

# ケーソン式防波堤の大変形破壊に伴う作用波力の変化に関する実験的研究

## Experimental Study on the Change of Wave Force in Large Deformation Process of a Caisson Breakwater

宮田正史<sup>1</sup>・安野浩一郎<sup>2</sup>・吉田 誠<sup>3</sup>・関本恒浩<sup>4</sup>・大久保陽介<sup>5</sup>

Masafumi MIYATA, Koichirou ANNO, Makoto YOSHIDA  
Tsunehiro SEKIMOTO and Yousuke OOKUBO

We conducted detailed hydraulic model experiments in order to sophisticate the performance-based design method of breakwater in consideration of the life cycle cost. The caisson type composite breakwater and covered with wave-dissipating block were tested in the condition of large displacement of the caisson and the rubble mound foundation. The wave force acting on the moving caisson was investigated. The effect of deformation of wave dissipating blocks to the wave force on the caisson was also investigated.

### 1. はじめに

防波堤の性能設計において、滑動変形量を算定するための外力と変形の関係については多くの検討がなされている(例えば、下迫ら, 1994)。一方、過去の被災事例(例えば、宮井ら, 1993)の中には、捨石マウンドの破壊が要因とみられる被災や堤体がマウンドから滑り落ちる例も報告されており、このような破壊形態を考慮した被災予測手法の構築が今後必要となる。堤体が変形すると、ケーソンに作用する外力も変化し、累積する滑動変形量や最終的な防波堤の破壊形態に影響を及ぼすことが考えられる。しかしながら、防波堤の変形に伴う作用外力の変化に関してはほとんど検討がされていない。

本研究では、防波堤のライフサイクルコストを考慮した性能設計法の高精度化に向けた基礎的研究を行う目的の下、混成式ケーソン堤および消波ブロック被覆式ケーソン堤を対象に水理模型実験を実施し、ケーソンが大変形した際のケーソンに作用する外力の変化に関する詳細な検討を行う。

### 2. 水理模型実験の概要

#### (1) 実験条件

大変形破壊に至った防波堤の被災事例を参考にケーソン形状を設定し、縮尺1/30の二次元水理模型実験を実施した。本実験においては、破壊現象を詳細に把握する基礎的な研究を行うことを目的としているため、入射波は

規則波とし、波高、周期は事前に実施した実験の結果、ケーソンの大変形破壊が生じた波高0.325m、周期2.14sとした。実験では、マウンドの高さ、ケーソン背面のマウンド肩幅、および消波ブロックの形状等を変化させた構造形式を対象とした。表-1に実験条件を示す。なお、表-1のケーソンType1とは、ケーソン前面にブロック荷重計測用の計測器を設置したケースである。また、滑動安全率は実験で得られた波力を用いて算出した数値である。

表-1 実験条件

実験ケース	単 位	Type1	Type2
縮尺・波浪条件	—	1/30・波高0.325m, 周期2.14s	
ケーソン規格	m	B0.466×H0.483 ×L0.60	B0.39×H0.483 ×L0.60
ケーソン水中重量	kN	1.47	1.32
設置水深	m	0.328	0.408
捨石マウンド	mm	中央粒径5~40	
マウンド高さ	m	0.367	
肩幅(背面)	m	0.167, 0.250	0.167, 0.127
消波ブロック (滑動安全率)	—	無(0.96) 完全(1.21) 不完全1(0.92) 不完全2(0.94)	無(0.89) 不完全1(0.76)

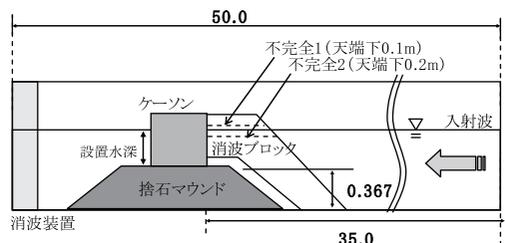


図-1 実験断面 単位 m

- 1 正会員 工修 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室
- 2 正会員 五洋建設株式会社技術研究所
- 3 正会員 修(工) 五洋建設株式会社技術研究所
- 4 フェロー 博(工) 五洋建設株式会社技術研究所
- 5 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社

る。消波ブロックの被覆状態は、ケーソン天端面までを被覆した完全断面、天端面のブロックを1段、および2段分取り除いた断面をそれぞれ不完全1、および不完全2とした。

図-1に実験断面を示す。実験においては、ビデオ画像を用いた画像解析によりケーソンの水平変位量・沈下量・回転角やマウンドの断面形状の経時変化を計測した。模型には前背面、底面および天端面に波圧計を、模型内部に速度・加速度計をそれぞれ設置した。前面壁には、荷重計を設置し消波ブロックによるケーソンへの寄りかかり荷重を計測した。底面には、2種類の荷重計を設置し地盤反力、底面せん断力を計測した。各計測器の設置位置の詳細については、宮田ら(2009)を参照されたい。以上の計測器を用いてケーソンに作用する外力を全て計測した。

### 3. 水理模型実験結果 (混成式ケーソン堤)

#### (1) ケーソンの大変形の形態

本実験におけるケーソンの大変形過程においては、以下に示す3つの破壊段階を経て変形が進展していた。まず、初期段階では、ケーソン後し付近の捨石マウンド表層の局所的なせん断変形が主要因となり、水平変位が卓越し、次に、捨石マウンドが大きく破壊されて、著しく変形が

増加する進行段階に移行する。この段階で、マウンドの法肩付近がケーソンの移動に伴い岸側方向に押し出されて隆起する。そして、隆起した部分がケーソン背後に受動抵抗として作用し破壊の進行が進まなくなる安定段階にいたった。図-2にケーソンの変位時刻歴例を示す。

各計測を行う実験に先立ち、同じケーソン模型を用いて破壊の再現性を確認する簡易実験を行った。簡易実験では、1つの構造形式に対し3回行い、ケーソン変位、捨石の破壊状況のばらつきを把握した。その結果、ケーソンの大変形破壊を伴う実験の再現性は概ね良好であることを確認した。図-3に実験後の破壊状況の比較例を示す。

#### (2) ケーソンの変位に伴う水平波力の変化

計測波力からケーソンの移動に伴って発生する慣性力を差し引いた混成式ケーソン堤への水平波力の変化に関する検討を行った。なお、慣性力は、ケーソン内部に2箇所設置した加速度計の計測値と各時刻の回転による影響を考慮して評価し、ケーソンの冲向き方向の加速度を正として整理した。図-4に進行段階における押波前後の各波圧計の時刻歴例を示す。図-4の固定時とは、ケーソンが動かないようにケーソンを水槽に固定した状態で同じ波浪を作用させた実験結果である。個々の波圧計における進行段階の水平波力と固定時の波力は概ね一致しており、一方、進行段階の揚圧力は大きく増加する傾向を示している。

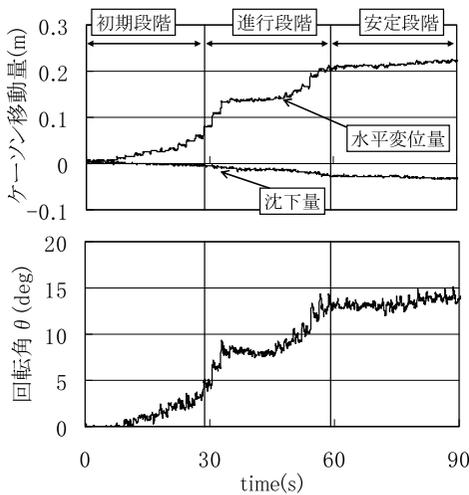


図-2 ケーソンの変位時刻歴 (Type1, 不完全1)

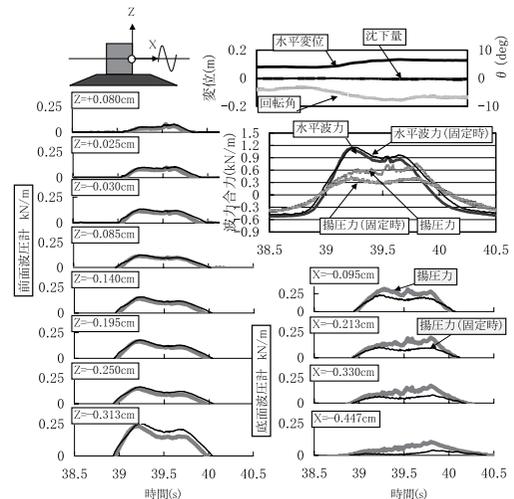


図-4 各波圧計の時刻歴 (Type1, 肩幅0.167)

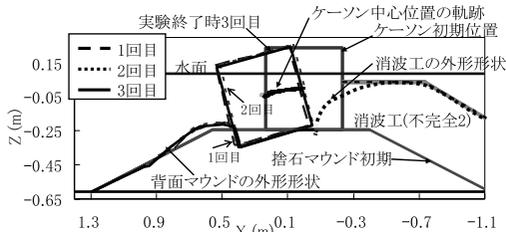


図-3 実験後の破壊状況比較例 (Type1, 不完全2)

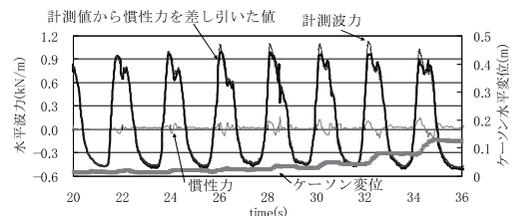


図-5 水平波力とケーソン変位時刻歴 (Type1, 肩幅0.167)

図-5に水平波力の時刻歴例を示す。計測波力の時刻歴においては、ケーソンの水平変位の増加による波形の変化は小さく、押波時のピーク値に相違が生じるだけである。計測値からケーソンの慣性力を差し引いた正味の波力は、ケーソン変位の増加にかかわらず概ね一定となっている。

図-6に押波時の水平波力ピーク値とケーソン変位の関係を示す。ケーソン幅の異なるType1とType2とで計測値には大きな差異が見られるものの、計測値から慣性力を差し引いた値は、3つの破壊段階を通じて概ね一定値となっている。Type1とType2での計測波力の相違は慣性力の符号が異なるためである。Type1は、堤体の滑動安全率が1.0に近く、初期段階では主に押波時のみケーソンが移動する。破壊の進行に伴いケーソンが回転し始めた時点で、ケーソンの挙動が波の位相と逆転し、押波時の慣性力が正值となった。一方のType2は、Type1よりも滑動安全率が小さいため、滑動に寄与する波力の作用時間がType1より長く、引波時の沖側への移動も見られる。ケーソンの回転が発生した時も波と概ね同位相で動くために、慣性力が負値となった。なお、安定段階に近づくにつれ、計測波力と計測値から慣性力を差し引いた値との差が小さくなる傾向も見られた。

図-6に示す合田式（碎波）とは、ケーソン変位に応じて肩幅BMの割り増しを行った衝撃碎波係数 $\alpha_1$ を用いて合田式により波力を計算した結果であり、合田式（非碎波）は、 $\alpha_1$ を用いなかった結果である。設計上は、合田式（碎波）を用いて議論する必要があるが、本実験においては衝撃碎波力が作用していないため、計測値から慣性力を差し引いた値は概ね一定値となり、合田式（非碎波）と同様の傾向を示している。

以上から、非碎波条件の水平波力については、ケーソンの破壊の進行による影響を受けず、ケーソンが大きく変形したとしても破壊前の波力が維持されるものとして評価できると考えられる。なお、水平波力とケーソン底面のせん断力を比較すると、両者に差は生じていない

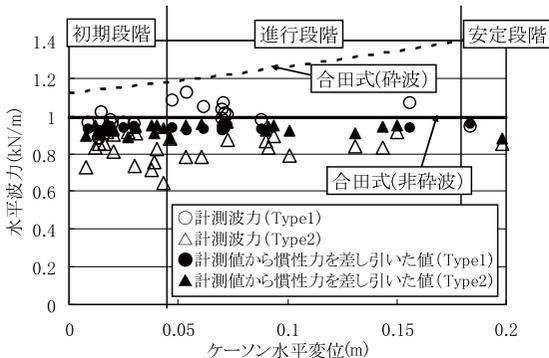


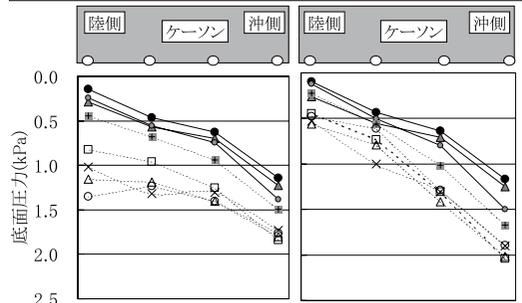
図-6 水平波力とケーソン変位の関係 (Type1,Type2)

め、本実験では、高橋ら(1993)が指摘する地盤バネの効果は小さく、水平波力は有効波力に等しいと考えられる。

(3) ケーソンの変位に伴う揚圧力の変化

図-7はケーソンの変形の進行に伴い増加する回転角毎に水平波力最大時の底面圧力分布を示したものである。検討では、揚圧力をケーソン底面に垂直に作用する向きとして定義した。なお、図中の静水圧補正後とは、各波圧計の計測値からケーソンの沈下量、回転角に応じた静水圧の変化分を考慮し、動水圧成分を抽出したものである。補正前の揚圧力は、進行段階および安定段階において急激に増加し、等分布荷重に近くなる傾向を示している。ケーソンの沈下量、回転角に応じた静水圧の補正を行うと、破壊段階にかかわらずケーソン陸側の圧力は概ね0に近づくため、陸側の圧力増加は、ケーソンの破壊の進行に伴うケーソンの沈下および回転による影響が支配的である。一方、沖側の圧力は破壊段階の進行に伴い増加し、安定段階では、初期段階に対して約2倍程度にまで達しており、ケーソンの沈下と回転による影響だけでは説明できないことがわかる。

図-8にケーソンの水平変位と沖側底面波圧に対する前面底面波圧比の関係を示す。沖側の底面波圧と、前面側



(a) 補正前 (b) 静水圧補正後

図-7 底面への作用波圧分布 (Type1)

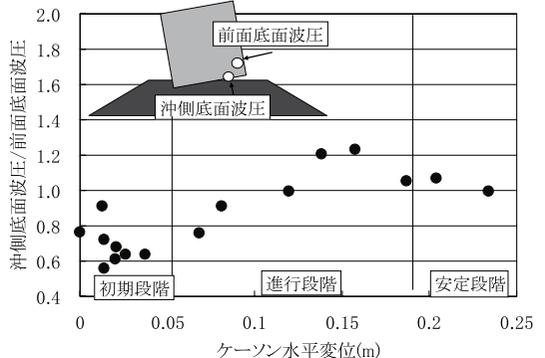


図-8 ケーソン水平変位と沖側底面波圧の増減 (Type1)

の底面付近に取り付けた水平力測定用の波圧計の値との波圧比は、進行段階において急激に増加した。安定段階においては、ケーソンの沖側底面と捨石マウンドとで隙間が生じるため、波圧比は概ね1.0となる。進行段階において波圧比が1.0を上回る場合があるのは、ケーソンの沖向の回転運動によりケーソン底面と捨石マウンドとの空間が狭まることと、水が閉じ込められる効果による局所的な底面圧力の高まりによるものと思われる。また、本実験においては、ケーソン陸側の底面部は、破壊段階の進行が進むと、崩壊した捨石マウンド内にめり込むようになる。そのケーソンの挙動により、陸側底面部への動水圧の伝達が低減され、静水圧補正後の陸側底面波圧が0に近づくものと考えられる。なお、揚圧力については、ケーソン底面の接触状況により大きく異なる可能性がある。

(4) 数値計算による実験の再現

ケーソンの破壊段階毎の波力の変化を詳細に把握するために、数値波動水路 (CADMAS-SURF . ver.5.1) を用いて変形途中の断面をモデル化し、実験と解析による水平波力、揚圧力の比較を行った。解析では、初期段階、変位進行段階、安定段階についてそれぞれ実験時のケーソン沈下量、回転角およびマウンドの形状をモデル化して行った。図-9に安定段階の水平波力最大時における実験と解析の比較結果を示す。なお、両者は静水圧補正前の状態を比較した結果である。図-9から、解析結果は、計測値から慣性力を差し引いた値を概ね再現できている。

図-10に破壊段階毎の実験と解析の波力の比較を示す。解析結果は、それぞれの破壊段階における実験結果と概ね一致しており、また、破壊段階の進行に伴い揚圧力が増加する傾向も合わせて再現できていると考えられる。

これらの結果から、防波堤の大変形破壊時において、ケーソンへの作用波力の経時変化を数値解析により適切に評価できる可能性が高いと考えられる。

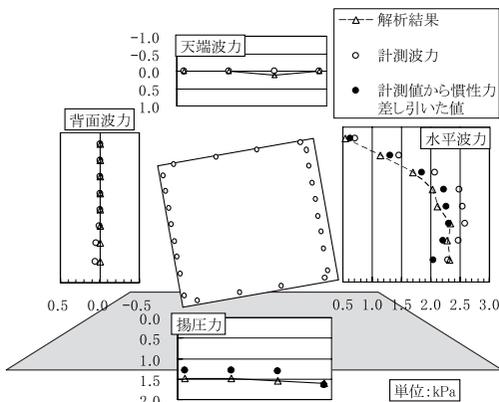


図-9 数値解析と実験値との比較 (安定段階, 回転角12.2°)

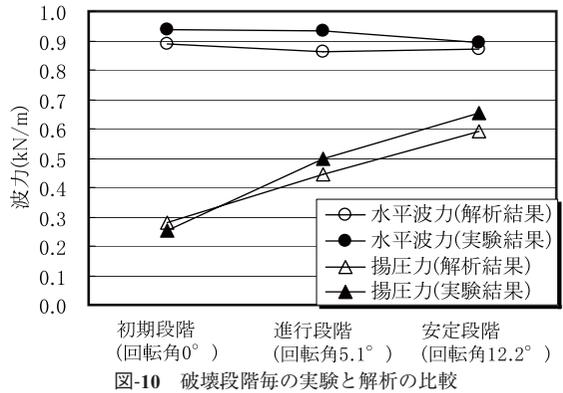


図-10 破壊段階毎の実験と解析の比較

4. 水理模型実験結果 (消波ブロック被覆式ケーソン堤)

(1) ケーソンの変位に伴う水平波力の変化

消波ブロック不完全断面における波力算定手法がいくつか提案されている。ここでは、初期段階時の4波を対象に水平波力について被覆断面毎に既往の波力算定式 (塩見ら, 1994;高橋ら, 2000) と比較を行った。図-11に水平波圧分布と各波圧算定式との比較結果を示す。

本実験では、塩見ら (1994) の式よりも高橋ら (2000) の手法の方がより整合する傾向を示しており、不完全2のケースではその差が明確であった。

次に破壊段階の進行に伴う水平波力の変化について検

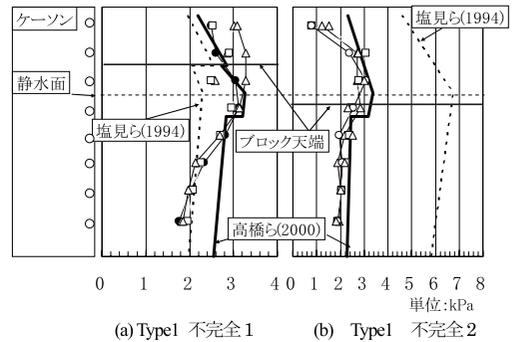


図-11 消波ブロック不完全断面における波力分布

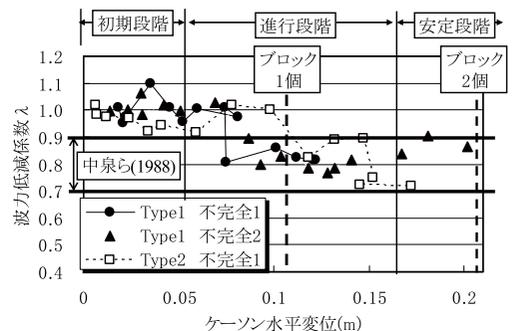


図-12 ケーソンの水平変位量と波力低減係数の関係

討を行った。図-12にケーソン水平変位と波力低減係数の関係を示す。なお、波力低減係数は、破壊前の消波ブロックがない状態の水平波力最大平均に対する比として定義した。

消波ブロック被覆式ケーソンは、ケーソン水平変位の増加に伴い、水平波力が低減する傾向を示しており、安定段階においては、波力低減係数が0.7~0.9まで低下している。波力の低減は、消波ブロック1個の高さに相当する程度の水平変位が発生した時点で現れているため、破壊段階の移行にしたがうというよりもむしろブロックの規格に依存していると考えられる。この低減効果は、中泉ら(1988)の潜堤とケーソンとの距離をパラメタとした実験結果と概ね同様の値を示していることから、消波ブロックとケーソンに一定の距離が生じたことによって、消波ブロックが潜堤として機能し、水平波力が低減されたと考えられる。

消波ブロック被覆式ケーソンにおいては、ケーソンの変形過程における消波工の変形を考慮するとともに、消波ブロックによる波の変形の効果を考える必要がある。

(2) 消波ブロックの寄りかかり荷重

最後に、ケーソンに作用する消波ブロックの寄りかかり荷重(ブロック荷重)について概略的な検討を行った。

実験結果によると、ブロック荷重は引波時に最大値となる。1波毎のブロック荷重の最大値は、静水状態におけるブロック初期荷重に引波波力を加えた値に概ね一致する。図-13に引波波力とブロック荷重初期値の合計とブロック荷重最大値の関係を示す。なお、本実験におけるブロック初期荷重は、田中ら(1985)の実験結果と概ね一致している。

図-13中の直線より下側に位置するプロット値はケーソンの岸側への移動に伴いブロックの接触点が少なくなったことによる。一方、上側に位置するものは、引波時にケーソンがブロックに寄りかかり、ケーソンの自重がブロック荷重に寄与したためであると考えられる。ケーソン自重の寄与によるブロック荷重の増加は、ケーソン

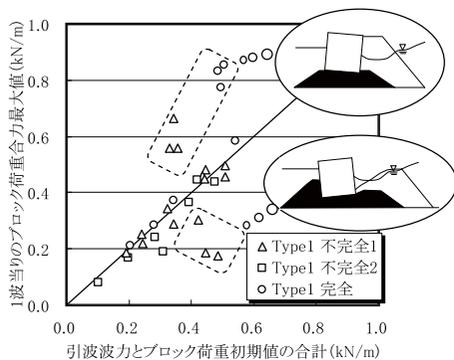


図-13 ブロック荷重と引波波力およびブロック荷重初期値の合計

変位が小さい時にも発生する場合があります。その際には、ケーソンの底面せん断力も大きく増加していた。

5. 結論

本研究の結果、得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 混成式ケーソン堤に作用する水平波力は、破壊段階の進行に伴う変化がないものの、揚圧力はケーソンの回転に伴って増加することを確認した。水平波力については、計測波力から慣性力を差し引いた正味の波力がどの破壊段階においても一定となるためである。揚圧力については、捨石マウンドとの間に隙間が生じて、前面側の波圧が増加するためである。
- (2) 混成式ケーソン堤については、数値波動水路による再現計算により、各破壊段階における作用波力の再現が可能であると考えられる。
- (3) 本実験における消波ブロック被覆式ケーソンについては、ケーソン変位の増加に伴い消波ブロックが潜堤として機能し、水平波力が低減した。ケーソンへ作用する波力の評価の際には、ケーソン変位の増加に伴う消波工の変形を考慮するとともに、消波ブロックによる波の変形の効果を考える必要がある。
- (4) ブロック荷重は、ケーソンの変形状況に関係なく、ケーソンの自重が作用しない状態では、引波波力とブロック荷重初期値の合計により概ね評価できる。一方、ケーソンがブロックに寄りかかり、ケーソンの自重の影響が現れる時は大きく増加する。

参考文献

塩見雅樹・山本 浩・津川昭博・黒沢忠男・永松宏一(1994)：消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究，海岸工学論文集，第41巻，pp.791-794。  
 下迫健一郎・高橋重雄(1994)：混成防波堤の期待滑動量の計算，海岸工学論文集，第41巻，pp.785-790。  
 高橋重雄・下迫健一郎・上部達夫・谷本勝利(1993)：衝撃碎波力に対する混成堤防波堤の動的応答の計算，海岸工学論文集，第40巻，pp.766-770。  
 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山真雄・石貫国朗(2000)：台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験，港湾技術研究所資料，No.973，pp.35-50。  
 田中昌光・山本正昭・間辺本分(1985)：消波ブロック被覆ケーソンに作用する水平荷重の評価，海岸工学論文集，第32巻，pp.490-494。  
 中泉昌光・山本正昭・間辺本文(1988)：潜堤付防波堤の波力に対する実験的研究，海岸工学論文集，第35巻，pp.632-636。  
 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993)：被災防波堤集覧(その4)，港研資料，No.765，pp.45-128。  
 宮田正史・吉田 誠・安野浩一朗・三好俊康・三藤正明・熊谷健蔵(2009)：偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，(投稿中)