

消波ブロック衝突による防波堤ケーソンの損傷対策技術の開発

Development of Anti-Damage Measure Technology of a Caisson-Type Breakwater Covered with Wave-Dissipating Blocks

市村正春*・志賀正夫**

ICHIMURA Masaharu and SIGA Masao

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 所長

There occurred damages on front walls of a caisson-type breakwater covered with wave-dissipating blocks in several ports, that seemed to be caused by rocking or movement of blocks. This paper reports the process of damages, model experiment, and a formula which evaluates the collision force transferred through wave-dissipating blocks.

Key Words : caisson-type breakwater, anti-damage measure technology, movement of blocks

1. はじめに

国土交通省東北地方整備局管内の港湾の防波堤において、波浪による消波ブロックの衝突が原因と思われるケーソン前壁の穴あき被災が報告されている。

ケーソン穴あき箇所からは中詰砂が流出しており、堤体重量が減少することにより滑動、転倒に対する安定性が低下し、最悪の場合、設計を下回る波浪の来襲で、防波堤が滑動、転倒等の被災を受ける可能性がある。

本調査は、既存施設の有効活用の観点に立ち、

- ①ケーソン損傷（穴あき）の原因の検討
- ②消波ブロック衝突実験を実施し、その結果から消波ブロック衝突力算定式を提案
- ③損傷対策技術についての情報収集・整理と適用性に関する検討

等を行い、最終的に「ケーソン損傷対策方法と補修（補強）技術に関するマニュアル（仮称）」の作成を目指すものである。

2. ケーソン損傷（穴あき）の原因の検討

2.1 被災状況

検討対象とした東北地方整備局管内の港湾の防波堤におけるケーソン損傷（穴あき）は、被災事例の調査の結果、そのほとんどが消波ブロック被覆堤の港外側側壁で発生している。その発生状況を以下に示す。

(1) 被災した港湾と損傷箇所

東北地方整備局管内において被災した港湾と損傷箇所を表-1に示す。

調査の結果、八戸港が24箇所と抜きん出て多く、八戸港においては、消波ブロックで被覆されていることに何らかの原因があると考えられた。

表-1 被災した港湾と損傷箇所 注1

港名	地区名	損傷箇所	備考
八戸港	外港地区防波堤(中央)	注2 24箇所	消波工有
秋田港	飯島地区防波堤(北)	1箇所	〃
酒田港	北港地区防波堤(北)(第2)	1箇所	消波工無
	本港地区防波堤(南)	1箇所	消波工有

注) 1. 平成14年度資料収集結果に平成16年度八戸港現地調査結果を追記

2. 損傷箇所：穴あき確認14件、鉄筋露出確認または穴あきは確認されなかったが中詰砂流出を確認10件

図-1に八戸港外港地区防波堤(中央)の位置を示す。

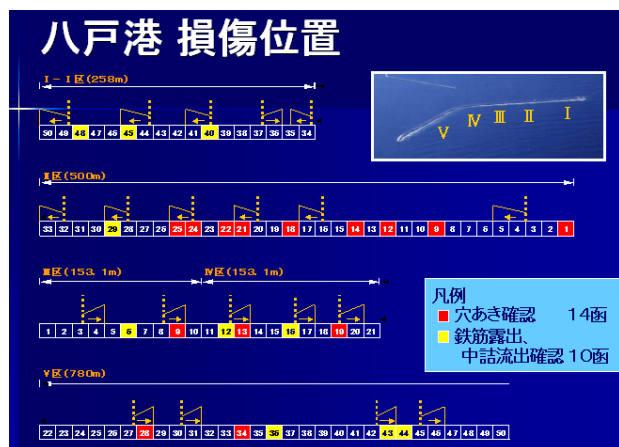


図-1 八戸港鳥瞰図

(2) 八戸港外港地区防波堤(中央)の損傷位置

当該防波堤の損傷の平面位置を図-2に示す。

損傷を受けたケーソンの割合は、調査対象100函に対して損傷24函(24%)であり、消波ブロックの施工端部では全数40函に対して損傷13函(33%)となっており、消波ブロックの施工端部において被害が多く見られる。

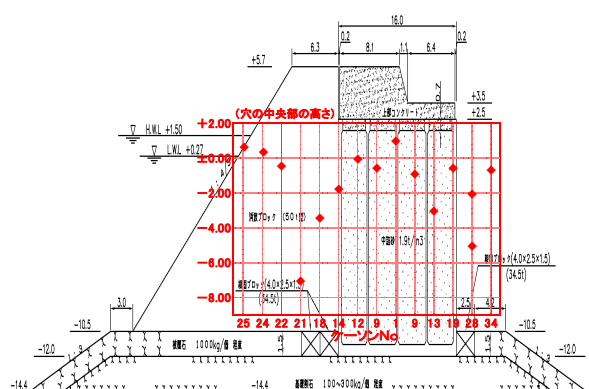


- 注) 1. オレンジ色の点線は、消波工の施工端部を示す。
2. 消波工施工端部の法線方向の法面にかかるケーソンを施工端部の函数としてカウントした。

図-2 八戸港外港地区防波堤(中央)損傷位置平面図

次に、損傷（穴あきのみ）位置を高さ別に集計したものを図-3に示す。

波力作用の大きい水面付近で被害が多く見られる。



- 注) 1. 横軸：ケーソン No, 縦軸：水深位置

図-3 八戸港外港地区防波堤(中央)損傷位置断面図

2.2 ケーソン損傷（穴あき）の原因の検討

以下の理由により、ケーソン前壁の損傷（穴あき）は、波浪による消波ブロック衝突のためと推定された。

- ①穴あきの被害は、消波ブロック被覆の防波堤に多く発生している。
- ②被害は、消波ブロックの施工端部に多く見られる。
これは、施工端部は完成断面ではなくブロックの安定が比較的悪いこと、不完全消波による衝撃砕波力が発生しやすいことによると考えられる。
- ③水面付近で被害が多く見られる。これは、消波ブロックの上層部であり、上のブロックに余り押さえられていないこと、また、水面付近であり、作用する波力が大きいことから、ブロックが動きやすい状態となっているためと考えられる。
- ④後述の消波ブロック衝突模型実験の結果から、消波

ブロック衝突によりケーソン前壁が損傷し得ることが確認された。

2.3 消波ブロック衝突のメカニズムと衝突速度

（独）港湾空港技術研究所の実験では、消波ブロックは、施工端部や上層部で上の押さえがなく動きやすい状態である場合に、そこに波力が作用して「ロッキング」「転落衝突」「水平移動衝突」等のパターンでケーソン前壁に衝突すると考えられた。

衝突速度は、ロッキングで波速の0.05～0.1倍、転落衝突で自由落下の0.3倍、水平移動衝突で波速の0.12倍程度となっており、安全側の値として、ロッキングおよび水平移動衝突の場合は波速の0.15倍、転落衝突の場合は落下速度の0.5倍の衝突速度が提案されている。

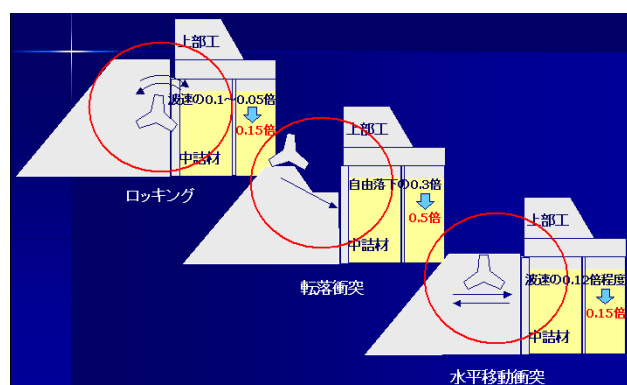


図-4 消波ブロック衝突のメカニズム

3. 消波ブロック衝突模型実験

消波ブロック衝突模型実験を実施し、消波ブロックの衝突力算定式を導出するとともに、ケーソン前壁の破壊と耐力の検討を行った。

3.1 実験の概要

実験は、水平荷重装置を用いて行った。図-5および図-6に実験装置の概略図を示す。図の反力壁にケーソン前壁を疑似したRC版を、鋼製衝突体に消波ブロック一脚の先端部を疑似したコンクリート塊を取り付け、コンクリート塊をRC版に衝突させて、衝突体の衝撃力、衝突速度、はね返り速度、RC版試験体の載荷面の陥没量、版のたわみ等を計測した。

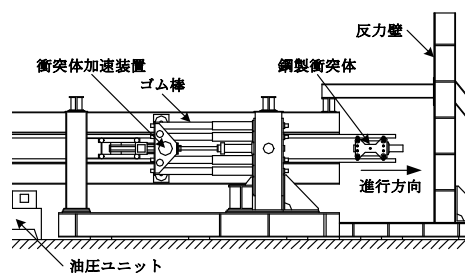


図-5 実験に使用した水平荷重装置

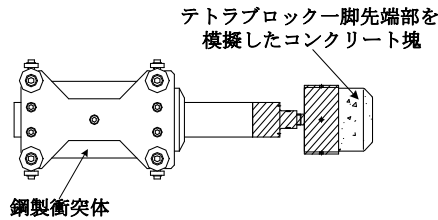


図-6 衝突体の概略図

実験は大きく分けると、区分①：RC版の境界条件を4辺単純支持とし、衝突体の衝突位置を版中央1箇所として、RC版の厚さ、RC版のコンクリート強度、衝突ブロックの形状を複数ケース設定したもの、区分②：RC版の境界条件を3辺固定1辺単純支持とし、衝突体の衝突位置を複数箇所とし、他の条件を1ケースとしたものの2通りを実施した。

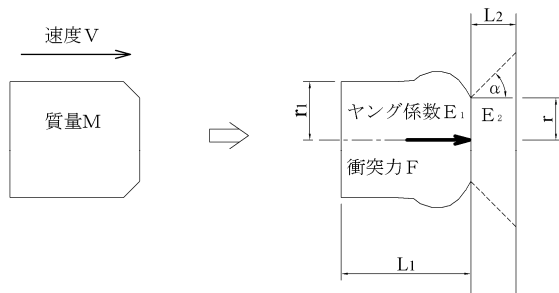
なお、模型の縮尺は、実験装置上の制約から、 $s=1/6.4$ とした。

3.2 消波ブロック衝突力算定式の提案

消波ブロック衝突力算定式は、消波ブロック衝突時に運動エネルギー T が衝突力 F により、ブロックの圧縮歪エネルギー U_1 、RC版の圧縮歪エネルギー U_2 と曲げ歪エネルギー U_{3m} に変換され、これらの和に比例すると仮定して導かれた。

図-7 に衝突による歪エネルギー発生の様式図を示す。また、導かれた消波ブロック衝突力算定式(1)を示す。

なお、消波ブロック衝突力算定式の詳細については、参考文献の1)を参照されたい。



運動エネルギー $T=1/2 \cdot M \cdot V^2$ 歪エネルギー $U=U_1+U_2+U_{3m}$

図-7 衝突による歪エネルギー発生の様式図

$$F = C_0 \cdot \frac{\sqrt{\pi} \cdot M^{1/2} \cdot V}{\sqrt{\frac{L_1}{E_1 r_1^2} + \frac{L_2}{E_2 r^2 (1 + (L_2/r) \cdot \tan \alpha)} + U_{3m}^*}} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 C_0 ；実験より定まる定数、 M ；衝突体質量、 V ；衝突速度、 L_1 ；衝突体長さ、 L_2 ；版厚、 E_1 ；衝突体のヤング係数、 E_2 ；版のヤング係数、 r_1 ；衝突体半径、 r ；衝突面半径、 $\alpha=45^\circ$
 $U_{3m}^* = 2\pi / F^2 \cdot U_{3m}$
 U_{3m} ；版の曲げ歪みエネルギーで、版の支持条件、形状寸法、衝突位置等により計算される。

3.3 消波ブロック衝突力試算と部材耐力との照合

八戸港防波堤のケースを取り上げ、衝突という現象から押し抜きせん断のみを考慮するものとして、導かれた消波ブロック衝突力算定式を用いて衝突力を試算し、ケーソン前壁の部材耐力と照合した。試算条件は、次の通りである。

(衝突力試算)

- ・転落衝突のメカニズムは除外する。

(ここでは、水平移動衝突の試算を示す。)

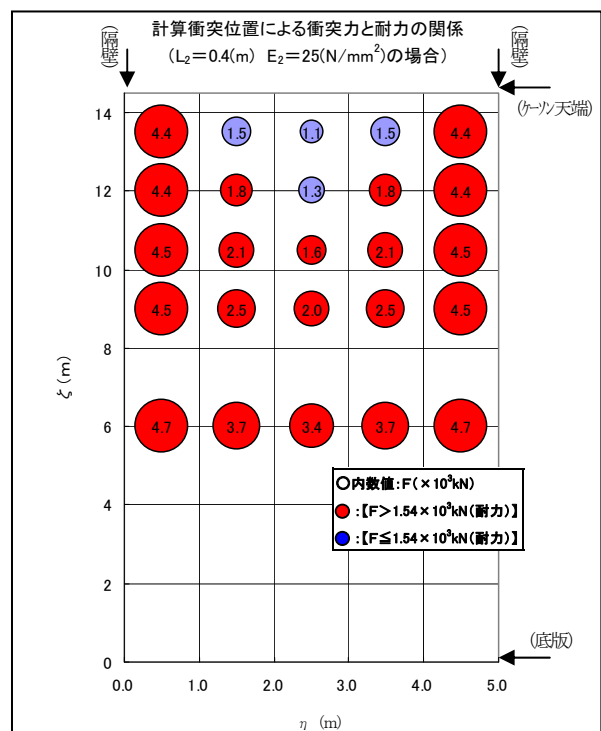
- ・衝突速度は、港空研をはじめとする既往の研究成果に設計波の諸元を当てはめると $1 \sim 2 \text{ m/s}$ となり、ここでは 1 m/s として、衝突力を小さくなる方向で評価して部材耐力と比較する。

(部材耐力算定)

- ・鉄筋比は鉄筋量の最も多い部位の $\rho=0.0041$ とする。
- ・設計上の安全係数は考慮しない。

(例. 部材係数 $\gamma_f=1.3 \rightarrow 1.0$)

結果を図-8に示す。



部材耐力(押し抜きせん断耐力)算定結果: $V_{pcd}=1.54 \times 10^3 \text{ kN}$

図-8 消波ブロック衝突力とケーソン前壁部材耐力 (八戸港)

曲げの影響、隔壁部の押し抜きせん断耐力の評価等の課題は残っているが、施工端部である、断面の上部にあって上からの押さえがない等、消波ブロックが不安定な状態にある時、消波ブロックの衝突によりケーソン前壁が損傷(穴あき)し得ることが力学的にも確認された。

また、導かれた消波ブロック衝突力算定式は、対策工(補強工)検討の際の有効な手段となる。

4. 損傷対策技術の収集・整理と適用性の検討

これまでの調査結果を踏まえ、予防対策と事後対策の観点から、既往のケーソン補修・補強技術、陸上分野での補修・補強技術、本調査で得られた技術について収集・整理を行い、それらについて適用性の検討を行った。

4.1 予防対策技術について

本検討では予防対策技術を、①消波ブロックが移動しないようにする技術、②消波ブロックが衝突してもケーソンが損傷（穴あき）しないように部材補強する技術、の2つに大別し、かつ、新設の場合を対象とした。

検討した結果、ケーソン損傷予防対策として適用性が高いと考えられるものを表-2に示す。

表-2 予防対策技術

区分	工法概要	備考
①	・消波ブロックを整積として噛み合わせを良くし、消波ブロックが移動するのを防ぐ。	・消波ブロック断面の大きい防波堤では、経済的に不利となる。 ・実験等により効果を確認することが望ましい。
②	・消波ブロック衝突に耐えうるよう、ケーソン部材（前壁）を増厚する。	・最も適用性が高いと考えられる。
②	・消波ブロック衝突に耐えうるよう、ケーソン部材（前壁）に高強度のコンクリートを用いる。	・部分的（前壁）な高強度コンクリートの使用となるため、施工に工夫が必要となる。
②	・消波ブロック衝突に耐えうるよう、ケーソン部材（前壁）をSRC化する。	・部分SRCとなるため、設計、施工での工夫が必要となる。
②	・隔壁を増やして前壁のスペン間隔を短くする。	・曲げに対して有効な手段となる。 ・他に押し抜きせん断対策が必要となる。

4.2 事後対策技術について

ケーソンが損傷した場合に補修・補強する事後対策技術の整理を行うに当たり、損傷を、

STEP 1：ひび割れ

STEP 2：コンクリート剥離・剥落、鉄筋露出・破断

STEP 3：穴あき、中詰砂流出

に区分した。しかしながら現在のところ、STEP 2までの段階で変状を確認することは困難であり、STEP 3で実際の対応となっている。

検討した結果、ケーソン損傷事後対策として適用性が高いと考えられるものを表-3に示す。

また、穴あき等の変状が確認された場合だけではなく、既設ケーソンの予防対策として実施されることを想定して、同表には補強対策工法も示した。

表-3 事後対策技術

区分	工法概要	備考
STEP 1	・ひび割れにエポキシ系接着剤を注入する。	・陸上分野での実績が豊富である。 ・現在は水中用のものも開発されている。
STEP 2	・ケレン、ハツリの後、グラウト、エポキシ樹脂剤を充填する。	・施工時の型枠に工夫を要する。
STEP 3	・穴に型枠、鉄板等を設置し、隔壁に中詰コンクリートを充填（打設）する。	・施工時の型枠に工夫を要する。 ・工費は比較的高くなる。 ・信頼性は高い。
補強	・消波ブロック衝突に耐えうるよう、ケーソン部材（前壁）を増厚する。	・海側ないしは隔壁側 ・消波ブロック撤去ないしは上部コンクリート～中詰砂の撤去、復旧を伴う。 ・海側からの施工の場合、波浪対策が必要となる。
補強	・消波ブロック衝突に耐えうるよう、ケーソン部材（前壁）の隔壁側に鋼板を接着する。	・上部コンクリート～中詰砂の撤去、復旧を伴う。 ・陸上分野での実績は多い。 ・隔壁内であるため、鋼材腐食、接着剤劣化の可能性は小さい。

5. おわりに

以上の結果を踏まえ、今後は冒頭でも述べた通り、「ケーソン損傷対策方法と補修（補強）技術に関するマニュアル（仮称）」を作成する予定である。作成に当たっては、提案式により算定される消波ブロック衝突力に対するケーソン部材耐力の照査に曲げモーメントの影響を考慮することを検討するとともに、収集・整理した補修・補強技術の事例を紹介する等分かり易く示すことに留意する所存である。

本報告は、「既存施設（防波堤等）補修技術開発調査」「既存施設（防波堤等）改良技術開発調査」（共に国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所発注）の成果を取りまとめたものである。調査に当たっては、（独）港湾空港技術研究所高橋重雄研究主監、早稲田大学清宮 理教授をはじめとする技術検討会委員各位より多大なご指導、ご鞭撻をいただいております。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 滑川伸孝・志賀正夫・長尾憲彦・菊池傑・山口貴之・大野友則・市村正春・宮脇周作：ケーソン式防波堤に対する消波ブロック衝突時の衝突力評価，海岸工学論文集掲載予定，第52巻，2005。
- 2) 菊池傑：国土交通省東北地方整備局管内技術調査報告会資料，平成16年7月28日。