

防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃碎波力について

高橋 重雄* ・津田 宗男** ・下迫健一郎***
横田 弘**** ・清 宮 理*****

1. ま え が き

写真-1 は、防波堤のケーソン壁に大きな穴があいた被災例であり、このようなケーソン壁の破壊事例は、意外に少なくない。その原因として最近よく言われているのが、消波ブロックの衝突であるが、写真-1 のように波力、特に衝撃碎波力の直接の作用による破壊も考えられる。ただし、衝撃碎波力は強大な波力であり、こうした衝撃碎波力の発生数を考えると、破壊事例がもっと多くなるはずであるが、実際には破壊事例は限られており、中詰め土圧や動的応答の効果によってかなり発生応力が緩和されていると思われる。

本報告は、こうした衝撃碎波力によるケーソン壁の破壊について検討を行うものである。谷本ら (1975) や田畑・中山 (1996) はケーソン壁の破壊に関する検討を行っており、著者ら (1995; 1998) も水理模型実験を実施して、こうした衝撃碎波力によるケーソンの応答を検討している。ここではさらに 3 次元 FEM による動的応答計算を行い、衝撃碎波力によるケーソン壁の応答について検討する。また、同時にこれまでのケーソン壁の破壊事例を整理して、現地の実態を把握する。特に衝撃碎波力による破壊だけでなく、消波ブロックの衝突によるものも調査し、両者の違いを明らかにする。

2. 被災事例調査

2.1 調査概要

ケーソン壁の破壊に関する調査・研究は、谷本ら (1975) が行っており、8 ケースの破壊事例を示している。これらは、すべて消波工のない混成堤に衝撃的な波圧が働いており、マウンドが高いことによる衝撃碎波力の発生が原因と考えられる。

この谷本ら (1975) の調査以後、最近までのほぼ 20 年間の主要なケーソンの破壊事例を調査した。このうち、全国の港湾において、ケーソン壁が被災した事例は、軽

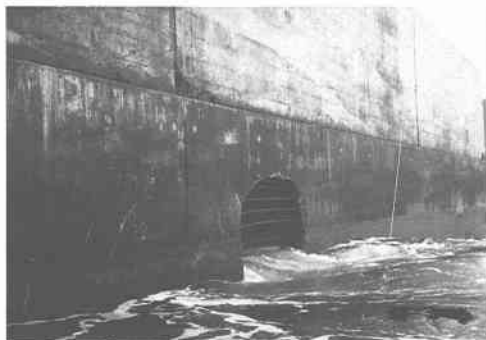


写真-1 衝撃碎波力によるケーソン壁の破壊

微なものを除けば表-1 に示すように 17 ケースである。これは、被災防波堤集覧(服部ら, 1984; 宮井ら, 1993)を基に、各工事事務所の資料等から作成したものである。表-2 に、ケーソン壁の破壊の考えられる原因を示しているが、表-1 の 17 件の内 12 件は、衝撃碎波力によるケーソン壁の破壊である。そのうち 7 件が消波工がない場合で、高マウンドや急勾配海底斜面によるものであり、5 件が消波工がある場合で、消波工端部などの不完全消波部における衝撃碎波力によるものである。さらに、17 件中の 5 件が消波ブロックの衝突によるものと思われる。表-2 には、その他の原因による破壊も示しているが、表-1 はそれらを含んでいない。

なお表-1 の被災事例は、全国の 16000 函といわれているケーソンの数に比して、圧倒的に少ない。

2.2 衝撃碎波力による被災

(1) 高マウンド・急勾配海底による衝撃碎波力

谷本ら (1975) の古い調査事例のほとんどが高マウンド・急勾配海底による衝撃碎波力が原因であり、表-1 の今回の調査でも同様な原因の事例が多い。しかしながら、酒田港の衝撃碎波力による防波堤の大規模な被災(谷本ら, 1981)の後、こうした危険性多くの技術者に認識されるようになり、それまでかなり多かったこうした被災が次第に少なくなっている。実際、谷本らの調査では約 4 年間に 8 件の被災が発生しているが、表-1 では約 20 年間で 7 件であり、このうち 1990 年以降に発生している 3 件にはそれぞれ特殊な理由がある。その一つは、

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長

** 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術研究所 水理研究室

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官

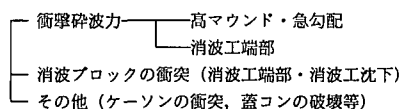
**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部構造強度研究室長

***** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

表-1 ケーソンの破壊事例

港 名	構造様式	被災年月	ケーソンの被災状況	被災の原因
増毛港	混成堤	1977/04	破損・中詰流出, クラック	水深急変部の衝撃碎波力
釧路港	消波ブロック被覆堤	1981/08	前壁直径1mの穴, 中詰砂流失	消波工端部(施工時), 消波ブロックの衝突
小名浜港	混成堤	1981/08	1箇クラック・中詰流失	高マウンドによる衝撃碎波力
御前崎港	消波ブロック被覆堤	1981/08	1箇損傷(直径1mの未貫通穴)	消波工端部(施工時), 消波ブロックの衝突
新宮港	混成堤	1982/09	破損・クラック・中詰流出	水深急変部の衝撃碎波力
A港	消波ブロック被覆堤	1987/02	1箇ほぼ全壊, 中詰め流出	不完全消波(施工時), 衝撃碎波力, 角部のケーソン
B港	消波ブロック被覆堤	1987/12	前壁径3m穴, クラック, 上部工破損	堤頭部消波工端部の衝撃碎波力
片泊港	消波ブロック被覆堤	1987/08	1箇がほぼ全壊	消波工の散乱沈下による衝撃碎波力
鶴殿港	混成堤	1990/11	前壁直径3mの穴	海底地盤が変動・水深変化, 高マウンドによる衝撃碎波力
鹿島港	混成堤	1990/11	1箇がほぼ全壊	高マウンドによる衝撃碎波力
むつ小川原港	消波ブロック被覆堤	1991/02	4箇が破損, 1箇はほぼ全壊	隅角部消波工端部の衝撃碎波力
小本港	消波ブロック被覆堤	1991/02	3箇が破損, 上部工延長42m破損	消波工の散乱沈下による衝撃碎波力
南の浜港	混成堤(突堤)	1991/09	1箇ほぼ全壊	急勾配海底による衝撃碎波力, 堤頭箇所側側壁の破壊
K港	消波ブロック被覆堤	1996/09	いくつかの壁に穴	消波ブロックの衝突
H港	消波ブロック被覆堤	1996調査	129箇の内, 18箇に穴などの損傷	消波ブロックの衝突
M港	消波ブロック被覆堤	96/8, 97/9	合計3カ所の壁に穴	消波ブロックの衝突
W港	混成堤	1977/08	1箇ほぼ全壊, 上部工延長24m破損	急勾配海底による衝撃碎波力

表-2 ケーソン壁の破壊原因



海底地盤の洗掘等によって前面水深が大きくなり、結果的に高マウンドになった場合であり、あとの二つは、側壁方向(法線に沿う方向)から急勾配海底による衝撃碎波力を受けた突堤の場合である。

(2) 不完全消波部の衝撃碎波力

衝撃碎波力によるケーソン壁の被災は、最近でも発生しているが、この被災は消波ブロック被覆堤の不完全消波部(消波工端部など)で発生しているのが特徴である。これは、通常の混成堤を消波ブロックで被覆して改良することや、最初から消波ブロック被覆堤を建設することが多くなっていることに対応しており、特に消波工の施工中に発生していることが多い。不完全な消波は、そこで波が砕け、強大な衝撃波力が発生するため、このタイプの被災の5例中4例が、ケーソンがほとんど全壊するほどの被災であったことに注意が必要である。

例えば、むつ小川原港の東防波堤では、隅角部に消波工があり、その端部でケーソン1箇が全壊するという被災があった(塩見ら, 1994)。この場合は、もともと消波工端部になることを考慮して、ケーソン幅を大きくし、かつ壁厚も45cmから70cmに大きくしていたが、消波工が散乱して消波工端部が移り、衝撃波力を考慮していないケーソンが破壊に至っている。壁厚を70cmにしたケーソンは40cmほど滑動しているが、前壁には損傷がない。

通常、衝撃碎波力によるケーソン壁の被災が発生する場合には、その近くのケーソンのなかには前壁の損傷は受けないが滑動するものも多い。また、衝撃碎波力によ

る滑動災害は、壁の損傷災害の3倍以上ある。すなわち、ケーソン壁が被災するのは、衝撃碎波力がかなり強大である場合か、あるいはケーソン壁の厚さが小さい場合と考えられる。また衝撃碎波力が作用するところが静水面付近であることが多いため、この部分が上部コンクリートでなく、ケーソン壁が静水面上比較的高くまである場合に被災しているようである。

ただし、不完全消波の場合や高マウンドでも必ず衝撃碎波力による被災が発生しているわけではなく、波高や周期、波向きなどによって変わってくることは、言うまでもない。

2.3 ブロックの衝突による被災

消波ブロック被覆堤の普及に伴って、消波ブロックの衝突によるケーソン壁の損傷も最近問題となっている。表-1には5つの事例を示しているが、軽微なものを含めるとその数はかなり増えるようである。

ブロックの衝突によるケーソンの破壊は、曲げ破壊ではなく、押し抜きせん断による破壊である。鉄筋の表面のコンクリートが剝離するだけの場合もあるが、衝突したブロックの形で穴が開いている場合がほとんどであり、この場合は、前面(表面)側より中詰め砂がある後面側の方で大きくコンクリートが剝離していることも多い。

こうしたケーソン壁へのブロックの衝突は、防波堤の全体で発生しているわけではなく、限られた箇所が発生している。もちろん、消波ブロック被覆堤の数は非常に多いが、限られた防波堤で発生している。すなわち、

- ① 波高が大きく、ブロックも大きい防波堤
- ② 消波ブロックの沈下・散乱が発生している防波堤
- ③ 消波工の端部であったり、消波工が沈下した場所に主に発生している。なお、こうしたケーソンの損傷は、静水面からケーソン天端付近にかけて発生することが多

く、ブロックに隠れて発見が遅れることが多い。また、消波工が散乱・沈下した後に調べても、その時には発見されず、消波ブロックを追加復旧し、次の台風を経た後に発見されることもある。

通常は、天端付近のものがケーソンの上部工に接触しているだけであったのが、消波工端部の時や沈下したときにケーソンに接触し易くなり、ブロックがさらに沈下や散乱したときに、ケーソン壁と衝突すると考えられる。特に消波工端部や消波工が沈下したところでは、波力も大きくブロックも動きやすいと考えられる。

3. 3次元 FEM 動的計算

3.1 計算方法

ケーソン堤を対象とした3次元の動的解析を行った。ケーソン壁を3次元粘弾性シェル構造とし、中詰め砂や捨石マウンドを粘弾性ソリッド構造としてモデル化し、運動方程式を直接積分法によって計算している(例えば、日本鋼構造協会, 1986)。中詰め砂やマウンドの弾性定数はRichardらの実験式、そして減衰定数はRayleigh減衰を仮定して決定している。ただし地盤の弾性を考慮していないことなどによって、マウンドはやや固い状態を対象にしている。計算では、ケーソン壁のひずみや応力だけでなく、速度や加速度、あるいは中詰め砂の土圧の時間変化等を求めている。

まず、著者らが行ったケーソン壁の動的応答に関する模型実験結果を計算で再現して、計算法の妥当性を検証している。次に、現地ケーソンを対象としてケーソンの構造や中詰め砂あるいはマウンドの剛性等を変えた計算を行い、動的応答効果に関する検討を行っている。

3.2 模型実験結果との比較

図-1は、著者ら(1995)の模型実験結果を数値計算と比較したものである。中詰め土圧、加速度、ケーソン壁の歪みは比較的良好に一致しており、計算でも実験で見られた動的応答や中詰め土の効果が認められた。すなわち、

① ケーソン壁の歪みは、衝撃波力のピーク(位相Ⅰ)ではなく、少し遅れてピークとなる。これは、ケーソン壁の加速度による慣性力(中詰め土や水の付加質量力)の効果であり、動的応答効果である。

② 歪みピーク時(位相Ⅱ)には、波力はピーク時よりかなり小さくなっているが、壁の加速度がほぼ負のピークであり、この負の慣性力がその時の波力に加わって歪みを発生させる。ただし、この合力は通常、ピーク時の波力よりは小さい。

③ ケーソン内の中詰め土圧には、中詰め土の弾性による力と加速度による慣性力とがある。位相Ⅰでは、慣性力が卓越し、それによって歪みを小さくしている。位相Ⅱでは、負の慣性力が歪みを大きくする方に働くが、

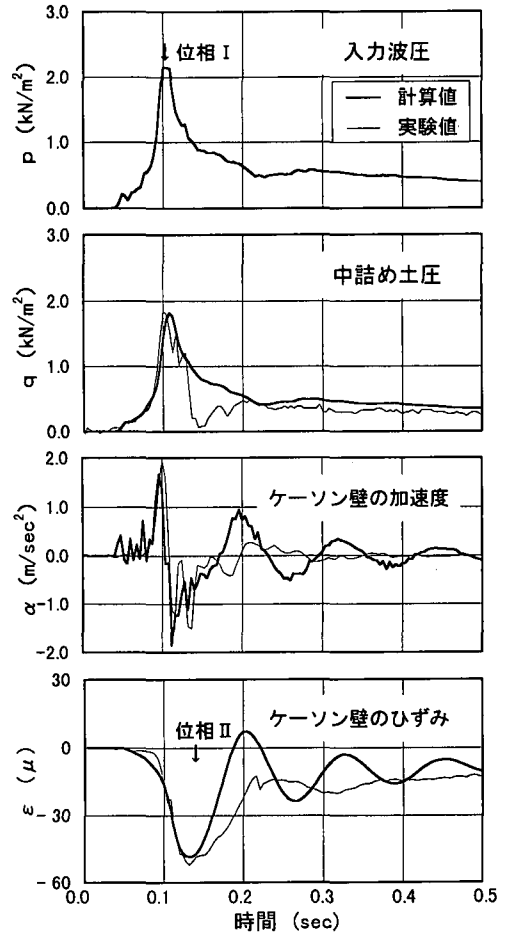


図-1 実験値と計算値の比較

そのときの弾性による力で、ほぼ相殺されている。

3.3 現地量による計算

むつ小川原港の防波堤を対象に現地量の計算を行った。図-2は標準ケースの計算メッシュを示し、太線で囲まれた隔壁1列分を対象に計算を行った。

(1) 動的応答・中詰め土の効果

図-3は、計算結果を示すもので、ケーソン壁の静水面中央における変位、土圧、壁のたわみ(すなわち歪み)と加速度を示している。図には、①衝撃碎波力の継続時間が短い $\tau=0.01$ sのケース、② $\tau=0.06$ sのケース、③マウンドの弾性定数を1/10として柔らかくしたケースを示している。各データは、衝撃波圧のピーク値が静的に作用した場合の値で無次元化している。ただし静的なたわみは、中詰め土の弾性による低減効果を含んでいる。

① 作用時間が短いケース

図-3の細線で示す $\tau=0.01$ sの場合には、模型の場合とほぼ同じようにたわみは位相Ⅱでピークとなっており、慣性力の効果で静的な場合の0.7倍となっている。

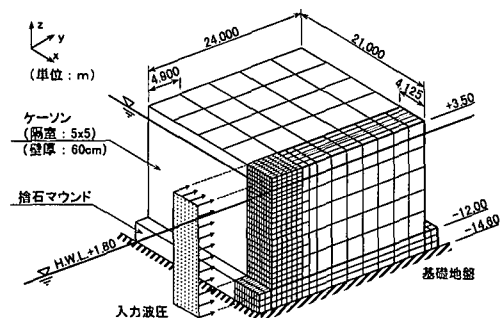


図-2 現地量の計算メッシュ

② $\tau=0.06$ s のケース (壁の固有振動周期より長い場合)

図中の実線で示すように、作用時間が短い場合と異なり、ケーソンのたわみのピークは衝撃波圧のピークで出現しており、しかもその値は静的な場合とほぼ同じである。すなわち、慣性力の効果はほとんど無く、動的効果が認められない。これは、ケーソン壁の固有振動周期が 0.04 s であり、衝撃波圧の継続時間より短く準静的に作用しているものと考えられる。

③ マウンドが柔らかい場合

上述した図-3の①と②のケースでは、マウンドのパネによるケーソン全体の固有振動周期は 0.23 s であり、衝撃波圧の作用時間に比べてかなり長い。したがってケーソン壁の動きとケーソン全体の動きとは明確に区別できる。ケーソン壁が衝撃波圧を受けてたわみがピークとなる時間には、ケーソン全体の動きは慣性力の影響が強くケーソン壁のたわみにあまり影響していないようである。これは、マウンドのパネを 1/10 に柔らかくした場合も同様であり、衝撃力の作用時間内では、たわみだけでなく土圧や変位・加速度についてもほとんど両者の差がないことがわかる。

(2) 衝撃波力の作用時間と動的効果

衝撃砕波力の継続時間についてはまだ明確な算定法はなく、また現地での計測事例も十分ではないが、通常は 0.06 s より長いと考えられる。ただし、非常に衝撃的でピークが立つ場合には、これより短いものも当然考えられる。図-4 は、横軸に衝撃波圧の作用(継続)時間をとって、たわみや中詰め土圧、そしてケーソンの変位を示したものである。やはり、たわみは衝撃波圧の継続時間がケーソン壁の固有振動周期 0.04 s 以上では静的な場合とほぼ同じであり、動的応答による低減効果が期待できるのはそれより短い場合である。中詰め土圧は、継続時間が 0.04 s 以下では慣性力の影響で静的な場合より大きくなっているが、非常に作用時間が短いときにはその慣性力も小さくなっている。一方、ケーソン全体の変位

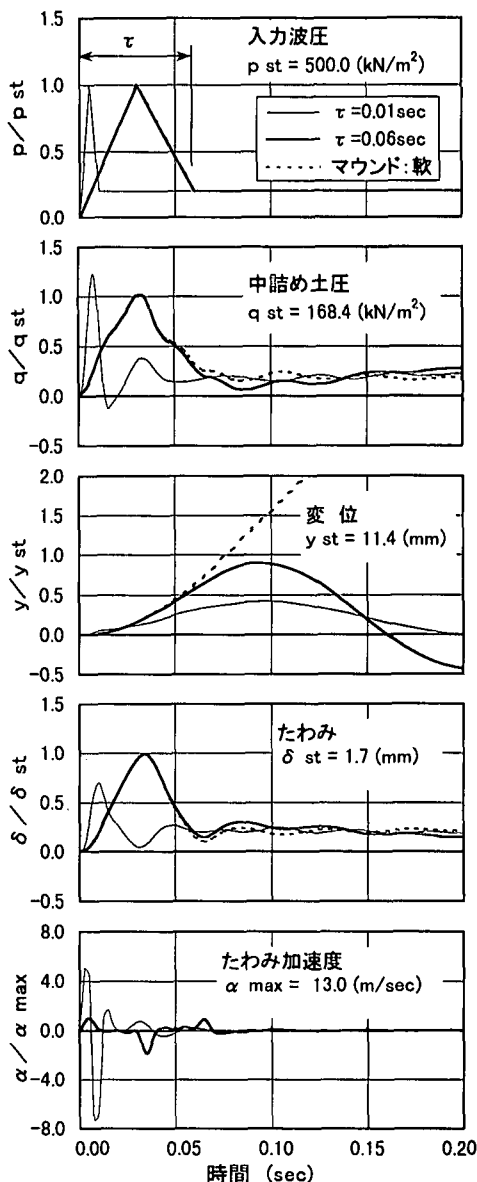


図-3 衝撃波圧によるケーソン壁の応答波形

は、ケーソン全体の固有振動周期あたりでピークとなるような傾向を示し、たわみとはかなり異なっている。

(3) ケーソン壁の曲げモーメント

図-5 は、たわみがピークとなった時のケーソン壁の曲げモーメントを示しており、水平成分については静水面、鉛直成分については壁の中央での分布を示している。

実線は作用時間がケーソン壁の固有振動周期より長い 0.06 s で中詰め砂がある場合、破線は中詰め砂のない場合、細線は現行の簡便設計法に従った 3 辺固定版を想定した静的計算である。

中詰め砂の弾性によってこれがない場合に比べ、曲げ

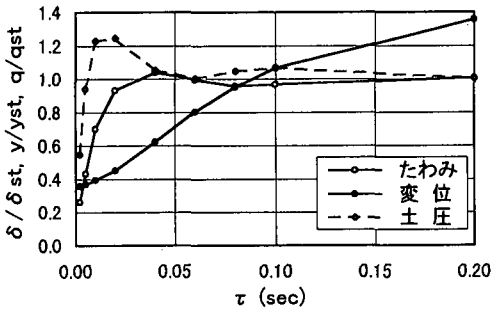


図-4 衝撃波圧の継続時間と動的応答効果

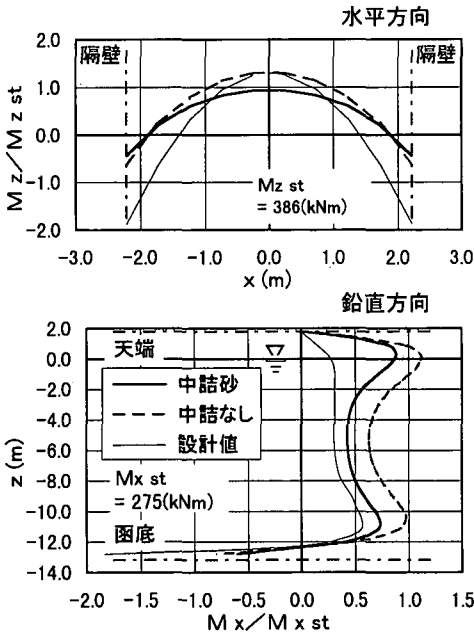


図-5 曲げモーメント分布

モーメントは約 0.7 倍に低減されている。現行設計法との比較では、両端固定の影響を受け曲げモーメントの増大が顕著に現れ、水平曲げモーメントは安全側に設計されている。それに対し鉛直方向では特に静水面付近で曲げモーメントがかなり過小に算定されていることに注意が必要である。

(4) ケーソン壁の厚さ、隔壁間隔等の影響

図-6 はケーソンの隔壁スパンや壁厚を変化させた場合の、隔壁スパン 5.5 m、壁厚 0.6 m の静的曲げ圧縮応力を基準とした、ケーソン壁の曲げ圧縮応力低減率を示している。曲げ圧縮応力は断面性能の影響を強く受けており、スパン長を短くするより壁厚を大きくする方が効果的であることが分かる。

なお、被災を受けたむつ小川原港のケーソン壁の検証も行った。被災した壁厚 45 cm のケーソン壁の許容曲げ

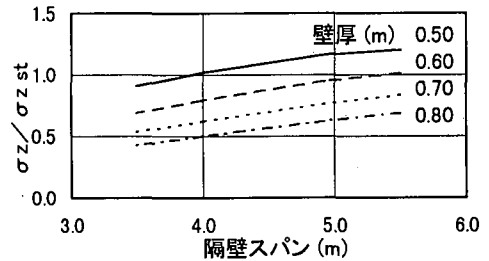


図-6 ケーソンの形状と断面応力

モーメントが 240 kNm、被災しなかった壁厚 70 cm のものが 540 kNm に対して、衝撃砕波圧 $2.8w_bH$ (衝撃砕波力係数 $a_1=1.9$ (高橋ら, 1992)) によって発生する曲げモーメントは、それぞれ 315, 421 kNm であり、ケーソン壁を厚くすることによって被災が回避できたことが分かった。

謝辞: この研究の実施に当たり、運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所の井福所長、栗岡次長、第三港湾建設局神戸調査設計事務所の穴戸所長、豊島次長、第二港湾建設局横浜調査設計事務所の林所長、坂井設計室長、八戸港工事事務所の高垣前所長・浜田所長、鹿島港工事事務所の佐藤所長ほか多くの方々ご協力を得ている。ここに記して深甚の感謝の意を表します。

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. 791-795.
- 谷本勝利・小舟浩治・大里睦夫 (1975): ケーソン壁に作用する波力と応答計算, 港研資料, No. 224, 39 p.
- 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄 (1981): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について, 港研報告, 第 20 巻, 第 2 号, pp. 1-39.
- 高橋重雄・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 676-680.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・油谷進介 (1995): 衝撃砕波力によるケーソン壁の土圧とひずみに関する実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 906-910.
- 田畑真一・中山哲蔵 (1996): 衝撃砕波力作用時の壁面に生じる歪みについて, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 756-760.
- 日本鋼構造協会 (1986): 構造工学における有限要素法の理論と応用, 116 p.
- 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一 (1984): 被災防波堤集覧 (その 3), 港研資料, No. 485, 281 p.
- 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, 179 p.
- Takahashi, S., M. Tsuda, K. Suzuki and K. Shimosako (1998): Experimental and numerical evaluation on the dynamic response of a caisson wall subjected to breaking wave impulsive pressures, Proc. of 26th ICCE, ASCE.