# 次世代防波堤構造の研究 PartⅢ

～ 吹上式ケーソンと土台による衝撃耐性の向上 ～

**Research into next-generation breakwater structures Part Ⅲ**

~ Improved impact resistance with an up-flow caisson and footing ~

越谷市立武蔵野中学校　3年　小瀧 夏維

**概要：**防波堤の設置においては、ケーソンと呼ばれる基礎を設置し、その上に人が通る道を整備する。ケーソンは漁港などへの津波被害を防ぐために非常に重要であり、津波によって倒壊をしてはならないが、東日本大震災の際、実際にケーソンが一部倒壊した事例が存在する。昨年度（PartⅡ）は、ケーソンを一部貫通させて衝撃を後方へ受け流す「貫通式ケーソン工法」を提案したが、海面と穴の位置によっては、かえって倒壊しやすくなる課題が残った。本研究では、受けた水を上へ噴き上げて逃がす「吹上式ケーソン」を提案し、漁港への影響を抑えつつケーソンが動きにくくなることを示した。さらに、基礎を海側へ張り出す「土台」を組み合わせた工法により、強い波力でもケーソンが倒壊しないことを確認した。

## １．研究目的

2011 年 3 月に発生した東日本大震災から、すでに 10 年以上が経過した。10 年の節目にはテレビで特集が組まれ、被災地では語り部が当時の記憶を語り継ぐなど、教訓を後世へつなぐ活動が続けられている。しかし、時間がたつにつれて、その記憶や教訓が薄れていく（形骸化する）ことが懸念される。私は東日本大震災の映像を見て強い衝撃を受け、この教訓を風化させたくないという思いも込めて、中学 1 年・2 年と、防波堤の基礎である「ケーソン」の研究を続けてきた。今年度は、その集大成として、これまでの研究よりも衝撃に強く（倒れにくく）、かつ漁港を守るケーソンの形を考え、実験を行うこととした。

昨年度（PartⅡ）は、ケーソンを貫通させて衝撃を後方へ受け流す「貫通式ケーソン工法」を提案したが、海面と穴の位置が合わないと、かえって倒壊しやすくなる課題が残った。ケーソンが倒れると、その奥の漁港に津波が直撃してしまう。そこで本研究では、**漁港を守る性能を保ちながら、ケーソン自体が動かない（滑らない・倒れない）方法**を明らかにすることを目的とした。

## ２．研究方法

### ２－１　防波堤の仕組みを確認する（ケーソン）

防波堤は非常に大きな形をしているが、私たちから見えている部分は一部分であり、ほとんどは海の中に沈んでいる。津波は非常に強い力で押し寄せてくるため、全体が大きくて重い設備を海中に設置し、破損しないようにしている。この海中に設置している箱を「ケーソン」と呼ぶ。ケーソンを横に並べることで、強い津波にも耐えられる防波堤を実現している。また、ケーソンは高さ 23m、幅 24m、重さ 7500 トンと非常に大きい（秋田港に実際に設置されている物）。

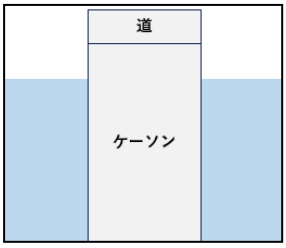



図 1:防波堤断面図



図 2:搬送中のケーソン ※参考文献[6]より引用

## ２－２　研究の準備

今回の研究では、以下の材料を使用する。①波高（はこう）計測器…水が付着した部分を下から計測することで波の高さを測る。②木工用紙…切り貼りして型（型枠）を作り、セメントを流し込む。③セメント…水と混ぜ、型に流して固める。④プール…海の代わりに使用。⑤アクリル板…津波発生装置として使用。



図 3:波高計測器(長い棒に白紙を取り付け)



図 4:木工用紙



図 5:セメント



図 6:プール



図 7:アクリル板

## ２－３　ケーソンの作成（基本の作り方）

木工用紙を切り貼りし、5cm×5cm の立体（型枠）を作成する（海で使用する一般的なケーソン 10m×10m の 1/200 スケール）。セメントに水を混ぜ、型に流し込み、24 時間ほどで固めてケーソンを作る。まず基準となる 5cm×5cm を**従来型**として作成した。今回考案した改良型（吹上式・土台）は、各実験の章で、その作り方とあわせて示す。



図 8:作成した四面体の上部写真



図 9: セメントを流した直後



図 10:完成したケーソン

## 3．実験①　従来型ケーソンの効果測定

### 3－1　方法

前章で揃えた材料を以下のように設置する。

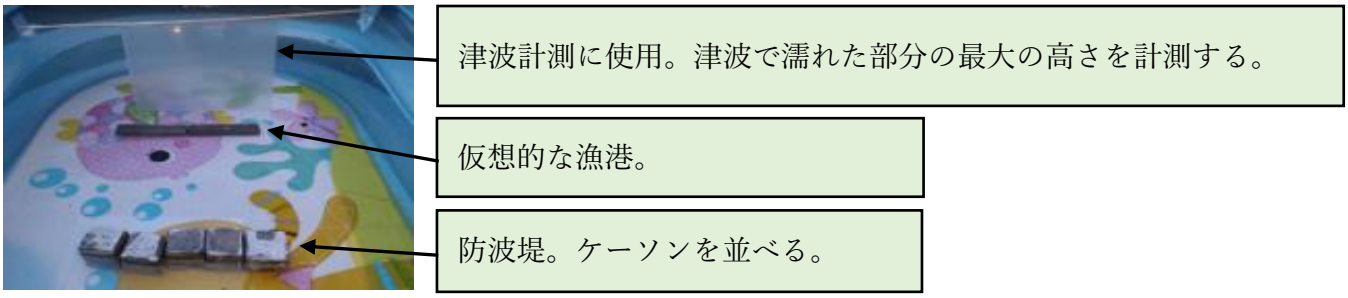



写真 11: 実際の津波計測装置

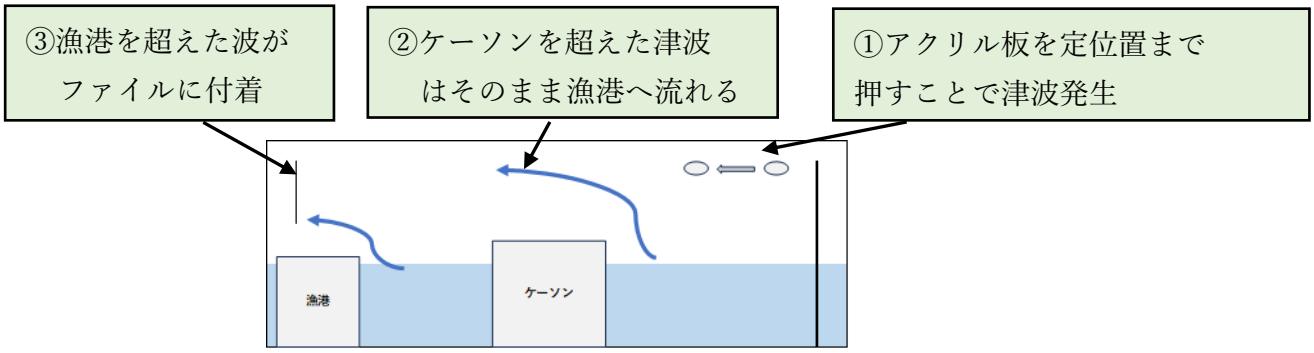



図 12:津波測定装置の断面図

また、以下の計算により、３種類の波力の波を起こす。

※波力（はりょく：波の強さ）について

2 秒でポイント間を移動する波力を 1N とし、時間間隔を短くすることで波力が強くなる

以下の比例モデルを採用する。

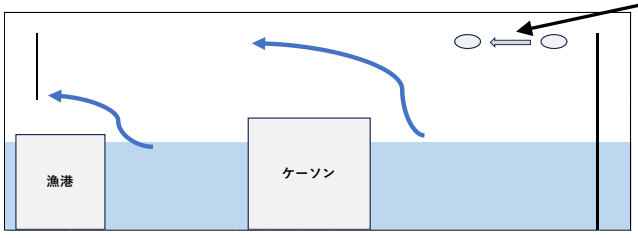



図 13: 波力の調整方法

(t)：波力(時間 t に応じた力)（単位:N)

F (t) = k/t

ポイント間を移動する時間

k:係数。2 で固定。

この式に当てはめると、ポイント間の移動時間ごとの波力は図 14 となる。ポイント間移動の時間間隔が短くなれば、波力が大きくなる仕組みである。

| ポイント間移動時間(秒) | 波力(N) |
|---|---|
| 2 | 1N |
| 1 | 2N |
| 0.5 | 4N |

図 14: ポイント間移動時間と波力の関係

実験は、各波力(1N,2N,4N)で、各 10 回ずつ行う。(合計 30 回)

また、ケーソン自体が移動（倒壊）した回数も合わせて記録する。

## ３－２　実験①結果

本研究では、波の高さをデータの分布・ばらつきを一目で把握できる「箱ひげ図」で結果を表す。箱ひげ図は、最大値・上位 25%（第 3 四分位）・中央値・下位 25%（第 1 四分位）・最小値と、平均値（×印）を表したものである。

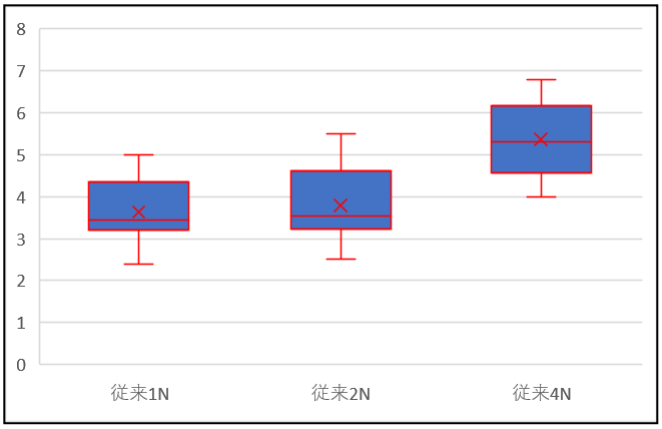



図 15:実験①結果箱ひげ図

| 種類 | 1N | 2N | 4N |
|---|---|---|---|
| 従来型平均(cm) | 3.64 | 3.79 | 5.37 |

図 16:実験①水しぶき 平均

| ケーソン移動(倒壊)回数／10回 | 1N | 2N | 4N |
|---|---|---|---|
| 従来型 | 0 | 0 | 2 |

図 17:ケーソン倒壊回数

波力が大きくなるほど漁港側の水しぶきは高くなり、4N では平均 5.4cm となった。また、**波力 4N では 10 回中 2 回、ケーソンが移動（倒壊）してしまった。**

## ３－３　実験①考察

従来型ケーソンは、重いにもかかわらず、強い波力（4N）では 10 回中 2 回倒壊してしまった。防波堤が倒壊すると、その奥の漁港に津波が直撃し、防波堤の役割を果たせなくなる。したがって、ケーソンが受ける力を減らしつつ、かつ**ケーソン自体が動かない工夫**が必要であると考えた。

## ４．防波堤設置に関する課題と解決案（仮説：吹上式ケーソン）

昨年度（Part Ⅱ）の貫通式ケーソンは、受けた水を後方（漁港）へ受け流すことで衝撃を和らげたが、水が漁港へ流れてしまうことや、海面と穴の位置が合わないと倒壊しやすくなるという課題があった。また、実験①から、従来型は重くても倒壊してしまうことが分かった。

これらの反省を活かし、私は次のように考えた。受けた水を「後ろ」ではなく「上」へ流せばよいのではないか。水を上へ逃がせば、①漁港へ水を通さずに済み、漁港を守る性能を保てる。さらに、②水を上へ噴き上げた反動で、ケーソンが下に押さえつけられ、動きにくくなるのではないか――という仮説を立てた。この工法を**「吹上式（ふきあげしき）ケーソン工法」**と命名し、実験②で確かめる。



一定条件（海面と穴の位置が一致）においては高性能だが、一致しないと倒壊回数が増える（課題）

<参考>Part Ⅱ で開発した貫通式ケーソン

### ４－１　吹上式ケーソン工法の基本的考え（効果の予測）

ケーソンの前面に「上へ抜けるみぞ」を設け、受けた水を上へ噴き上げる。

**効果の予測：**① 後方の漁港へ水を通さない（漁港を守る性能を保つ）。

② 水を上へ噴き上げた反動で、ケーソンが下に押さえられ、動きにくくなる。

## ５．実験②　吹上式ケーソンの実験

### ５－１　吹上式ケーソンの作成と効果確認方法

吹上式ケーソンは、前面の中央に「上へ抜けるみぞ」をもつ。型枠の内側に棒（中子）を当ててセメントを流し、固まってから棒を抜いて、みぞを作成した。従来型と吹上式を、波力 1N・2N・4N で各 10 回、同じ条件で計測する。あわせて移動（倒壊）回数を記録する。

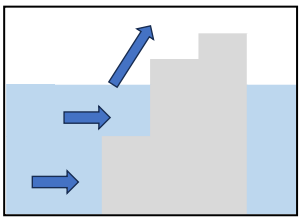


図 18:吹上式ケーソンイメージ
（水圧を上に逃がす）

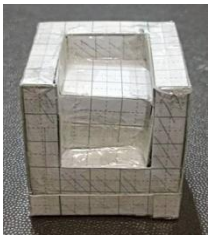


図 19:吹上式
ケーソン型枠

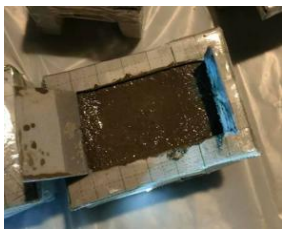


図 20:ケーソン作成写真
下部に穴を開けセメントを流す

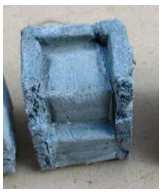


図 21:完成した吹上式ケーソン



図 22:実際の実験写真

### ５－２　実験②結果

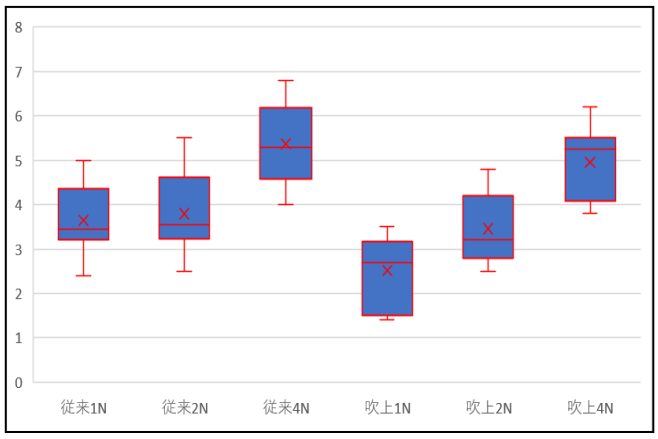



図 23: 実験②結果箱ひげ図

| 種類 | 1N | 2N | 4N |
|---|---|---|---|
| 従来型平均(cm) | 3.64 | 3.79 | 5.37 |
| 吹上式平均(cm) | 2.51 | 3.46 | 4.95 |

図 24: 実験②水しぶき平均

| ケーソン移動(倒壊)回数／10回 | 1N | 2N | 4N |
|---|---|---|---|
| 従来型 | 0 | 0 | 2 |
| 吹上式 | 0 | 0 | 2 |

図 25: 実験②ケーソン倒壊回数

すべての波力で、吹上式は従来型よりも漁港側の水しぶきが低くなった（例：1N で 3.64→2.51cm）。一方で、移動（倒壊）回数は、従来型・吹上式ともに 4N で 2 回であった。

### ５－３　実験②考察

仮説どおり、吹上式ケーソンは、すべての波力で従来型よりも漁港側の水しぶきが低くなり、漁港を守る性能を高められた。とくに波力が小さい 1N では 3.64cm→2.51cm と約 3 割低くなった。一方、最も強い 4N では 5.37cm→4.95cm と減り方は小さく、強い波では水の勢いが大きく、上へ逃がしきれない分が増えるためと考えられる。

一方で、移動（倒壊）回数は従来型・吹上式ともに 4N で 2 回と、変化がなかった（1N・2N は 0 回）。吹上式は反動でケーソンを下に押さえているのに倒壊が減らなかった理由を、次のように考えた。① 上へ噴き上げる反動は、津波が正面から押す力に比べると小さい。② みぞを作ったぶん従来型より軽くなり、踏ん張る力（重さ・摩擦）が減る。この二つがほぼ打ち消し合い、倒れにくさは従来型とほとんど変わらなかったと考えられる。

したがって、倒壊を防ぐには「上へ逃がす」だけでは足りず、津波が正面から押す力に負けず大きく踏ん張る仕組みが必要である。漁港を守る性能はそのままに、倒れにくさを高める工夫が次の課題となった。

## ６．実験②で残った課題と解決案（仮説：土台付き吹上式ケーソン）

実験②で「なぜずれてしまうのか」を考えた。吹上式は、津波が正面から押す力そのものが大きく、噴き上げの反動だけでは踏ん張りきれない。津波はケーソンの海側を持ち上げ、漁港側の下の角を支点にして倒そうとする。そこで、基礎（土台）を海側へ張り出すことを考えた。海側に張り出した土台と、その上に乗る水の重みは、持ち上がろうとする海側を上から押さえつける。しかも支点から遠い位置にあるため、てこの原理で、小さな重みでも大きく踏ん張ることができる。吹上式に土台を足したこの形を「土台付き吹上式」と命名し、実験③で確かめる。

### ６－１　土台付き吹上式ケーソン工法の基本的考え（効果の予測）

倒れにくくなる（転倒）。海側の土台とその上の水の重みが、持ち上がろうとする海側を押さえる。支点から遠いほど、てこが長くよく効く。
漁港を守る性能（水しぶき）は吹上式と同程度に保ちつつ、移動（倒壊）回数が減る。

## ７．実験③　土台付き吹上式ケーソンの実験

### ７－１　土台付き吹上式ケーソンの作成と効果確認方法

吹上式ケーソンの海側に、3 マス (3cm) 分の土台を張り出して作成した。従来型・吹上式と同じく、波力 1N・2N・4N で各 10 回、漁港側の水しぶきの高さと移動（倒壊）回数を計測する。

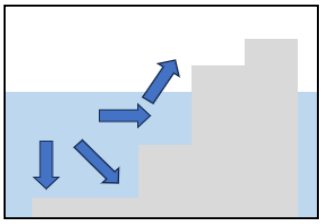


図 26:土台付き吹上式ケーソン
イメージ(水圧を上に逃がす)



図 27: 土台付き吹上式
ケーソン型枠



図 28:完成した土台付
吹上式ケーソン

## ７－２　実験③結果

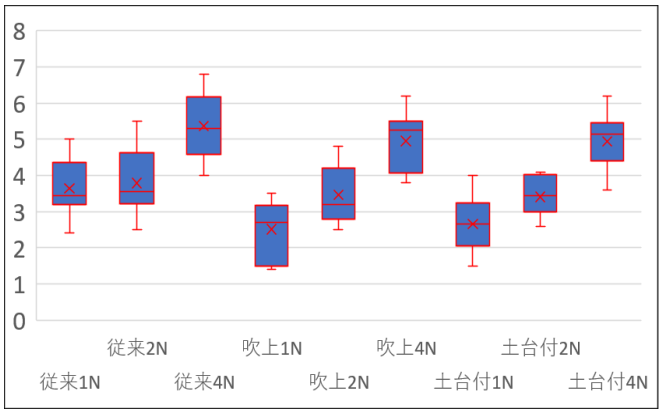



図 29: 実験③結果箱ひげ図

| 種類 | 1N | 2N | 4N |
|---|---|---|---|
| 従来型平均(cm) | 3.64 | 3.79 | 5.37 |
| 吹上式平均(cm) | 2.51 | 3.46 | 4.95 |
| 土台付吹上式平均(cm) | 2.66 | 3.41 | 4.94 |

図 30: 実験③水しぶき平均

| ケーソン移動回数 | 1N | 2N | 4N |
|---|---|---|---|
| 従来型 | 0 | 0 | 2 |
| 吹上式 | 0 | 0 | 2 |
| 土台付吹上式 | 0 | 0 | 0 |

図 31:実験③ケーソン倒壊回数

漁港側の水しぶきは、土台付吹上式と吹上式でほとんど差がなかった。一方で、**土台付吹上式の移動（倒壊）回数は、4N でも 0 回であった。**

## ７－３　実験③考察

仮説どおり、土台付き吹上式ケーソンは、漁港側の水しぶきが実験②（吹上式）とほぼ変わらず（4N で平均 4.94cm と 4.95cm）、移動（倒壊）回数は 0 回であった。ここで、3 種類のケーソンを「漁港を守る（水しぶきが低い）」と「倒れない（移動回数が少ない）」の 2 つの観点で比べると、次のことが分かる。従来型は倒壊 2 回、吹上式も倒壊 2 回であり、どちらも強い波では倒れてしまう。防波堤は倒れてしまえば、その奥の漁港に津波が直撃するため、いくら水しぶきが低くても意味がない。これに対し、土台付き吹上式ケーソンだけが、漁港を守る性能を保ちながら倒壊 0 回を実現し、初めて 2 つの条件を同時に満たした。注目すべきは、土台を足しても漁港側の水しぶきがほとんど変わらなかったことである。これは、土台が「倒れにくさ（倒壊防止）」だけを受け持ち、漁港を守る役割は吹上式の「みぞ」がそのまま担っているためと考えられる。つまり、水を上へ逃がす「吹上」（漁港を守る）と、基礎を広げて踏ん張る「土台」（倒れない）という、2 つの異なる工夫を役割分担して組み合わせたことが、両立できた理由である。また、最も強い波力 4N でも倒壊が 0 回だったことは、予測③（水位が上がるほど土台に乗る水が増え、押さえる力が強くなる）と一致する。強い津波ほど土台に乗る水が増えて踏ん張る力も増すため、いちばん危険な条件でこそ効果を発揮したと考えられる。

このことは、実際の防波堤の被災とも深く関係している。実際のケーソンは、幅の広い頑丈な基礎（捨石マウンド）の上に置かれ、この基礎がケーソンを支えている。東日本大震災で釜石港のケーソンが倒壊したのは、津波が防波堤を越えて速い流れができ、その流れで基礎（捨石マウンド）が波でえぐられてしまい、ケーソンが支えを失って滑り・倒れたためだとされている〔参考文献[5],図 32〕。つまり、基礎が弱くなると、重いケーソンでも倒れてしまう。

本研究は、基礎（土台）を強く・広くすれば、ケーソンは倒れにくくなることを示し、**「基礎の大切さ」を活かした形だといえる。**

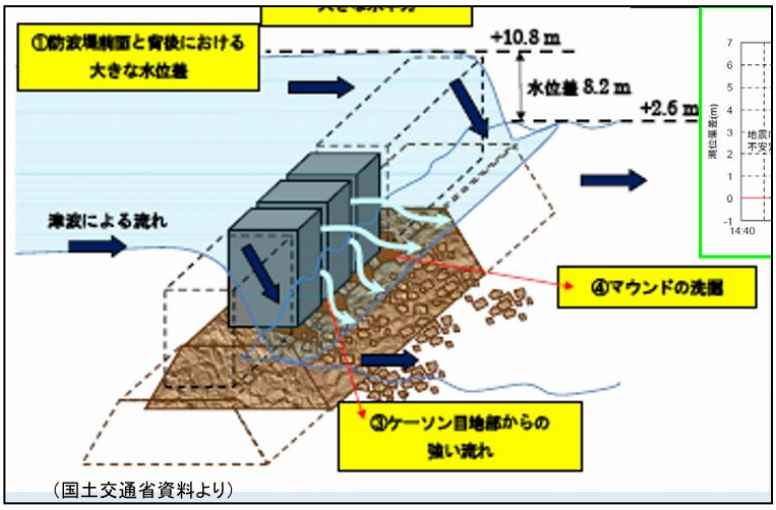



図 32: 釜石湾口防波堤の被災メカニズム(参考文献[5]より引用)

※東日本大震災では、基礎が削られ、ケーソンが倒壊したと分析されている

## 8．結論

本研究で提案した**土台付き吹上式ケーソン**は、漁港を守る性能を保ちながら、ケーソンの倒壊を防ぐ、非常に効果のある工法である。前回までの反省を活かし、受けた水を上へ逃がす「吹上」と、基礎を海側へ広げる「土台」を組み合わせることが、ケーソンの衝撃耐性の向上に有効であることを確認した。

## 9．今後の課題

今回の実験では、1/200 スケールでの実験を行ったが、模型と実物のちがいについては、今後の研究テーマとしたい。

## １０．謝辞

本研究では、国土交通省・気象庁のホームページから多くの情報・資料を確認させていただいた。また、資料の整理やパソコンでの作業に協力していただいた父に感謝いたします。

## 引用文献・参考資料

[1] 国土交通省 四国地方整備局「防波堤・防潮堤の被災メカニズムとその効果について」2011 年
[2] 港湾空港技術研究所「釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討」2012 年
[3] 小瀧 夏維「衝撃耐性に優れた防波堤に関する研究 ～湾曲型ケーソン設置工法の提案～」2024 年
[4] 小瀧 夏維「次世代防波堤構造の研究 Part Ⅱ ～貫通式ケーソンによる衝撃耐性の向上～」2025 年
[5] 一般財団法人 港湾空港総合技術センター「釜石湾口防波堤の被災メカニズム」2011 年
[6] 田中組 “防波堤ができるまで　～ケーソンの設置～,2003 年
https://www.youtube.com/watch?v=yjralaw__Ck