

消波ブロックの繰返し衝突を受ける防波堤ケーソン壁の局部破壊に関する確率論的推定

別府万寿博*・山口貴之**・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において、壁面に局所的な損傷や破壊が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・移動してケーソン壁に繰返し衝突したことが原因と考えられる。本研究は、直立壁を有する防波堤の耐波・耐衝撃設計法の確立という観点から、これまでに行ってきた衝撃砕波を受ける 4 脚形消波ブロックの動的挙動、および繰返し衝突による RC 板の局部破壊に関する実験データの定式化を行い、4 脚形消波ブロックの繰返し衝突によるケーソン壁の局部破壊を確率的に推定する方法を検討したものである。

1. はじめに

台風による高波浪などの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発生することが知られている(合田ら, 1967; 高橋ら, 1983)。高橋ら(1999)は、衝撃砕波による被災を分析し、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(以後の文中では便宜上、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。著者らは、これまでに 4 脚ブロックによるケーソン壁局部破壊のメカニズムを解明するため、①衝撃的な砕波を受ける 4 脚ブロックの動的挙動や衝突力に関する水理模型実験、②繰返し衝突によるケーソン壁模型の破壊に関する水平衝撃実験を行った。しかし実際は、様々な気象・海象条件の下で発生する衝撃砕波が 4 脚ブロックに作用し、さらにその 4 脚ブロックもランダムな速度でケーソン壁に繰返し衝突することによって局部破壊が生じるものと考えられる。したがって、一定の条件下で行ったこれらの模型実験の結果を用いて実際の破壊を直接的に推定するのは困難であると考えられる。

本研究は、直立壁を有する防波堤の耐波・耐衝撃設計法の確立という観点から、まず、水理模型実験と水平衝撃実験結果の中で破壊の判定に必要なデータを定式化した。次に、これらの関係式とモンテカルロシミュレーションを組合せてケーソン壁の破壊確率算定法を提案した。最後に、提案した破壊確率算定法に全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の波浪データを入力して、波浪特性の違いが破壊確率に及ぼす影響について検討を行ったものである。

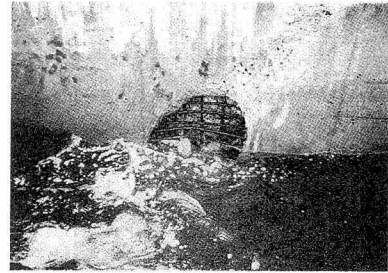


写真-1 ケーソン壁に生じた局部的破壊

2. 模型実験とデータの定式化

(1) 水理模型実験

a) 実験の概要

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、フルード則を適用した縮尺 1/36 の水理模型実験を行った。水路には、図-1 に示すように勾配 3/100、長さ 10 m の海底模型を形成し、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。実験パラメータは、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) である。水深 h は、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 (実換算; 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 (実換算; 15.2 s) と被災発生時の周期 $T=1.67$ s (実換算; 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 (実換算; 5.58 m)、 $H=20.0$ cm (実換算; 7.20 m) および $H=22.5$ cm (実換算; 8.10 m) の 3 種類とした。検討した模型断面は図-2 に示す釧路港の断面を模擬した消波ブロック被覆堤断面で、4 脚ブロックが沈下および散乱した状況を想定し、4 脚ブロックを静水面まで積載している。4 脚ブロックの斜面勾配は、1:1.5 となるように乱積形式で配置した。4 脚ブロックは、モルタル製で質量 5.9 N、高さ約 9 cm であり、実物 32 tf 型に相当するものである。

実験は、それぞれのケースに対して各 1 回行い、全 12

* 正会員 工(博) 防衛大学校助手 建設環境工学科

** 正会員 工(修) シンパタ工業(株) 海洋土木事業部

*** 正会員 工 博 防衛大学校教授 建設環境工学科

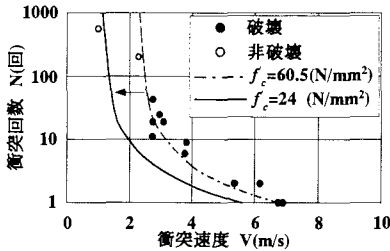


図-7 衝突回数と衝突速度の関係

b) 実験結果の定式化

衝突速度と破壊に至る衝突回数の関係を図-7に示す。本実験で用いたレプリカ則によると速度は縮尺によらず一定となるので、実験値は実スケール値と同じである。これより、衝突速度が2.27 m/s以下では200回以上衝突させても破壊は生じず、これ以上の速度になると、破壊衝突回数は急激に低下し、速度6.44 m/sでは1回の衝突で押し抜きせん断破壊した。図中に示した点線は、①破壊が生じる限界速度は2.27 m/s、②1回の衝突で破壊する速度は6.44 m/s、という条件による回帰式であり、次式で表される。

$$N = 8.2(V - 2.27)^{-1.4} \dots\dots\dots (2)$$

実験で使用したRC板のコンクリートの圧縮強度は、 $f_c = 60.5 \text{ N/mm}^2$ であり、実際のケーソンに使われるコンクリートの圧縮強度 $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$ に比べてかなり大きい値であるので、式(2)を圧縮強度 $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$ の場合に修正した。別途行った静的試験(山口ら, 2004)によると、①静的な局部破壊によって消費されるRC板のエネルギー(以下、吸収エネルギーという)は3.68 kN・mで、これは衝突体の運動エネルギーとほぼ等しく、エネルギー保存則はほぼ成り立つ、②中詰め材の有無は押し抜きせん断耐力に影響を与え、中詰め材がある場合は無い場合に比べ耐力が約2.5倍となる、ことが明らかとなっている。そこでまず、土木学会コンクリート標準示方書により圧縮強度 $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$ の場合の押し抜きせん断耐力(中詰め材なし)を求めると37.2 kNとなる。上記②より、中詰め材の影響を考慮すると耐力は93.0 kNとなり、吸収エネルギーは2.64 kN・mとなった。したがって、エネルギー保存則より、破壊に必要な衝突速度を求めると、5.26 m/sとなる。すなわち、強度の低下によって1回の衝突で破壊する速度が1.18 m/s小さくなる。そこで、回帰式をこの分だけ低速側へ移動させると、次のように修正される。

$$N = 8.2(V - 1.09)^{-1.4} \dots\dots\dots (3)$$

上式は、破壊の限界速度が1.09 m/sということを示しており、図-7に実線で示している。なお、繰返し衝突する領域についても、1回の衝突により求めた修正量だ

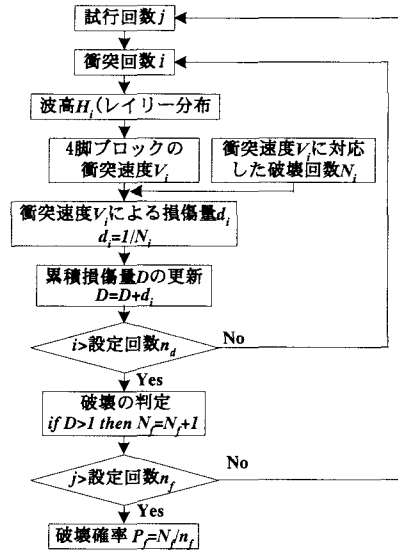


図-8 破壊確率の算定フロー

け単純に移動させたが、詳細については今後検討する必要があると考えている。

3. 破壊確率算定法の提案

(1) 破壊確率算定の考え方

これまでに定式化した関係式を組合せて、4脚ブロックの衝突を受けるケーソン壁の破壊確率を算定する方法を検討する。まず、波浪条件として波高を入力する。波高は気象・海象条件に応じて様々な値をとるが、確率的にはレイリー分布に従って発生することが知られている。そこで、レイリー分布に従う乱数によって波高を発生させ、入射波高と4脚ブロック移動速度の関係式から衝突速度を求め、次に衝突速度と破壊回数の関係式を用いてケーソン壁の破壊を推定する。ここで、破壊の判定法としては、疲労破壊の分野でよく知られている線形被害則(マイナー則)を用いている。マイナー則は、一定応力振幅の繰返し回数 n_i とその振幅における疲労寿命 N_i との比が被害度を表し、次に示すように、それらの総和が1.0になると破壊するという疲労の蓄積に関する被害則である。

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \dots\dots\dots (4)$$

一般に、外力として応力や力が用いられるのに対し、ここでは衝突速度を外力に相当するものと考えて、マイナー則を準用した。具体的には以下のようにして破壊確率を求めた。図-8に破壊確率算定のフローを示す。レイリー分布に従って確率的に発生させた波高 H_i から式(1)の平均速度と標準偏差 $\sigma = 0.31$ のばらつきをもつブロック速度 V_i を求める。次に速度 V_i に対する破壊回

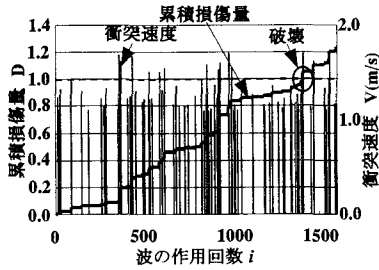


図-9 損傷量の累積過程

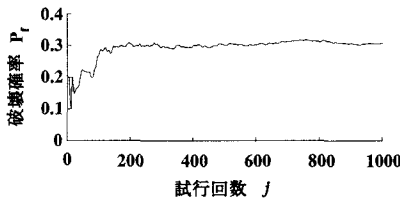


図-10 破壊確率の推移状況

数 N_i を式 (3) から求め、式 (4) のマイナー則によって損傷量 $1/N_i$ を累積させて破壊の判定を行った。また、このような試行を N 回行い、次式によって破壊確率 P_f を求めた。

$$P_f = \frac{N_f}{N} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 N_f ：試行回数 N の中で破壊に至った回数。

(2) 計算例

図-9 は損傷推定の一例として、波の総作用数 1600、有義波高 $H_{1/3} = 10$ m における損傷の累積過程を示したものである。図中の衝突速度はケーソン壁に損傷を与える限界速度 1.09 m/s (式 (3) 参照) をこえた場合のみを示している。これより、大きな速度で衝突するときには損傷量が急激に増加していることがわかる。最終的に 1400 回の衝突により累積損傷量が 1.0 を超えて破壊に至っている。図-10 は試行回数 $N = 1000$ 回までの破壊確率の推移を示している。図より、試行回数 200 程度で破壊確率は 0.30 に収束していることがわかる。以上の検討より、水理実験および水平衝撃実験から得られた回帰式とマイナー則を組合せることで、ケーソン壁局部破壊の破壊確率を推定する手法を提案することができた。

4. 波浪特性がケーソン壁の損傷・破壊に与える影響

提案した破壊確率算定法に、実際の波浪データを入力して破壊確率を求め、波浪条件が破壊確率に与える影響について考察する。入力する波浪データは、NOWPHAS から収集した。

表-1 波の作用回数 (6 年間)

波高	日本海側			太平洋側		
	秋田	福井	鳥取	むつ小川原	御前崎	宮崎
6 m	3262	2291	3083	857	361	1565
7 m	1000	440	915	283	—	313
8 m	605	106	—	837	—	203
9 m	—	—	—	366	—	—
10 m	—	—	—	96	—	—

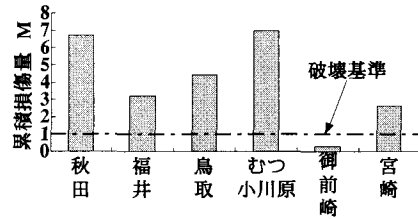


図-11 NOWPHAS データによる累積損傷量

(1) 検討場所と入力データ

検討を行った地点は日本海側から秋田港、福井港、鳥取港、太平洋側からむつ小川原港、御前崎港、宮崎港の計 6 地点を選定した。4 脚ブロックによるケーソン壁の被災事例によると、被災時の最小波高は釧路港における 5.9 m である。そこで、波高 5.5 m 以上の記録のみを各港のデータから集めた。すなわち、波高 6~10 m の間を 1 m ごとに分類し、6 年分 (1991, 1994, 1995, 1996, 1999, 2000) のデータに基づいて波高別の波浪継続時間と平均周期を求めた。また、波の作用回数を次式により求めた。

$$\text{作用回数} = \text{波浪継続時間} / \text{平均周期}$$

波高別の作用回数を表-1 に示す。なお、防波堤の耐用年数を 50 年として、累積損傷量と破壊確率を求めている。

(2) 累積損傷量

各地点におけるケーソン壁の累積損傷量を図-11 に示す。これより、秋田港、むつ小川原港など日本海側から東北地方にかかる地域がケーソン壁の局部破壊の危険性が高くなっている。この理由は、太平洋側で高波浪をもたらすのは夏~秋にかけて襲来する台風の影響であるのに対し、日本海側では主として冬季波浪と呼ばれる低気圧が原因であるためと考えられる。この冬季波浪は、毎年長時間発生するので 4 脚ブロックの衝突回数が増えるため、ケーソン壁の損傷も増大するものと推測される。今回用いたデータによると、台風による波浪に比べて冬季波浪の方が、波高 6 m 以上の高波浪が発生した回数は約 3 倍、平均波浪継続時間は約 2 倍大きくなることがわかった。このような冬季波浪の影響によって、日本海側では 4 脚ブロックによるケーソン壁の局部破壊が起こる

可能性が高いと考えられる。

図-12 は各地域における最大有義波高と累積損傷量を比較したものである。これより、最大有義波高と累積損傷量の相関に統一した傾向はないことがわかる。これは、港湾構造物は最大有義波高を基準として設計されることが多いが、4脚ブロックによるケーソン壁の局部破壊は衝突回数の影響も大きいいため、最大有義波高のみによつては評価できないことを示している。

(3) 4脚ブロックの沈下期間が破壊確率に及ぼす影響

各地点の破壊確率を図-13 に示す。これより、御前崎港の破壊確率は0.0で、それ以外の全ての地点において破壊確率は1.0になった。この理由は、本検討において50年間常に4脚ブロックが沈下していると仮定したためと考えられる。4脚ブロックは、防波堤完成時には防波堤天端高さまで積み上げられており、実際に沈下している期間はかなり短いと考えられる。一般に、4脚ブロックの沈下は、4脚ブロック下部の砂地盤が洗掘・吸出しを受けることによって発生するが、4脚ブロックがいつ、どの程度沈下するかに関して定量的に評価することは困難である。そこで、4脚ブロックの沈下期間をパラメータとして破壊確率を求めてみた。図-14 は日本海側の代表として秋田、太平洋側の代表として宮崎を選び、4脚ブロックの沈下期間に対する破壊確率を求めた結果である。これより、まず秋田港の場合は沈下期間が4年までは破壊は全く生じない。しかし、沈下期間が5年を過ぎると破壊確率は急激に増加し、12年以上になると破壊は確実に生じることになる。一方、宮崎港の場合は沈下期間11年までは破壊は生じないが、その後急激に破壊確率が增加する。しかし、秋田港に比べると緩やかな増加であることがわかる。このように、波浪条件や4脚ブロックの沈下期間が、ケーソン壁の破壊確率に大きな影響を与えることがわかる。

5. ま と め

本研究は、直立壁を有する防波堤の耐波・耐衝撃設計法の確立という観点から、ケーソン壁の局部破壊を確率的に推定する方法について検討したものである。本研究で得られた成果を要約して以下に示す。

(1) 水理模型実験と水平衝撃実験結果の定式化を行い、マイナー則と組合せることで4脚ブロックの繰返し衝突を受けるケーソン壁の局部破壊を確率的に推定する方法を提案した。

(2) 提案した破壊確率算定法に、全国港湾海洋波浪観測資料から収集したデータを入力して各地の破壊状況を検討した。その結果、冬季波浪の影響を受けやすい日本海側の方が太平洋側に比べ、ケーソン壁の局部破壊が

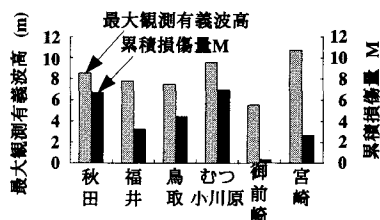


図-12 最大有義波高と累積損傷量の比較

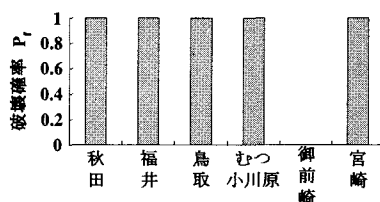


図-13 NOWPHAS データによる破壊確率

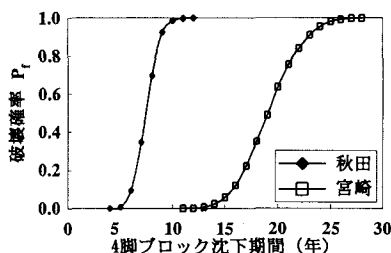


図-14 4脚ブロックの沈下期間と破壊確率の関係

起こる可能性が高いことがわかった。また、4脚ブロックによるケーソン壁の局部破壊は最大有義波高のみによつては評価することはできないことがわかった。

(3) 4脚ブロックの沈下期間は、ケーソン壁の破壊確率に大きな影響を与えることがわかった。今後、4脚ブロックの沈下メカニズムや沈下期間について検討することが必要と考えている。

謝辞：本研究に際して、当時防衛大学校本科学士 島村和斉氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 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.
- 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・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.
- 山口貴之・別府万寿博・大野友則 (2004): 消波ブロックの繰返し衝突により防波堤ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 759/I-67, pp. 381-396.