

ソリトン分裂津波の分裂変形過程と消波工の津波力低減効果

青田 徹*・高山 知司**・下迫 健一郎***・八尋 明彦****・

丸山 草平*****・松本 朗*****・半沢 稔*****

* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

*** (独法) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域長

**** (一財) 沿岸技術研究センター 審議役

***** (株) 不動テトラ 総合技術研究所

消波工で被覆されていない直立混成堤に作用する津波波力に関しては多くの研究がなされており、津波波力算定式が実務に供されている。一方、消波ブロック被覆堤に作用する津波波力についてその詳細は明らかになっていない。そこで、水理模型実験により、消波ブロック被覆堤に作用する津波波力について検討し、消波工によるソリトン分裂津波の波力低減効果を明らかにすることを目的として研究を行った。

キーワード：防波堤、津波、波力

1. はじめに

消波工で被覆されていない直立混成堤に作用する津波波力に関しては多くの研究がなされており、津波波力算定式が実務に供されている。一方、消波ブロック被覆堤に作用する津波波力についてその詳細は明らかになっていない。防波堤の耐津波設計ガイドライン(国土交通省港湾局, 2013)は、ソリトン分裂津波の衝撃的な波力が消波工によって低減できる可能性を示唆しているに過ぎない。

津波防災に関連したソリトン分裂の研究は、まず岩崎ら(1975)が基礎的な検討を行っている。その後、ソリトン分裂波の発生およびそれによる構造物の被害が、1983年の日本海中部地震津波において実際に確認された(首藤, 1984)。これを受けて、段波津波やソリトン分裂津波の直立壁への作用津波力に関する検討が、谷本ら(1984)、池野ら(2005)、安田ら(2006)などによりなされている。最近、加島・平山(2013)は2011年の東北地方太平洋沖地震津波の久慈港の状況を模型実験により再現し、ソリトン分裂の発生・伝播過程や防波堤の衝撃的な波圧について検討した。ここでは、ソリトン分裂津波による防波堤への衝撃波力の発生が確認されている。このように、直立混成堤の津波力の検討は多くなされているが、ソリトン分裂津波に対する消波工の波力低減効果について実験によって検討した事例はなく、明らかとなっていない。現在、消波ブロック被覆堤が広く建設されていることから、消波工の波力低減効果を明確にすることは耐津波設計において急務である。そこで、水理模型実験により、消波工によるソリトン分裂津波の波力低減効果を明らかにすることを目的として研究を行った。

2. ソリトン分裂津波の分裂変形過程

(1) 実験方法

実験には長さ 50.0m, 幅 1.0m, 高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いた。水路端部にはピストン式造波装置が設置されている。津波の造波は、造波板を押波初動で正弦波の半周期分動かして行った。造波板の運動振幅 39cm で周期は $T=8\sim 28$ 秒である。表-1 に実験ケースとえり分け距離(後述)、図-1 に海底地形の縦断面図を示す。造波された一山の段波は斜面により前傾化し水平床上で分裂、増幅、砕波へと一連の変形を起こす。

(2) 実験結果

一例を図-2 に示す。 $x=15$ m 地点で段波前面の中腹からソリトン分裂の発生が認められ、伝播するにつれて第 2

表-1 実験ケース

Case	水深 h (cm)	周期 T (s)	えり分け距離 d_s (m)
1	10	22, 24, 26, 28	42.6~58.3
2	12	20, 22, 24, 26	48.8~65.1
3	16	14, 18, 20	45.2~67.1
4	20	12, 14, 16, 18, 20	47.9~86.5
5	24	10, 12, 14	23.2~39.8
6	28	8, 10, 12	18.7~38.7

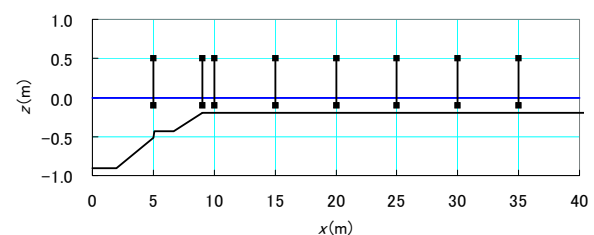


図-1 造波水路縦断面図

波, 第3波が発生した. 分裂第1波は $x=20\text{m}$ と 25m の間で砕波し波高が低減した. 砕波の形態は波頂から穏やかに崩れる Spilling 型であった.

分散第1波の波形を孤立波の理論波形と比較したところ, 実測波形は理論波形とよく一致し, ソリトン分裂波の波形は対象とする地点における水深と波高により一義的に定まり, 沖での津波の周期や波高には依存しないことがわかった. このことは, 波力実験では, 防波堤の設置位置や津波の周期を自由に設定できることを示している.

このように, 分裂第1波の波峰部は孤立波の理論波形でよく近似されるが, 後続する谷部の高さは波の進行距離に依存し, 長距離の伝播により静水面に近づいていく. Hammack and Segur (1974) は初期の段波が進行にともない完全にソリトン波に分裂するまでの水平距離としてえり分け距離 d_s を式(1)のように定義した. ここで, l_0 は段波の波長, η_0 は段波の波高である. 表-1 には各実験ケースのえり分け距離も示されている. η_0 は $x=9\text{m}$ 地点での段波の波高とした. l_0 は式(2)から定めた. ただし, T_0 は段波の周期であり, $x=9\text{m}$ 地点において水位が静水面よりも上となる時間帯の長さとした. このように定めたえり分け距離と, 式(3)で定義する分散第1波の分裂度 χ の関係を取りまとめた.

$$d_s = (l_0 / \eta_0) h \quad (1)$$

$$l_0 = \sqrt{gh} T_0 \quad (2)$$

$$\chi = (\eta_{\max} - \eta_t) / \eta_{\max} \quad (3)$$

ここで, $\eta_{\max}$ は静水面から測った分裂第1波の波峰高さ, η_t はそれに続く谷の高さであり非砕波の波形を対象としている. 分裂度は0~1の間の値を取り, 0で非分裂, 1で分裂第1波がソリトン波形となる完全分裂を意味する. 図-4 から, 波形の分裂は相対伝播距離0.2~0.6で急激に進行し, 0.6で分裂度0.8程度となり, その後ゆるやかに完全分裂に近づくことがわかる.

3. ソリトン分裂津波の波力の特性

(1) 実験方法

水路の防波堤設置位置付近を2分割し, 一方に防波堤を設置し他方で通過波を測定した. ケーソン前壁の位置は $x=34\text{m}$ であり, 3分力計および波圧計でケーソンに働く波力と波圧を測定した. サンプル周波数は1kHzとした. 測定は3回繰り返して行い, 結果は平均値で整理した. 実験ケースを表-2に, 実験断面を図-5に示す. 波形の分裂度と波圧の検討では, 非砕波の条件を対象としており, Case1-1, -2, -4は標準的な防波堤断面, Case1-3は非越波となるような高天端の断面で実験を行った. 消波工の津波力低減効果の検討では, はじめに標準的な防波堤の天端高を想定した Case2-1

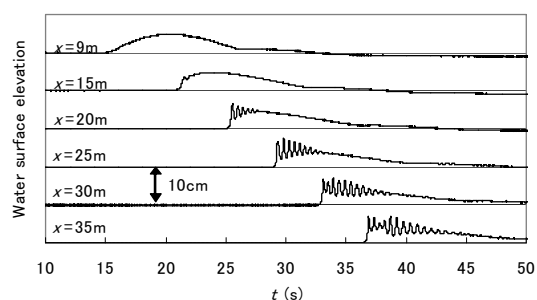


図-2 津波伝播状況 ($h=10\text{cm}$, $T=22\text{s}$)

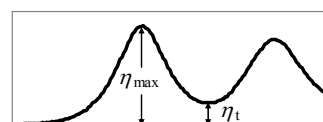


図-3 波形の分裂度の説明図

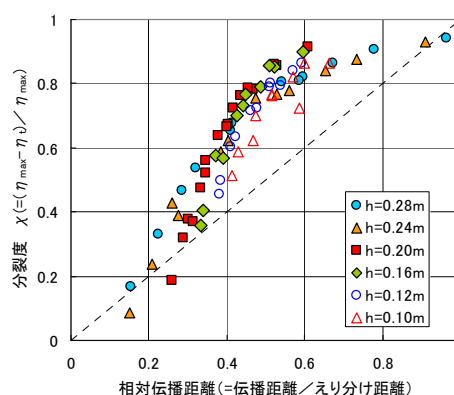


図-4 伝播距離と波形の分裂度の関係

で, 非砕波および砕波条件での実験を行った. 次に衝撃的な波力に対する消波工の効果を検討する目的で, Case2-2 では引波初動で先端が切り立ったソリトン分裂波を用いた. Case2-3 では予備実験において確認された造波限界津波高の3倍の高さのケーソンを用いた. ただし, 消波工の天端高は対象とした水深において想定される設計波高 H_D の2倍の高さとした.

表-2 実験ケース

Case	水深 $h(\text{cm})$	マウンド 水深 $h_m(\text{cm})$	防波堤 天端高 $h_t(\text{cm})$	消波工 天端高 $h_{BL}(\text{cm})$	消波工 天端幅 $B_{BL}(\text{cm})$	ブロック 質量 $m(\text{g})$	津波
1-1	16.0	11.2	5.5	-	-	-	押
1-2	"	"	9.1	-	-	-	"
1-3	"	"	36.1	-	-	-	"
1-4	20.0	14.0	6.9	-	-	-	"
2-1	16.0	11.2	5.5	5.5	8.0	98.6	押
2-2	24.0	18.0	7.4	7.4	10.0	184.3	引
2-3	16.0	11.2	36.1	18.3	8.0	98.6	押

- ・ケーソン幅は全ケースで24.5cmとした.
- ・Case1は波形の分裂度と波圧の関係の検討実験である.
- ・Case2は消波工による津波力低減効果の検討実験であり, 消波工なしとありの条件で実験した. 表中にありの場合の諸元を示す.
- ・津波欄の「押」は押波初動, 「引」は引波初動を表す.

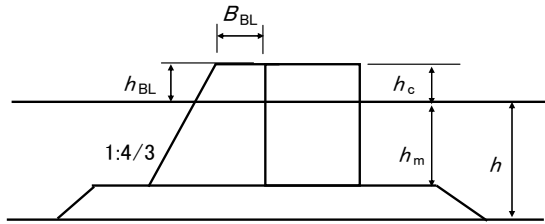


図-5 実験断面模式図

(2) 実験結果

図-6 に静水面上の波圧 $p_{\max}$ を非砕波状態における分裂波の波高 $\eta_{\max}$ で無次元化した無次元波圧強度 p^* と波形の分裂度 χ の関係を示す。波圧は滑動合成波力が最大となる時刻での値である。データは h_c/h の値ごとにほぼ1本の線でまとめ、無次元波圧強度は分裂が大きく進行している状態では進行するにつれて小さくなることがわかる。すなわち、ソリトン分裂波高を静水面から測定した場合、波高 $\eta_{\max}$ が同一であっても波圧強度は分裂の度合いによって異なり、 η_t よりも下の津波本体の厚さの影響を受ける。天端を高くした Case1-2, 非越波とした Case1-3 では、天端からの越流が減少するため p^* の値は Case1-1 よりも大きくなった。Case1-4 は h_c/h の値が Case1-1 とほぼ等しいため、 χ に対する p^* の値は Case1-1 と同程度であった。

図-7, 8 に非砕波および砕波の条件での水位および消波工なしとありの条件での波力の時系列を示す。非砕波の場合、防波堤設置位置でソリトン分裂がかなり進行していた。それに対応して水平波力の時系列は周期的に増減する波形となった。砕波の場合には、津波本体の振幅と分散波の振幅は同程度であった。波力波形も津波本体による周期の長い波形の上に個々のソリトン波に対応した波力が重畳した形状となった。いずれのケースでも消波工の津波力低減効果が認められ、消波工ありとなしの場合の水平波力の比率で定義した水平波力低減率 λ_H は、第1ピークに対する値と滑動合成波力最大時の値がそれぞれ非砕波の場合 0.89 および 0.90, 砕波の場合 0.83 および 0.82 であった。同様に鉛直波力低減率 λ_V は非砕波の場合 0.88 と 0.91, 砕波の場合はいずれも 0.77 であった。

このように消波工の効果は確認されたが、分裂波の砕波は波頂が緩やかに砕ける Spilling 型であるため波当たりは穏やかであり、図-8 に見られるように、消波工なしの場合にも波力に衝撃的な成分は見られなかった。そこで、引波初動の条件で先端が切り立ったソリトン分裂波の砕波を対象に実験を行った。図-9 に水位と波力の時系列を示す。このケースは初期の引波の様

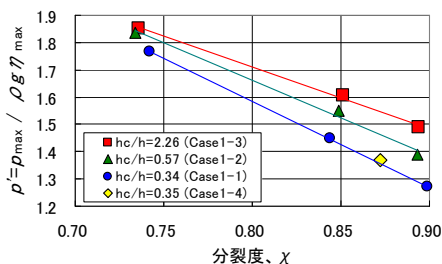
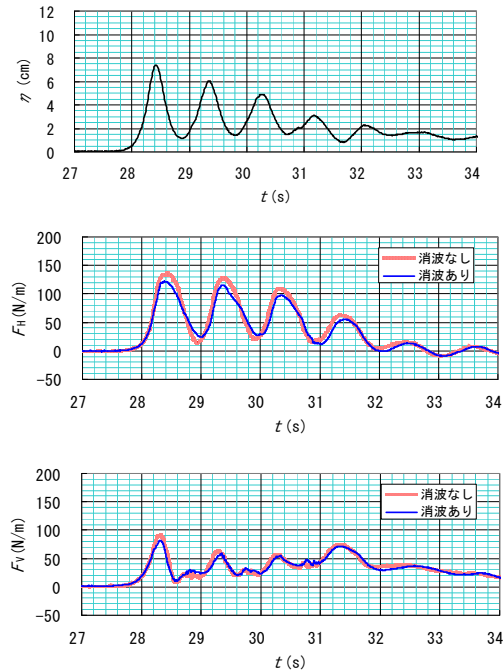
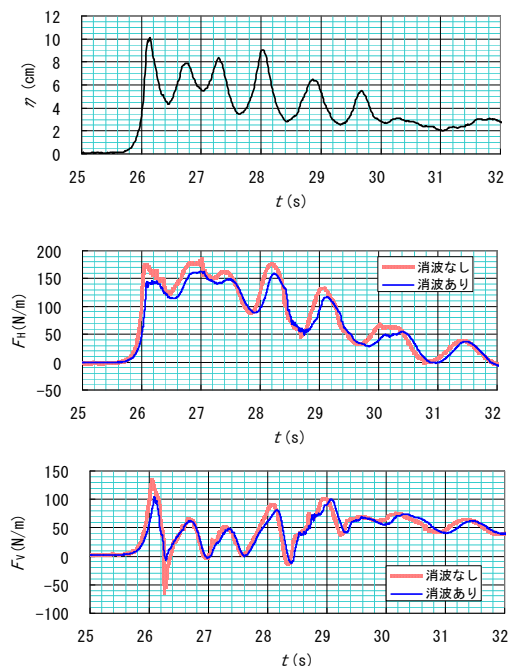


図-6 波形の分裂度と静水面上の波圧強度の関係

相が防波堤側と通過波側で異なるため、その後の押波の波形、到達時刻も若干異なり、水位と波力の時系列に時間差が見られる。水位波形は前傾化し非対称な形状となっている。水平波力は切り立ったピークの後にほぼ一定の値が続くいわゆる腰掛け部を有しており、衝撃的な波力の作用が確認できる。この波力のピークは消波工によって効果的に低減されており、滑動合成波力が最大となる第1ピークにおける水平波力低減率 λ_H は 0.72, 鉛直波力低減率 λ_V は 0.47 であった。この

図-7 水位および波力の時系列 (Case2-1(a), 非砕波)
(上段: 水位, 中段: 水平波力, 下段: 鉛直波力)図-8 水位および波力の時系列 (Case2-1(b), 砕波)
(上段: 水位, 中段: 水平波力, 下段: 鉛直波力)

ように、衝撃的なソリトン分裂波の作用に対しては、消波工の波力低減効果は高い。

最後に、非越波条件で検討した。ケーソンの天端高は造波限界津波高の3倍とした。消波工の天端高は、現実的な値を想定して、対象とした水深において想定される設計波高 H_D の2倍とした。図-10に水位と水平波力の時系列を示す。水位波形はCase2-1(b)と同じである。水平波力は消波なしの場合には双峰型の波形を示した。消波ありの場合には一山の波形が時間遅れを伴いながら出現した。鉛直波力は消波ありの場合には波状性は見られず、ほぼ一定の値が長時間継続する波形となった。このケースでは第1ピークの水平波力低減率 λ_H は0.72、鉛直波力低減率 λ_V は0.77であった。高天端で消波工が設計波高の2倍の高さまで設置された場合には、波力低減効果は高いことがわかる。

4. まとめ

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 分裂波の波形は水深と波高により一義的に定まる。実測波形は孤立波の理論波形とよく一致した。
- (2) 分散第1波の波峰高さとそれに続く谷の高さで定義した分裂度 χ は相対伝播距離で良くまとまる。相対伝播距離0.6で分裂度0.8程度まで分裂が進行した。分裂波の波高で無次元化した波圧強度は分裂が進行し分裂度が大きくなるにつれて小さくなる。
- (3) 標準的な防波堤を想定した断面では消波工による波力低減率は、非碎波の場合0.9程度、碎波の場合0.8程度であった。引波初動で衝撃的な碎波が作用する場合は消波工の効果は顕著となり、水平波力低減率は0.7、鉛直波力低減率は0.5程度となった。

以上、段波津波が水平床でソリトン分裂する場合の消波工の津波力低減効果について、水理模型実験により明らかにした。本論文は分裂波の波力の基本的な特性の解明を目的としているため、外力は第1分裂波の静水面からの波峰高さ $\eta_{\max}$ で代表させた。実設計に資するためには、津波シミュレーションから得られる津波の高さを用いて津波波力を算定することが重要と考えられる。それについては、別の機会に報告することとしたい。

参考文献

- 1) 池野正明・松山昌史・榊山勉・柳沢賢 (2005) : ソリトン分裂と碎波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 751-755.
- 2) 岩崎敏夫・真野明・小杉達郎 (1975) : 孤立性段波のソリトン分裂に関する研究, 第22回海講論文集, pp. 47-51.
- 3) 加島寛章・平山克也 (2013) : 現地津波のソリトン分裂特性に関する実験的検討とその再現計算, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_694-699.

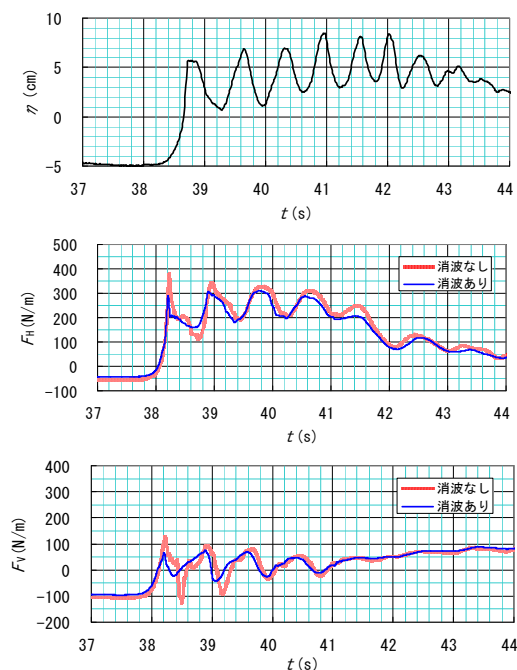


図-9 水位および波力の時系列 (Case2-2, 引波初動)
(上段: 水位, 中段: 水平波力, 下段: 鉛直波力)

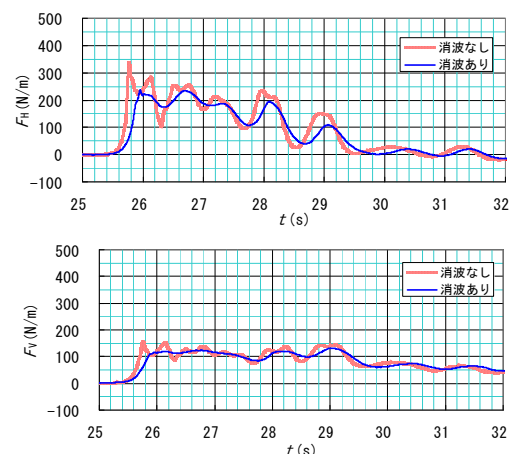


図-10 波力の時系列 (Case2-3, 碎波)
(上段: 水平波力, 下段: 鉛直波力)
(水位波形はCase2-1(b)と同じ)

- 4) 国土交通省港湾局 (2013) : 防波堤の耐津波設計ガイドライン, <http://www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf>, 参照 2014年5月12日.
- 5) 首藤伸夫 (1984) : 秋田県北部海岸における日本海中部地震津波, 第31回海講論文集, pp. 247-251.
- 6) 谷本勝利・鶴谷広一・中野晋 (1984) : 1983年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海講論文集, pp. 257-261.
- 7) 安田誠宏・高山知司・山本博紀 (2006) : ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 256-260.
- 8) Hammack, J. L. and H. Segur (1974) : The Korteweg-de-Vries Equation and Water Waves. Part 2, J. Fluid Mech., Vol. 65, Part 2, pp. 289-314.