ソリトン分裂津波に対する消波ブロック被覆堤の津波波力算定法に関する研究

丸山草平¹・高山知司²・下迫健一郎³・八尋明彦⁴・鈴木高二朗⁵
青田徹⁶・田中真史⁷・松本朗⁸・半沢稔⁹

^{1,8}正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)
E-mail:sohei.maruyama@fudotetra.co.jp
E-mail:akira.matsumoto@fudotetra.co.jp

²フェロー 一般財団法人沿岸技術研究センター (〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2)
E-mail:takayama@cdit.or.jp

^{3,5}正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:shimosako@pari.go.jp
E-mail:suzuki_k@pari.go.jp

^{4,7}正会員 一般財団法人沿岸技術研究センター (〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2)
E-mail:yahiro@cdit.or.jp
E-mail:m_tanaka@cdit.or.jp

⁶株式会社不動テトラ ブロック環境事業本部 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)
E-mail:toru.aota@fudotetra.co.jp

⁹正会員 株式会社不動テトラ ブロック環境事業本部 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)
E-mail:minoru.hanzawa@fudotetra.co.jp

消波工による津波波力の低減効果を明らかにすることを目的として、消波ブロック被覆堤に作用するソリトン分裂津波の波圧に関する水理模型実験を実施した。消波工がない場合の波力実験結果から、津波の水平波力算定式として谷本式および修正谷本式の妥当性の確認をするとともに、それらの津波高水深比による適用範囲と静水面の波圧に関する係数の値を明確にした。揚圧力は津波高水深比によらず、一律、谷本式による算定が妥当であることを確認した。消波工で被覆しない状態での波力の算定値と消波工で被覆した防波堤に作用する波力の実験値とを比較検討し、消波工によるソリトン分裂津波の波力低減を精度よく算定する式を提案した。また、消波ブロックの安定実験を行い、風波の設計波高に対する所要質量を有するブロックは、ソリトン分裂津波に対して安定であることを確認した。

Key Words : tsunami, soliton fission, wave force, wave-dissipating works

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の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¹⁾では、ソリトン分裂が顕著に生じていない段波状津波の波圧として谷本ら²⁾が提案している算定式(谷本式)に修正係数を乗ずることによってソリトン分裂および越流を伴う津波の波力式を修正谷本式として提案している。これらの算定式は消波工で被覆されていない混成堤に対するものである。消波ブロック被覆堤に関しては、ソリトン分裂による衝撃

的な波力が消波工によって低減される可能性を示唆しているが、その詳細については明らかにしていない。多くの第一線防波堤が消波工で被覆されていることを考えると、消波工の波力低減効果の解明は、これらの防波堤の耐津波の安定性照査において急務となっている。丸山ら³⁾は消波工によってソリトン分裂津波の波力が低減することを水理模型実験で示したが、分裂波の波力の基本的な特性解明に主眼を置いていたために消波ブロック被覆堤の波力算定法の提案には至っていない。

そこで本研究では、設計に資することを目的として、ソリトン分裂津波に対する消波ブロック被覆堤の波力低減効果を定量的に検討するとともに、消波ブロックの安定性についても実験的に調べた。初めに消波工がない場

合の防波堤について実験を行い、谷本式および修正谷本式と実験値を比較し、これらの算定式の妥当性を確認するとともに、津波高水深比による適用範囲を明確にした。次に消波工がある場合の実験を行い、この実験による波力値と、消波工がない場合の算定式による波力値の比として、消波工による波力低減率を提案した。最後にソリトン分裂津波も含め、津波に対する消波ブロックの安定性について検討した。

2. 波力特性に関する水理模型実験

(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。図-1 に造波水路の断面図を示す。ソリトン分裂を発生させるため、模型床の勾配は水平とした。図-2 に津波の伝播状況の一例を示す。 $x=17\text{m}$ 地点で分裂が発生し、伝播に伴い第 2 波、第 3 波が発生した。

水路内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。ケーソン前面位置 $x=34\text{m}$ の通過波側で測定された水位を入射津波とした。ケーソンに 3 分力計および波圧計を設置し、波力と波圧を測定した。3 分力計に基づく滑动合成波力が最大となる時刻における測定値を解析対象とした。測定は 3 回繰り返して行い、結果は平均値で整理した。縮尺は 1/50

図-1 造波水路断面図

図-2 津波伝播状況 ($h=20\text{cm}$)

とした。

表-1 に実験ケース、図-3 に防波堤断面図を示す。各水深に対して、造波板の運動周期を一定とし、運動振幅を数段階に変化させて実験を行った。防波堤の天端高は各水深に対して設定した風波の設計波高 H_D の 0.6 倍および 1.0 倍の値とした。消波ブロックの質量は、設定された設計波高と使用したブロックの設計で通常用いられる K_D 値 8.3 をハドソン式に適用して算定した。

(2) 入射津波高の定義

設計実務において、津波波力を算定するにあたっては、一般に津波シミュレーションから得られる入射津波高を用いるが、シミュレーションされる津波高は分裂波の波峰高さではなく、津波本体の高さである。得られた分裂

表-1 波力実験ケース

Case	設置水深 h (m)	マウンド水深 h' (m)	設計波高 H_D (m)	天端高 h_c (m)	ブロック質量 M (t)	消波工天端幅 B (m)
1-1	8.0	5.6	4.6	2.8	12.3	4.0
1-2				4.6		
2-1	10.0	7.0	5.7	3.5	23.0	5.0
2-2				5.7		
3-1	12.0	8.4	6.9	4.1	36.8	5.9
3-2				6.9		

- ・数値は現地量で記述している。以降、特に断らない限り、数値は現地量で記述する。
- ・ケーソン幅 B_c は全て 12.3m とした。
- ・消波工がない場合とある場合の波力を測定した。

図-3 実験断面図

図-4 ソリトン分裂波形と入射津波高 ($h=24\text{cm}$)

波から津波本体の高さを定義するため、ここでは安田ら⁴⁾に倣い、通過波側水路の防波堤前面位置で計測されたソリトン分裂波形を移動平均し、その最大値を入射津波高 a_1 と定義した。移動平均時間は、本実験ケースにおける分裂第1波目の平均的な周期である1s(模型量)とした。図-4に移動平均処理前後の水位時系列の一例を示す(模型量)。

(3) 直立混成堤の波圧算定式

谷本ら²⁾は、ソリトン分裂が顕著に生じていない前面が切り立った段波状津波の波圧算定式(谷本式)を以下のように提案した。図-5に谷本式による波圧分布を示す。

$$\eta^* = 3.0a_1 \quad (1)$$

$$p_1 = 2.2\rho ga_1 \quad (2)$$

$$p_u = p_1 \quad (3)$$

ここで、 η^* は静水面上の波圧の作用高さ、 a_1 は入射津波高、 p_1 は静水面における波圧強度、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 p_u は直立壁前面下端の揚圧力である。

この谷本式に対して、防波堤の耐津波設計ガイドライン¹⁾はソリトン分裂が発生する場合において、静水面の波圧に関する係数を以下のように2.2から3.0に割り増した修正谷本式により算定することを提案している。

$$p_1 = 3.0\rho ga_1 \quad (4)$$

しかしながら、ソリトン分裂が発生するとされる津波高水深比 a_1/h の値は概ね0.3以上とされており、静水面の波圧に関する係数を2.2から3.0に割り増しする条件となる a_1/h の値は明確ではない。

そこで、本研究ではまず直立混成堤の波圧算定式を次式のように定義し、静水面の波圧に関する係数 α について津波高水深比の値により検討した。

$$p_1 = \alpha\rho ga_1 \quad (5)$$

図-5 谷本式による波圧分布

Case1-1から3-2において消波工がない場合の無次元波圧強度分布と谷本式および修正谷本式との関係を検討した。図-6(a), (b)に $h_c/H_D=0.6$ および1.0の無次元波圧強度分布をそれぞれ示す。縦軸は静水面から上方を正とする鉛直座標 z を a_1 で無次元化した値である。無次元水平波圧は、 $a_1/h < 0.15$ では谷本式近傍に、 $a_1/h \geq 0.25$ では修正谷本式近傍に分布した。 $0.15 \leq a_1/h < 0.25$ ではその中間的な範囲でばらついた。このことから、 $a_1/h=0.15$ でソリトン分裂が発生し始めるものと考えられる。 $a_1/h \geq 0.25$ のデータで谷本式近傍に分布しているものは碎波の影響によって波圧が減少したものである。波圧の作用高 η^* に関しては全ての a_1/h において $3.0a_1$ と考えてよい。

(a) $h_c/H_D=0.6$

(b) $h_c/H_D=1.0$

図-6 無次元 水平波圧強度分布

一方、揚圧力は図-7の無次元波圧強度分布に示すように、 a_1/h の値によらず修正谷本式では過大評価と言える。図-7の横軸はケーソン前面位置から港内側方向を正とする水平座標 x_c をケーソン幅 B_c で無次元化した値である。

揚圧力が作用する基礎マウンド近傍では、基礎マウンドの波力低減効果もあり、衝撃的な波圧成分が発生するとは考えにくい。また、水平波圧の静水面下の分布(図-6(a), (b))も、静水面から下に向かうにしたがって、 $p/\rho g a_1$ は3.0から離れ、2.2付近に向かって分布している。このことから、揚圧力は衝撃波圧成分を考慮しない谷本式による算定が妥当であると考えられる。以上の結果より、静水面の水平波圧に関する係数 α を以下のように提案する。

$$\alpha = \begin{cases} 2.2 & (a_1/h < 0.15) \\ 1.0 + 8.0(a_1/h) & (0.15 \leq a_1/h < 0.25) \\ 3.0 & (a_1/h \geq 0.25) \end{cases} \quad (6)$$

揚圧力に関しては a_1/h によらず、一律 $\alpha=2.2$ とする。

(4) 消波工による津波波力低減率

(3)で述べた津波波力の算定値(消波工なし)および実験値(消波工あり)の比を用いて、ソリトン分裂津波に対する消波工の水平波力低減率 λ_H および揚圧力低減率 λ_U を定義する。図-8(a)は水平波力の低減率 λ_H と津波高水深比 a_1/h の関係を示したものである。津波高が小さい範囲で λ_H は概ね1.0、津波高が大きくなると λ_H は次第に小さくなり、 $a_1/h = 0.40$ で0.5~0.6となった。図中には、設計計算用の算定値として式(7)~(9)より求められる値を直線で示している。津波高が小さい範囲では算定値はプロットされた値とほぼ同等、津波高が大きい範囲ではプロットされた値のほぼ中間的な値となっている。また、 a_1/h が同一の場合、 $h_c/H_D=0.6$ の方が $h_c/H_D=1.0$ よりも λ_H がやや

図-7 無次元波圧強度分布 ($h_c/H_D=0.6, 1.0$, 揚圧力)

小さく、波力低減効果が高い傾向がある。そのため、 $h_c/H_D=1.0$ の算定式は、 $h_c/H_D=0.6$ の算定式の横軸(a_1/h)を0.05だけ右側に平行移動した式形となっている。

図-8(b)は揚圧力の低減率 λ_U と津波高水深比 a_1/h の関係を示したものである。 λ_U も λ_H と同じ傾向を示しており、図中の直線で示した算定式は $h_c/H_D=0.6, 1.0$ ともに λ_H に対する算定式と同じになる。そこで、

$$\lambda = \lambda_H = \lambda_U \quad (7)$$

とにおいて、消波工による波圧低減率 λ は次式で求める。

i) $h_c/H_D=0.6$ の場合

$$\lambda = \begin{cases} 1.0 & (a_1/h < 0.15) \\ 1.27 - 1.8(a_1/h) & (a_1/h \geq 0.15) \end{cases} \quad (8)$$

ii) $h_c/H_D=1.0$ の場合

$$\lambda = \begin{cases} 1.0 & (a_1/h < 0.20) \\ 1.36 - 1.8(a_1/h) & (a_1/h \geq 0.20) \end{cases} \quad (9)$$

(a) 水平波力低減率

(b) 揚圧力低減率

図-8 波力低減率

これにより消波工がある場合の水平津波力 p_{1B} および揚圧力 p_{UB} を次式のように算定することができる。なお、波圧の作用高 η_B^* に関しては消波工の有無による明確な差異が認められなかったことから、 λ による低減は行わないこととした。

$$\eta_B^* = \eta^* = 3.0a_i \quad (10)$$

$$p_{1B} = \alpha \lambda \rho g a_i \quad (11)$$

$$p_{UB} = 2.2 \lambda \rho g a_i \quad (12)$$

図-9(a), (b)は消波工がある場合の水平津波力および揚圧力について、算定値と実験値の相関を示したものである。算定値は実験値によく一致している。すなわち、式(10)~(12)を用いることによって消波ブロック被覆堤に作用するソリトン分裂津波の波力を精度よく算定できることが確認された。

(a) 水平波力

(b) 揚圧力

図-9 波力算定精度

3. 消波ブロックの安定性に関する水理模型実験

消波工が津波によって被災した場合、ソリトン分裂津波に対する消波工の波力低減効果が低下する可能性がある。そこで、ソリトン分裂津波に対する消波ブロックの安定性を検討した。

表-2に実験ケースを示す。防波堤断面は図-3と同じである。水深は $h=12\text{m}$ とし、波力実験と同様に造波板の運動周期を固定し、運動振幅を数段階に変えて造波した。被害が発生した場合はその都度ブロックを積み直して次の実験を行った。したがって被害個数は累積個数ではない。被害の定義は、ブロック1個分以上の移動および、90度以上の回転とした。

Case1は風波の設計波高 H_D に対する所要質量のブロックによる実験である。天端高は $h_c=0.6H_D$ としており、波力実験Case3-1と同じ条件である。

Case2およびCase3は内湾域に設置されるブロックを想定し、風波の設計波高 H_D を小さくしている。天端高は使用したブロックの質量および K_D 値8.3をハドソン式に適用して風波の設計波高を算定し、この値の0.6倍とした。安定実験の津波高は波力実験と同様、沖合で砕波するケースも含まれており、設計上考慮すべき条件をカバーしているものと考えられる。

Case1ではブロックの被害は発生しなかった。図-10に被害の発生したCase2およびCase3の a_i/H_D と被害率 D の関係を示す。被害は押し波時に空中部で発生しており、ケーソン天端に乗り上げるブロックやケーソン背後へ飛散

表-2 安定実験ケース

Case	設置水深 h (m)	マウンド水深 h' (m)	設計波高 H_D (m)	天端高 h_c (m)	ブロック質量 M (t)	消波工天端幅 B (m)
1	12.0	8.4	6.9	4.1 (0.6 H_D)	36.8	5.9
2			4.1	2.5 (0.6 H_D)	7.4	3.4
3			3.2	2.0 (0.6 H_D)	3.7	2.8

図-10 a_i/H_D と被害率 D の関係

するブロックが観察された。通常、不規則波による安定実験では引き波により法先方向へ移動するブロックも見られるが、本実験ではそのような挙動は観察されなかった。設計波高の1.5倍の津波高に対して、被害率は1.0%以下であった。全ケースでの最大被害率も1.5%程度であり、波力低減効果に影響を及ぼすと考えられるほどの被害は発生しないことが確認できた。ここで注意しておかなければならないのは、設計波高 H_D は谷から峰までの全振幅で与えられるが、 a_f は静水面から津波の峰までの高さを表すことである。そのため、 $a_f/H_D=1.0$ の場合、設計波と同じ高さの津波が来襲することを示している。

半沢ら⁵⁾による離岸堤のブロックを対象としたソリトン津波による安定実験では、孤立波の波頂部が離岸堤の天端を通過した後に岸側斜面のブロックが一気に崩れるような形態の被害であった。このとき、港外側のブロックに被害は観察されなかった。今回の実験の対象は防波堤であり、ケーソン壁面が消波工を押さえる効果により大きな被害が発生しなかったものと考えられる。

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) 直立混成堤（消波工なし）に津波が作用した場合の水平波圧算定式として、谷本式および修正谷本式の適用範囲と波圧係数を明確にした。
- (2) 揚圧力については、修正谷本式では過大評価であり、谷本式での算定が妥当であることを確認した。

- (3) 消波工がある場合の水平波力と揚圧力の低減率は同じ値になり、式(8)と(9)で与えられることを示した。
- (4) 安定実験 Case1 の結果、水深から定まる風波の設計波に対する所要質量を有するブロックは、ソリトン分裂津波に対して安定であった。
- (5) 設計波高の 1.5 倍の津波高に対して、消波ブロックの被害率は 1.0%程度であり、波力低減に影響を及ぼすほどの被害は発生しないことを確認した。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf>, 2013.
- 2) 谷本勝利，鶴谷広一，中野晋：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, 1984.
- 3) 丸山草平，高山知司，下迫健一郎，八尋明彦，青田徹，松本朗，半沢稔：ソリトン分裂津波に対する消波工の波力低減効果に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70, No.2, I_781-I_785, 2014.
- 4) 安田誠宏，高山知司，山本博紀：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, 2006.
- 5) 半沢稔，松本朗，田中仁，山本方人：離岸堤消波ブロックの津波に対する安定性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.67, No.2, I_796-I_800, 2011.

(2015.3.18 受付)

ESTIMATION OF TSUNAMI FORCE ACTING ON THE BLOCK ARMORED BREAKWATER IN THE STATE OF SOLITON FISSION

Sohei MARUYAMA, Tomotsuka TAKAYAMA, Kenichiro SHIMOSAKO,
Akihiko YAHIRO, Kojiro SUZUKI, Toru AOTA, Masashi TANAKA,
Akira MATSUMOTO and Minoru HANZAWA

A series of hydraulic model experiments were performed to verify the effect of armoring concrete blocks on the tsunami pressure reduction in the state of soliton fission. Applicable ranges for Tanimoto and modified Tanimoto formulas of wave pressure acting on a caisson have been determined in terms of the ratio of tsunami height for water depth. The estimation formula for the tsunami pressure reduction factor of the armoring blocks was proposed in the result of the comparison of tsunami force between the states without and with the armoring blocks. The calculated tsunami forces acting on the caisson armored with the blocks well agree with the corresponding experimental ones. The sufficient stability of the armoring blocks against the tsunamis has been confirmed by the experiments.