧による力の最大値は周期の違いによって約 20% の差があったが、本実験で対象とした周期の範囲では $F_{pmax}=0.3024H$ で概ね評価できると考えられる。

謝辞：本実験を行うにあたり防衛大学校 建設環境工学科の林建二郎助教授には多大なご協力を得た。また、(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、同 有川太郎博士および国土交通省東北地方整備局の関係各位、さらに株式会社日本港湾コンサルタント 技術本部 技術開発部の滑川伸孝博士より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

- 大久保勝美・山本泰司・梅沢信敏・木村克俊・土井善和 (2001): 消波工と本体工の天端高さが異なる消波ブロック被覆堤の水理特性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 706-710.
- 合田良実・原中祐人 (1967): 衝撃砕波圧に関する一考察, 港研資料, No. 32, pp. 1-18.
- 合田良実 (1979): 砕波指標の整理について, 土木学会論文集, 179 号, pp. 39-49.
- 鈴木高二朗・高橋重雄 (1998): 消波ブロック被覆堤のブロック沈に関する一実験, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 821-825.
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司 (1983): 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第 22 巻, 第 4 号, pp. 3-31.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1990): 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, 港研報告, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 53-75.
- 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二朗・五明美智男 (1999): 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.
- 服部千佳志・柴田綱三・大堀晃一 (1984): 防波堤被災集覧 (その 3), 港研資料, No. 485, 281 p.